

(解説)

無線通信分野における電磁界シミュレーションの活用

丸山政克*・真鍋知多佳*

*技術開発本部・電子技術研究所

Analysis and Design of High Frequency Components for Wireless Communication through Electromagnetic Field Simulation

Masakatsu Maruyama・Chitaka Manabe

High frequency components were analyzed in an electromagnetic field using a simulator based on the finite element method. The results illustrate the behavior of the components in the electromagnetic field, and make clear how such fields affect high frequency components. Using a slotted waveguide antenna as example high frequency component device, this paper discusses the analysis method and how simulation results compare with real tests.

まえがき = 近年、電子技術のめざましい発達により、各種の通信や放送をはじめとするさまざまな分野において無線技術の利用が著しく増加している。また、情報化社会の進展により通信環境のブロードバンド化が求められており、電子デバイスの高速化、広帯域化とあいまって、利用される周波数帯もより高周波帯へと移行している。このように、高周波技術に対するニーズが高くなる一方で、高周波領域においては、回路やデバイスの大きさが使用する周波数の波長に近づくために、デバイス機能が個別に集中していると見せなくなることや、回路からの電磁波の放射も無視できなくなることにより、電磁界の挙動を含めたより複雑高度な回路設計技術が必要となっている。

そこで注目されているのが、電磁界シミュレータによる高周波部品の設計・解析技術である。電磁界解析技術は、コンピュータ性能の向上とあいまって急激に進歩しており、従来は解析できなかった大きなモデルや複雑なモデルにまで応用分野が広がっている。

本稿では3次元電磁界シミュレータによる解析技術を用いて高周波部品における電磁界の振舞いを紹介するとともに、本技術を用いたワイヤレス通信機器設計の一例として、スロットアレーアンテナと呼ばれる平面アンテナの事例について紹介する。この平面アンテナは薄型でコンパクトな形状で、かつ量産性、意匠性に優れており、準ミリ波を用いた高速無線アクセスシステムの加入者局アンテナとして開発を進めている。

本稿で使用した電磁界シミュレータは、有限要素法を用いた数値計算によりマクスウェル方程式を解いて電磁界を解析するものである。

1. 導波管スロットアレーアンテナの概要

高周波伝送路には、テレビケーブルでなじみの深い2線式線路や同軸線路の外に、導波管と呼ばれる伝送線路形態がある。導波管とは、導体の筒の中に電波を閉じこめて伝送するもので、高周波領域における損失が少なく大電力を伝送できるという特徴がある。一方、伝送する電波の波長に応じて導波管の断面サイズが決定されるの

で、周波数が低く波長が長い領域では導波管の断面サイズが大きくなってしまいうということもあり、主にマイクロ波帯以上の高周波分野で使用されている。

導波管は断面形状によって、方形・円形・楕円形などに分類されるが、最も一般的な方形導波管について説明を進める。導波管内における電磁波分布の形態をモードと呼び、その中で最も低い遮断周波数を持つものを基本モードと呼ぶ。方形導波管の基本モードは、 TE_{10} と呼ばれるモードで、電界は短辺方向に、磁界は長辺方向に生じる。実際に方形導波管の電磁界解析を行い、 TE_{10} モードにおける電界の強度分布を表したのが図1である。

このように単純かつ理想的な形状における電磁波の振舞いについては従来より解析的にも求められている。しかし実際の使用における複雑な導波管形状、すなわち導波管の分岐、異なるサイズの導波管の接続などでは、解析的に求めることは一般的に困難である。

図2に示す導波管スロットアレーアンテナは、方形導波管を基本要素としているが、多数の分岐に加えて放射過程が含まれており、特に解析が困難なモデルである。下方の給電ポートから給電された電磁波は、給電導波管を伝搬するに従い順次分岐し放射導波管へと導かれる。放射導波管には複数のスロットが設けられ、給電端から入った電磁波は順次スロットから漏れだし空間へと放射される。末端のスロットにおいては導波管端での反射を防ぐべく、ここに到達した電磁波すべてを放射する仕組みになっている。このアンテナ構造は周波数特性を持つために特定の周波数帯においてのみアンテナとして機能するが、本稿で用いたアンテナは26GHzで最適化されており、シミュレーション及び実験におけるアンテナの励振周波数は26GHzである。

本アンテナを放射機能に着目して見ると、放射素子が各放射導波管に沿って並んでおり、かつその放射導波管が複数並んでいる形態となっている。このように放射素子が配列され形成されたアンテナをアレーアンテナと呼ぶ。アレーアンテナの特性(利得、放射パターン)は、構成する各放射素子の放射電力と電気的位相で決まるため、所望のアンテナ特性を得るためには、各放射素子の

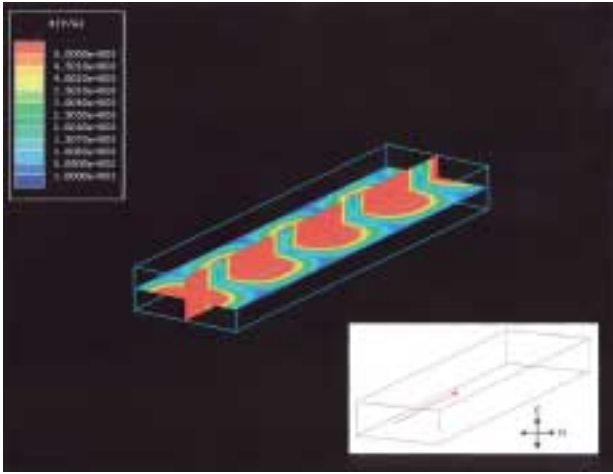


図1 導波管基本モードの電界強度分布
Fig. 1 Computed plot showing the magnitude of the electric field at TE₁₀ mode in waveguide

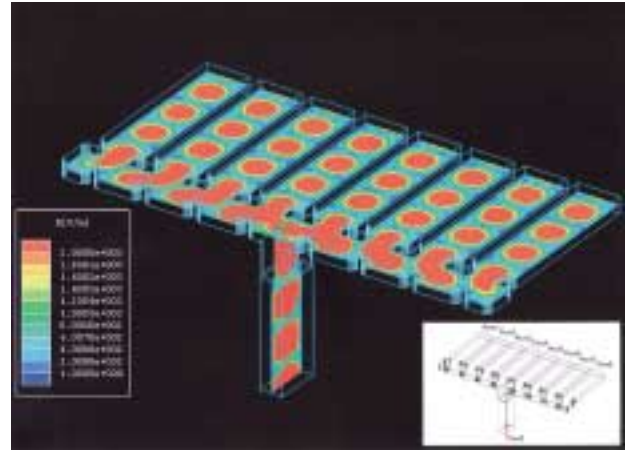


図4 スロットアレーアンテナの給電導波管分岐構造における電界強度分布
Fig. 4 Computed plot showing the magnitude of the electric field in the branched waveguide at slotted waveguide antenna

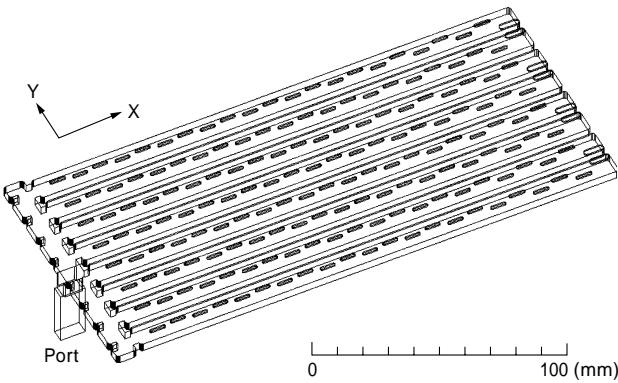


図2 導波管スロットアレーアンテナモデル
Fig. 2 Geometry of the slotted waveguide antenna

励振電力と位相とをアレーアンテナ内で所定の分布としなければならない。一般的によく使用される励振電力分布は、均一分布であり、これはアンテナの利得が最大となる分布である。この条件を導波管スロットアレーアンテナの場合について当てはめると、各スロットから放射される電力は等しく、かつ位相関係も一定でなければならない。

実用上現れる回路形状は本アンテナのように複雑な場合が多く、設計や解析を効率的に進めるには電磁界シ

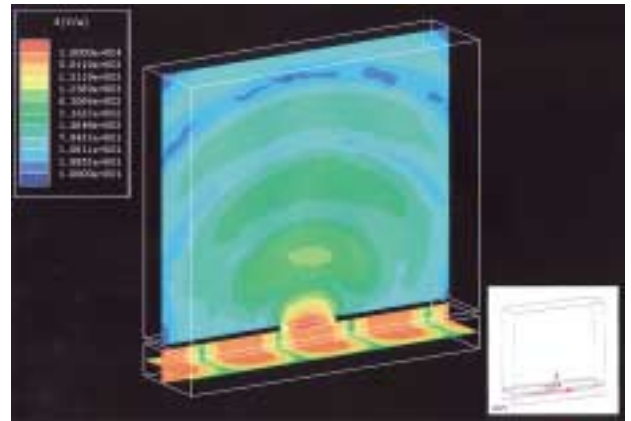


図5 導波管に設けられたスロットによる放射
Fig. 5 Radiation electric field from the single slot

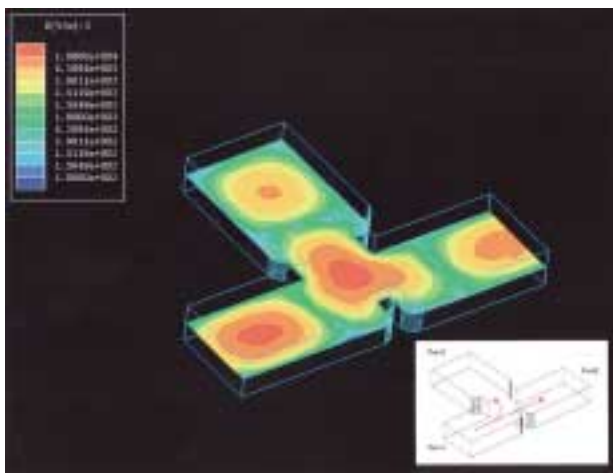


図3 導波管分岐構造における電界強度分布
Fig. 3 Computed plot showing the magnitude of the electric field in the branched waveguide

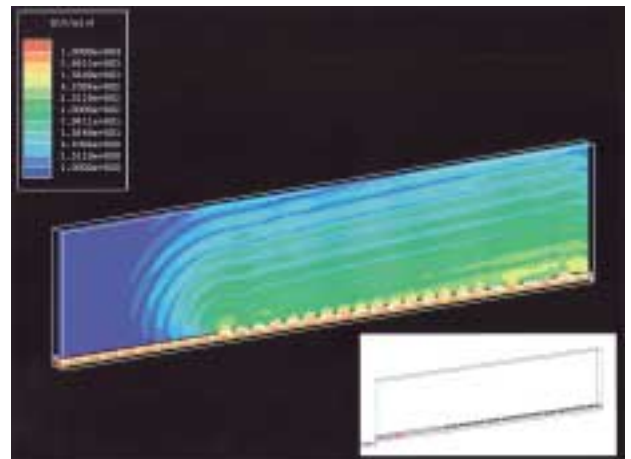


図6 放射導波管からの放射
Fig. 6 Radiation electric field from the slotted waveguide

ミュレーションの活用は欠かせない。本稿ではシミュレーションによる解析事例として、アンテナを構成する要素ごとに見ていく。

2. 給電導波管の分岐モデル

まず、方形導波管の分岐構造について考える。方形導波管において電磁波を分配する仕組みとして、図3のような分岐構造が知られている。ポート1からポート2へ抜ける導波管において、分岐用のポート3が設けられて

いる。分岐率と位相はポート3の導波管を接続する開口部の大きさや位置によって調整され、開口部の反対側に設けられた導波管内の突起によって不要な反射が抑えられる構造となっている。

図2のアンテナの給電導波管分岐部分を抽出してモデル化したのが図4であり、分岐部分にはこの分岐構造が使われている。すべての放射導波管に強度と位相をそろえて給電するよう設計されており、特に強度をそろえるためには、給電ポートから近く電磁波強度の強い分岐部では分岐率を小さく、逆に給電ポートから遠く電磁波強度の弱い分岐部では分岐率を大きく調整している。

シミュレーションにより得られた、分岐部分に伝わる電磁波の電界強度分布を図4に示す。中央下方の導波管から給電された電磁波は、各分岐部分で分配されて、それぞれの分岐導波管に等しい強度で分配されている。また、電界強度の位相も隣合う導波管で完全にそろっていることが分かる。正確には、隣合う導波管で180度ずれて逆位相になるが、電界の絶対値を表す強度分布であるので図4では位相がそろっている。

さらに、各導波管ポートにおける位相と信号強度の解析結果を表1に示す。隣合う導波管に対してはほぼ逆位相(180度ずれ)となっており、一つおきに見ていくと位相が1度以内の精度で揃っていることが分かる。また、各導波管ポートにおける電力の解析結果から、入力電力を8等分するための理論値12.5%に対して0.5%以内の誤差で等分配されることが分かる。

3. 放射導波管モデル

次に、放射導波管による放射過程について検討を進める。図5に示すように方形導波管の広面(断面における長辺側)に導波管管軸方向に平行なスロットを設けると、導波管内を伝搬している電磁波はスロット部分から漏れ出して自由空間に向かって放射される。

実際に、方形導波管の広面に設けたスロットから電磁波が漏れて放射されている状態の解析結果を図5に示す。スロット部分から漏れ出した電磁波は自由空間へと球面状に広がっており、導波管に設けられたスロットは確かにアンテナとして機能している。また、導波管を伝わる電磁波のうちスロットから放射される電磁波の割合は、スロットが導波管広面の中心線からどれだけずれて配置されているかによって決定されるため、スロットのずれ量を調整することで電波の放射強度を調整するこ

表1 給電導波管分岐構造における分岐特性
Table 1 Magnitude and phase of electromagnetic wave at each port of the branched waveguides

	Power (%)	Phase (deg)
Port 1	12.5	0.9
Port 2	12.5	180.9
Port 3	12.0	-0.3
Port 4	12.4	179.4
Port 5	12.3	-0.9
Port 6	12.2	179.2
Port 7	12.5	0.6
Port 8	12.6	180.2

とが可能である。

図2のアンテナの放射導波管部分について、モデルと電磁界解析の結果を図6に示す。放射導波管には22個のスロットが設けてあり、それぞれのスロット間隔は位相関係が一定になるように定められている。また、それぞれのスロットから放射される電力を等しくするために、給電ポートに近く導波管内の電磁波強度が強い位置では放射の割合を小さく、給電ポートから離れて導波管内の電磁波強度が弱くなるにしたがい放射の割合を大きく調整している。

放射の割合を調整する際のパラメータとなるのは、前述のとおりスロットの導波管広面中心線からのずれ量である。また、各スロット導波管の最終段スロットは、導波管端からの不要な反射を減らすために、到達したすべての電力を放射する仕組みとなっている。解析結果では、すべてのスロットから均一な強度で放射されて、合成された放射波は一樣な平面波となっている様子が分かる。放射方向が真正面ではなく2度程度のチルト角がついているが、これは給電側から見てスロットからの反射を軽減するためである。すなわち放射方向が真正面の場合、放射波の等位相面は導波管表面=スロット位置に一致し、各スロットからの反射が同位相で合成されて大きくなってしまいうからである。

4. シミュレーション結果の検証

シミュレーションモデルを簡略化するために、閉空間内の伝搬現象が主となる給電導波管の分岐部分と、自由空間への放射現象が主となる放射導波管部分とに分割してモデリングとシミュレーションを行ってきたが、それぞれのモデルは導波管端面で分割しているため、各端面部での電力と位相で情報のやりとりが可能であり、両モデルのシミュレーション結果を統合してアンテナ全体の特性を評価することが可能である。

アンテナ全体の放射特性を計算するために、スロット導波管8本をアレー化して解析を実施した。スロットアレーアンテナの給電条件には、分岐導波管の解析で得られた表1の結果を適用する。つまり、8分岐構造とスロット導波管のシミュレーション結果を合成してスロットアレーアンテナ全体の特性を解析することになる。

こうしてシミュレーションで得られたスロットアレーアンテナのアンテナ放射パターン(遠方界)を図7に示す。解析の結果から予測されるゲインは28dBiであり、これは試作アンテナを測定して得た実測値とよく合致している。また、解析によるアンテナ放射パターンを、同じく図7に示す実測値と比較してみると、X方向(長手方向)に生じている2度のチルト角が一致するほか、アンテナビーム幅の目安となる3dB角度範囲(利得最大値より3dB利得が低化する角度範囲)は、X方向で±1.5度、Y方向で±3.5度で実測値とよくあっている。ここでX、Y方向に対するビーム幅が異なるのは、スロットの全配置長さが2次元アレーのX方向とY方向で異なるからである。

スロットアレーアンテナを例にアンテナの最も重要な

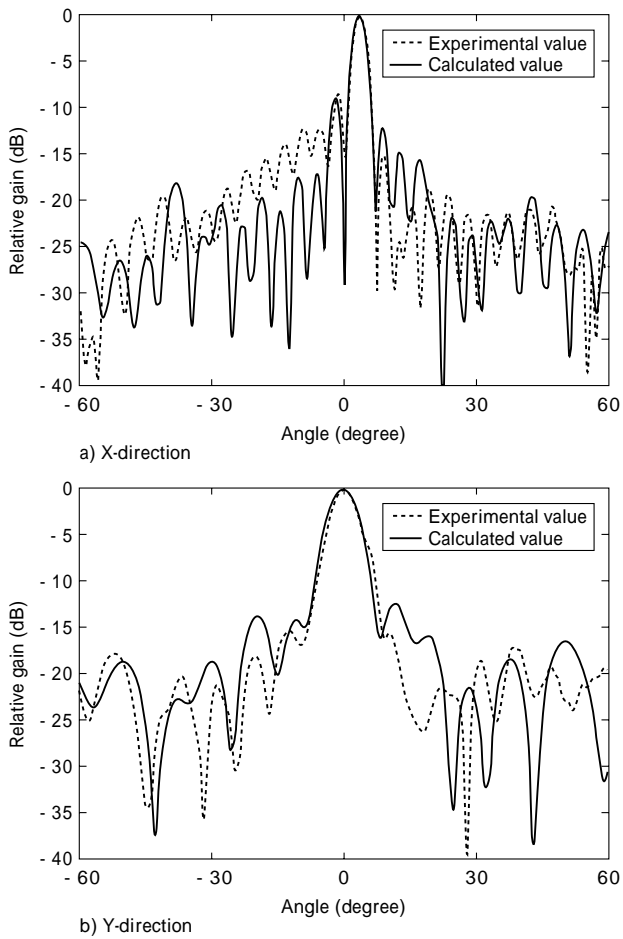


図7 解析によって得られたアンテナパターンと実測値の比較
 Fig. 7 Far-field pattern of slotted waveguide antenna

特性の一つであるアンテナパターンを解析し、その特性を実測値と比較した結果、電磁界解析により得られる特性は十分な精度で実測値と一致し、高周波部品の開発に有用であることが分かる。

むすび = 3次元電磁界シミュレーションにより、高周波領域における電磁界の振舞いと、高周波部品開発の一例としてマイクロ波通信向けのスロットアレーアンテナの事例を紹介した。電子・情報通信分野は急速な技術革新が続いており、今後もますますフレキシブルで迅速な開発が求められるのは必至である。ここで紹介した電磁界シミュレーション技術は、高周波部品の設計・解析のための有力な手段として期待されており、当社においては高速無線通信システムなどを構成する高周波部品の開発に活用している。

なお、導波管スロットアンテナの基本については、東京工業大学安藤真教授のご指導をいただきました。この場をかりて深謝します。