

# 研究・開発におけるシミュレータの実際

Activities of Simulators for Research and Development

宮崎守泰

## 1. はじめに

製品開発においては、目標性能の達成はもとより、十分な製造歩留りと信頼性の確保、加えて短期間での効率的な開発完遂が求められる。近年における種々のシミュレーション技術の進展、及びシミュレータの汎用化と高度化は、製品開発に求められる上述の課題を克服する上で大きな手助けとなる。本稿では、マイクロ波・光の技術分野において、関連する回路やデバイス、サブシステムなどを開発する上でシミュレーション技術やシミュレータが果たしている役割と適用事例について紹介する。

## 2. シミュレーション技術の果たす役割

企業の製品開発においてシミュレーション技術は、システム設計からコンポーネント設計や試験評価に至るまで、様々な場面で重要な役割を果たしている。図1に、製品開発へのシミュレーションの関わりを模式的に示す。ここでシミュレーション技術を適用する主な目的は、次の三つと考える。まず第1は設計の効率化を図ること、第2は設計段階で歩留りと信頼性を評価し設計に反映させること、第3は主として開発の初期段階において実験等では解明し難い現象を分析し新たなアイデアの発掘を図ることである。以下、これらについて少し詳しく述べる。

### 2.1 設計の効率化

シミュレーション結果が実測結果と高精度に一致すれば、試作は検証用に一度で済む。また、周囲環境や動作

時の発熱などの影響まで考慮したシミュレーション技術が進歩し、かつ、この結果を設計に反映できれば、開発時の試験期間を大幅に短縮できる。更には、システム試験で不具合が生じた場合でも、図1に示すようにシミュレーションによる検証や診断ができれば問題の早期解決が期待できる。

### 2.2 設計段階での歩留り信頼性の評価と設計への反映

シミュレーションの場合は、試作評価と異なり設計パラメータを種々に変化させて結果を得ることが短時間に可能なため、得られた結果の精度が実測値に対してそれなりに良好であれば、開発品の歩留りを意識した設計が期待できる。例えば、マイクロ波や光の回路パラメータの数値ばらつきを想定した、いわゆる誤差解析をシミュレータで実施しながら設計を行えば、最終性能に対して

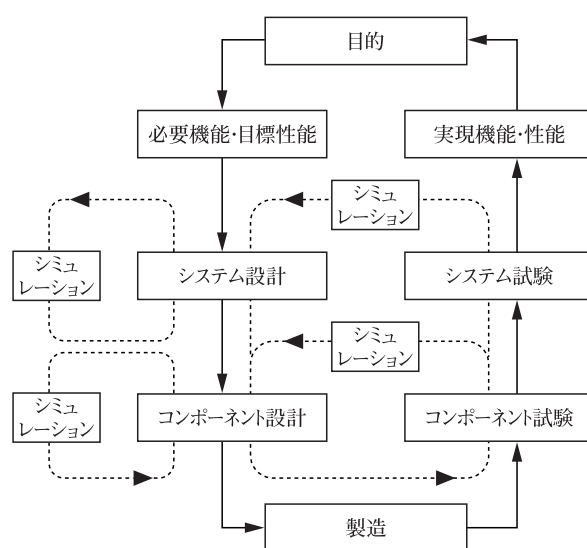


図1 製品開発へのシミュレーションの関わり

宮崎守泰 正員：シニア会員 三菱電機株式会社電子システム事業本部  
Moriyasu MIYAZAKI, Senior Member (Electronic Products and Systems Group,  
Mitsubishi Electric Corporation, Tokyo, 100-8310 Japan).  
電子情報通信学会誌 Vol.96 No.6 pp.380-385 2013年6月  
©電子情報通信学会 2013

一定の歩留りを見込むことが可能となる。

また、回路を構成する各々の要素の特性が変化しても総合特性の変化が少ないような設計ができれば、開発品の歩留りは向上する。この考えは、品質工学として知られている<sup>(1)</sup>。シミュレーション技術と品質工学を組み合わせることで、歩留りの良好な回路設計が期待できる。

### 2.3 現象分析と最適解の追求

半導体素子内部の動作など、外部からでは振舞いを把握できない場合、その部分をモデル化してシミュレータを構築することで内部における現象を分析でき、最適動作の実現に役立つ。例えば、半導体素子の内部動作には未知の部分も多いが、半導体素子の内部構造を模擬したデバイスシミュレータの働きにより、内部構造と動作メカニズムの対応が大分明らかになってきている。

## 3. シミュレーション技術の適用事例

ここでは、前章で述べたシミュレーション技術の役割に対応した具体的な事例として、マイクロ波回路、光回路、半導体素子、及びアンテナ設計への各種シミュレーション技術、シミュレータの適用例を紹介する。

### 3.1 マイクロ波回路

#### 3.1.1 受動回路

立体形状を有する中空の導波管回路の設計・開発に

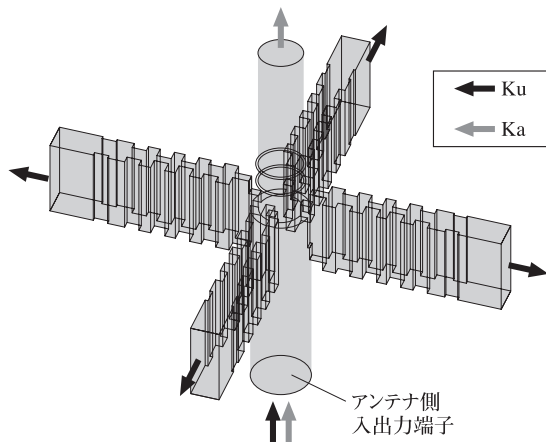


図2 直交2偏波 Ku/Kaバンド共用導波管給電回路 (文献(2)から引用)

### 用語解説

Cバンド、Kuバンド、Kaバンド 電波の周波数帯を分類するための表記方法の一つであり、Cバンドは4~8GHz、Kuバンドは12.4~18GHz、Kaバンドは26.5~40GHzをそれぞれ表す。

は、有限要素法やモード整合法による三次元電磁界シミュレーションが特に有用であり、その高い解析精度が開発期間の短縮に貢献している。図2の直交2偏波 Ku/Kaバンド<sup>(用語)</sup>共用導波管給電回路(Ortho-Mode Junction, 以下OMJ)を例に、高精度電磁界解析の適用例を示す<sup>(2)</sup>。本OMJは、衛星管制局アンテナの給電系における主要コンポーネントであり、二つの周波数帯域にて、右旋と左旋の円偏波信号、あるいは、直交する二つの直線偏波信号の分離機能を実現する6端子回路である。図3に、試作OMJのアンテナ側入出力端子におけるKuバンドの反射特性を示す。計算値(設計値)は実測値に対して一定の差異を生じているが、試作品の仕上がり寸法を解析モデルに反映させた計算値は実測値に近づき、計算精度の高さがうかがえる。なお、実測値のリップルは測定系の影響による。

次に、品質工学とシミュレーション技術の組合せの実例を示す<sup>(3)</sup>。品質工学では、製品の本来の働きを表す「機能」と製造ばらつきや使用環境などの「ノイズ」に着目し、ノイズを加えたときの機能のばらつきを評価す

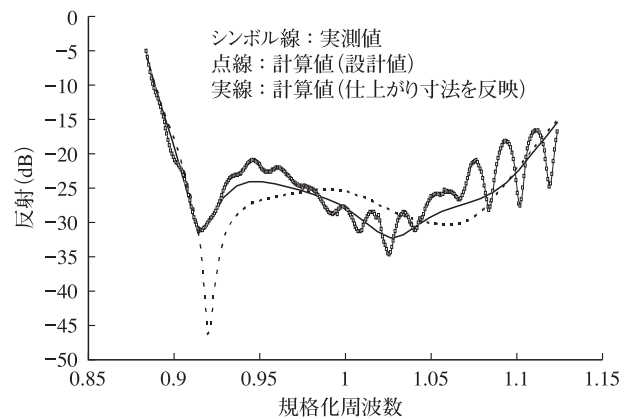


図3 試作OMJのアンテナ側入出力端子におけるKuバンドの反射特性 (文献(2)から引用)

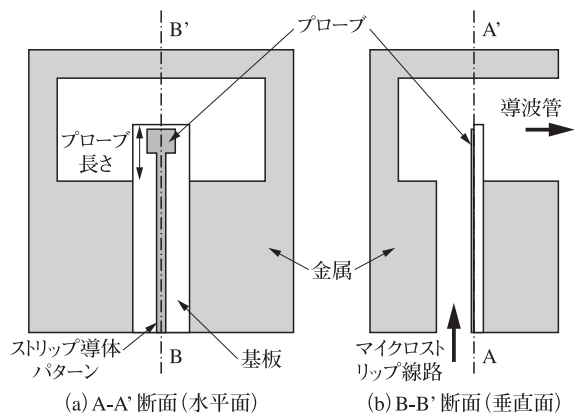


図4 導波管/マイクロストリップ線路変換器 (文献(3)から引用)

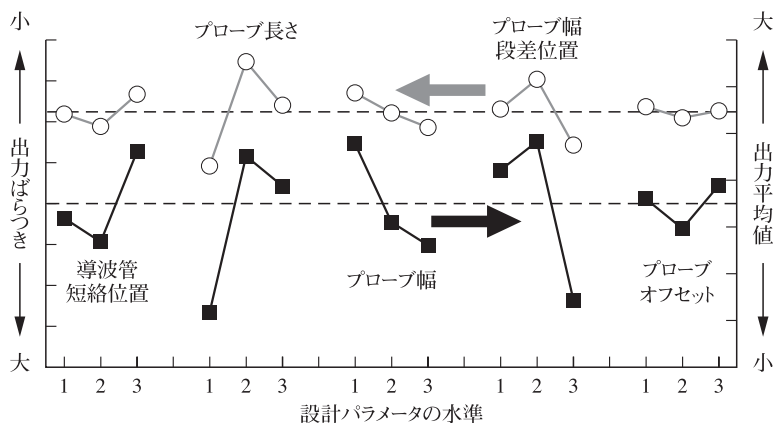


図5 要因効果図 (文献(3)から引用)

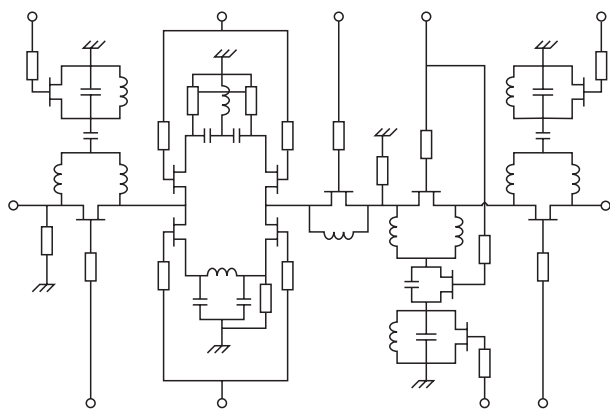


図6 Cバンド<sup>(用註)</sup>5 bit MMIC 移相器回路構成 (文献(4)から引用)

る。直交表で与えられる設計パラメータとノイズの組合せについてシミュレーションを行うことで、どの設計パラメータが機能のばらつきに影響を与えるのかを把握することができる。例えば、図4に示す導波管/マイクロストリップ線路変換器では、導波管モードの入力電力からマイクロストリップ線路モードの出力電力への変換を機能と定義する。使用周波数帯域幅を考慮するために周波数変動をノイズとして与えるとともに、設計パラメータのうちの一つである結合プローブの長さの製造ばらつきをノイズとして加えて、市販シミュレータによる三次元電磁界解析を行った。図5に示す要因効果図は、上述の解析結果から品質工学の手順に従って分析を行った結果であり、各設計パラメータの三つの水準値において、ノイズを加えたときの出力(機能)のばらつきと平均値を表している。ばらつきと平均値の両方に対して、結合プローブの長さが最も大きく影響していることが分かる。出力のばらつきを小さく、かつ平均値を大きくするには、ばらつきと平均値を個別に調整できるような新たな設計パラメータ(変換器構造)の導入が必要である。

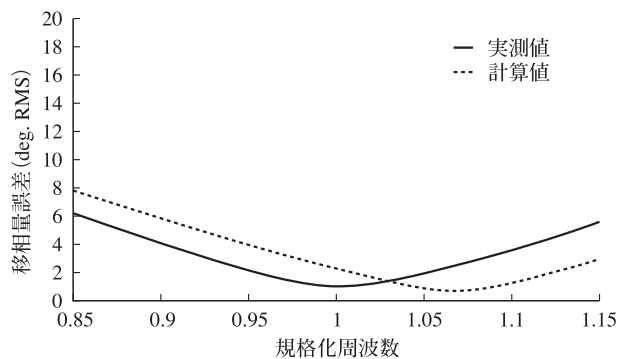


図7 MMIC 移相器の移相量誤差 シミュレーション値と実測値の比較 (文献(4)から引用)。

### 3.1.2 能動回路

図6に回路構成例を示すMMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) 移相器<sup>(4)</sup>のシミュレーションを行う場合、回路規模が大きい中で高い計算精度と速い計算速度を両立するため、スパイラルインダクタや線路近接部については電磁界シミュレータを適用し回路シミュレータとの組合せを図っている。図7に移相量誤差のシミュレーション値及び実測値の例を示す。中心周波数について数%の誤差があるものの、移相量誤差は、両者でよい一致が得られている。

図8<sup>(5)</sup>に能動素子であるFET (Field Effect Transistor) の大信号モデル等価回路を示す。本モデルは、自己発熱の効果及びトラップの効果を検討した高精度なモデルである。図9<sup>(5)</sup>に本モデルによる入出力特性を示す。デバイスは窒化ガリウム (GaN) を用いた GaN HEMT (High Electron Mobility Transistor), ゲート幅は 0.5 mm, 周波数は 9.6 GHz, バイアス条件は  $V_{dsq} = 30$  V,  $I_{dsq} = 100$  mA/mm である。計算結果と測定結果はよく一致しており、モデルの有効性が確認できる。発熱まで考慮したことで計算精度が向上した。

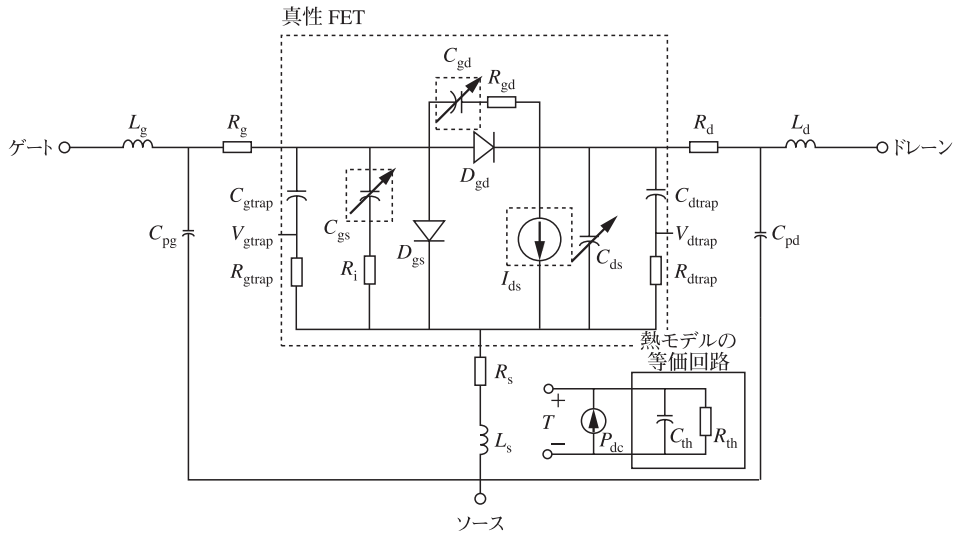


図8 FET 大信号モデル等価回路 (文献(5)から引用)

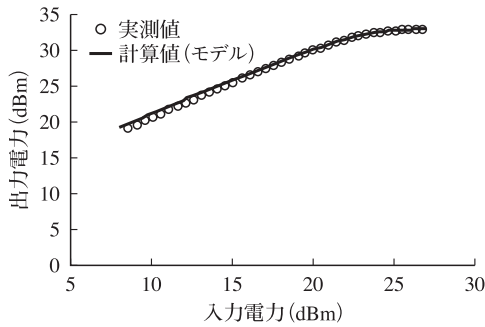


図9 FET の入出力特性 (文献(5)から引用)

レーザ媒質の利得による増幅効果を取り込んだシミュレータを開発し、レーザ装置の設計に適用した<sup>(6)</sup>。図10にシミュレーション方法を示す。

図11にシミュレーションを行ったレーザ発振器の構成例を示す。図中の受動 Q-SW は、レーザ光の強度に応じて吸収量に変化する強度スイッチであり、可飽和吸収体などで構成される。図12にレーザ発振器の出力ビームパターンを示す<sup>(7)</sup>。本シミュレータにより、設計段階においてレーザ装置特性を高精度に予測し、試作回数を減らすことで開発コストの低減に成功した。

### 3.2 光回路

レーザ発振器の解析へのシミュレーション技術の適用を紹介する。レーザ装置の開発には、共振器内の伝搬による回折、波面収差、偏光状態、利得分布の影響を考慮したシミュレーションが必要である。そこで、光線伝搬行列 (ABCD 行列) を用いた二次元フレネル伝搬に、

### 3.3 半導体素子

半導体素子へのシミュレーション技術の適用例として、GaN HEMT を取り上げ、信頼性や高周波特性に大きく影響するゲート漏れ電流のシミュレーション技術を紹介する<sup>(8),(9)</sup>。トランジスタ内部の電流の振舞いは、内部のポテンシャル、電界、電子濃度などが複雑に絡み合った現象であるが、素子の本質的な領域 (例えばゲー

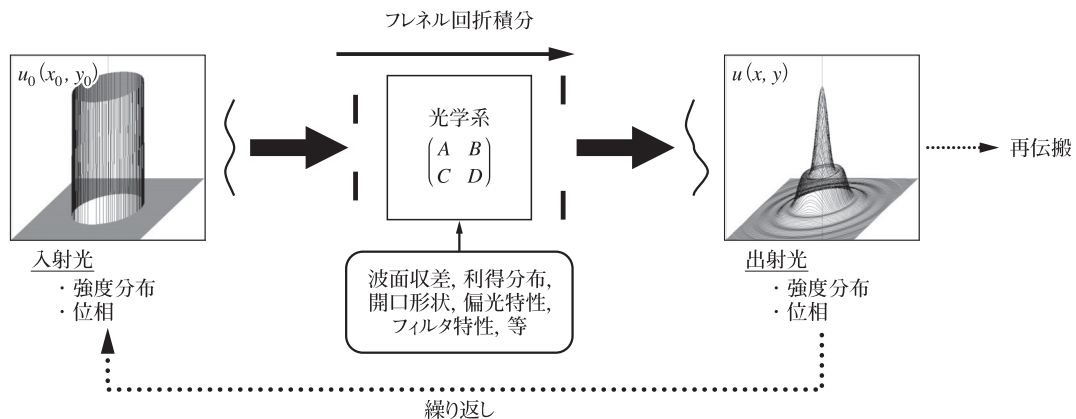


図10 レーザ発振器のシミュレーション方法 (文献(6)から引用)

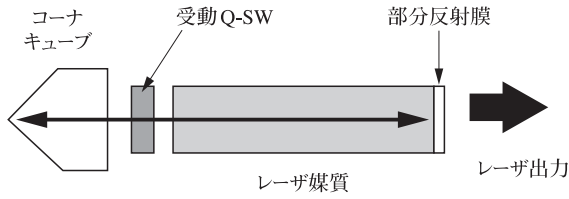
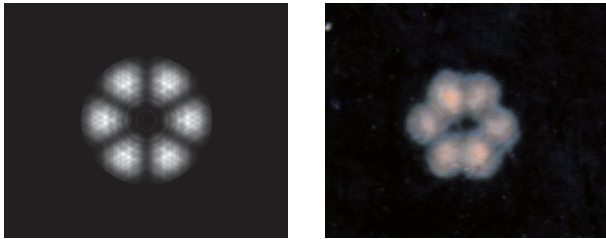


図 11 レーザ発振器の構成 (文献(7)から引用)



(a)シミュレーション (b)実測

図 12 出力ビームパターン (文献(7)より引用)

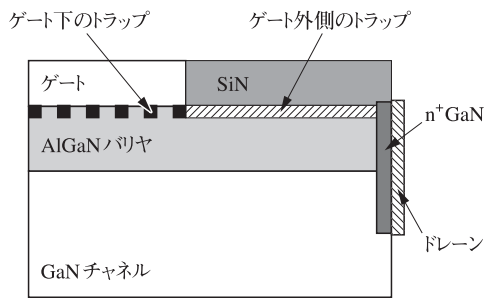
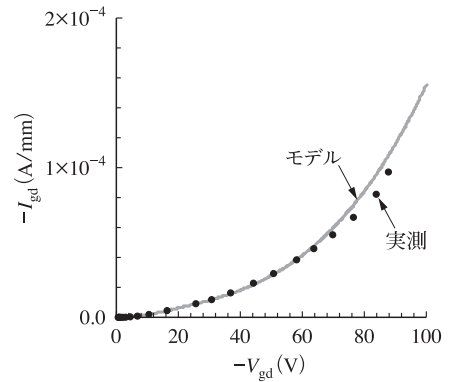


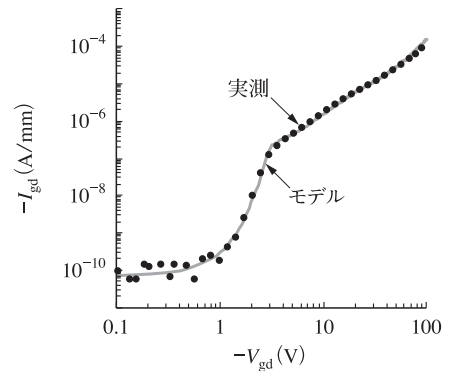
図 13 GaN HEMT ゲート漏れ電流の物理モデル (文献(8), (9)から引用)

ト電極)はマイクロメートル単位と微細であり、内部の現象を直接測定することは容易ではない。一方で、トランジスタの物理モデルを構築できれば、ポテンシャルなどの内部パラメータと電流値などの外部特性を関連付けられる。

図 13 は GaN HEMT に適用したゲート漏れ電流の物理モデル (断面模式図) である。GaN HEMT の特徴である高電圧動作を模擬するため、AlGaIn バリア表面に 2 種類のトラップ (Donor thin layers) を設定した二次元構造としている。図 14 に、GaN HEMT ゲート漏れ電流  $I_{gd}$  の特性を、実測とモデルによるシミュレーションの結果を比較しながら示す。横軸はゲート電圧  $V_{gd}$  であり、リニア軸とログ軸の両方で示している。リニア軸では  $V_{gd}$  の絶対値が大きい領域、ログ軸では小さい領域に注目すると、いずれの領域においてもモデルによる計算値は実測値をほぼ再現できている。本シミュレーション結果により半導体素子内部の振舞いと外部特性が関係付けられ、トラップへの対応の大きな手掛かりを導き出



(a)リニア軸



(b)ログ軸

図 14 GaN HEMT ゲート漏れ電流特性 (文献(8), (9)から引用)

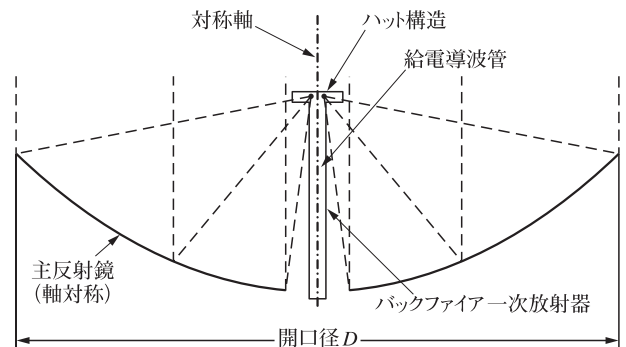


図 15 アンテナの構成 (文献(10)から引用)

せる。

### 3.4 アンテナ

Ku バンドの衛星通信を利用した船上地球局システムに採用された反射鏡アンテナ<sup>(10)</sup>の設計例を示す。このアンテナは、世界各地で利用されるため、国内外の規格・法規に準拠すべく要求条件は非常に厳しく、アンテナ設計には、高精度なシミュレーション技術が不可欠である。アンテナの概略構成を図 15 に示す。バックファイア一次放射器は給電導波管と誘電体で支持されたハッ

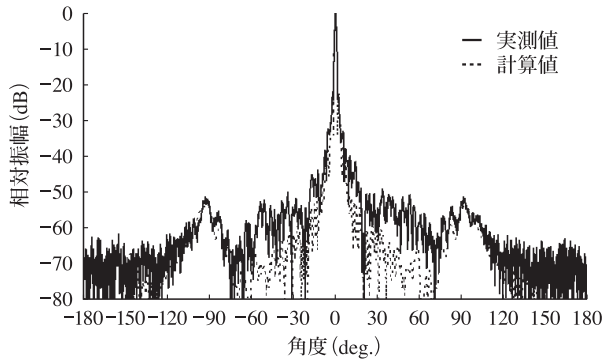


図 16 放射パターン (送信帯) (文献(10)から引用)

ト構造, 給電導波管の外側表面上にコルゲーション, 開口付近にチョーク, ハット構造には $\lambda/4$ の深さの溝を有する. このような複雑な構造を有する一次放射器の設計のため, Ansoft HFSS (有限要素法による電磁界シミュレータ) を利用し, 主反射鏡を介した放射パターンは自社開発シミュレータ (物理光学法) で解析した.

図 16 に放射パターンの設計値と測定値を示す. 高精度なシミュレーション技術の活用により, 最低限の試作で低サイドローブレベル特性を実現し, Eutelsat の標準アンテナ規格 Standard M<sup>(11)</sup> を満足した.

#### 4. シミュレータへの今後の期待

これまで述べてきたとおり, 産業界におけるマイクロ波・光分野の回路やデバイスの研究・開発を遂行する上で, シミュレータには, 更なる高精度化と適用範囲の拡大が求められると同時に, 種々の設計技術や評価技術との融合による設計技術への進化が期待される.

#### 文 献

- (1) 立林和夫, 入門タグチメソッド, 日科技連, 東京, 2004.
- (2) 湯川秀憲, 小林亮介, 吉田幸司, 水野友宏, 大和田 哲, 宮崎守泰, “高出力用直交 2 偏波 2 周波数帯共用導波管給電回路の試作評価,” 2013 信学総大, no. C-2-51, March 2013.
- (3) 田原志浩, 中川隆文, 大和田 哲, 宮崎守泰, “品質工学を用いた導波管/マイクロストリップ線路変換器のロバスト設計に関する一検討,” 2013 信学総大, no. C-2-65, March 2013.
- (4) M. Hangai, M. Hieda, N. Yunoue, Y. Sasaki, and M. Miyazaki, “S-and C-Band Ultra-compact phase shifters based on all-pass networks,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 58, no. 1, pp. 41-47, 2010.
- (5) H. Otsuka, T. Oishi, K. Yamanaka, M. Thorsell, K. Andersson, A. Inoue, Y. Hirano, and I. Angelov, “Semi-physical nonlinear circuit model with device/physical parameters based on HEMTs,” International Journal of Microwave and Wireless Technologies, vol. 3, no. 1, pp. 25-33, 2011.
- (6) 柳澤隆行, 平野嘉仁, “コーナーキューブプリズムを用いたレーザー共振器の発振モードの検討,” レーザー学会学術講演会第 25 回年次大会, no. 21aVII-10, 2005.
- (7) 柳澤隆行, 秋野陽介, 平野嘉仁, “測距装置用小型アイセーフ Er. Glass パッシブ Q スイッチレーザーの開発,” 第 24 回レーザーセンシングシンポジウム, no. A-1, pp. 7-10, 2005.
- (8) T. Oishi, K. Hayashi, Y. Yamaguchi, H. Otsuka, K. Yamanaka, M. Nakayama, and Y. Miyamoto, “Mechanism study of gate leakage current for AlGaIn/GaN HEMT structure under high reverse bias by TSB model and TCAD simulation,” Extended Abstracts of the SSDM2012, pp. 907-908, Kyoto, Japan, Sept. 2012.
- (9) Y. Yamaguchi, K. Hayashi, T. Oishi, H. Otsuka, T. Nanjo, K. Yamanaka, M. Nakayama, and Y. Miyamoto, “Simulation study and reduction of reverse gate leakage current for GaN HEMTs,” CSICS2012, session L. 2, California, Oct. 2012.
- (10) 山本伸一, 籾村修次, 水野友宏, 稲沢良夫, 佐藤裕之, 土谷牧夫, “バックファイア一次放射器を用いた衛星通信用小型反射鏡アンテナ,” 信学技報, SAT2012-30, pp. 73-77, Aug. 2012.
- (11) Eutelsat, Standard M EESS 502 Issue 12-Rev. 0, “Earth station minimum technical and operational requirements,” June 2009.

(平成 25 年 2 月 15 日受付 平成 25 年 3 月 4 日最終受付)



みやざき もりやす  
宮崎 守泰 (正員: シニア会員)

昭 57 千葉大・工・電気卒. 昭 59 同大学院電子工学専攻修士課程了. 同年三菱電機株式会社入社. 以来, アンテナ給電回路, マイクロ波回路の研究開発に従事. 現在, 同社情報技術総合研究所光電波・通信技術部門統轄. 博士 (工学). 平 22 年度電気科学技術奨励賞受賞. IEEE シニア会員.