

透明導電膜アンテナ

千葉大学 伊藤 公一¹
光電子技術研究所 古屋 洋高²・官 寧³・松尾 昌一郎⁴・姫野 邦治⁵
材料技術研究所 大森 喜和子⁶
電子電装開発センター 後藤 謙次⁷

Antenna Made of Transparent Conductive Film

K. Ito, H. Furuya, N. Guan, S. Matsuo, K. Himeno, K. Ohmori & K. Goto

近年、無線通信が非常に発達してきており、無線通信用携帯機器の多くは小さくなりつつある。それとともに、携帯機器に搭載するアンテナにも小型化が求められている。携帯機器に搭載するアンテナは、搭載スペースが限られている点およびほかの搭載部品の影響を受けやすい点から、設計がますます難しくなっている。本稿では、ガラス基板のうえに透明導電膜を形成した放射素子と、30 cm 四方のグラウンド板からなるモノポールアンテナを作製し、透明導電膜アンテナの基礎評価を行った。透明導電膜のシート抵抗を $19.8 \text{ } \Omega/\text{sq}$ から $1.3 \text{ } \Omega/\text{sq}$ まで変化させると、2.4 GHz において導電膜の抵抗による最大利得の低下が 4.4 dB から 0.2 dB に減少し、放射効率が 46 % から 93 % に上昇した。また、モーメント法を用いた理論解析により、2.8 GHz における導電膜の抵抗による利得の低下率が $0.20 \text{ dB}/\text{ } \Omega/\text{sq}$ 、放射効率の低下率が $2.7 \text{ } \%/ \text{ } \Omega/\text{sq}$ となる評価が得られ、透明アンテナの設計に定量的な指針が得られた。

As mobile wireless communications have progressed dramatically in recent years, many mobile devices are becoming smaller, and smaller and miniaturization of the antennas installed in mobile devices is required accordingly. The design of antennas for small mobile devices is becoming much more difficult not only because the space is getting limited but also because other electrical parts influence the performance of the antennas. In this paper, we describe the fabrication of a monopole antenna, which consists of a radiation element made of a transparent conductive film and is mounted on a glass substrate and a $30 \times 30 \text{ mm}^2$ ground plane, and evaluate the characteristics of the antenna. It is revealed that the gain lowering of the antenna due to the ohmic losses decreases from 4.4 dB to 0.2 dB at 2.4 GHz and the efficiency of the antenna increases from 46 % to 93 % at the same frequency, as the sheet resistivity decreases from $19.8 \text{ } \Omega/\text{sq}$ to $1.3 \text{ } \Omega/\text{sq}$. A numerical analysis based on the moment method was applied to the antenna and yielded an estimation that the rate of the decrease in gain was $0.20 \text{ dB}/\text{ } \Omega/\text{sq}$ and the rate of decrease in efficiency was $2.7 \text{ } \%/ \text{ } \Omega/\text{sq}$ at 2.8 GHz. This provided the quantitative data for the design of transparent antennas.

1. ま え が き

近年、携帯電話や無線 LAN、Bluetooth などの無線通信が急速に普及している。無線通信用機器は持ち運びの可能性が大幅に増え、携帯端末の小型化が進んでおり、使用アンテナも小型化への要求が強い。無線用携帯機器で

は、アンテナは機器内に内蔵されることが多く、機器の小型化はアンテナの設計に大きな制約をもたらす。まず、携帯機器の小型化とともに、内蔵アンテナの搭載スペースが確保しにくくなっている。そのうえ、ほかの搭載電気部品との距離が近くなり、アンテナ特性に影響を与える問題が発生し、内蔵アンテナの設計はますます困難になっている。アンテナを端末内でなく端末筐体の外面に搭載できると、搭載スペースが確保できるだけでなく、他の部品からの影響が抑えられ、アンテナ設計上で自由度が向上する。しかしながら、通常の銅製アンテナは意匠の観点から筐体外面に設置できないことが多い。携帯端末の外観を損なうことなくアンテナを外面に備え付けるためには、透明導電材料の使用は有力な手段の一つで

1 大学院工学研究科人工システム科学専攻教授（工学博士）
2 光技術研究部
3 光技術研究部主席研究員（工学博士）
4 光技術研究部グループ長
5 光技術研究部長
6 化学機能材料開発部
7 電子材料開発部グループ長

ある．現在，光学的に透明で電気を流すことが可能な材料としては，インジウム酸化スズ (Indium Tin Oxide: ITO) やフッ素酸化スズ (Fluoride Tin Oxide: FTO) 等があげられる¹⁾．しかし，これらの透明導電材料は銅に比べると導電率が低く，高い電気抵抗を有することが知られているため，アンテナ設計上の障害になることが想定される．これまでも透明導電膜を用いたアンテナの研究が報告されているが²⁾⁷⁾，透明導電材料の抵抗がアンテナの特性にどのような影響をおよぼすかといった基本的な研究は行われていない．

そこで，われわれはガラス基板上に様々な抵抗を有する透明導電膜で放射素子を形成したモノポールアンテナを試作し，アンテナ特性について調べた．実際に測定したところ，透明導電膜のシート抵抗を $19.8 \text{ } \Omega/\text{sq}$ から $1.3 \text{ } \Omega/\text{sq}$ まで変化させると，2.4 GHz における導電膜の抵抗による最大利得の低下が 4.4 dB から 0.2 dB に減少し，放射効率が 46 % から 93 % に上昇した．また，モーメント法に基づき，アンテナについて理論解析を行い測定結果と比較した．計算結果は測定結果とよく一致しており，解析方法の有効性が確かめられた．この理論解析により，2.8 GHz におけるシート抵抗によるアンテナ利得の低下率は $0.20 \text{ dB}/\text{ } \Omega/\text{sq}$ で，アンテナ放射効率の低下率は $2.7 \text{ } \%/ \text{ } \Omega/\text{sq}$ であることがわかり，透明アンテナ設計における定量的指針が得られた．

2. 実験概要および結果

図1に実験に用いたアンテナを示す．透明導電膜アンテナは yz 面に平行なガラス基板上に形成されており，ガラス基板は厚さが 1.1 mm で比誘電率が 4.8 である． xy 平面上に設けたグラウンド板は銅板を用いており，その寸法は $300 \times 300 \text{ mm}^2$ とした．アンテナは無線 LAN や Bluetooth で使用されている 2.4 GHz で整合が取れるように設計を行っ

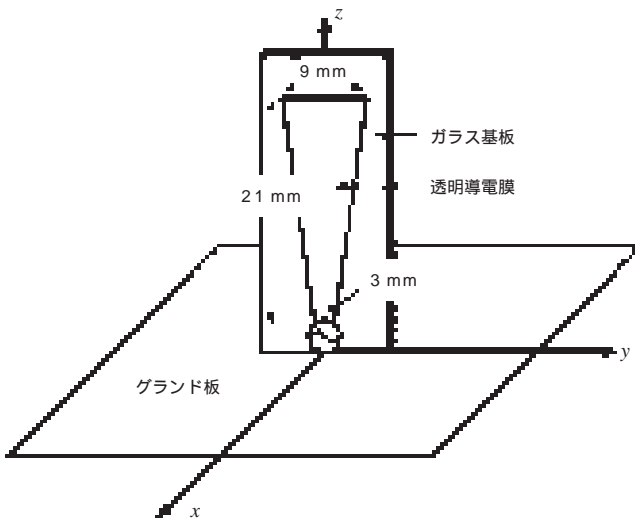


図1 試作アンテナの構成
Fig. 1. Configuration of fabricated antenna.

た．本稿では放射素子の材料を ITO および比較用の銅で作製し，アンテナの特性を測定した．ITO のシート抵抗は $1.3 \text{ } \Omega/\text{sq}$ から $19.8 \text{ } \Omega/\text{sq}$ の間で5種類用いた．図2に作製した透明アンテナの一例を示す．

図3に特性インピーダンスを $50 \text{ } \Omega$ とした場合のアンテナの電圧定在波比 (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) の測定結果を示す．図3からシート抵抗の大きさに関わらず 2.4 GHz 付近で銅製アンテナと同様に VSWR は 2 以下を維持していることがわかる．また，5 GHz 付近で VSWR 値が高くなっているが，そこは放射リアクタンスが零となり，放射抵抗が非常に高くなる反共振点である．

放射特性は共振周波数 2.4 GHz および反共振周波数にあたる 5.0 GHz で行ったが，ここでは 2.4 GHz における xz 面および yz 面での測定結果のみを図4および図5に示す．図4および図5により，シート抵抗が小さくなるにつれて，利得が大きくなり，銅製アンテナの特性に近づくことがわかる．実際，シート抵抗が $19.8 \text{ } \Omega/\text{sq}$ から $1.3 \text{ } \Omega/\text{sq}$ まで小さくなる間に，銅製アンテナを基準とした最大利得の低下は 2.4 GHz で 4.4 dB から 0.2 dB まで，5.0 GHz で 2.5 dB から 0.4 dB まで減少した．



図2 ITO アンテナ試作品
Fig. 2. Sample of ITO antenna.

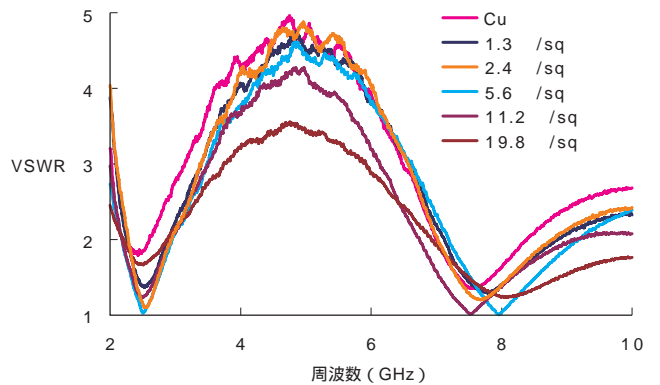


図3 試作したアンテナの VSWR 周波数特性
Fig. 3. VSWR dependence of frequency for fabricated antennas.

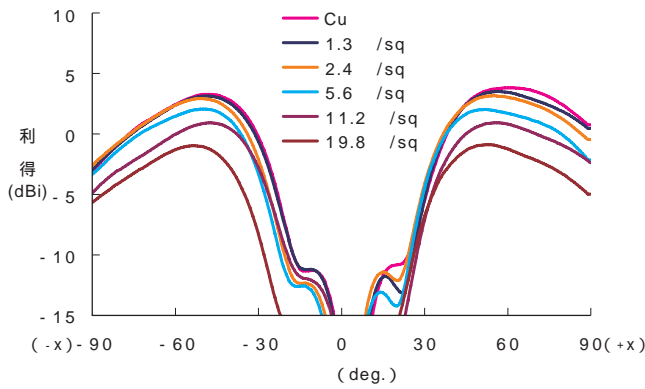


図4 2.4 GHzにおけるEのxz面での放射特性の測定結果
Fig. 4. Radiation pattern E on xz-plane at 2.4 GHz for fabricated antennas.

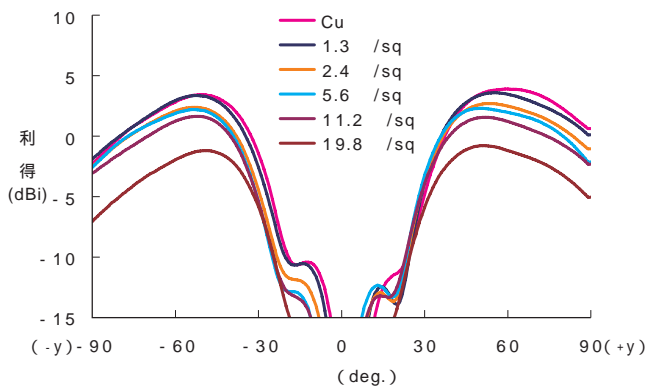


図5 2.4 GHzにおけるEのyz面での放射特性の測定結果
Fig. 5. Radiation pattern E on yz-plane at 2.4 GHz for fabricated antennas.

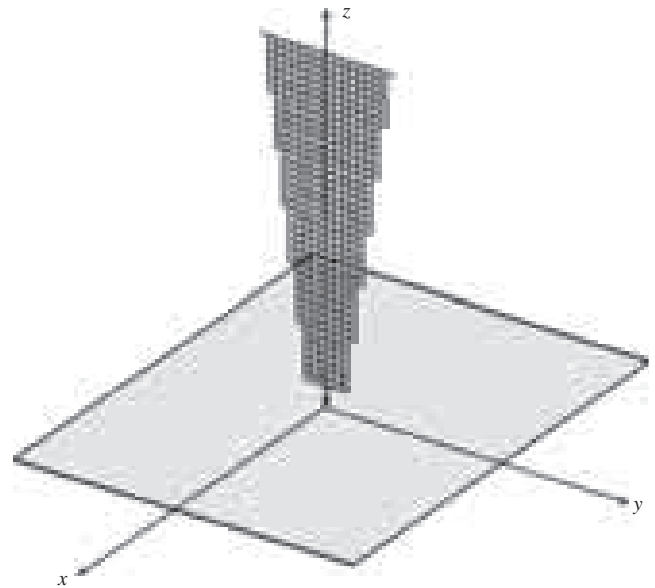


図6 ワイヤグリッドモデルを用いた計算モデル
Fig. 6. Wire-grid model for simulation.

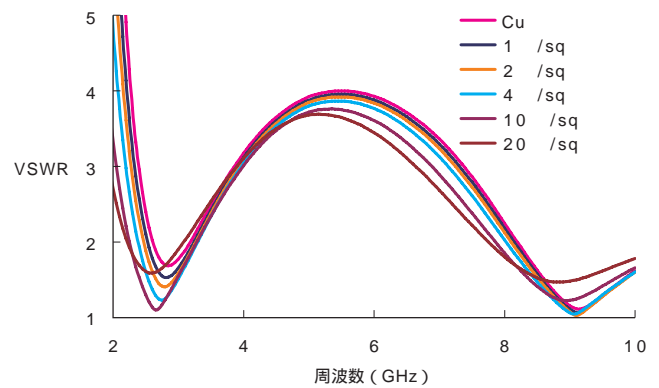


図7 ガラス基板がない場合のVSWR周波数特性の計算結果
Fig. 7. Calculated VSWR dependence on frequency for antennas without substrate.

また、ホイラーキャップ法⁸⁾⁹⁾を用いて放射効率を測定したところ、銅製アンテナの放射効率を100%と仮定した場合、シート抵抗が前述と同様に变化する間に、放射効率は2.4 GHzで46%から93%まで、5.0 GHzで65%から98%まで上昇した。

3. 数値解析

われわれは図6に示すワイヤグリッドモデルを用いてモーメント法に基づくシミュレータNEC4 (Numerical Electromagnetic Code version 4)¹⁰⁾により、アンテナについて数値解析を行った。シート抵抗は離散化したワイヤエレメントごとに抵抗を直接付加することで計算に取り入れた。そこでは、実際に使用した透明導電膜は数百nmの厚さであり、使用周波数領域におけるスキンドープス(10 μm以上)より遥かに薄いことを考慮して、以下の式により抵抗 R_l を与えた：

$$R_l = \frac{l}{s} \sigma \quad \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 σ 、 l 、 w はそれぞれ透明導電膜の導電率、

エレメントの長さおよび幅を表す。なお、シミュレータの制限により、グラウンド板の大きさは無限大、透明導電膜の下にガラス基板は存在しない条件の下で解析を行った。

図7にシート抵抗の大きさを変化させたときのVSWRの計算結果を示す。図3の測定結果と比較すると、計算ではガラス基板を考慮していない分、共振周波数が高周波側へ移動しているが、VSWR特性の挙動は図3の実験結果と非常に似た結果が得られた。図3の測定では共振は2.4 GHz、反共振は5.0 GHzで起きているが、理論計算ではそれぞれ2.8 GHzと5.6 GHzで起きている。以後、2.8 GHzと5.6 GHzの計算値はそれぞれ2.4 GHzと5.0 GHzの測定値と比較することとする。

図8および図9に2.8 GHzにおけるxz面およびyz面での放射特性の計算結果を示す。また、図10に計算結果と実験結果を比較している。計算結果と実験結果で指向性が多少異なるのは、グラウンド板の大きさが計算と実測で異

なっているためである．しかし，シート抵抗の値が小さくなるにつれて，利得が上昇する傾向および変化量は実験結果とよく一致している．

図11にシート抵抗値による最大利得の変化の計算結果を示す．ただし，図中の利得は銅製アンテナの最大利得で規格化している．最大利得は周波数に依存し，5 GHz付

近で最大値を示しているが，この特性はアンテナ固有のものであり，アンテナの形状に依存する．図12に2.8 GHzおよび5.6 GHzにおける計算結果と2.4 GHzおよび5.0 GHzにおける実験結果の比較を示すが，両者はよく一致していることがわかる．計算結果から，シート抵抗による利得の減少率は2.8 GHzで0.2 dB/ /sq, 5.6 GHzで0.12 dB/ /sqであることがわかった．

図13にシート抵抗を変化させた場合の放射効率の計算結果を示す．図11に示した最大利得の計算結果と同様な傾向を示している．2.8 GHzおよび5.6 GHzにおける計算結果と2.4 GHzおよび5.0 GHzにおける実験結果を比較すると，図14に示すようにほぼ一致した結果が得られている．計算結果から，シート抵抗による放射効率の低下率は2.8 GHzで2.7 %/ /sq, 5.6 GHzで1.7 %/ /sqであることがわかった．

最後に2.8 GHzおよび5.6 GHzでの電流分布を図15および図16に示す．両図ともに銅を用いた場合とシート抵抗が1 /sqの材料を用いた場合は電流がアンテナのエッジ付近に集中し，分布はほとんど変わらないが，10 /sqの場合は損失が大きいためエッジ付近の電流集中が弱められていることがわかる．

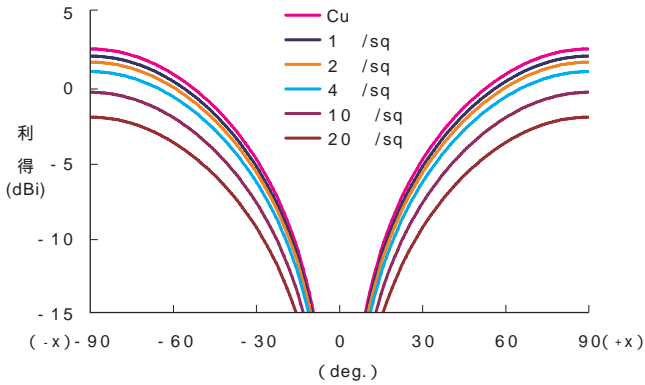


図8 2.8 GHzにおけるEのxz面での放射特性の計算結果
Fig. 8. Calculated radiation pattern E on xz -plane at 2.8 GHz for antennas without substrate.

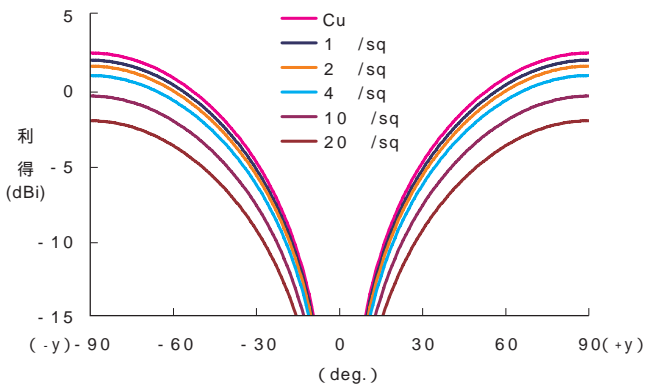


図9 2.8 GHzにおけるEのyz面での放射特性の計算結果
Fig. 9. Calculated radiation pattern E on yz -plane at 2.8 GHz for antennas without substrate.

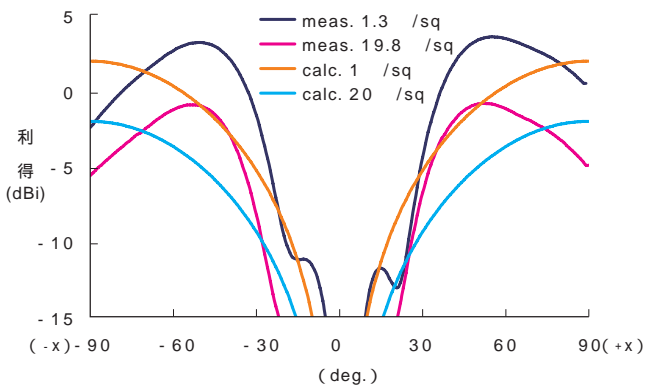


図10 Eのxz面での放射特性の比較
Fig. 10. Comparison of radiation pattern E on xz -plane.

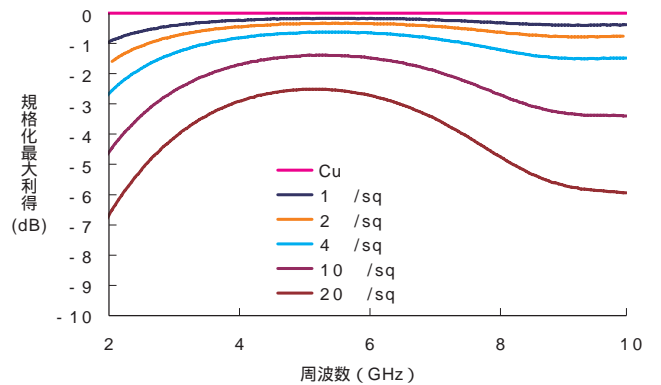


図11 最大利得の周波数特性の計算結果
Fig. 11. Calculated maximum gain dependence on frequency.

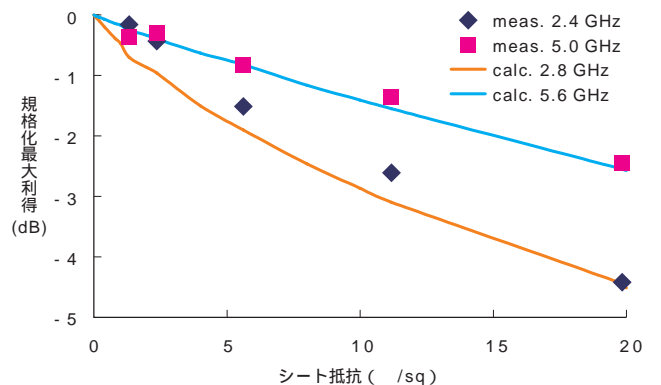


図12 最大利得のシート抵抗依存性の比較
Fig. 12. Comparison of maximum gain dependence on sheet resistivity.

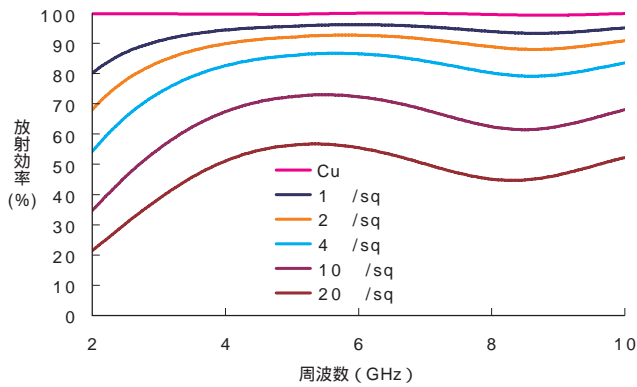


図13 放射効率の周波数特性の計算結果
Fig. 13. Calculated radiation efficiency dependence on frequency.

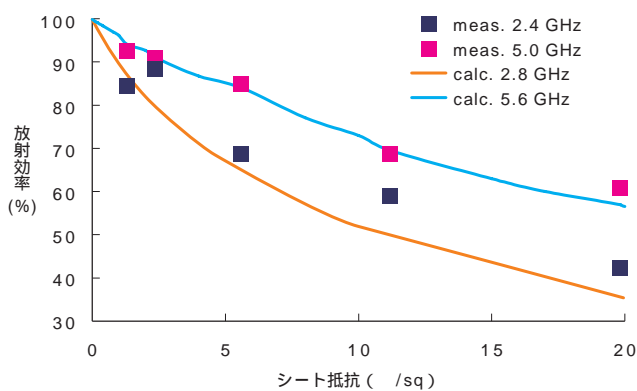


図14 放射効率のシート抵抗依存性の比較
Fig. 14. Comparison of radiation efficiency on sheet resistivity.

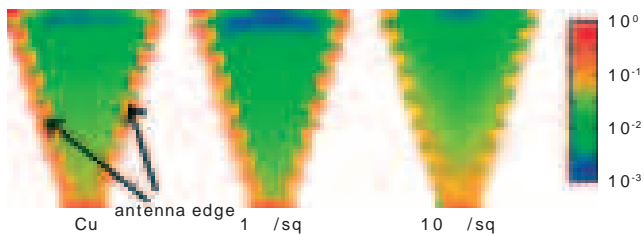


図15 2.8 GHzでの電流分布
Fig. 15. Current distributions at 2.8 GHz.

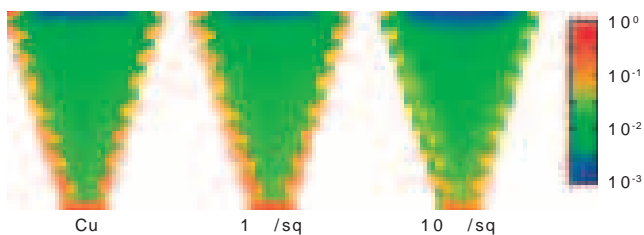


図16 5.6 GHzでの電流分布
Fig. 16. Current distributions at 5.6 GHz.

これまでの実験結果と計算結果から、透明材料の抵抗のアンテナの特性に与える影響が定量的に明らかになった。たとえば、シート抵抗が1.3 /sqの透明材料を用いた場合、2.4 GHzにおいて利得は銅製アンテナからわずかに0.2 dB低下、放射効率は93%であった。このような抵抗による劣化があっても、透明アンテナの特性は携帯端末内部に設置するアンテナの特性を補える状況であれば、十分実用化ができると考える。

4.むすび

われわれは透明導電膜を用いたアンテナの基礎検討を行った。シート抵抗を19.8 /sqから1.3 /sqまで変化させると、2.4 GHzにおける導電膜の抵抗による最大利得の低下は4.4 dBから0.2 dBまで減少し、放射効率は46%から93%まで上昇した。これはモーメント法を用いた計算結果と傾向が非常に一致している。計算結果からシート抵抗あたりの利得と放射効率の増減率を見積もったところ、2.8 GHzで利得は0.2 dB/ /sq、放射効率は2.7%/ /sqであった。このように、われわれはモノポールタイプのアンテナにおいて、透明導電膜の抵抗が放射特性に与える影響について定量的な評価を得て、実用化できる可能性を示した。今後は、アンテナの最適化や給電方法などを具体的に検討していく予定である。

参考文献

- 1) T. Kawashima, et al.: Thin Solid Films, Vol.445, No.2, pp.241-244, 2003
- 2) M. S. Wu, et al.: IEICE Trans., Vol.E-74, No.5, pp.1277-1282, 1991
- 3) R. N. Simons, et al.: IEEE AP-S Int. Symp., pp.2100-2103, 1997
- 4) M. Outaleb, et al.: Microwave and Opt. Technol. Lett., Vol.24, No.1, pp.3-7, 2000
- 5) C. Mias, et al.: IEE Colloquium on Antennas for Automotives, pp.8/1-8/6, 2000
- 6) K. Oshima, et al.: IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., pp.1569-1572, 2002
- 7) C-F. Huang, et al.: Elect. Lett., Vol.38, No.20, pp.1162-1163, 2002
- 8) H. A. Wheeler, Proc. IRE, Vol.47, pp.1325-1331, 1959
- 9) 安藤ほか: 信学総大, S8-3, Vol.3, pp.285-286, 1987
- 10) <http://www.llnl.gov/IPandC/technology/software/softwaretitles/nec.php>