

シミュレーション結果の視覚化とその解釈

Visualization and Its Interpretation of a Simulation Result

田口 光雄

Mitsuo Taguchi

長崎大学大学院工学研究科 〒852-8521 長崎市文教町 1-14

Graduate School of Engineering, Nagasaki University 1-14 Bunkyo-machi, Nagasaki, 852-8521 Japan

E-mail: mtaguchi@nagasaki-u.ac.jp

Abstract

In the simulation of the antenna by the electromagnetic simulators, it is difficult to check if they work properly or to interpret the result correctly. In this lecture, a dipole antenna and a rectangular loop antenna are excited by the Gaussian monocycle pulse and the near field distributions in the time domain are shown. Then the relation between the near field distribution and the antenna characteristics such as the input impedance and the radiation patterns is discussed in order to interpret the phenomena on the antenna.

1. まえがき

パソコンやグラフィック・プロセッシング・ユニット (GPU) の急速な能力向上と共に、パソコン上で動作する電磁界解析シミュレータが多く販売され、各種アンテナの設計解析に使われている。従来は、アンテナの入力インピーダンスや放射特性を数値的に求めるだけであったものが、近年では、アンテナ上の電流分布や近傍での電磁界分布を表示して、アンテナの動作原理の説明に使われることもある。

1997年に、電磁波工学の導入教育のために、マックスウェルの方程式や電磁波伝搬、分布定数線路理論等をアニメーションで説明する CD-ROM が発表された[1]。電磁波現象を数式で説明するよりも、アニメーションを見る方が理解しやすい。電磁波がどのように作られるかを数式ではなく、電磁界シミュレータを用いてアニメーションで表現できれば、大学や企業で初めてアンテナを学ぶ人にとっても理解しやすく、設計開発にも役立つのではないかと思われる。しかし、電磁界シミュレータでアンテナの解析を行うとき、アンテナモデルの設定がシミュレータの規定する条件を満足しておれば、使用者の意図とは異なるモデルとなっても、計算結果が出力される。従って、アンテナモデルの妥当性を如何に

判断できるかが、シミュレータを使いこなすために必要である。著者は、電磁界シミュレータで得られた結果を可視化することで、アンテナの動作原理が説明できないかの基礎検討を行ってきた[2-5]。

本稿では、電磁界シミュレータを用いてアンテナの解析を行う場合に、得られた結果の妥当性を判断するために必要な基本式を説明している。次に、ダイポールアンテナ、矩形ループアンテナを、ガウシアンモノパルス電圧源で励振した場合の数値シミュレーション結果を可視化して、アンテナ近傍で電磁界がどのように伝搬するかを示している。数値計算には、計算時間を短縮するために、FDTD法などの時間領域のシミュレータではなく、モーメント法に基づく電磁界シミュレータ WIPL-D の Time domain solver を用いている[6]。また、正弦波電圧源で励振した場合の計算結果を示し、電磁界分布とアンテナの入力インピーダンスや放射特性の関係を説明している。

第2節では、アンテナ特性を理解するために、伝送線路上を電流がどのように伝搬するか、また、アンテナ給電点での入力インピーダンスと反射係数の関係を説明するために、分布定数線路理論とスミスチャートを説明している。また、アンテナ上の電流・

等価磁流分布と放射電磁界の関係をまとめている。

第3節では、数値計算例として、ダイポールアンテナと矩形ループアンテナを取り上げ、パルス電圧源で励振した場合の電磁界の時間応答と、正弦波電圧源で印加した場合の電磁界分布を説明し、それらとアンテナの入力インピーダンス特性、放射特性の関係を説明している。

2. アンテナの特性を理解するための基本式

ここでは、平行2線伝送線路の終端にダイポールアンテナが接続されたモデルを例に取り、アンテナ特性を表す入力インピーダンス、反射係数、電流分布を説明する。また、アンテナ上の電流分布と放射特性の関係を説明する。

図1に、終端を開放した平行2線伝送線路とその電流振幅分布を示す。時間因子を $\exp(j\omega t)$ とする。分布定数線路理論によれば、線間電圧 $V(z)$ 、線路上の電流 $I(z)$ は、次式で表される[7]。

$$V(z) = V_1 \exp(-j\beta z) + V_2 \exp(j\beta z) \quad (1)$$

$$I(z) = \frac{V_1}{R_c} \exp(-j\beta z) - \frac{V_2}{R_c} \exp(j\beta z) \quad (2)$$

R_c は線路の特性インピーダンス、 β は伝搬定数である。線路終端 $z=l$ で電流は零となるので、式(2)より、 $V_2 = V_1 \exp(-j2\beta l)$ となり、 $z=l$ での電圧 $V(l) = V_1 \exp(-j\beta l) + V_2 \exp(j\beta l) = 2V_1 \exp(-j\beta l)$

(3)

を用いると、

$$I(z) = \frac{V(l)}{2R_c} \left[\exp\{j\beta(l-z)\} - \exp\{-j\beta(l-z)\} \right] \quad (4)$$

を得る。式(4)右辺の第1項は電源から先端に進む入射波を表し、第2項は先端から電源側への反射波を表す。式(4)を更に変形し時間因子を代入すると、

$$I(z, t) = j \frac{V(l)}{R_c} \sin\{\beta(l-z)\} \exp(j\omega t) \quad (5)$$

となり、点 z での電流振幅は時間に依存せず一定の定在波分布となる。伝搬定数 β は線路上の波長 λ_0 を用いて $\beta = 2\pi/\lambda_0$ と表されるので、電流振幅分布は、次のように、正弦波状となる。

$$|I(z)| = \frac{|V(l)|}{R_c} \left| \sin \frac{2\pi(l-z)}{\lambda_0} \right| \quad (6)$$

図2に、線路を終端から4分の1波長の位置で折り曲げた、平行2線で給電した半波長ダイポールアンテナを示す。平行線路の特性インピーダンスは、素子間隔によって決まる。線路と垂直な部分では、先端になるほど離れているので、特性インピーダンスが変わり、電流分布も正弦波状から変化する。しかし、その長さは、高々、波長程度であるので、その電流分布は、近似的に、正弦波状と見なすことができる。現在では、ダイポールアンテナの電流分布は数値計算により求めることができるが、ほぼ正弦波状となっている。

線路上の点 z での入力インピーダンス $Z_{in}(z)$ は、次式で定義される。

$$Z_{in}(z) = \frac{V(z)}{I(z)} \quad (6)$$

また、電圧反射係数 $S(z)$ は、

$$S(z) = \frac{\text{反射波電圧}}{\text{入射波電圧}} = \frac{V_2 \exp(j\beta z)}{V_1 \exp(-j\beta z)} \quad (7)$$

$$= \frac{V_2}{V_1} \exp(j2\beta z)$$

で定義され、式(6)に式(1)、(2)を代入すると、入力インピーダンスは電圧反射係数を用いて、

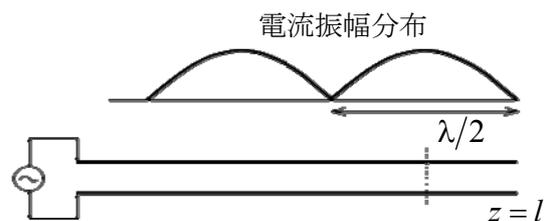


図1. 終端を開放した平行2線伝送線路

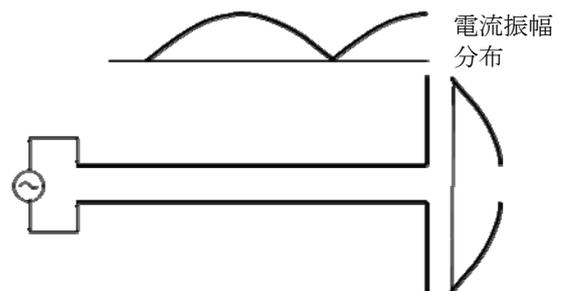


図2. 平行2線で給電した半波長ダイポールアンテナ

$$Z_{in}(z) = R_c \frac{1+S(z)}{1-S(z)}, \quad S(z) = \frac{\frac{Z_{in}(z)}{R_c} - 1}{\frac{Z_{in}(z)}{R_c} + 1} \quad (8)$$

と表される。図1の伝送線路終端では $Z_{in}(l) = \infty$ であるから $S(l) = 1$ となり、終端を短絡した場合には $Z_{in}(l) = 0$ となるから $S(l) = -1$ となる。アンテナの入力インピーダンスを図示するとき、しばしばスミスチャートが使われる。スミスチャートは電圧反射係数の大きさと位相を極座標形式で表示したもので、反射係数をプロットすれば、そのときの入力インピーダンスを図から読み取ることができる。逆に、入力インピーダンスを与えれば、反射係数を読み取ることができる。

次に、アンテナ上の電流分布、等価磁流分布と放射電磁界の関係を示す。図3に、座標原点近くにな置かれたアンテナ上の電流分布 \mathbf{J} とアンテナから十分遠方の観測点 $P(r, \theta, \phi)$ を示す。アンテナ上の電流分布 \mathbf{J} 、等価磁流分布 \mathbf{M} が与えられれば、観測点 P での放射電界 \mathbf{E} は、次式で表される[8]。

$$\mathbf{E}(r, \theta, \phi) = \frac{\exp(-jkr)}{r} \mathbf{D}(\theta, \phi) \quad (9)$$

$$\mathbf{D}(\theta, \phi) = -\frac{j\omega\mu}{4\pi} \int_V \left\{ \mathbf{J} - (\mathbf{J} \cdot \mathbf{i}_r) \mathbf{i}_r + \sqrt{\varepsilon/\mu} \mathbf{M} \times \mathbf{i}_r \right\} \times \exp(jk\rho \mathbf{i}_\rho \cdot \mathbf{i}_r) dv' \quad (10)$$

放射磁界は、電界と次の関係にある。

$$\mathbf{H}(r, \theta, \phi) = \sqrt{\varepsilon/\mu} \mathbf{i}_r \times \mathbf{E}(r, \theta, \phi) \quad (11)$$

放射電磁界は、球面波 $\exp(-jkr)/r$ と、観測点の距離に依存しない $\mathbf{D}(\theta, \phi)$ の積で表される。 $\mathbf{D}(\theta, \phi)$ は指向性関数と呼ばれ、それを表示したものが指向性パターンである。 k は自由空間中での伝搬定数を表す。アンテナの設計開発では、所望の放射特性を実現するために、アンテナ上の電流分布、等価磁流分布をどうすれば良いかが問題となる。従って、式(10)右辺の被積分関数の意味を理解する必要がある。

3. アンテナの解析例

図4に、2本の同じ長さの線状導体の間にギャップを設け、そこで給電した、中央給電ダイポールアンテナを示す。給電点にガウシアンモノサイクルパルス

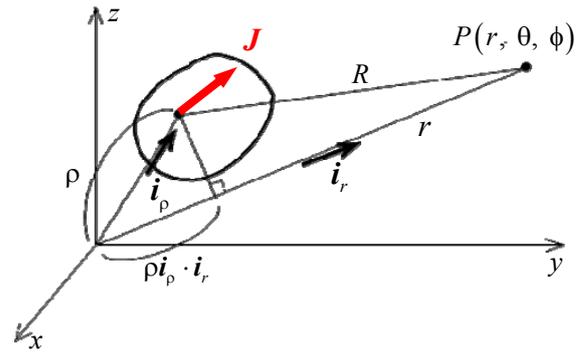


図3. アンテナと十分遠方の観測点

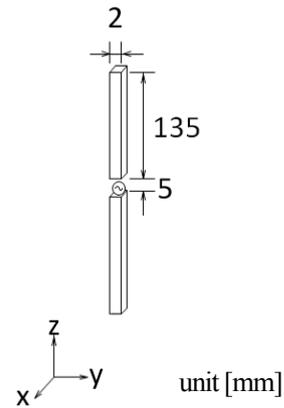


図4. 中央給電ダイポールアンテナ

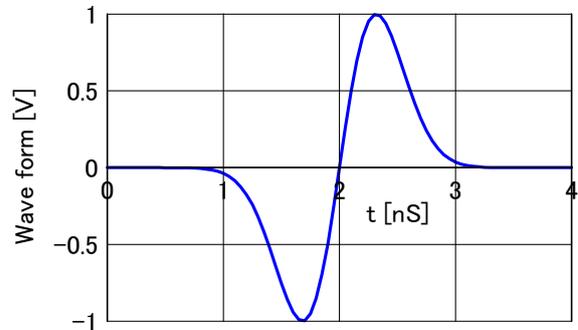


図5. ガウシアンモノサイクルパルスの時間波形

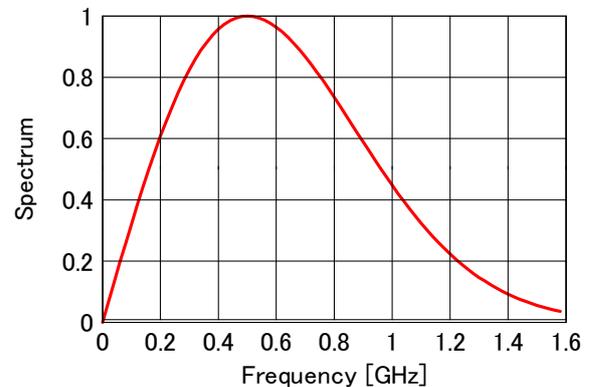


図6. ガウシアンモノサイクルパルスの周波数スペクトル

ス電圧源を接続している。図 5, 6 にガウシアンモノサイクルパルス電圧の時間波形と周波数スペクトル分布を示す[3]。アンテナの長さは共振周波数が 500MHz となるようにしている。

図 7, 8 に、アンテナ近傍での電界、磁界分布の時間応答を示す[3]。給電点からアンテナ上を移動する電荷はアンテナ終端で同位相で反射する。電荷によって電界が励振され、電荷の移動量に比例する電流によって磁界が励振されている。給電点にはモノパルス電圧を印加したが、電荷はアンテナ両端で反射を繰り返しながら、減衰するので、給電点電圧、電流分布も減衰振動する。

図 9 に、単一周波数 10MHz 正弦波電圧源で励振した場合の近傍電界、磁界、ポインティングベクトル分布を示す。アンテナの全長は 0.01 波長以下であるので、電流はほとんど流れない。図 10, 11 に、周波数 500MHz、1GHz の正弦波電圧源で励振した場合の近傍電界、磁界、ポインティングベクトル分布を示す。電界はアンテナ先端で強く励振され、磁界は先端から 4 分の 1 波長付近で強く励振されている。

図 12, 13 に、アンテナ給電点での入力インピーダ

ンス計算値を示す。図 13 のスミスチャートは、特性インピーダンス $R_0 = 50\Omega$ で規格化した反射係数を示す。横軸の数値は規格化抵抗を、外周に沿った位置にある数値は規格化リアクタンスを示す。周波数 10MHz では、入力抵抗はほぼ零、リアクタンスは容量性で極めて大きくなる。このとき、電圧反射係数はほぼ 1 となっていることがスミスチャートからわかる。周波数 500MHz では、入力インピーダンスは 66.6Ω となっている。周波数 917MHz で入力抵抗は最大、すなわち、電流振幅は最小で反共振となる。

図 14 に、電圧反射係数の周波数特性を示す。アンテナを散乱行列で表せば、電圧反射係数は S_{11} と等しいので、図中では S_{11} を用いている。

図 15 に、アンテナを含む垂直面内での放射電界指向性パターンを示す。式(10)によれば、放射電界の大きさは、電流の積分で求められる。アンテナ上の電流分布は、図 9~11 の磁界分布に比例するので、磁界分布で説明するが、周波数 10MHz では、アンテナの大きさが微小であるので、電流の積分は小さい値となり、指向性がブロードになる。

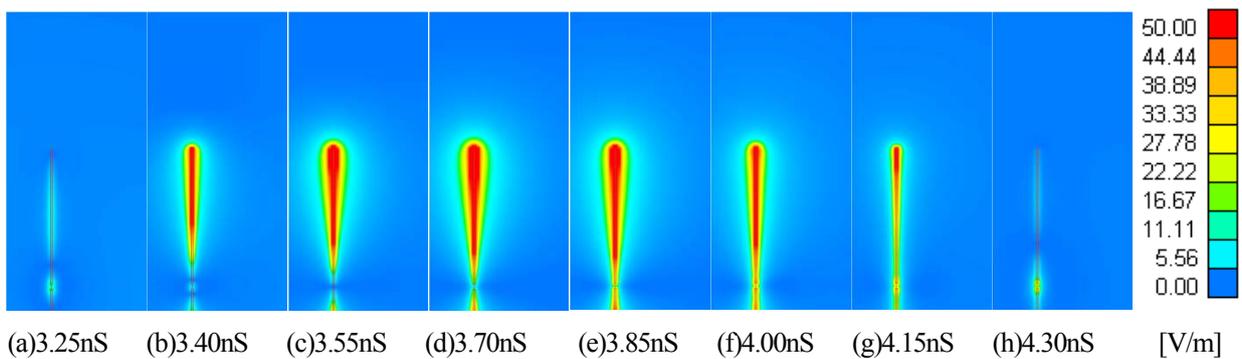


図 7. 電界の時間応答

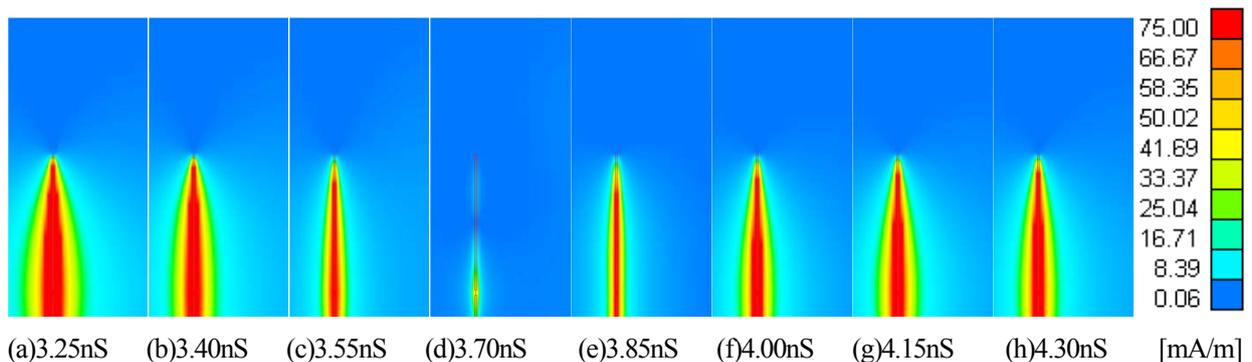


図 8. 磁界の時間応答

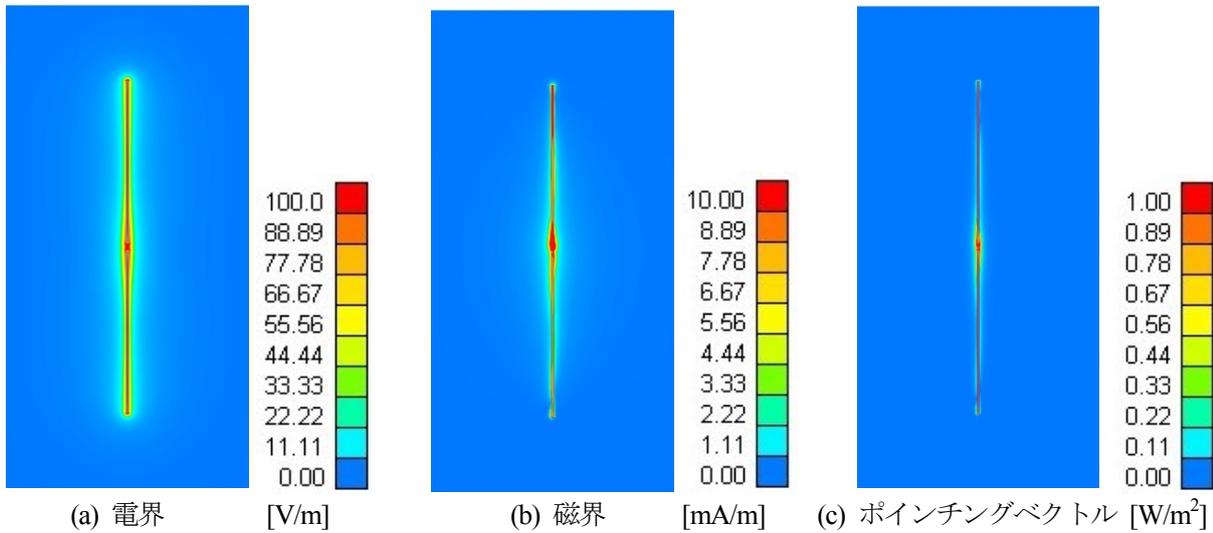


図9. 正弦波電圧源を印加した場合の電磁界分布 (周波数 10MHz)

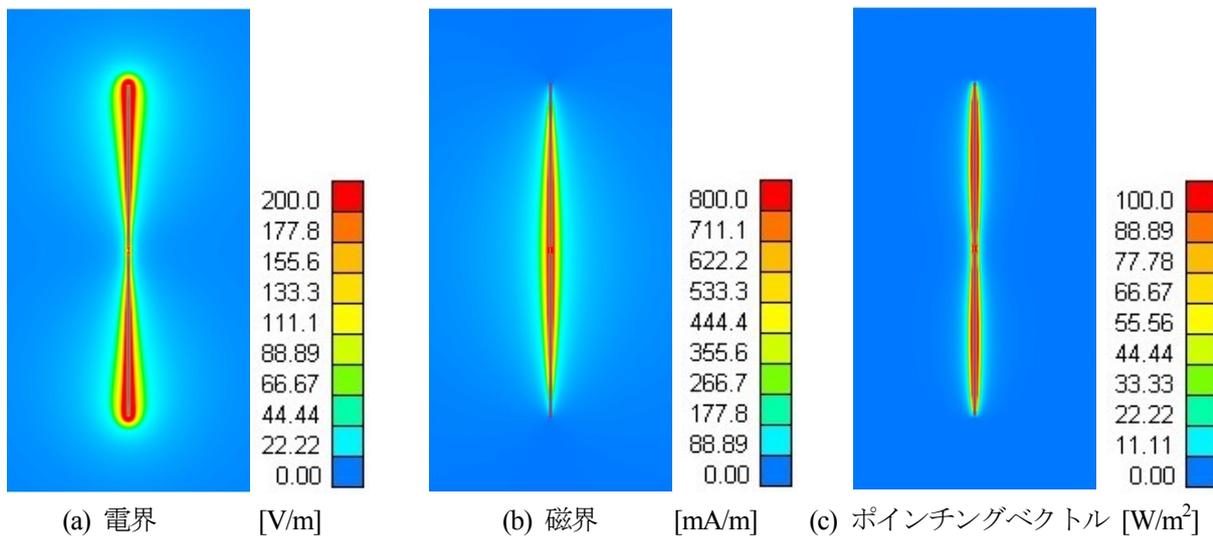


図10. 正弦波電圧源を印加した場合の電磁界分布 (周波数 500MHz)

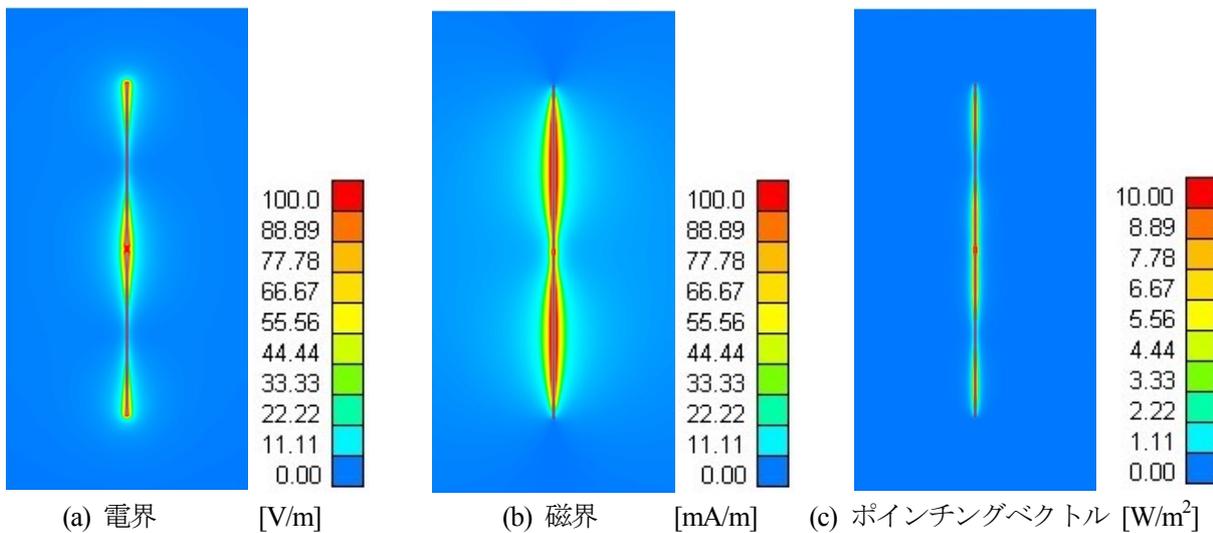


図11. 正弦波電圧源を印加した場合の電磁界分布 (周波数 1GHz)

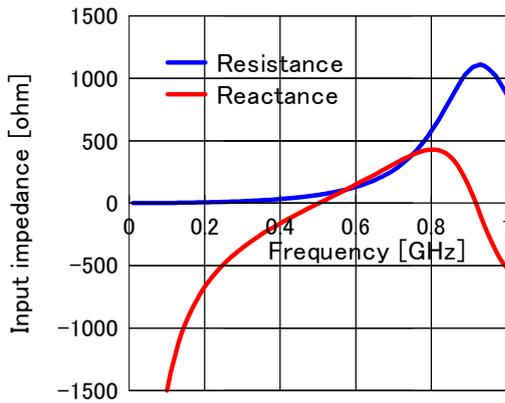


図 12. ダイポールアンテナの入力インピーダンス特性

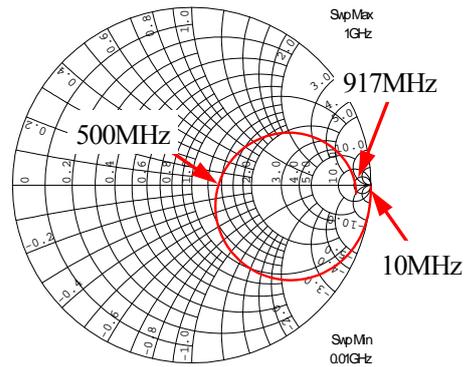


図 13. スミスチャート

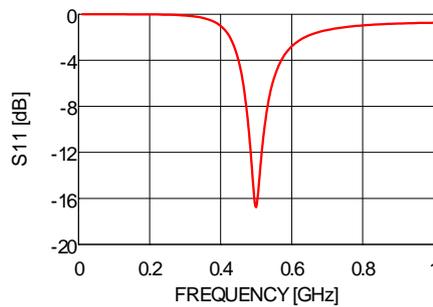


図 14. ダイポールアンテナの反射係数

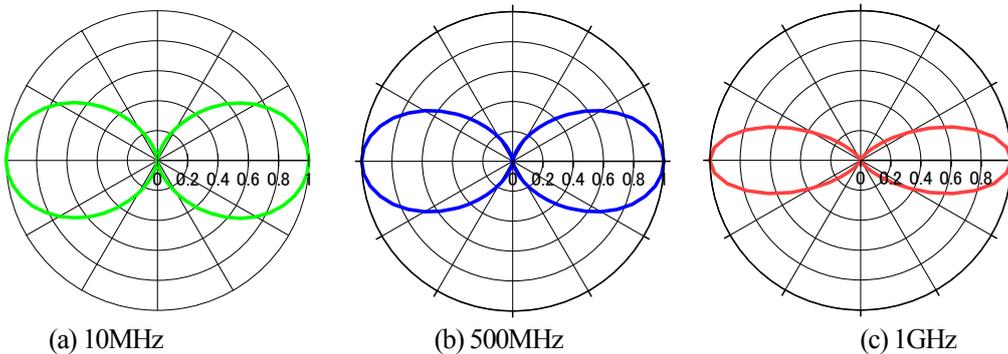


図 15. 正弦波電圧源を印加した場合のダイポールアンテナの垂直面内放射電界指向性パターン

図 16 に、周波数 500MHz でアンテナ周囲長が 1 波長となるように設計した矩形ループアンテナを示す。図 17、18 に、ガウシアンモノサイクルパルス電圧源を印加した場合の、アンテナ近傍の電界、磁界分布の時間変化をそれぞれ示す[5]。ループアンテナの給電点に電圧を印加すると電荷が給電点から上部と下部の 2 方向へ向かって伝搬し、最も離れた点でそれらの電荷は打ち消しあい零となるが、また向かい側へ電荷が移動している。電荷分布に従って、電界分布が励振される。アンテナ上の電流は、給電点から上部と下部の 2 方向へ向かって流れ、 $t=2.60\text{nS}$ に給電点から最も離れた点において電流は合成され、

増幅されて向かい側へ流れる。アンテナ近傍には電流に応じて磁界が励振される。

図 19 に、単一周波数 10MHz 正弦波電圧源で励振した場合の近傍電界、磁界、ポインティングベクトル分布を示す。アンテナの全長は 0.02 波長以下であるので、給電点での電位差は小さく、電界は微小である。図 20、21 に、周波数 500MHz、1GHz の正弦波電圧源で励振した場合の近傍電界、磁界、ポインティングベクトル分布を示す。

図 22、23 に、ループアンテナ給電点での入力インピーダンス計算値を示す。周波数 10MHz では、電氣的に微小な長さのループが給電点に接続され、入

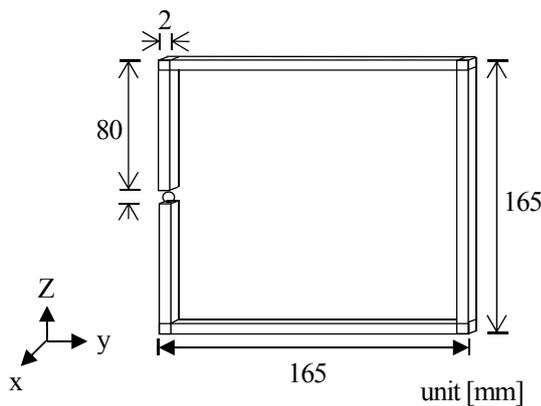


図 16. 矩形ループアンテナ

力抵抗はほぼ零、リアクタンスは誘導性となっている。周波数が高くなると共に、コイルの周囲長が長くなるので、リアクタンスが大きくなる。

図 24 に、電圧反射係数の周波数特性を示す。図 25 に、周波数 10MHz、500MHz、1GHz での放射電界指向性パターンを示す。10MHz での電界強度は、アンテナの大きさが微小となるために、他の周波数に比べて極めて小さくなる。

4. まとめ

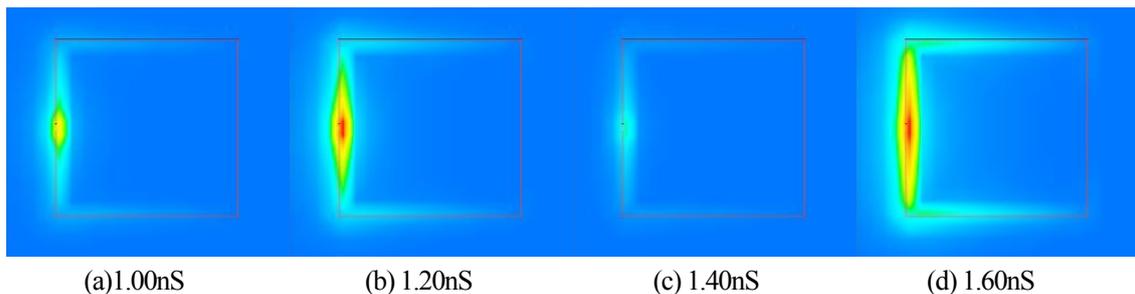
本稿では、ダイポールアンテナと矩形ループアンテナをパルス電圧源と単一周波数の正弦波電圧源で励振して数値計算を行い、入力インピーダンス、放射特性に加えて、近傍電磁界を可視化して、電磁波がどのように伝搬しているかを説明した。また、アンテナの入力インピーダンス、放射電界指向性パターンとの関係を示した。

現在、マルチバンドアンテナ、UWB アンテナ、MIMO アンテナなど、様々な形状のアンテナの解析

が行われている。アンテナは、ダイポールやループの重ね合わせで表すことができるので、得られた結果を可視化して、如何に分解して考えるかが重要である。

文献

- [1] M. F. Iskander, A. Rodriguez-Balcells, O. Santos, R. M. Jameson, and A. Nielsen, "New Interactive multimedia CD-ROM for engineering electromagnetic," Trans. on IEEE AP-S Int. Symp., vol.4, pp.2486-2489, 1997.
- [2] 田口光雄, 伊藤友一, "平行 2 線に沿った電磁波伝搬のアニメーション化," 映像情報メディア学技報, BCT2010-4, pp.13-16, Jan. 2010.
- [3] 田口光雄, 五嶋大志, "線状アンテナからの電磁波放射のアニメーション化 -第 2 報-, " 映像情報メディア学技報, BCT2012-7, pp.25-28, Jan. 2011.
- [4] 田口光雄, "電磁波工学教育におけるシミュレータの可能性", 電子情報通信学会誌, Vol.96, No.1, pp.41-45, Jun. 2013.
- [5] 田口光雄, 東直人: "線状アンテナからの電磁波放射のアニメーション化 -第 3 報-, " 映像情報メディア学会技術報告, BCT2013-19, Jan. 30, 2013.
- [6] "WIPL-D Pro v10.0 3D Electromagnetic Solver Professional Edition User's Manual", WIPL-D, 2012.
- [7] D. M. Pozar: Microwave engineering, Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
- [8] R. F. Harrington, "Field Computation by moment methods," Macmillan company, New York, 1968.



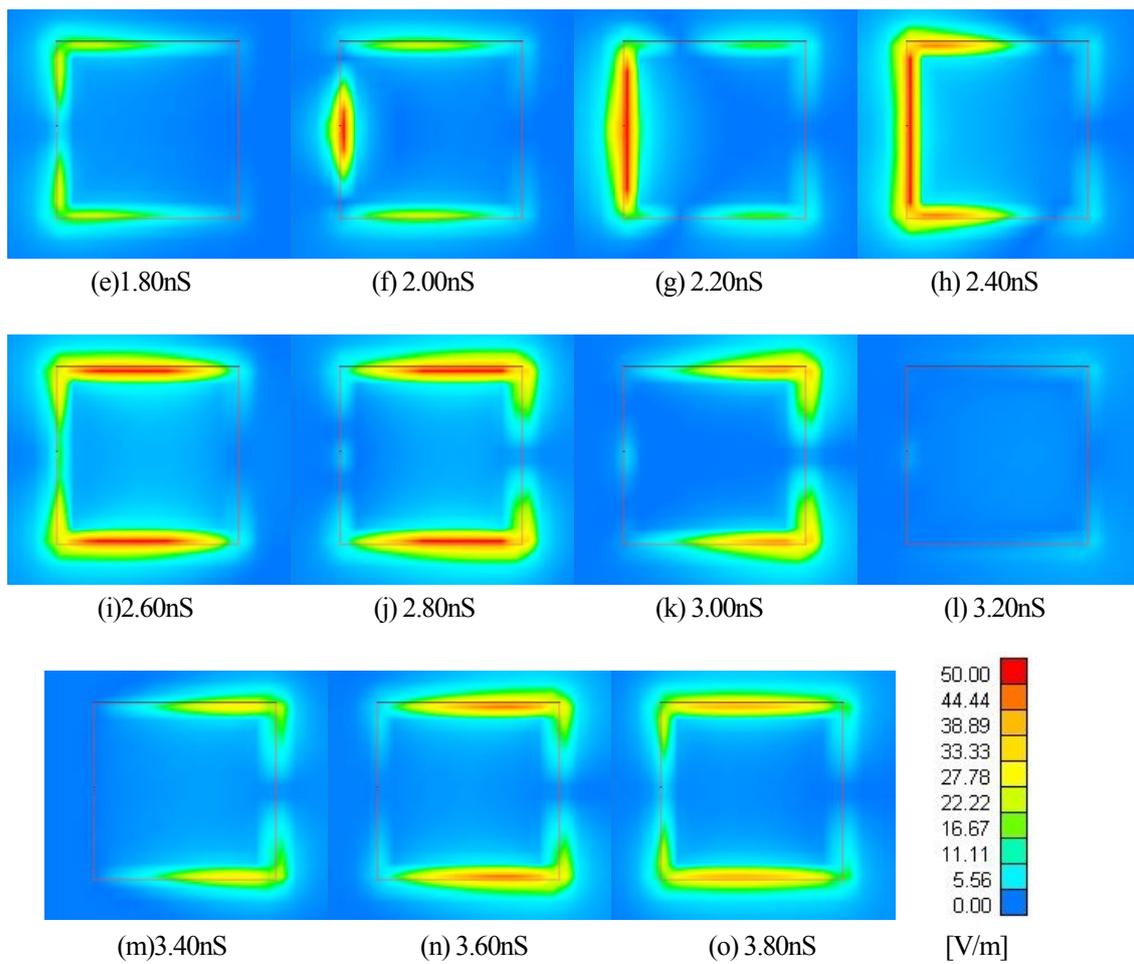
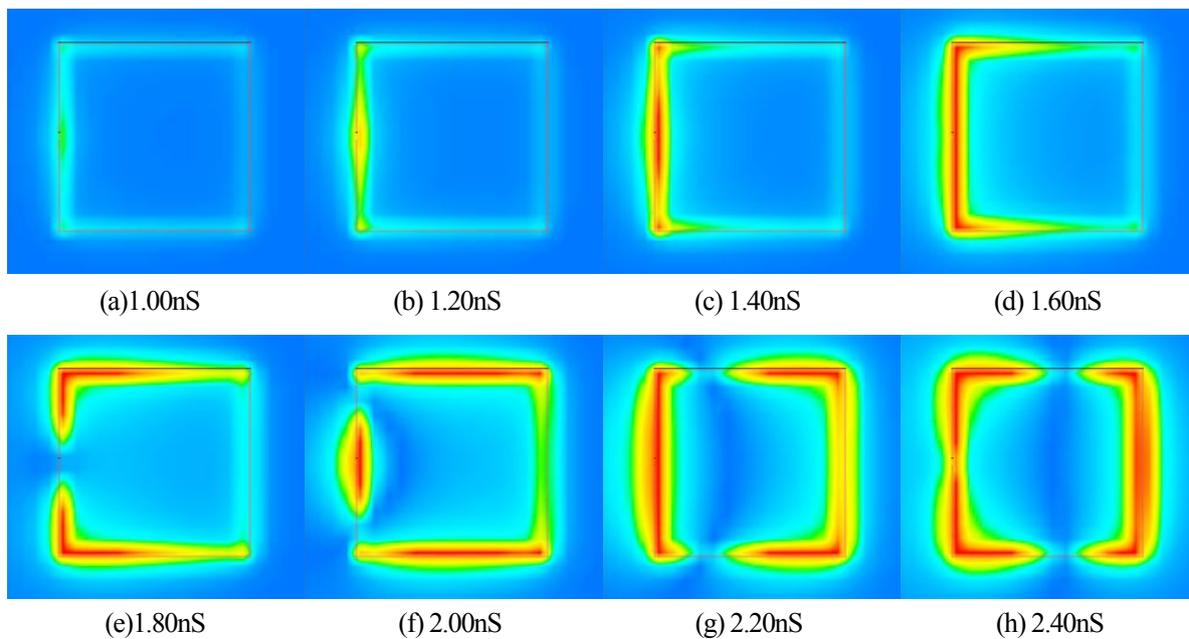


図 17. ループアンテナ近傍の電界分布の時間応答



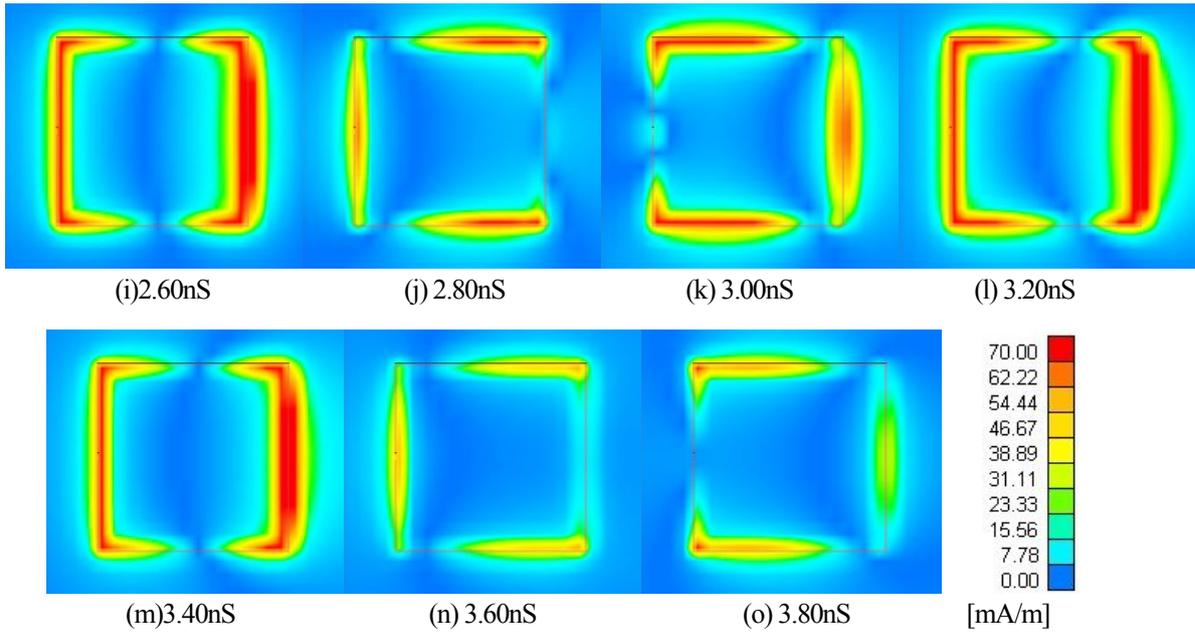


図 18. ループアンテナ近傍の磁界分布の時間応答

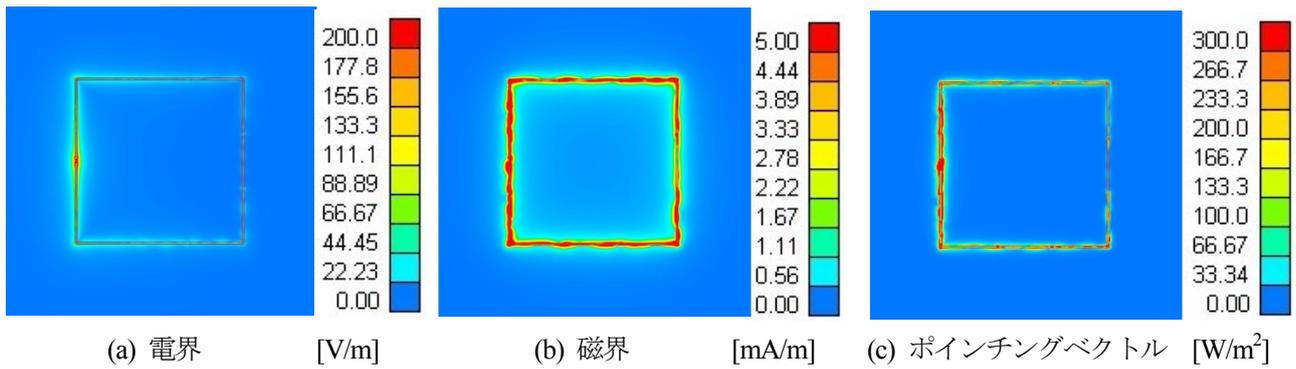


図 19. 正弦波電圧源を印加した場合の電磁界分布 (周波数 10MHz)

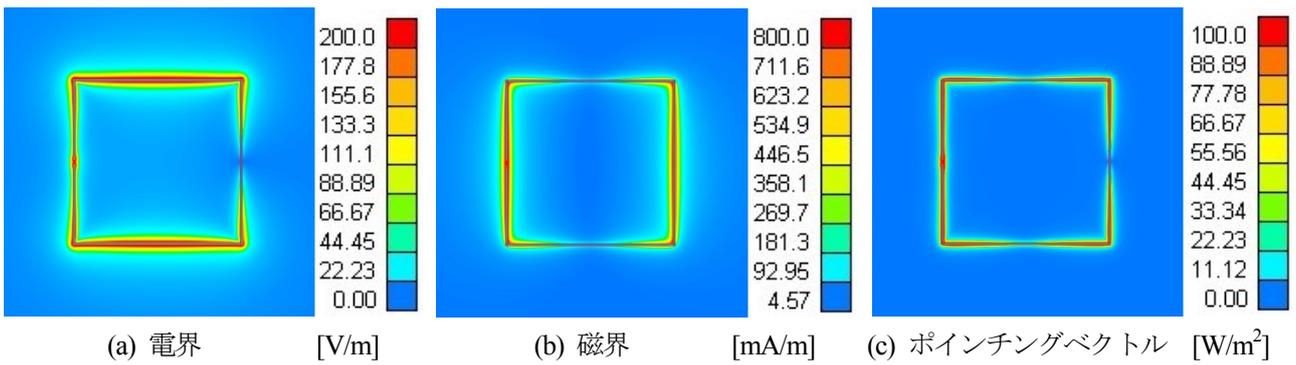


図 20. 正弦波電圧源を印加した場合の電磁界分布 (周波数 500MHz)

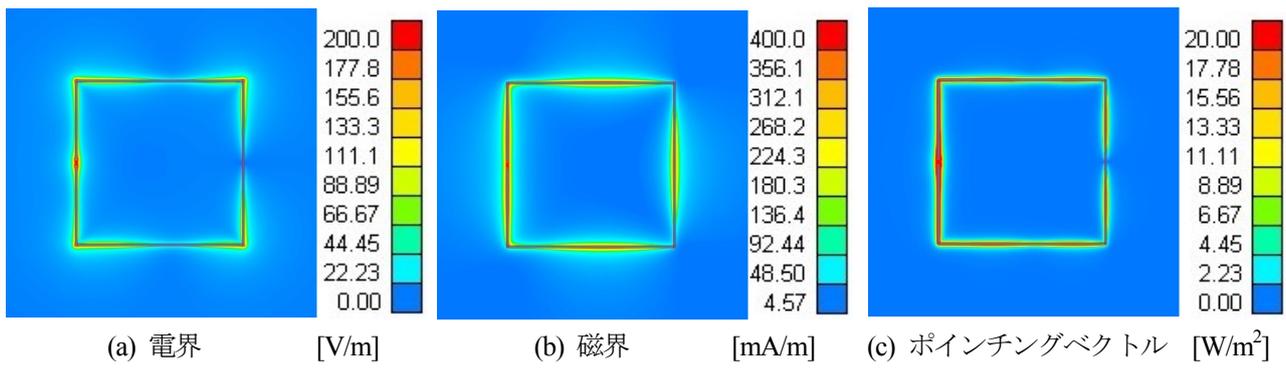


図 21. 正弦波電圧源を印加した場合の電磁界分布 (周波数 1GHz)

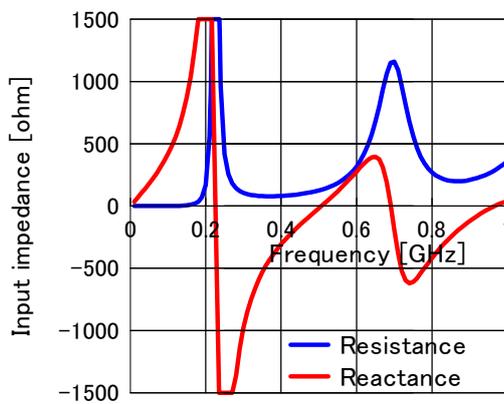


図 22. ループアンテナの入力インピーダンス特性

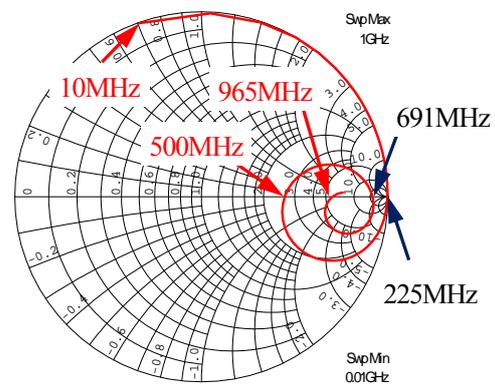


図 23. スミスチャート

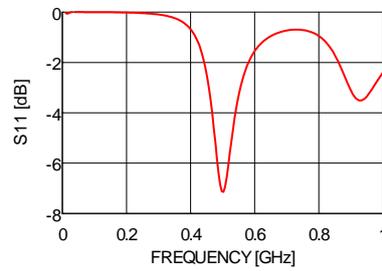


図 24. ループアンテナの反射係数

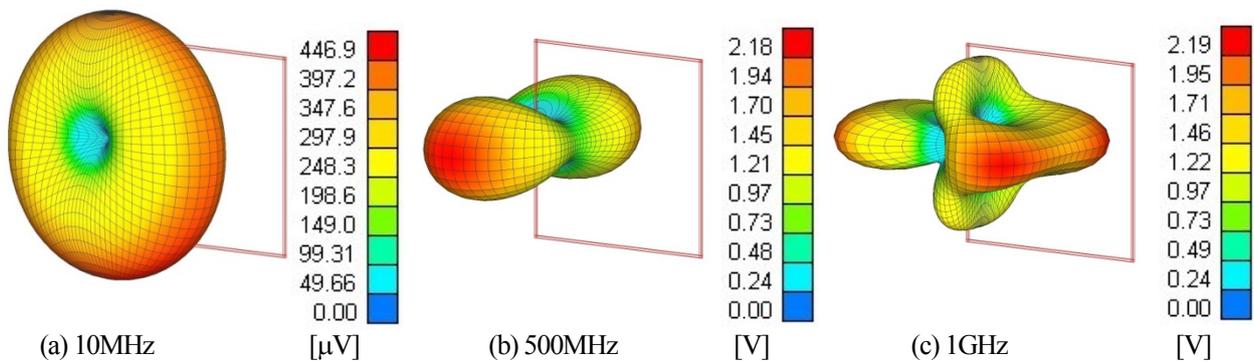


図 25. ループアンテナの放射電界指向性パターン