

人体に装着された小形無線端末用アンテナの放射特性

齋藤 裕^{†a)} 長野 勇[†] 八木谷 聡[†] 春木 宏志^{††}

Radiation Characteristics of an Antenna for a Small Radio Terminal in vicinity of a Human Body

Yutaka SAITO^{†a)}, Isamu NAGANO[†], Satoshi YAGITANI[†], and Hiroshi HARUKI^{††}

あらまし 本論文では、人体の様々な位置に装着される小形無線端末用アンテナの重要な設計指針を示している。初めに、代表的な装着状態として胸装着状態及び操作状態の二つに着目し、これらの状態で人体に装着されたカード型端末用 $\lambda/4$ モノポールアンテナの垂直面指向性を 2 GHz において測定した。その結果、胸装着状態において、効率はアンテナと胸との間隔 10 ~ 35 mm に対して 18 ~ 80% と変化が大きく、人体正面の垂直面指向性は自由空間と同様に水平方向がヌル点となるため、パターン平均化利得 (PAG) が -8 dBd 以下と低い。一方、操作状態において、効率は約 60% で一定であり、垂直面指向性は自由空間とは異なり水平方向の放射が高いため PAG が約 -4 dBd と高いことを示した。次に、FDTD 法を用いて個々の人体部位が放射特性に及ぼす影響を解析した。その結果、胸装着状態では電力吸収及び指向性ともに胴体の影響が支配的であり、解析や測定においては胴体のみを考慮すればよい。また、操作状態では手及び腕による電力吸収と頭及び胴体による反射の影響が大きいため、解析や測定においては上半身すべてを考慮する必要があることを示した。

キーワード カード型、腕時計型、小形無線端末、効率、垂直面指向性、モノポール

1. ま え が き

移動通信システムのサービスは、従来の携帯電話中心から今後はデータ通信や情報配信サービスなどへと多様化していく。このような非音声サービスに対応した携帯無線端末の形状も、カード型や腕時計型などのように多様化し、かつ小型化が進むことが予想される。このような新しい形態の無線端末（以下、小形無線端末と呼ぶ）では、使用者がそれを携帯して使用する状態が多様化する。例えば、カード型非音声情報端末の場合は口や耳の近傍で通話を行うことはなく、胸ポケット内に入れて使用する状態（以下、胸装着状態と呼ぶ）や手で持って表示を見ながら操作する状態（以下、操作状態と呼ぶ）が主な使用状態として想定される。

従来の携帯電話では通話状態において高い通信性能

が求められるが、小形無線端末では上記のような胸装着状態や操作状態の通信性能を確保することが要求される。したがって、小形無線端末用アンテナにはこれらの状態において高い実効利得が求められる。

端末用アンテナの実効利得を評価する指標としてパターン平均化利得（以下、PAG: Pattern Averaging Gain）[1] が利用されている。この PAG は到来波が低仰角に集中することを前提として水平面指向性のみから求められ、最終的な評価指標として十分実用的である。一般的な携帯電話用ホイップアンテナを頭部近傍で使用した通話状態の PAG は約 -6 dBd であり、これが小形無線端末用アンテナの目標値となる [2]。これを目標値として、胸装着状態や操作状態において端末用アンテナの PAG を評価し改善を行ううえで、次に示す 2 点の課題が考えられる。

1 点目の課題は、人体に装着された端末用アンテナの垂直面指向性と効率の問題である。人体に近接したアンテナの PAG を決定する水平面放射強度は、人体への電力吸収に依存する効率と垂直面指向性パターンの両方に依存する。したがって PAG の改善を検討する際は、効率と垂直面指向性の両方に着目する必要がある。

[†] 金沢大学工学部, 金沢市
Faculty of Engineering, Kanazawa University, Kanazawa-shi,
920-8667 Japan

^{††} 松下通信工業株式会社, 横浜市
Matsushita Communication Industrial Co.,Ltd., Yokohama-shi,
223-8639 Japan

a) E-mail: y-saito@krd.mci.mei.co.jp

ある．効率を測定によって求めるためには，垂直面電力指向性を測定して放射電力の全立体角積分を求める必要がある [3]．また，効率が一定であると仮定して，垂直面指向性のパターンが変化すると水平面放射強度も変化する．このように，小形無線端末用アンテナの実効利得向上を目指すうえで，各装着状態における垂直面指向性と効率の特徴を把握することが大変重要である．しかし，胸装着状態や操作状態において垂直面指向性と効率の特徴を示した報告は従来なかった．

2点目の課題は，各装着状態のアンテナ特性評価における人体の取扱い方の問題である．従来の携帯電話用アンテナの研究開発において重視されている通話状態では，アンテナに近接する頭部，手または肩の影響が考慮されていた [4], [5]．一方，胸装着状態や操作状態のアンテナ特性は，人体の様々な部位からの影響を受ける可能性がある．これに関連する報告は，腹部近傍 [6] や手で保持したダイポール [7] などいくつかあるが，問題が十分に整理されているとはいえない．

様々な装着状態を同一条件で評価する最も基本的な方法は，人体全身の影響を考慮することである．この場合，測定においては人体モデルの選択と測定方法が問題となる．また，FDTD 法などの数値解析においては全身モデルを含むことによるグリッド数増大が問題となる．したがって，人体の各部位がアンテナ特性に及ぼす影響を明らかにして，各装着状態個々において考慮すべき人体モデルを特定することが必要である．

本論文の目的は，これらの課題を解決して $\lambda/4$ モノポールアンテナを取り付けたカード型無線端末の実効利得改善のための有効な指針を示すことである．本論文の 3. では，胸装着状態及び操作状態に置かれたアンテナの垂直面指向性を実際の人体をモデルとして用いて測定する．その結果から，各状態の垂直面指向性，効率及び PAG の特徴を明らかにする．更に 4. では，測定結果と FDTD 法電磁界シミュレータ FIDELITY [8] を用いた計算結果の一致を確認したうえで，このシミュレータを用いて個々の人体部位が放射特性に及ぼす影響を解析する．その結果から，各装着状態の解析時に考慮すべき人体部位を明らかにする．なお，アンテナの動作周波数は，今後様々な移动通信システムで利用される 2 GHz に設定した．

2. アンテナ構成と自由空間特性

本論文では，小形無線端末としてカード型情報端末を想定した．この理由は，通話機能をもたないカード

型情報端末の普及が今後予想されることと，この形状が最も多様な使用状態が考えられるためである．また，この端末に取り付けるアンテナとして $\lambda/4$ モノポールアンテナを選択した．この理由は，様々なタイプのアンテナを代表するものとして最も基本的な構成であるからである．また，モノポール長として $\lambda/2$ ではなく $\lambda/4$ を選択した理由は，^{きょう} 筐体上に分布する電流の影響 [9] により，人体近接時の特性変化が顕著であり，この特性変化に特に着目するためである．

図 1 に端末及びアンテナの構成を示す．端末の筐体は名刺サイズのカード型端末を想定して $55 \times 90 \times 10$ mm の銅板により構成した．モノポールは長さ 37.5 mm ($\lambda/4$)，直径 1 mm の銅線で構成した．小形発振器を筐体内部に組み込み，その出力を 50Ω の小径同軸ケーブルと小形コネクタを介してアンテナに給電した．自由空間における VSWR は 2 GHz において 1.4 であった．自由空間の E_θ 成分指向性の測定結果を図 2 に示す．

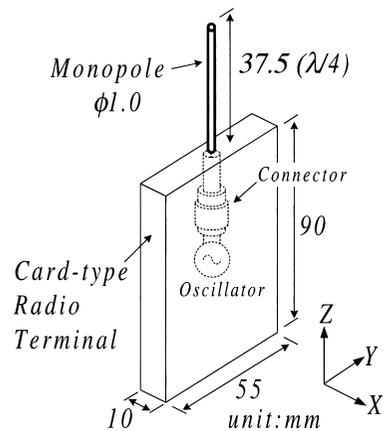


図 1 カード型端末と $\lambda/4$ モノポールアンテナ
Fig. 1 Card terminal and $\lambda/4$ monopole antenna.

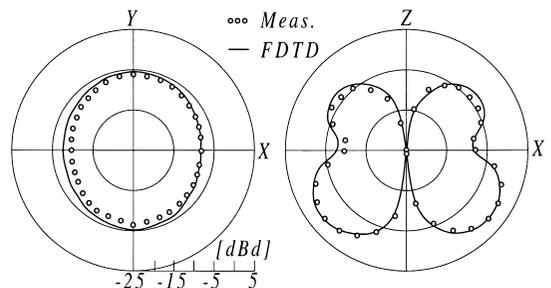


図 2 指向性 (自由空間)
Fig. 2 Radiation patterns (free space).

水平 (XY) 面はほぼ無指向性である．垂直 (XZ) 面は，X 及び -X 方向にもヌル点が存在する四つ葉形パターンとなっている．この指向性は，筐体上の電流分布に起因する $\lambda/4$ モノポールアンテナの典型的な形である [9]．また，図 2 において，FIDELITY を用いた FDTD 法計算結果も併記している．計算では，図 1 の構成を約 40,000 個の不等間隔グリッドでモデル化した．グリッドサイズは 1~5 mm である．

3. 人体装着時の放射特性

人体に近接したアンテナの特性劣化要因は，人体への吸収電力に加えて入力インピーダンスの変化による不整合損失が考えられる．本論文で示す測定により得られた指向性には，吸収電力と不整合損失の両方が含まれており，これらを含むアンテナ特性を議論することが実用上重要である．アンテナの動作利得や効率についての定義 [10] において，アンテナ効率 η_a には吸収電力と不整合損失が含まれていない．そこで本論文では，文献 [10] の定義を拡張して，吸収電力と不整合損失を含む効率 η_{ac} を図 3 を用いて定義する．図 3 において，

P_T : 給電系から入力される電力

P_o : アンテナ入力電力

P_r : アンテナ系の放射電力

P_a : 人体への吸収電力

η_m : インピーダンス不整合損失による給電効率

η_r : 放射効率

η_{ac} : 効率

である．それぞれの関係から，効率 η_{ac} は次式で示される．

$$\eta_{ac} = \eta_m \cdot \eta_r = \frac{P_o}{P_T} \cdot \frac{P_r}{P_o} = \frac{P_r}{P_T} \quad (1)$$

ここで，人体に吸収される電力 P_a は $P_o(1 - \eta_r)$ となり，不整合損失電力は $P_T(1 - \eta_m)$ となる．本章以降で示す人体装着時の放射特性は，これらの吸収損失と不整合損失の両方を含むものとして議論する．

3.1 胸装着状態

胸装着状態の人体とアンテナの様子を図 4(b) に示す．この状態は，使用者が端末を左胸ポケットに垂直に挿入している状態を想定している．この状態では，人体とアンテナが $1/4$ 波長以下の間隔で近接することになり， η_{ac} が間隔に依存して大きく変動することが予想される [6]．そこで，胸と端末の中心との間隔 d_c を 10~35 mm の範囲で変化させた．

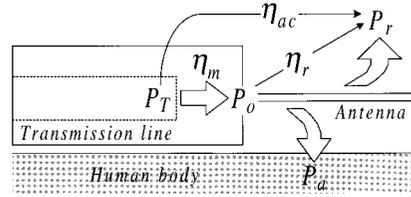


図 3 効率 η_{ac} と不整合損失
Fig. 3 Efficiency and mismatch factor.

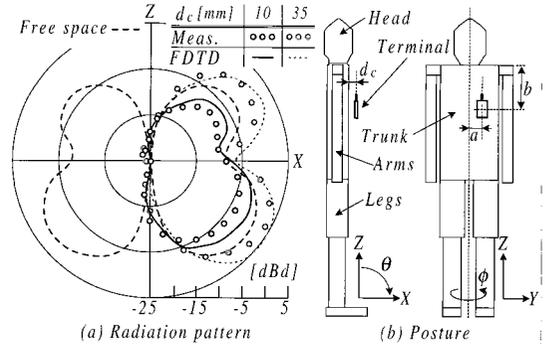


図 4 胸装着状態 ($a = 70$ mm, $b = 200$ mm)
Fig. 4 Wearing on the chest ($a = 70$ mm, $b = 200$ mm).

本論文では，人体全身の影響を含む放射特性を実際の人体を用いて電波暗室において測定した．実際の人体を用いているため，アンテナと人体の間隔や装着位置のわずかな差による測定偏差が予想される．そこで，人体の服装を厚み 1 mm 以下のシャツ 1 枚として，そのシャツと端末との間げきに樹脂製のスペーサを挟むことで間隔 d_c を固定した．また，そのスペーサを樹脂製のベルトを用いて人体に装着することで装着位置が一定となるように注意した．また，身長や体重などの体格とアンテナの放射特性との相関は小さい [11] と予想されるが，測定精度を高める目的で人体として身長 160~180 cm の 5 人を用い，この 5 人すべてに対して指向性の測定を行った．

図 4(a) に胸装着状態の E_θ 成分 XZ 面指向性を示す．5 人の人体による指向性の偏差は，XZ 面内の平均レベルで 1 dB 以下であった．図 4(a) において丸点で示す測定結果は 5 人の平均値を示している．また，自由空間の指向性を破線で併記している．自由空間と胸装着状態を比較すると，人体正面側の指向性はほぼ相似な形であることがわかる． $d_c = 10$ mm の場合は人体正面側のヌル点が約 10 度 Z 方向へ変化している

が、 $d_c = 35\text{ mm}$ では X 方向にヌル点が存在し自由空間の場合と同一である。したがって、胸装着状態では水平面放射レベルが低くなり、この現象は 3.4 で述べる PAG 低下の原因となる。

また、人体正面側 (X 側) の平均放射レベルは、 $d_c = 10\text{ mm}$ では自由空間に比べて約 3 dB 低い。逆に $d_c = 35\text{ mm}$ では自由空間に比べ約 3 dB 高い。これらの現象は 3.3 で述べる効率の議論に対応しており、 $d_c = 10\text{ mm}$ では人体による電力吸収の影響が大きく、 $d_c = 35\text{ mm}$ において人体は反射体に近いと考えられる。

図 4(a) において、FDTD 法計算結果を実線で併記している。人体全身を含む FDTD 法計算においては、(b) の状態の人体及びアンテナを約 3,000,000 個の不等間隔グリッドでモデル化した。グリッドサイズは 1~8 mm とした。特に、3.3 で述べる効率の計算結果と測定結果を一致させるために、アンテナと人体の間けき及びアンテナに近接する人体胸部のグリッドを他の部位より小さい 1 mm 角に設定した。人体の身長は、測定を行った人体の平均である 170 cm とした。そのほかの体格も測定した 5 人の人体の平均的な寸法とした。人体の媒質定数は $\epsilon_r = 49$ 、 $\sigma = 1.6\text{ S/m}$ で均一とした。測定結果と計算結果は指向性の傾向が一致している。

3.2 操作状態

操作状態の人体とアンテナの様子を図 5 (b) に示す。これは、使用者が端末を左手で持ち、顔の前で表示を見ながら操作している状態を想定している。この状態は、腕時計型無線端末を腕に装着して顔の前にかまえた通話状態 [2] と共通点があると考えられる。ここでは、顔 (顎) と端末の中心との間隔 d_h を 100~300 mm の範囲で変化した。測定において、左手の位置と胴体との間隔を樹脂製の支持材を用いて固定することで測定中一定の間隔 d_h を確保した。また、端末の筐体と手の間に厚み 5 mm の樹脂製スペーサを挿入した。これは端末の外装樹脂ケースを想定したものである。これに対応して FDTD 法計算では、図 6 に示すように、手と端末との間に 5 mm の空間を確保した。手のモデルは、親指 (Thumb)、他の 4 本の指を一体化した部分 (Fingers) 及び手の甲 (Hand) によって構成した。また、3.3 で述べる効率の計算結果と測定結果を一致させるために、手のモデルのグリッドを他の部位より小さい 1 mm 角に設定した。更に、端末と手が重なる Z 方向の高さ (60 mm) を測定と計算

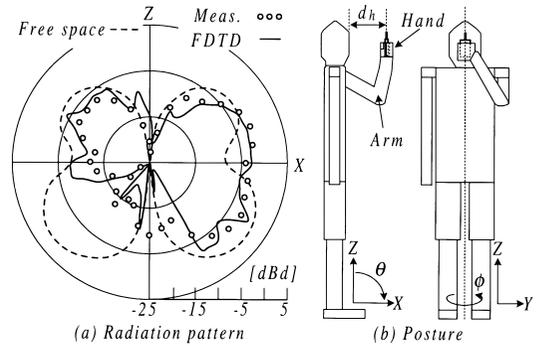


図 5 操作状態 ($d_h = 200\text{ mm}$)
Fig. 5 Holding in the hand ($d_h = 200\text{ mm}$).

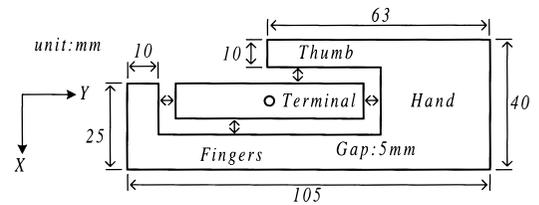


図 6 手の解析モデル (水平断面)
Fig. 6 Hand model.

で一致させた。

操作状態の E_θ 成分 XZ 面指向性を自由空間の指向性と比較して図 5 (a) に示す。 d_h が 100~300 mm の範囲で指向性の変化はわずかであったため、ここでは $d_h = 200\text{ mm}$ の結果のみを示した。胸装着状態と同様に 5 人の測定平均値を丸点で示し、破線が自由空間の結果である。

この結果から、人体正面側の垂直面指向性は操作状態と自由空間とで異なる形であることがわかる。特に、自由空間においてヌル点である X 方向が、操作状態では最大放射レベルに近づいていることが注目される。この現象により水平面放射レベルが増大するため、3.4 で述べるように高い PAG が得られる。また、人体後方 ($-X$) 側上方 (Z 側) の放射レベルは胸装着状態に比べると高いが、人体後方 ($-X$) 側下方 ($-Z$ 側) の放射レベルは低くなっている。これはアンテナから見た反射体として、頭の断面積は比較的小さいが胴体の断面積が大きいことによると考えられる。このような垂直面指向性と人体の各部位との関連については、4. で詳細に考察する。

ここまで、各装着状態の放射特性の特徴を E_θ 成分 XZ 面指向性のみを用いて示した。これは E_θ 成

分 XZ 面が最も特徴を明確に表しているためである。ただし、 E_ϕ 成分や他のカット面の指向性についても測定を行い、その結果が計算結果とほぼ一致することを確認している。これらの結果は、次節以降の効率や PAG の算出に用いられる。

3.3 効率 η_{ac}

効率 η_{ac} を求めるために、本論文では主平面指向性による推定方法 [12] を用いた。離散的なアジマス角度 ϕ_i で分割された垂直面の電力指向性の θ 及び ϕ 成分をそれぞれ $G_\theta(\theta, \phi_i)$ 及び $G_\phi(\theta, \phi_i)$ として、これらが吸収電力と不整合損失を含むものとする、効率 η_{ac} は次式で近似できる。

$$\eta_{ac} \simeq \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \int_0^\pi [G_\theta(\theta, \phi_i) + G_\phi(\theta, \phi_i)] \sin \theta d\theta \quad (2)$$

ここで、 n は 2 以上の整数であり、 $n/2$ は垂直面数である。 n を十分大きくすると式 (2) は真値に収束するが、 n が小さいと推定誤差が大きくなる。各装着状態における推定精度を確認するために、FDTD 法計算により求めたアジマス角度 10 度ステップの垂直面指向性を用いて、 n を変化した場合の効率の収束状況を計算した。その結果を図 7 に示す。ここでは、 $n = 36$ の場合を真値と仮定している。上段 (a) が胸装着状態であり、下段 (b) が操作状態の結果を示す。この結果から、 n が 8 以上であれば、すべての条件において効

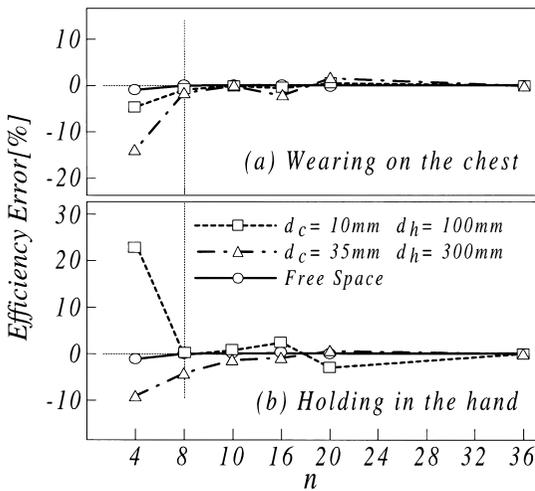


図 7 η_{ac} の推定誤差
Fig. 7 The estimated error of the η_{ac} .

率の推定誤差が 5% 以内となり、実用上十分な精度が得られることがわかる。しかし、 $n = 4$ における推定誤差は最悪で 20% 以上であり、これは実用上許容できない誤差といえる。

上記の確認から、測定では垂直面数を 4 ($n = 8$) として η_{ac} を求めた。したがって、指向性を測定する垂直面は、 XZ 及び YZ 面にアジマス角 ± 45 度方向を加えた計 4 面に設定した。このようなアジマス角度 45 度ステップの垂直面指向性は、端末を装着した人体を回転台の上に置いて、4 種類の角度で寝かせることで測定した。指向性測定において、装着状態や人体の身長にかかわらず、常に回転中心がアンテナの位置となるようにした。

図 8 に間隔の変化に対する η_{ac} と η_m の変化を示す。 η_m は入力インピーダンスから不整合損失分を算出して求めた。入力インピーダンスは、図 1 に示す小形発振器を取り外して小形コネクタを介して測定した。上段 (a) に胸装着状態、下段 (b) に操作状態の結果を示し、 P_a の範囲が人体への吸収分、 P_r の範囲が放射分を示している。また、 η_m と 100% との間が不整合損失分 ($1 - \eta_m$) となる。5 人の人体から得られた測

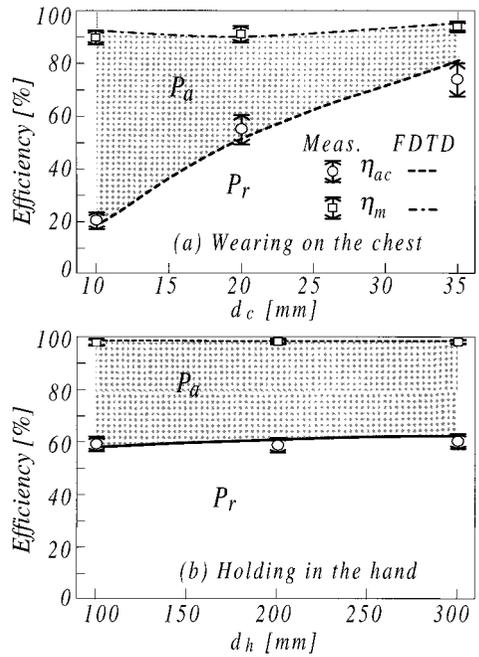


図 8 効率 η_{ac}
Fig. 8 Efficiency η_{ac} .

定結果を矢印の範囲で示し、丸点及び四角点がその平均値を示している。

η_{ac} の偏差及びその平均値と計算結果の差が最も大きいのは図 8(a) に示す胸装着状態の $d_c = 35$ mm の場合であり、計算結果が 80.8% であるの対して、測定値は 68~80.5% で平均値は 74.3% であった。このように胸装着状態の η_{ac} は $d_c = 35$ mm では高いが、 $d_c = 10$ mm では約 18% まで劣化する。一方、 η_m は 90~95% で変化が小さい。 $d_c = 10$ mm では、電力の約 73% が人体に吸収されており、それに対して不整合損失分はわずかである。この結果は文献 [6] の「腹部近接状態」に近い結果である。

操作状態では図 8(b) からわかるように、 η_{ac} は間隔 d_h によりほとんど変化せず 58~62% であり、 η_m は 98% で一定である。これから、操作状態の η_{ac} は近接する手及び腕への電力吸収に依存しており、頭及び胴体の影響は小さいと考えられる。

3.4 パターン平均化利得 (PAG)

本節では、ここまで述べた各装着状態の放射特性を PAG を用いて評価する。PAG (G_a) は、水平面の電力指向性から次式で求められる [1]。

$$G_a = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[G_\theta \left(\frac{\pi}{2}, \phi \right) + \frac{1}{C_{VH}} G_\phi \left(\frac{\pi}{2}, \phi \right) \right] d\phi \quad (3)$$

ここで、 C_{VH} はアンテナへ入射する到来波の交差偏波電力比 (P_θ/P_ϕ) であり、 P_θ 及び P_ϕ はそれぞれ θ 及び ϕ 偏波の等方性アンテナで受信された移動通信環境における平均電力である。ここでは、 C_{VH} とし市街地の一般的な値である 6 dB を用いた。

5 人の人体の指向性測定結果から算出した PAG の平均値を表 1 に示す。この結果から、胸装着状態の PAG は -8 dBd 以下と低く、 d_c により約 2.5 dB の変化が見られる。この変化は η_{ac} の変化にほぼ依存している。一方、操作状態の PAG は約 -4 dBd で一定であり、胸装着状態に比較して 4~7 dB 高い。この差

表 1 PAG
Table 1 PAG.

胸装着状態			
d_c [mm]	10	20	35
PAG [dBd]	-11.1	-8.6	-8.6
操作状態			
d_h [mm]	100	200	300
PAG [dBd]	-3.7	-3.8	-4.2

は、3.1 及び 3.2 で述べた垂直面指向性における水平 (X) 方向の放射レベルの差に起因している。

操作状態の PAG (-4 dBd) は、一般的な携帯電話用ホイップアンテナの通話状態の値 (約 -6 dBd) より 2 dB 高く実用上十分な性能である。この値は腕時計型無線端末用アンテナの通話状態の値 [2] にほぼ近い。これらの結果は、操作状態では近接する手及び腕の影響をある程度おさえれば、比較的容易に高い実効利得が得られることを示している。

一方、胸装着状態の PAG を向上するためには、アンテナと人体との間隔に依存する電力吸収の低減に加えて、垂直面指向性を変化させて水平方向の放射レベルを向上することが必要となる。この際、垂直面指向性が自由空間のそれと相似形であるので、カード型端末用 $\lambda/4$ モノポールでは装着状態の評価を行うことなく、アンテナ単体の垂直面指向性に着目して指向性の改善研究を行うことができる。

4. 人体の各部位による影響

前章までの垂直面指向性の測定はすべて実際の人体を用いているため、大型の電波暗室と耐加重性能が高い回転台が必要であった。仮に人体の特定部分をモデル化したファントムを使用できれば、測定系に求められるこれらの条件が緩和される。

また数値解析において人体全身を考慮すると、グリッド数の増大による計算時間の増大とメモリ消費が問題となる。実際に、前章で示した人体全身を含む FDTD 法計算では、Pentium III 600 MHz の CPU と 512 MB のメモリを用いて 6~9 時間の計算時間を要した。解析においてモデル化する人体の部位を限定できれば計算時間を節約することができる。

各装着状態の放射特性の評価において必ずしも全身を含める必要がなく、影響が極めて小さい部位は測定または計算の対象から除くことが可能であると考えられる。そこで本章では、人体の各部位が放射特性に与える影響を FDTD 法を用いて解析し、各装着状態において考慮すべき人体部位を特定する。

まず初めに、人体の各部位が指向性に及ぼす影響を調べるために、各部位を個別に削除した場合の指向性の変化を計算した。その結果を図 9 に示す。左側 (a) は胸装着状態 ($d_c = 10$ mm) の結果を示している。ここでは、人体全身が存在する状態、全身から両足を削除した状態及び胴体を残してそれ以外すべての部位を削除した状態を実線、点線及び破線でそれぞれ示す。

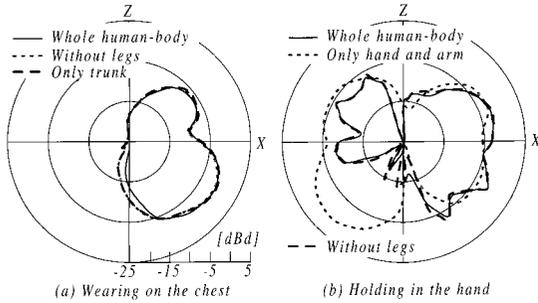


図9 指向性の変化

Fig.9 The variation of the radiation patterns.

この結果から、全身と胴体だけの結果は一部を除いてほぼ一致している。人体後方(-X)側の下方(-Z)において差異が見られるが、絶対レベルが低いことと、到来波仰角が水平方向付近に集中することを考慮すると、実効利得の評価においてこの差異は無視してよいと考えられる。したがって、胸装着状態の指向性の解析や測定では、胴体のみを考慮すればほぼ実用的な結果が得られるといえる。

次に、図9の右側(b)に操作状態($d_h = 100\text{ mm}$)の結果を示す。ここでは、実線が人体全身を、点線が手及び腕のみが存在する場合を、破線が全身から両足のみを削除した状態(以下、上半身)をそれぞれ示す。この結果から、全身と上半身の結果は下方(-Z側)の一部を除いてほぼ一致することがわかる。これから足の影響は無視できると考えられる。

一方、上半身の結果と手及び腕のみの結果には、人体後方(-X)において大きな差が見られる。これは頭及び胴体の有無による差であることから、頭及び胴体の反射の影響は無視できないと考えられる。また、手及び腕のみの指向性には自由空間の四つ葉形パターンに対する差異が見られる。これは、端末に近接する手の影響により筐体上の電流分布が変化することに起因すると考えられる。このように手、腕、頭及び胴体による影響は実効利得の評価に際して無視できない。

次に、各部位に吸収される電力の比率に着目した。人体全身が存在する状態における各部位の吸収比率を表2に示す。この結果は電磁界シミュレータ FIDELITY の機能(SAR Display)を用いて算出した。この機能は損失媒質の特定部分における吸収電力の総和を算出するものである。なおこの結果は、 P_T を基準とした P_a の比率として示している。

表2 各部位の電力吸収 P_a
Table 2 The P_a of each body parts.

部位	胸装着状態		操作状態		
	胴体	その他	手	腕	その他
P_a (%)	72.1	0.4	26.1	6.6	6.2

この結果から、胸装着状態の電力吸収は胴体に集中していることがわかる。この結果と上記の指向性の結果は対応しており、胸装着状態のアンテナ特性の解析や測定に際しては胴体のみを考慮すればよい。

次に、操作状態の電力吸収はアンテナに近接している手と腕に集中していることがわかる。この結果と図8(b)に示す η_{ac} の変化が小さいことは対応している。このように、 η_{ac} は特に手への電力吸収に依存することになる。 η_{ac} の測定値は $d_h = 200\text{ mm}$ において 55.6~61.6%であり、5人の人体の偏差は6%と比較的小さい。これは、端末と手の間隔を 5mm、端末と手のZ方向の重なりを 60mm に固定することで、手の形や大きさなどの個人差の影響をおさえたことによる。手のモデルを同一条件に設定した計算結果の η_{ac} は 60.8%と測定値にほぼ一致した。この結果から、上記の条件において図6に示すモデルはほぼ妥当であると考えられる。

このように頭及び胴体による吸収は少ないが、上記の指向性の議論において頭及び胴体による反射の影響が無視できない。したがって、操作状態のアンテナ特性の解析や測定においては上半身すべてを考慮する必要がある。

5. む す び

本論文では、代表的な装着状態として胸装着状態及び操作状態の二つに着目し、これらの状態で人体に装着されたカード型端末用 $\lambda/4$ モノポールアンテナの垂直面指向性を 2GHz において測定した。また、FDTD法を用いて個々の人体部位が放射特性に及ぼす影響を解析した。結果から得られる結論を以下にまとめる。

(1) 胸装着状態

効率はアンテナと胸との間隔(10~35mm)に依存し18~80%の範囲で変化する。間隔10mmでは電力の約73%が人体に吸収されるが、間隔35mmでは人体は反射体に近い。人体正面の垂直面指向性は自由空間のそれと相似形であり、水平方向がヌル点となるためパターン平均化利得(PAG)が-8dBd以下と低い。実効利得改善に際しての重要なポイントは、効率

の改善に加えて、アンテナ単体（自由空間）の垂直面指向性において水平方向の放射レベルを向上することである。電力吸収及び指向性ともに胴体の影響が支配的であり、アンテナ特性の解析や測定において考慮すべき部位は胴体のみである。

(2) 操作状態

効率は約 60% で一定であり、電力吸収は手及び腕に集中する。垂直面指向性は自由空間とは異なり、水平方向の放射が高く PAG が約 -4 dBd と高い。これは端末の筐体上電流分布の変化と頭及び胴体の反射の影響である。実効利得改善のポイントは、手への電力吸収の低減に加えて、手の影響による垂直面指向性の変化を含めて水平方向の放射レベルを向上することである。アンテナ特性の解析や測定に際しては上半身すべてを考慮する必要がある。

(3) 本指針の一般性に関する考察

上記の結果から得られる指針は、カード型端末用 $\lambda/4$ モノポールアンテナに限定されるものである。特に効率と PAG の絶対値や操作状態における手の影響は、ほかの種類のアンテナでは異なる結果となると考えられる。ただし、垂直面指向性が本論文のモデルに比較的近い小形端末アンテナ全般において、特に胸装着状態の垂直面指向性や考慮すべき人体部位に関して同様な指針が適用可能であると予想される。ほかの種類のアンテナに関する研究が今後の課題である。

謝辞 本研究にあたり、有益な御助言を頂きました松下電器産業小川晃一氏に感謝します。電波暗室における測定に御協力頂きました石川県工業試験場吉村慶之氏、金沢大学山下貴寛氏、杉浦宏和氏に感謝します。また、本研究の機会を与您頂きました松下通信金沢研究所専務林敏彦氏に感謝致します。本研究は、科学技術庁の平成 11 年度科学技術振興調整費による地域先導研究「地域産業の発展に寄与する電磁波技術に関する研究（超小型携帯無線機用アンテナの放射特性）」の一環として行われた。

文 献

- [1] T. Taga and K. Tsunekawa, "Performance Analysis of a Built-in Planar Inverted F Antenna for 800 MHz Band Portable Radio Units," IEEE J. Select. Areas Commun., vol.SAC-5, no.5, pp.921-929, June 1987.
- [2] 斎藤 裕, 西木戸友昭, 春木宏志, "2 GHz 帯腕時計型携帯無線端末用アンテナの放射特性," 信学論(B), vol.J82-B, no.10, pp.1937-1941, Oct. 1999.
- [3] 陳 強, 吉岡弘貴, 猪狩和久, 澤谷邦男, "人体の吸収を考慮したアンテナ放射効率の測定法についての検討," 信学技報, EMCJ98-43, pp.23-26, Sept. 1998.

- [4] J. Toftgard, S. Hornsleth, and J.B. Andersen, "Effects on portable antennas by the presence of a person," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.41, no.6, pp.739-746, June 1993.
- [5] 小川晃一, 松吉俊満, 門間健志, "人体頭部に近接したダイポールアンテナの多重波中実効利得特性に与える肩の影響に関する基礎的検討," 信学論(B), vol.J82-B, no.10, pp.1847-1856, Oct. 1999.
- [6] H.-R. Chuang, "Human operator coupling effects on radiation characteristics of a portable communication dipole antenna," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.20, pp.556-560, April 1994.
- [7] 武藤 輝, 新井宏之, "セラミックファントムを用いた携帯端末の特性測定," 信学技報, A-P99-147, pp.17-22, Nov. 1999.
- [8] FIDELITY, User's Manual for FIDELITY, version 2.0, Zeland Inc., 1999.
- [9] R. Yamaguchi, K. Sawaya, and Y. Fujino, "Effect of dimension of conducting box on radiation pattern of a monopole antenna for portable telephone," IEICE Trans. Commun., vol.E76-B, no.12, pp.1526-1531, Dec. 1993.
- [10] 片木孝至, 山田吉英, 安藤 真, "「アンテナ・電波伝搬関連新語解説集」編纂," 信学技報, A-P94-94, p.55, Dec. 1994.
- [11] H. Arai, N. Igi, and H. Hanaoka, "Antenna-Gain Measurement of Handheld Terminals at 900 MHz," IEEE Trans. Vehicular Tech., vol.VT-46, no.3, pp.537-543, Aug. 1997.
- [12] 斎藤 裕, 松吉俊満, 小川晃一, "主平面指向性による携帯機アンテナの実効利得の推定方法," 1999 信学総大, SB-1-8, March 1999.
- [13] 羽石 操, 平沢一紘, 鈴木康夫, 小型・平面アンテナ, 第 2 章, 電子情報通信学会, 1996.

付 録

式(2)の導出に関する補足説明を行う。両偏波成分の指向性 $|E_\theta(\theta, \phi)|$ 及び $|E_\phi(\theta, \phi)|$ が吸収損失及び不整合損失の両方を含むものとするれば、放射パターン積分法により効率 η_{ac} は次式で求められる [13]。

$$\eta_{ac} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi [|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2] d\Omega}{Z_0 P_T} \quad (A.1)$$

ここで、 $d\Omega = r^2 \sin\theta d\theta d\phi$ であり、 r は観測点までの距離であり、 Z_0 は自由空間インピーダンスである。両偏波成分の指向性 $|E_\theta(\theta, \phi)|$ 及び $|E_\phi(\theta, \phi)|$ から電力指向性 $G(\theta, \phi)$ は次式で示される [13]。

$$G(\theta, \phi) = \frac{P_r}{P_T} D(\theta, \phi)$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{4\pi r^2}{P_T} S_r(\theta, \phi) \\
 &= \frac{4\pi r^2}{P_T} \frac{|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2}{Z_o}
 \end{aligned}
 \tag{A.2}$$

ここで、 $D(\theta, \phi)$ は指向性利得であり、 $S_r(\theta, \phi)$ はインテグレーションベクトルの r 方向成分である。式 (A.2) を各偏波成分の電力指向性の和 $G_\theta(\theta, \phi) + G_\phi(\theta, \phi)$ とおくと、式 (A.1) より η_{ac} は次式で与えられる。

$$\eta_{ac} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi [G_\theta(\theta, \phi) + G_\phi(\theta, \phi)] \sin \theta d\theta d\phi}{4\pi}
 \tag{A.3}$$

式 (A.3) の $G_\theta(\theta, \phi)$ 及び $G_\phi(\theta, \phi)$ を、離散的なアジマス角度 ϕ_i で分割された垂直面の電力指向性 $G_\theta(\theta, \phi_i)$ 及び $G_\phi(\theta, \phi_i)$ で表すと、式 (A.3) は式 (2) で近似できる。

(平成 12 年 3 月 21 日受付, 5 月 11 日再受付)



齋藤 裕 (正員)

昭 59 石川高専卒。民間企業を経て、平 3 (株) 松下通信金沢研究所入社。以来、主として移動体通信機器及び移動体通信用アンテナの研究開発に従事。現在、同社開発部主任技師。金沢大学院博士後期課程在学中。IEEE 会員。



長野 勇 (正員)

昭 43 金沢大・工・電気卒。昭 45 同大学院修士課程了。同年同大電気助手、昭 62 同電気・情報工教授。昭 58~59 米国ジェット推進研究所 NRC 研究員。異方性不均質媒質中の電磁界計算法、VLF 波による D 層電子密度計測法の開発、衛星搭載用プラズマ波計測装置の開発に従事。工博。昭 62 地球電磁気・地球惑星圏学会田中賞受賞。電気学会、テレビジョン学会、地球電磁気・地球惑星圏学会、アメリカ地球物理学会各会員。



八木谷 聡 (正員)

昭 63 金沢大・工・電気情報卒。平 2 同大学院修士課程了。平 5 同博士課程了。同年同大電気・情報助手、現在、同助教授。平 9~10 米国ミネソタ大客員研究員(文部省在外研究員)。科学衛星及びコンピュータシミュレーションによる磁気圏プラズマ波動解析の研究、火星探査衛星(のぞみ)搭載用低周波波動観測装置の開発に従事。工博。地球電磁気・地球惑星圏学会、米地球物理連合(AGU)各会員。



春木 宏志 (正員)

昭 41 東北大・工・電気卒。同年同大・工・電気通信研究所助手。昭 44 同大学院修士課程了。同年松下通信工業(株)入社。以来、主として移動体通信機器及び移動体通信用アンテナの研究開発に従事。現在、同社マルチメディアソリューション研究所 主席技師。