

# 携帯無線機用アンテナに与える人体の影響

佐藤和夫，西川訓利，鈴木徳祥

## Effects of Human Body on Antennas for Portable Radio Equipment

Kazuo Sato, Kunitoshi Nishikawa, Noriyoshi Suzuki

### 要 旨

携帯電話やPHSなどの移動通信システムで用いられる携帯無線機は小形化の傾向にあり，そのため，小形で高性能なアンテナが要求されている。しかし，携帯無線機に取り付けられたアンテナの特性は無線機筐体や人体などに影響されやすく，最適なアンテナ系を実現することは容易ではない。本報告では，人体近傍に置かれた携帯無線機用アンテナの特性をFDTD法を適用して解析し，アンテナが人体から受ける影響を明らかにしている。解析モデルは人体頭部と携帯無線機を握る手からなる人体モデル，および金属筐体に取り付けられたアンテナから構成されている。本解析モデルを用いて計算した結果は実験値とよく一致し，人体モ

デルの影響を含めて携帯無線機用アンテナの特性を精度よく解析できることが示されている。この解析モデルを用いて，600MHzから1900MHzの周波数において，携帯無線機に取り付けられた $\lambda/4$ モノポールアンテナ，および平板逆Fアンテナの特性を計算している。その結果，放射効率は人体モデルの影響を大きく受け，45%以下にまで劣化することが明らかにされている。さらに，人体モデル頭部の形状や携帯無線機を握る手の位置が放射効率に与える影響を明らかにし，アンテナの種類によって人体から受ける影響が大きく異なることが示されている。

### Abstract

Small and high-performance antennas are needed for mobile communication systems, such as a cellular phones and a personal handy phones, because portable radio equipment has become extremely small in recent years. However, it is difficult to design the antennas because of the effects of a human body and the portable equipment. In this study, characteristics of antennas mounted on the portable equipment near a human body are analyzed using the FD-TD method in order to clear effects of a human body on the antennas. An analysis model is composed of a human body model and the antenna mounted on a conducting box. It is confirmed

from a comparison between calculated and measured results that the model is useful to analyze the characteristics of antennas and the effects of human body on the antennas can be well examined with it. Using this model, characteristics of a  $\lambda/4$  monopole antenna and a planar inverted-F antenna in a frequency range of 600-1900MHz are calculated. The calculated results indicate that radiation efficiency becomes lower than 45% owing to the effects of human body model. Moreover, it becomes clear that the effects of the human body model on two types of antennas differs with each other.

キーワード

アンテナ，携帯無線機，FDTD法，放射効率，携帯電話，PHS，移動通信

## 1. はじめに

近年、携帯電話やPHSなどの移動通信システムが急速に普及してきている。これらのシステムで用いられる携帯無線機は小形化の傾向にあり、そのため小形でしかも高性能なアンテナが要求されている。しかし、携帯無線機に取り付けられたアンテナは無線機筐体や人体などの周囲の環境に影響されやすく、最適なアンテナ系を実現することは容易ではない。

無線機筐体とアンテナ素子とを含めたアンテナ系の特性を把握するには、計算機シミュレーションを用いた解析が有用であり、これまでにアンテナ系全体を線状素子でモデル化するワイヤグリッド法を用いてアンテナ特性を解析した例が数多く報告されている<sup>1-4)</sup>。これらの研究成果は携帯無線機用アンテナの特性を考える上では大変役に立つものであるが、人体の影響はほとんど考慮されていない。最適な携帯無線機用アンテナを開発するためには人体を含めたアンテナ系の特性を明らかにすることが不可欠である。しかし、ワイヤグリッド法を用いた解析では複雑な形状を持つ人体の影響を考慮することは容易ではないと考えられる。

FDTD法 (Finite-Difference Time-Domain: 差分時間領域法)<sup>5)</sup>を用いたアンテナ解析手法は、マクスウェル方程式を差分近似し、時間領域において電磁界を直接解くため、人体など任意の電気的特性を持つ物体を含むアンテナ系を特別な近似計算手法を用いずに解析できると考えられる。文献(6)では人体モデルを含めて携帯無線機に取り付けられた $\lambda/4$ モノポールアンテナ ( $\lambda$ : 波長)の特性をFDTD法を用いて計算している。この結果は携帯無線機用のポールアンテナに与える人体の影響を考える上で参考になるものであるが、アンテナに与える影響に大きく寄与すると考えられる人体モデルの形状やその配置の妥当性についてはほとんど検討されておらず、必ずしも実際の人間の影響を適切に表現する人体モデルを用いて計算を行っているわけではない。さらに、このような外付けのアンテナに加えて、最近ではダイバーシチ受信のための平板逆Fアンテナなどの内蔵型アンテナも受信専用のアンテナとして使用されている。内蔵型

アンテナでは人体から受ける影響が外付けのポールアンテナとは大きく異なると予想されるが、その特性は十分に解析されていない。携帯無線機の高性能化のためには、無線機に取り付けられるすべてのアンテナについて適切な評価と設計が行われることが不可欠である。

そこで、本報告では900MHz帯、1400MHz帯の携帯電話、および1900MHz帯のPHSの周波数帯において、人体近傍に置かれた携帯無線機に取り付けられた $\lambda/4$ モノポールアンテナおよび平板逆Fアンテナを対象として、人体モデルの形状や配置に対するアンテナ特性を解析し、実際の人間の影響を適切に表現できる人体モデルを明らかにする。さらに、これら2種類のアンテナに対する人体の影響の違いを示す。アンテナを最適化するための指標としてはアンテナの使用帯域幅や指向性などのいくつかの特性が考えられるが、ここではアンテナの放射効率に着目してその特性を明らかにする。アンテナの放射効率は原理的にはアンテナの3次元指向性を測定すれば求められるが、実際には人体も含めて測定を行うことが必要になり容易なことではない。そのため、計算機シミュレーションによる解析が有用であると考えられる。

以下、2.ではFDTD法に基づくアンテナ特性の計算手法、および人体モデルと携帯無線機に取り付けられたアンテナ素子からなる解析モデルについて述べる。3.では携帯無線機に取り付けられた $\lambda/4$ モノポールアンテナ、および平板逆Fアンテナを対象として、反射損特性と指向性の計算を行い、実験値と比較することで計算手法、解析モデルの妥当性を明らかにする。4.では、これら2種類の携帯無線機用アンテナの放射効率特性を人体の影響を考慮して求め、これらの解析結果に基づき、アンテナに与える人体の影響およびその違いについて考察を行う。

## 2. FDTD法の適用

ここでは、FDTD法におけるアンテナ特性の計算方法、および人体を含めた携帯無線機用アンテナの解析モデルについて述べる。

### 2.1 アンテナ特性の計算方法

FDTD法はマクスウェル方程式を差分近似し、時

間領域において電磁界特性を計算する手法である。解析した時間領域の電磁界特性から，給電点インピーダンス，指向性，利得，および放射効率などの周波数領域のアンテナ特性を計算している。給電点への入力波形としてガウスパルスを用い，給電点の電圧と電流の時間応答をフーリエ変換することにより，給電点インピーダンスの周波数特性を求める。指向性および利得の計算には入力波形として連続正弦波を用いる。そして，文献(7)の手法に基づき各格子上の複素電磁界を計算し，等価定理から指向性，利得を求める。放射効率 $e$ は各格子上の複素電磁界から，給電点に入力する電力 $P_{in}$ ，およびアンテナ系全体で消費される電力 $P_d$ を計算し，以下に示す式により求める。

$$e = \frac{P_{in} - P_d}{P_{in}} \quad (1)$$

$P_d$ としてはアンテナ素子の導体損，および人体で消費される電力などが考えられる。ここで対象としているアンテナ系では放射抵抗が数十 $\Omega$ となるためアンテナ素子の導体損による効率の低下は無視できる程度に小さい。そこで，ここではアンテナ素子を完全導体と仮定し， $P_d$ としては人体で消費される電力のみを考慮する。人体で消費される電力 $P_d$ は人体の導電率 $\sigma$ と人体内部の複素電界 $E$ から次式で与えられる。

$$P_d = \frac{1}{2} \iiint_v \sigma |E|^2 dv \quad (2)$$

ここで， $v$ は人体の体積を表し，積分は体積 $v$ の空間で行う。FDTD法における単位格子上の各電界成分の配置をFig. 1に示す。FDTD法では解析空間は離散化されるため，式(2)は次のように表される。

$$P_d = \frac{1}{2} \sum_{i,j,k} \sigma (|E_x(i,j,k)|^2 + |E_y(i,j,k)|^2 + |E_z(i,j,k)|^2) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3)$$

ここで $E_x(i,j,k)$ ， $E_y(i,j,k)$ ， $E_z(i,j,k)$ は， $i,j,k$ 番目の単位格子上の電界の $x,y,z$ 方向成分， $\Delta x$ ， $\Delta y$ ， $\Delta z$ は単位格子の $x,y,z$ 方向の寸法をそれぞれ表す。式(3)では人体を構成するすべての単位格子上の各電界成分から電力の損失量を計算し，その和をとることにより人体で消費される電力 $P_d$ を求めている。一方，給電点に入力される電力 $P_{in}$ は次式に示すよ

うに給電点における電圧 $V_f$ と電流 $I_f$ から求めることができる。

$$P_{in} = \frac{1}{2} \text{Re}[V_f I_f^*] \quad (4)$$

ここで， $\text{Re}[A]$ は複素数 $A$ の実部， $A^*$ は $A$ の共役複素数をそれぞれ表す。なお，実際にはアンテナ給電点におけるインピーダンス不整合による損失が存在する可能性があるが，本報告ではインピーダンス整合については常に整合がとれている理想的な場合を考え，不整合における損失はないものとする。従って，人体がない場合，アンテナの放射効率は100%になる。

## 2.2 人体の解析モデル

解析を行った2種類の携帯無線機用アンテナの構造をFig. 2(a)，およびFig. 2(b)にそれぞれ示す。Fig. 2(a)は携帯無線機を想定した金属筐体の上面に取り付けられた $\lambda/4$ モノポールアンテナ，Fig. 2(b)は金属筐体の側面に取り付けられた平板逆Fアンテナを示している。金属筐体の寸法は120cc程度の携帯無線機を想定し， $L_x = 40\text{mm}$ ， $L_y = 20\text{mm}$ ， $L_z = 140\text{mm}$ とした。

ここでは，これらの携帯無線機用アンテナを人体頭部側面に保持して通話している状態のアンテナ特性を解析する。そのため解析を行う対象としてはFig. 3(a)に示すようにアンテナ特性に最も影響を与えようと考えられる人体頭部と携帯無線機を握る手首から先の部分をここでは人体モデルとして

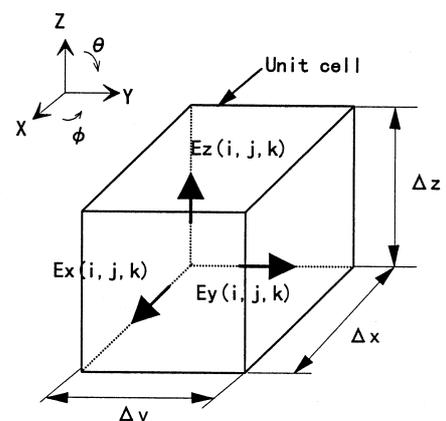


Fig. 1 Arrangement of electric field components on unit cell of FDTD lattice.

考慮することにした。以下，人体頭部と手を人体モデルと呼ぶ。この人体モデルと携帯無線機をFDTD法を適用して解析するため，人体モデルについてはFig. 3(b)に示す2つの解析モデル，すなわち，人体頭部が直方体の場合，および回転楕円体の場合を考え，それぞれ直方体モデル，および回転楕

円体モデルと呼ぶ。文献(8)に示されている人体頭部の形状を参考にして，回転楕円体の寸法は長軸 $H_L = 200\text{mm}$ ，短軸 $H_S = 160\text{mm}$ とした。回転楕円体の形状はFig. 3(b)に示すように立方体の単位格子を使って近似的に構成している。直方体の寸法は回転楕円体がちょうど入る大きさにしている。人体頭部の形状を直方体でモデル化するのは，人体の影響が最も大きくなる状況を想定した計算を行うためである。ここでは，携帯無線機用アンテナが実際に使用される場合の特性はこの2つの人体モデルを用いて計算した結果の間に入ると予想している。携帯無線機を握る手のモデルはコの字形状とし，その体積が約300ccになるようにその高さを100mm，厚みを20mmとした。手のモデルの寸法，体積については平均的な体格を持つ男性5名を対象に実際に測定を行い，その値を決定した。ここでは手のモデルの有無やその位置に対する人体のアンテナに与える影響についても検討する。さらにこの解析モデルでは人体モデルと携帯無線機筐体との間を4mm(1単位格子分)あけている。これは，携帯無線機筐体やアンテナ素子の金属部は人体と直接に接しているわけではなく，金属部と人体の間にはプラスチックケースなどの間隙があることを考慮したためである。ただし，Fig. 3(b)に示す平板逆Fアンテナを取り付ける面については，無線機

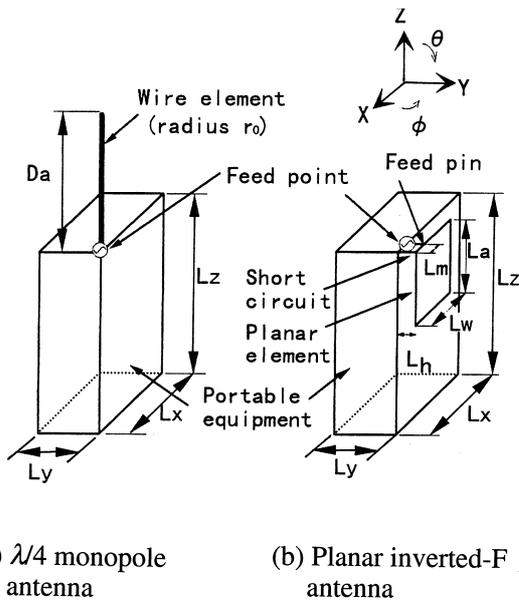
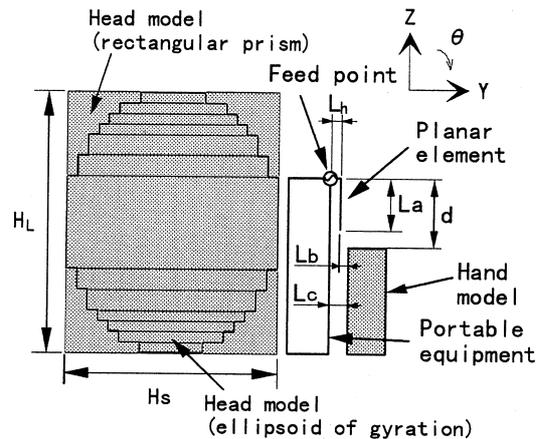
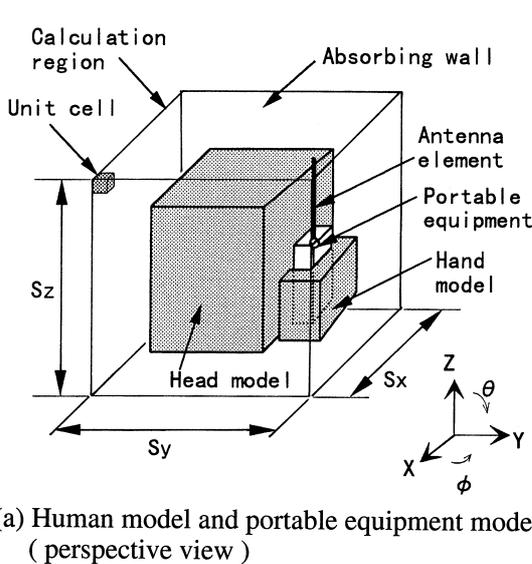


Fig. 2 Configuration of antennas mounted on portable equipment.



(b) Cross sectional view of analytical human models, rectangular prism model and ellipsoid of gyration model, for FDTD analysis ( case of planar inverted-F antenna )

Fig. 3 Analytical model for portable equipment and human body.

筐体と手のモデルの間隔 $L_c$ を8mmとした。これは、平板逆Fアンテナの高さ $L_h$ を4mmに限定しており、平板素子部分と手のモデルとの距離 $L_b$ を4mmあけるようにしたためである。 $\lambda/4$ モノポールアンテナが取り付けられた場合も、平板逆Fアンテナと同じ条件で比較するため、 $L_c$ は8mmとしている。

吸収壁としてはMurの1次の吸収壁<sup>9)</sup>を用い、計算領域の大きさは吸収壁の影響が小さくなるように $S_x = S_y = S_z = 360\text{mm}$ とした。単位格子の大きさは $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 4\text{mm}$ 、時間離散間隔は $\Delta t = 6.66\text{ps}$ とした。計算機容量の限界を考えるとセルの大きさはできる限り大きい方がよいが、計算精度が低下する問題がある。ここで対象としている600MHzから1900MHzの周波数帯においてはこれらのことを考慮し、実用に十分な精度の計算結果が得られるセルの大きさを選んだ。給電方法としては給電部の線状素子上の電界成分の位置にギャップを仮定し、そこに入力波を加えている。

### 3. 解析結果の検証

人体モデル近傍に置かれた携帯無線機用アンテナのFDTD法による解析結果の妥当性を確認するため、直方体の人体頭部とコの字型の手を薄いアクリル板で製作し、中に生理食塩水を満たした実験用の人体モデルを用いて反射損特性、および指向性を測定し、計算値と比較検証した。さらにこの人体モデルを実際の人間の代わりとして用いることができるかを明らかにするため、実際に人体頭部側面に携帯無線機を保持した時の反射損特性、および指向性を測定し、人体モデルを用いた場合の実験値と比較する。

計算では実験と同様に人体モデルとして直方体モデルを用い、その電気定数として、1500MHz帯における筋肉、および皮膚組織の比誘電率49.0、導電率 $1.77^8)$ を採用した。計算、実験を行うそれぞれの周波数で共振するように $\lambda/4$ モノポールアンテナの線状素子の長さ $D_a$ 、および平板逆Fアンテナの平板素子の寸法 $L_a$ 、 $L_w$ 、短絡ピンと給電ピンの間隔 $L_m$ を調整している。線状素子の半径は0.5mmとする。手のモデルの位置はFig. 3(b)に示す間隔 $d$ を40mm一定としている。このとき、給電点と人体頭部の距離は2種類のアンテナとも24mmになる。

900MHz帯における $\lambda/4$ モノポールアンテナ、および平板逆Fアンテナの給電点での反射損特性をFig. 4(a)、およびFig. 4(b)にそれぞれ示す。また、900MHz帯におけるアンテナ素子部分の寸法をFig. 4に合わせて示す。実線は直方体モデルを用いた場合の計算値、点線は人体モデルを用いた場合の実験値、破線は実際に人間(男性)が携帯無線機を保持した場合の実験値をそれぞれ示している。どちらのアンテナも計算値の傾向は点線で示す人体モデルを用いた実験値に3dB程度の誤差でよく一致することがわかる。また実験用の人体モデルは実際に人間が携帯無線機を保持したときの特性をよく表わしていることもわかる。さらに、600MHz帯( $\lambda/4$ モノポールアンテナのみ)、1400MHz帯、1900MHz帯の周波数において、反射損特性について同様に比較検証した結果、900MHz帯とほぼ同程度の誤差で解析できることがわかった。

次に880MHzにおける $\lambda/4$ モノポールアンテナ、および平板逆Fアンテナの $E_\theta$ 成分、 $E_\phi$ 成分の水平面

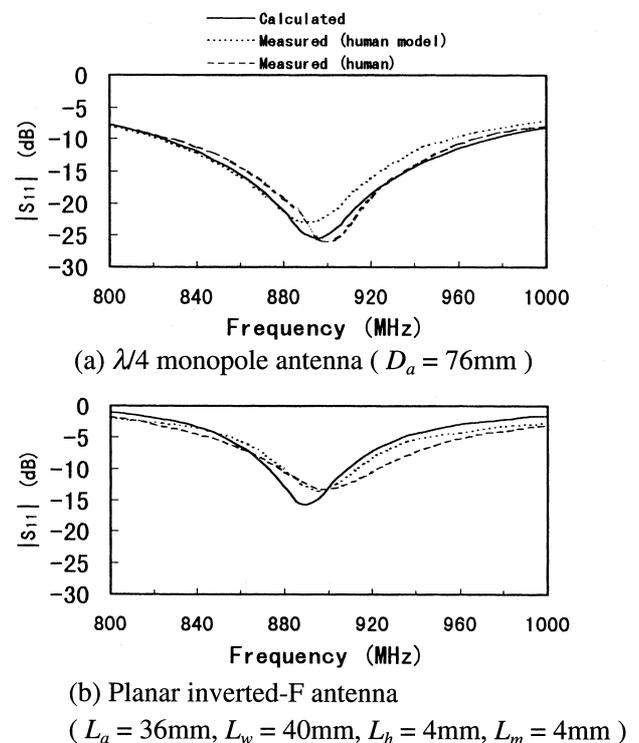


Fig. 4 Verification of results calculated with FDTD method ( reflection coefficient  $|S_{11}|$  in 900 MHz band ).

内指向性をFig. 5(a), およびFig. 5(b)にそれぞれ示す。図は0dBiで規格化して表示している。指向性の全体的な傾向に関しては, 実線で示す計算値と破線で示す人体モデルを用いて測定した実験値とはよく一致している。また, 水平面内の最大方向利得は2dB程度の精度で解析できることがわかる。さらに, 600MHz, ( $\lambda/4$ モノポールアンテナのみ), 1400MHz, 1900MHzの周波数において, 水平面内指向性について同様に比較検証した結果, 水平面内の最大利得は880MHzの場合とほぼ同様に, 2dB以下の誤差で解析できることがわかった。放射効率については, 前述したようにその測定は容易でなく, 測定精度も問題となる。そのため, 放射効率の実験値と計算値を直接比較することはここでは行っていない。しかし, Fig. 4の反射損特性の計算値は実験値によく一致し, また, 水平面内の最大方向利得が2dB程度の差で計算されていることから, 放射効率の計算値の信頼性は高いと推測される。この場合, 絶対的な精度が十分でないとしても, 人体の影響に対する放射効率の相対的な変化を知ることができれば, 携帯無線機用アンテナの設計において大変役に立ち, 以上のような解析モデルによる設計の有用性は高いと思われる。

次に, 人体モデルの妥当性を確認するため,  $\lambda/4$

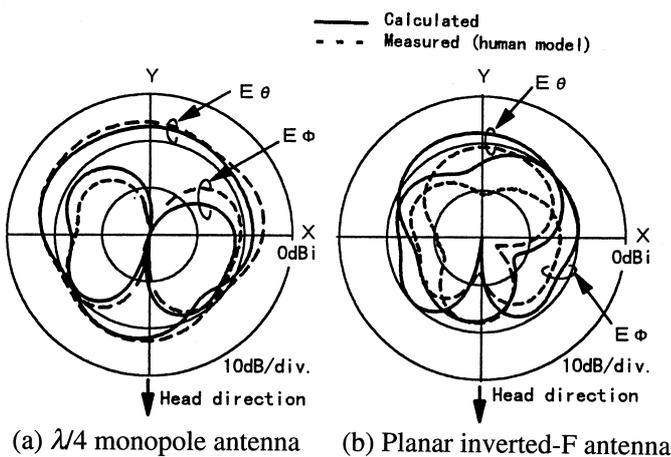


Fig. 5 Verification of results calculated with FDTD method ( horizontal radiation patterns at 880MHz ).

モノポールアンテナが取り付けられている場合について実験用の人体モデルと実際の人間に対して測定した $E_\theta$ 成分, および $E_\phi$ 成分の水平面内指向性をFig. 6(a)に示す。同図は880MHzにて測定したものである。実線は実際の人間の場合, 破線は実験用の人体モデルを用いた場合を示す。指向性の傾向は一致するが, 実際の人間を用いて測定した結果は, 人体モデルの結果に比べて利得が数dB程度高くなることがわかった。これは, 実際の人間の頭部の形状が実験で用いている直方体モデルに比べてアンテナに与える影響が小さいためであると考えられる。

さらに手のモデルの妥当性について, 手から受ける影響が大きいと予想される平板逆Fアンテナについて, 手の有り無しに対する水平面内指向性の变化を測定した結果をFig. 6(b)に示す。実線は実際の人間の場合, 破線は直方体モデルを用いた場合の実験値を示している。この図から手の影響により利得が低下する傾向がよく一致していることがわかる。

以上の検証結果から, Fig. 3に示す人体頭部と手で表した人体モデルを用いれば, 人体の影響を実用上満足できる精度で解析できることが明らかになった。

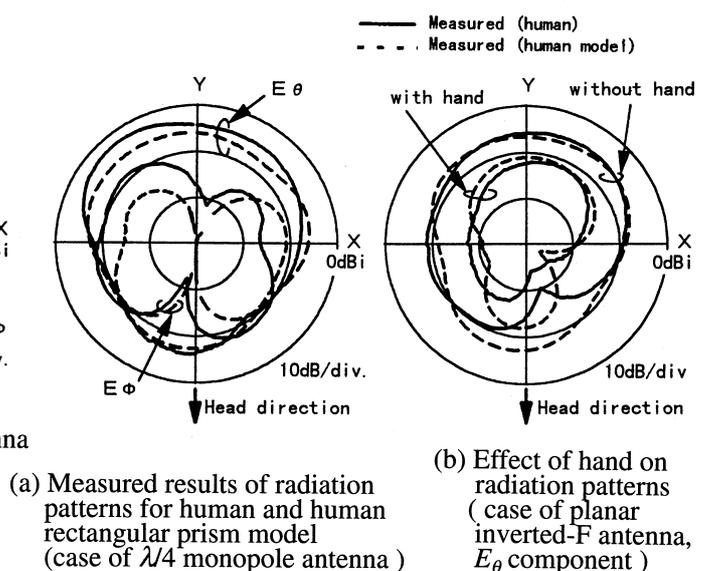


Fig. 6 Verification of human model ( horizontal radiation patterns at 880MHz ).

#### 4. 人体モデル近傍に置かれた携帯無線機用アンテナの特性

##### 4.1 $\lambda/4$ モノポールアンテナ

人体モデル近傍に置かれた携帯無線機に取り付けられた $\lambda/4$ モノポールアンテナの600MHzから1900MHzの周波数における放射効率を計算した結果をFig. 7に示す。ここでは人体モデルとして直方体モデルを用いた場合と直方体モデルから手のモデルを省き、人体頭部のみを考慮した場合について計算を行った。実線は直方体の人体頭部と携帯無線機を握る手を考慮した場合、破線は人体頭部のみを考慮した場合の計算結果である。点線で示される計算結果については後述する。

ここでは金属は完全導体とし、給電点において不整合による損失がないように整合をとっているため人体が存在しない場合の効率は100%である。すなわち、インピーダンス整合については理想的な場合を仮定し、不整合による損失はないものとする。人体頭部、および携帯無線機を握る手を考慮した場合、Fig. 7から、放射効率は600MHzでは21%、900MHzでは21%、1900MHzでは30%まで低下することがわかる。小さい変動はあるものの周波数が高くなる程、放射効率が高くなる傾向が見られる。これはアンテナ素子と人体モデル頭部との間隔が一定であるため、周波数が高くなるにつ

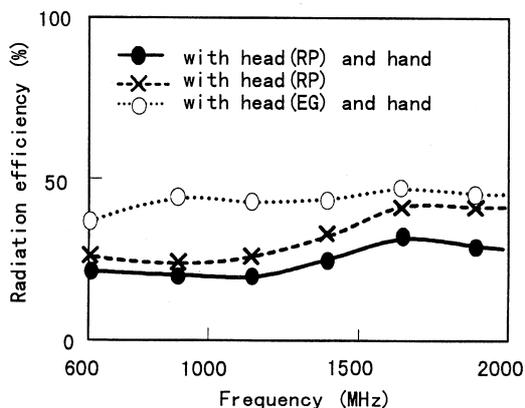


Fig. 7 Calculation radiation efficiency of  $\lambda/4$  monopole antenna mounted on portable equipment ( shape of head model : rectangular prism ( RP ), ellipsoid of gyration ( EG ) ).

れて波長比換算の間隔が広くなることから人体モデルの影響が小さくなり、放射効率が高くなると考えられる。携帯無線機を握る手の影響を考慮する場合と考慮しない場合の放射効率の差は900MHzにおいて3%、1900MHzにおいて12%である。この結果から、手の影響による放射効率の低下は比較的小さいことがわかる。これは人体モデル頭部で損失する電力の割合が、900MHzでは89%、1900MHzでは79%と高いためである。

人体モデル頭部をFig. 3(b)に示すように回転楕円体で置き換えたときの放射効率を計算した結果をFig. 7に点線で示す。Fig. 7からわかるように頭部形状を回転楕円体とすると放射効率は900MHz以上で約45%と高くなり、しかも周波数による変化が小さいことがわかる。これは人体頭部を回転楕円体でモデル化するほうが直方体でモデル化する場合に比べて、アンテナ素子と人体モデルの距離が離れることにより人体モデル頭部の影響が小さくなるためと考えられる。これらの計算結果は文献(6)で示される放射効率約55%より低い値となった。これは、文献(6)では半径90mmの球体で人体頭部をモデル化しており、頭部とアンテナ素子との間隔がここで考えているモデルの場合よりさらに離れるためと考えられる。このように $\lambda/4$ モノポール

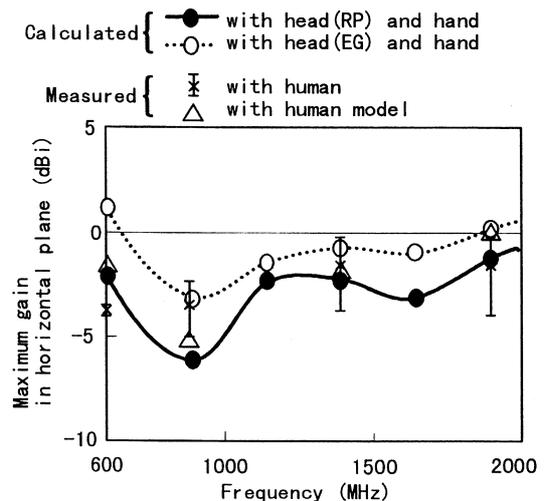


Fig. 8 Maximum gain in horizontal plane of  $\lambda/4$  monopole antenna mounted on portable equipment ( shape of head model : rectangular prism ( RP ), ellipsoid of gyration ( EG ) ).

アンテナでは人体モデル頭部の形状の違いによってアンテナ特性の劣化の度合いが異なるため、実際の人体の影響をより正確に表すことができる頭部形状の人体モデルを採用することが重要である。

次に600MHzから1900MHzの周波数における $E_\theta$ 成分の水平面内指向性の最大方向の利得を計算した結果をFig. 8に示す。実線は直方体モデルの場合、点線は回転楕円体モデルの場合をそれぞれ示す。直方体モデルの場合、900MHzにおいて利得は-6.1dBiと最も低い値をとり、600MHzでは-2.0dBi、1900MHzでは-1.4dBiの利得となる。回転楕円体モデルの場合は、水平面内利得は直方体モデルの場合に比べて1dBから3dB高くなっているが、周波数に対する傾向はほぼ同様である。これは放射効率の場合と同様に人体モデル頭部の影響が小さくなるためと考えられる。

さらに、Fig. 8には人体頭部の形状が直方体の人体モデルを用いた場合の実験値を印で、実際に人間が保持した場合の実験値を×印で合わせて示す。実際に人間が保持したときの実験値としては、男性5名分の測定結果の平均であり、測定結果の範囲も合わせて示す。実線で示す直方体モデルの計算値と人体モデルを用いた実験値は1.5dB程度の精度でよく一致している。実際に人間が保持したときの特性は、回転楕円体モデルと直方体モデルを用いて計算した結果の間におおよそ入っていることがわかる。ただし、600MHzでは、実際の人間が保持したときの特性は約-3.5dBiと低下しており、周波数が低くなると人体全体の影響を考慮する必要があることが推測される。以上の結果から、

900MHzから1900MHzでは、実際に使用される場合の特性はおおよそ回転楕円体と直方体の2つの解析モデルを用いて計算した結果の間の値になることが確かめられた。このことから、文献(6)の人体モデル頭部を用いた場合の計算結果は実際よりも影響が小さくなると考えられる。

直方体モデルの場合について、周波数600MHz、900MHz、および1900MHzの $E_\theta$ 成分の垂直面内指向性を計算した結果をFig. 9に示す。それぞれの指向性は1900MHzの垂直面の最大方向の利得で規格化して表示している。600MHzでは指向性の最大方向がほぼ水平方向を向くため、放射効率が低いにもかかわらず水平面内の利得がFig. 9(a)に示すように高くなる。また、600MHzでは人体頭部方向の利得の低下はほとんど見られず、人体モデル頭部による遮へい効果が小さい。900MHzでは指向性の最大方向が下方を向くため、水平方向の利得が低下することがわかる。一方、1900MHzでは人体モデル頭部側の利得が大きく低下するものの、その反面、頭部と反対側の利得が高くなっており、人体頭部による反射の効果が大きくなっていることが推定される。

#### 4.2 平板逆Fアンテナ

人体モデル近傍に置かれた携帯無線機に取り付けられた平板逆Fアンテナの放射効率を解析する。平板逆Fアンテナの構造、および取り付け位置はFig. 2(b)に示されており、アンテナ素子は頭部と反対側に置かれている。

ここでは人体モデルとして直方体モデルを用いた場合と直方体モデルから手のモデルを省き、人

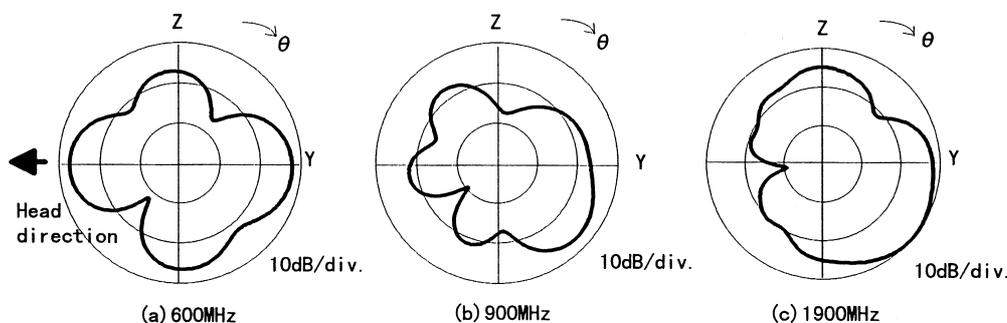


Fig. 9 Calculated vertical radiation patterns of  $\lambda/4$  monopole antenna mounted on portable equipment ( case of rectangular prism model ).

体頭部のみを考慮した場合について、携帯無線機に取り付けられた平板逆Fアンテナの900MHzから1900MHzの放射効率を計算した結果をFig. 10に示す。実線は直方体形状の人体頭部および携帯無線機を握る手を考慮した場合、破線は人体頭部のみを考慮した場合の計算結果である。携帯無線機を握る手を考慮した場合、放射効率は900MHzで14%、1900MHzで36%になる。この結果から、平板逆Fアンテナは $\lambda/4$ モノポールアンテナと比べて900MHzでは放射効率が7%低く、1900MHzでは逆に6%高くなる結果になった。携帯無線機を握る手が存在しない場合は、放射効率は900MHzで50%、1900MHzで62%と放射効率の劣化量は比較的小さい。人体モデル頭部で損失する電力の割合を計算した結果、900MHzで32%、1900MHzで52%になることがわかった。以上のことから、平板逆Fアンテナでは $\lambda/4$ モノポールアンテナとは異なり、放射効率特性に携帯無線機を握る手が大きく影響し、周波数が低くなるほど手の影響が大きくなり、放射効率が低下することがわかった。

このように平板逆Fアンテナでは人体頭部の放射効率に与える影響が比較的小さいため、人体モデル頭部の形状による放射効率の変化は少ないと考えられる。そこで、回転楕円体モデルの場合について計算した結果を点線でFig. 10に合わせて示す。回転楕円体モデルの場合は直方体モデルの場合に

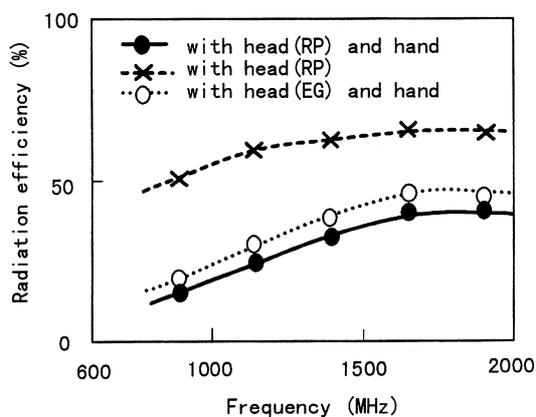


Fig. 10 Calculated radiation efficiency of planar inverted-F antenna mounted on portable equipment ( shape of head model : rectangular prism ( RP ), ellipsoid of gyration ( EG )).

比べて放射効率は約5%高くなるだけである。この結果から、平板逆Fアンテナでは $\lambda/4$ モノポールアンテナとは異なり、人体モデル頭部の形状によって放射効率特性はあまり変化しないことが確認できた。

Fig. 10において周波数が低くなるほど手の影響が大きくなる傾向が見られるのは、周波数が低いほどアンテナ素子の平板素子部の寸法が大きくなり、携帯無線機を握る手の影響をより大きく受けるためと考えられる。そこで、計算を行った周波数で最も手の影響が大きいと考えられる900MHzにおいて携帯無線機を握る手の位置を変化させたときの放射効率を直方体モデルについて調べた。Fig. 3(b)における間隔 $d$ に対する放射効率の変化を計算した結果をFig. 11に示す。 $d$ が大きくなるにつれて、つまり手がアンテナ素子から離れるにつれて放射効率は大きくなる傾向が見られる。 $d = 36\text{mm}$ 以下、すなわち手がアンテナ素子を覆うようになると放射効率は13%以下となり、著しく低下することがわかる。 $d = 64\text{mm}$ 程度までは $d$ にほぼ比例して効率は上がり、 $d = 64\text{mm}$ 以上では $d$ に対する変化は小さくなる。 $d = 76\text{mm}$ において効率が40%以上となり、1900MHzにおける平板逆Fアンテナの特性とほぼ同じ効率が得られる。この時、人体モデルとして頭部のみを考慮した場合の効率50%に比較して約10%低い値となる。この結果から、平板逆Fアンテナでは人体モデルの手と平板素子部の下端エッジの間隔ができる限り離れるようにアンテナ素子を設置すべきであり、約0.1波長以上離せば40%程

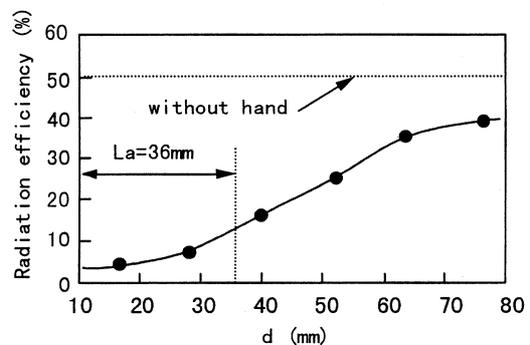


Fig. 11 Calculated radiation efficiency versus position of hand ( case of rectangular prism, frequency 900MHz ).

度の放射効率が得られることがわかった。

## 5. むすび

本報告では、人体近傍に置かれた携帯無線機に取り付けられた $\lambda/4$ モノポールアンテナおよび平板逆Fアンテナの特性を明らかにすることを目的とし、FDTD法を適用して放射効率などの特性を解析した。さらにこれらの結果に基づいてそれぞれのアンテナに与える人体の影響について考察を行った。

まず、人体頭部を直方体形状で、携帯無線機を握る手をコの字形状でそれぞれモデル化し、その近傍に置かれた携帯無線機に取り付けられた $\lambda/4$ モノポールアンテナと平板逆Fアンテナの反射損、および指向性を計算し、さらに、この解析モデルの妥当性を確認するため実験値と比較した。その結果、計算値は実験値とよく一致し、FDTD法を用いることで人体モデルを含めて携帯無線機用アンテナの特性を実用上十分な精度で計算できることが確認できた。

次に、人体モデルを含めて携帯無線機に取り付けられた $\lambda/4$ モノポールアンテナ、および平板逆Fアンテナの放射効率を計算した。その結果、 $\lambda/4$ モノポールアンテナでは、直方体モデルの場合、放射効率は900MHzで21%、1900MHzで30%まで低下することがわかった。また、人体モデル頭部が放射効率に与える影響が大きく、人体モデル頭部における電力損失が全体の約80%になることが明らかになった。この場合、人体モデル頭部の形状によりアンテナ特性が大きく変化し、回転楕円体モデルの場合は、放射効率は900MHz、1900MHzの周波数で約45%になった。このように $\lambda/4$ モノポールアンテナの場合には、人体頭部の形状をできる限り正確にモデル化することが必要であることもわかった。

一方、平板逆Fアンテナでは、直方体モデルの場合、放射効率は900MHzで14%、1900MHzで36%まで低下することがわかった。人体モデル頭部における電力損失は全体の約50%以下であり、 $\lambda/4$ モノポールアンテナの場合と比べて携帯無線機を握る手の放射効率に与える影響が大きくなることが明らかになった。そのため、人体モデル頭部の形状がアンテナ特性に与える影響は比較的小さく、回

転楕円体モデルの場合の放射効率は直方体モデルの場合に比べて約5%高くなるだけであった。さらに900MHzにおいて携帯無線機を握る手の位置を変化させた時の放射効率を調べた結果、手と平板素子部の下端エッジとの間隔を0.1波長以上離せば約40%の放射効率が得られることがわかった。

以上で述べたように携帯無線機に取り付けられたアンテナの特性は人体によって大きく影響され特性が劣化する。この傾向はアンテナの種類によっても大きく異なる。このため、携帯無線機用アンテナの設計には人体の影響を考慮することが不可欠であり、ここで示した計算手法、解析モデル、および解析結果は大いに役立つと考えられる。今後は、本手法を用いて最適な携帯無線機用アンテナを設計していく予定である。

## 参考文献

- 1) 平沢一紘, 藤本京平: "直方導体に取付けられた線状アンテナの特性", 電子情報通信学会論文誌, J65-B-9(1982), 1133
- 2) Taga T. and Tsunekawa K.: "Performance Analysis of a Built-in Planar Inverted F Antenna for 800 MHz Band Portable Radio Units", IEEE J. Sel. Areas Commun., SAC-5-5(1987), 921
- 3) 佐藤和夫, ほか3名: "直方導体に取付けられた平板逆Fアンテナの特性", 電子情報通信学会論文誌, J71-B-11(1988), 1237
- 4) 公文保則, 築地武彦: "携帯電話用変形伝送線路型アンテナの解析", 電子情報通信学会論文誌, J77-B-II-9(1994), 479
- 5) Yee, K. S.: "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media", IEEE Trans. Antennas & Propag., AP-14-3(1966), 302
- 6) Toftgard, J., Hornsleth, S. N. and Andersen, J. B., "Effects on Portable Antennas of the Presence of a Person", IEEE Trans. Antennas & Propag., AP-41-6(1993), 739
- 7) 柏達也, ほか3名: "Bergeron法によるパッチアンテナの3次元解析" 電子情報通信学会論文誌, J71-B-4(1988), 576
- 8) 加藤晃, 藤原修: "頭部の3次元リアルモデルにおけるマイクロ波の比吸収率分布", 電子情報通信学会技術報告, EMCJ92-48(1992), 45
- 9) Mur, G.: "Absorbing Boundary Conditions for the Finite-Difference Approximation of the Time-domain Electromagnetic-field Equations", IEEE Trans. Electromagn. Compat., EMC-23-4(1981), 377

## 著者紹介



佐藤和夫 Kazuo Sato  
生年：1962年。  
所属：情報通信研究室。  
分野：移動体通信用アンテナおよび電磁  
界解析分野の研究・開発。  
学会等：電子情報通信学会会員。  
工学博士。



西川訓利 Kunitoshi Nishikawa  
生年：1953年。  
所属：情報通信研究室。  
分野：移動体通信および電磁界解析分野  
の研究・開発。  
学会等：電子情報通信学会会員。  
1984年IEEE-VTS論文賞受賞。  
工学博士。



鈴木徳祥 Noriyoshi Suzuki  
生年：1966年。  
所属：情報通信研究室。  
分野：電磁界解析分野の研究。  
学会等：電子情報通信学会会員。