

電磁波解析ソフトウェアPoynting

Electromagnetic Wave Simulation Software “Poynting”

あらまし

近年、コンピュータシミュレーションによって電磁波の挙動を解析する取組みが非常に活発である。実際、エレクトロニクス分野の研究開発においては、期間短縮や費用削減を図る目的で、電磁波解析ツールの導入が不可欠になってきている。これには、移動体通信の急速な普及に伴ってマイクロ波デバイスの研究開発が活発になっている、電子回路の電気信号が高速化してその電磁波的な振舞いを考慮する必要が生じている、電子機器からの漏えい電磁波の対策が必要になっている、といった背景がある。富士通では、このような分野で電磁波の挙動をシミュレーションするニーズに応えるべく、電磁波解析ソフトウェアPoyntingの開発、販売およびサポートを行っている。

本稿では、Poyntingの基本機能、並列計算機能、CAD連携機能、回路シミュレータ連携機能について解説するとともに、Poyntingを用いたパッチアンテナ、ミアンダライン、プリント回路基板の計算事例を紹介する。

Abstract

The analysis of electromagnetic behavior by computer simulation has become quite active in recent years. In the research and development of electronic devices, electromagnetic analysis tools have become indispensable for shortening development times and reducing costs. This is because the research and development of microwave devices has intensified with the rapid spread of mobile communications. Moreover, as the frequencies of electrical signals in electronic circuits have risen, it has become necessary to examine electromagnetic behavior and deal appropriately with the leakage of electromagnetic waves. To meet this simulation need, Fujitsu has developed “Poynting,” an electromagnetic wave simulation software package that it markets and supports. This paper describes Poynting’s basic functions, parallel computation function, computer-aided design data conversion functions, and function for linking its simulation with a circuit simulator and presents Poynting calculation examples for a patch antenna, meander line, and printed circuit board.



並木武文
(なみき たけふみ)

計算科学ソリューション
統括部 所属
現在、電磁波解析ソフト
ウェアの開発に従事。



巨智部陽一
(こちべ よういち)

計算科学ソリューション
統括部 所属
現在、電磁波解析ソフト
ウェアの開発に従事。



笠野恭利
(かきの たかし)

計算科学ソリューション
統括部 所属
現在、電磁波解析ソフト
ウェアの開発に従事。



小田恭裕
(おだ やすひろ)

計算科学ソリューション
統括部 所属
現在、電磁波解析ソフト
ウェアの開発に従事。

まえがき

近年、コンピュータシミュレーションによって電磁波の挙動を解析する取組みが非常に活発である。実際、エレクトロニクス分野の研究開発においては、期間短縮や費用削減を図る目的で、電磁波解析ツールの導入が不可欠になってきている。これには、移動体通信の急速な普及に伴ってマイクロ波デバイスの研究開発が活発になっている、電子回路の電気信号が高速化しその電磁波的な振舞いを考慮する必要が生じている、さらに、電子機器からの漏えい電磁波が増加しその対策が必要になっている、といった背景がある。

富士通では、このようなニーズに応えるべく、電磁波解析ソフトウェアPoynting⁽¹⁾の開発、販売およびサポートを行っている。本稿では、Poyntingの基本機能、並列計算機能、CAD連携機能、回路シミュレータ連携機能について解説するとともに、Poyntingを用いたパッチアンテナ、ミアンダライン、プリント回路基板の計算事例を紹介する。

なお、Poyntingには、電波解析版と光波解析版があるが、本稿では前者について述べる。後者については、参考文献⁽²⁾を参照されたい。

Poyntingの基本機能と適用分野

本章では、Poyntingの採用している計算手法やシステム構成などの基本機能と適用分野について述べる。

● 計算手法

電磁波解析とは、電磁波の挙動を記述するMaxwell方程式を数値計算によって解くことである。Poyntingは、電磁波解析の手法としてFDTD (Finite Difference Time Domain) 法⁽³⁾⁽⁷⁾を採用している。FDTD法は、解析領域を直方体の格子に分割し、各格子に電磁界成分を図-1のように配置する。この微小直方体は、発明者の名称からYee格子と呼ばれる。また、計算する物理量（ここでは電界と磁界の各成分）が異なる位置で定義されていることから、スタッガード・セルと呼ばれることもある。

各格子および各電磁界成分はインデックスで特定される。

図-1の電磁界に対して、Maxwell方程式を時間と空間について差分表現する。例えば、電界のX成分

と磁界のY、Z成分から成る方程式(1)は、式(2)のように差分化される。

$$\varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad \dots (1)$$

$$E_x^{n+1}(i+1/2, j, k) = \frac{2\varepsilon(i, j, k) - \sigma(i, j, k)\Delta t}{2\varepsilon(i, j, k) + \sigma(i, j, k)\Delta t} \cdot E_x^n(i+1/2, j, k) + \frac{2\Delta t}{2\varepsilon(i, j, k) + \sigma(i, j, k)\Delta t} \cdot [\{H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2, k) - H_z^{n+1/2}(i+1/2, j-1/2, k)\} / \Delta y(j) - \{H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k+1/2) - H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k-1/2)\} / \Delta z(k)] \quad \dots (2)$$

式(2)において、 E は電界、 H は磁界、 ε は誘電率、 σ は導電率、 Δt は時間刻み幅、 Δy 、 Δz はそれぞれY、Z方向の格子幅、 n は時刻のインデックス、 i 、 j 、 k はそれぞれX、Y、Z座標のインデックスである。

この差分式は、電界のX成分をその周囲の磁界のY、Z成分で更新することを意味している。同様に、ほかの電磁界成分についても差分化し、電界と磁界を交互に更新していくことにより電磁界の時間変化が算出される。計算の過程では、設定した媒質条件、境界条件、励振条件が満たされるように処理が行われ、電磁界の時系列データが出力される。

● システム構成

Poyntingのシステム構成を図-2に示す。Poyntingは、電磁波解析を実行するSolverと、その出力データを解析するAnalyzer、プレ処理・ポスト処理を行うグラフィカルユーザインタフェース(GUI)から成る。

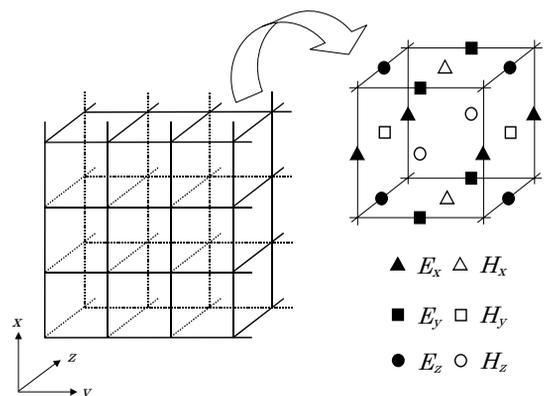


図-1 FDTD法における電磁界配置
Fig.1-Electromagnetic field arrangement for FDTD method.

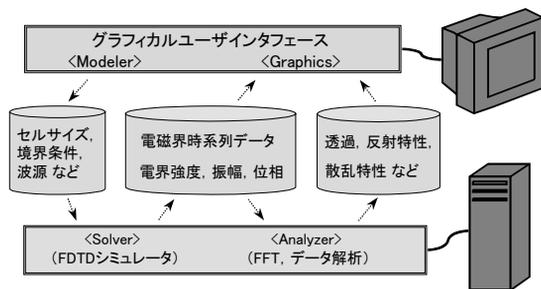


図-2 Poyntingのシステム構成
Fig.2-Poynting system configuration.

GUIは、プレ処理をするModelerとポスト処理をするGraphicsから成る。前者は、計算モデルの作成、差分格子の自動生成、境界条件・媒質条件・波源の設定などをポップアップウィンドウ形式で行う機能であり、入力データの作成を容易にする。後者は、算出された数値データを2, 3次元グラフやアニメーションで可視化する機能であり、計算結果の確認や評価を効果的にするとともに、直感的な理解を支援する。

Solverは、FDTD法に基づいた数値計算を実行し、解析領域内の電磁界各成分の時系列データやあらかじめ指定した部位の電圧電流の時間波形を算出する。規模の大きい計算の実行には、多大なメモリと長大な計算時間を要することがしばしばあり、ハイスペックなPCが必要とされる。

Analyzerは、Solverの出力したデータを更に2次的に解析する機能で、フーリエ変換によって時間領域データを周波数領域に変換したり、時間的・空間的な積分処理をしたりして、Sパラメータ、インピーダンス、放射パターン、放射スペクトルなどの実務で必要とされるデータを算出する。

なお、SolverとAnalyzerは、シングルCPUで実行するスタンドアロン版と、PCクラスタのようなマルチCPUで実行する並列版とがある。また、オプションとして、基板CADや3次元CADのデータをインポートする機能や、回路シミュレータと直接連携する機能がある。これらについては、詳細を後述する。

● 適用分野

Poyntingは、主に次のような分野で利用される。

- (1) 各種プリント回路基板のシグナルインテグリティ、パワーインテグリティ、電波不要輻射、静電気放電現象の解析

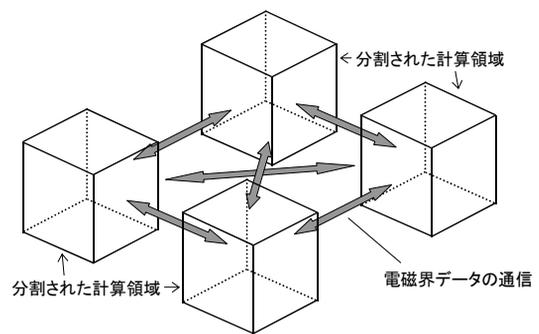


図-3 並列計算のイメージ
Fig.3-Concept of parallel computation.

- (2) 各種アンテナの入力インピーダンス、放射パターン、利得、軸比の解析
- (3) 各種マイクロ波コンポーネントのSパラメータの解析
- (4) 様々な物質、物体の電波吸収特性や電波遮へい特性の解析

並列計算機能

Poyntingの特長の一つに、PCクラスタを使用した並列計算機能がある。PCクラスタは、複数のPCをネットワーク接続して並列分散処理を行うシステムで、比較的安価で構築できる上、アプリケーションによっては高い性能を発揮することが可能である。

図-3は、4CPUのPCクラスタを用いた場合の並列計算のイメージである。計算領域をCPUの数に合わせて分割し、各CPUは分割された一つの領域のみを計算する。また、領域境界付近の電磁界データは各CPU間で通信される。FDTD法の場合、この通信データ量が少ないため、スケーラビリティ(台数効果による計算速度向上の度合い)が出やすい。

Poyntingの並列計算のスケーラビリティを図-4に示す。計算環境は、CPU : Xeon 3.8 GHz, ネットワーク : InfiniBand, OS : Red Hat Enterprise Linuxで、並列化ライブラリにはFJMPI^(注1)を使用している。

計算速度向上については、CPU数を1としたときの計算速度に対する比を示している。図-4に示したように、CPU数の増加に対して良好な速度向上が

(注1) 富士通が開発したMPI (Message Passing Interface)。MPIは、計算機間でデータ交信しながら並列処理するプログラムを実現するためのインタフェース。

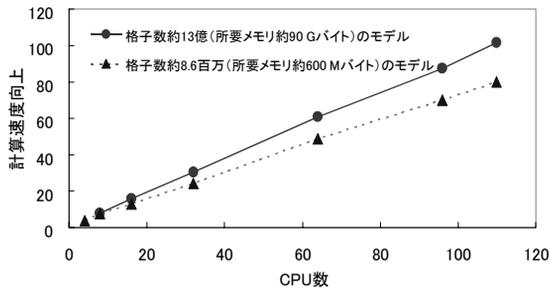


図-4 並列計算のスケーラビリティ
Fig.4-Scalability of parallel computation.

実現できており、並列計算性能が非常に高いことが分かる。

このような並列計算機能を用いれば、1台のPCでは多大な計算時間を要していた問題が短時間で計算できるようになる。また、従来は計算不可能と考えられていたような大規模問題が、実用的な時間で計算できるようになる。

CAD連携機能

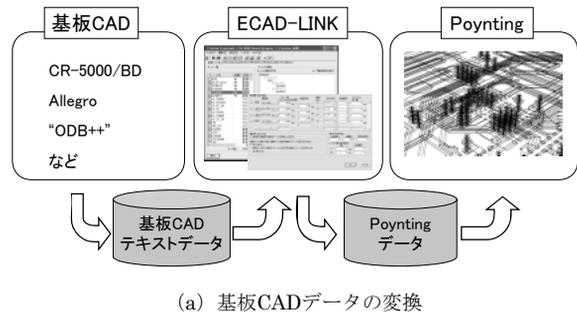
製品設計の段階で効率的に計算モデルを作成するためには、CADデータをモデルデータに変換する必要がある。Poyntingは、基板CADのデータを変換するオプション機能であるECAD-LINKと3次元CADのデータを変換するオプション機能であるMCAD-LINKを用意している。

ECAD-LINKが対応しているのは、CR-5000/BD, Allegro, およびODB++形式のデータを出力可能なCADである。MCAD-LINKが対応しているのは、STL形式のデータを出力可能なCADである。データ変換のイメージを図-5に示す。

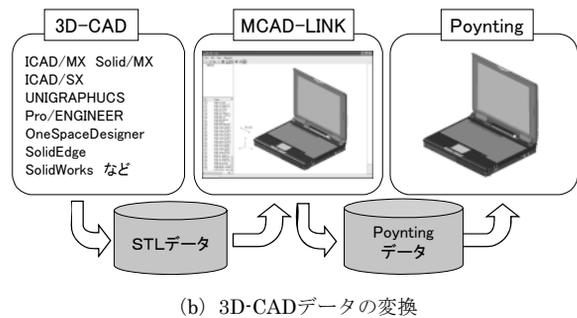
回路シミュレータ連携機能

Poyntingの持つ、回路シミュレータと直接連携する機能を用いれば、プリント回路基板において、配線部の電磁波的な現象と半導体素子の非線形動作を統一的に解析することができる。

電磁波と回路の連携シミュレーションの方法を図-6に示す。FDTD法で用いる差分格子の一边に、2端子の回路素子が設定されていると仮定する。FDTD法では、空間の電界 (E) と磁界 (H) が交互に計算されるが、磁界が算出されてから電界が算出されるまでの1サイクルは次のように進められる。



(a) 基板CADデータの変換



(b) 3D-CADデータの変換

図-5 CADデータの変換機能
Fig.5-Concept of CAD data conversion.

電磁波シミュレータ (Poynting)

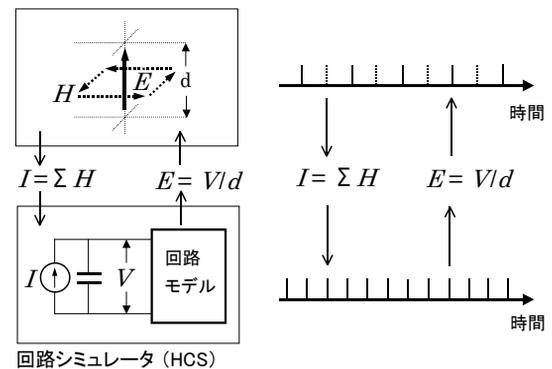


図-6 電磁波と回路の連携解析の方法
Fig.6-Numerical method for linking simulations of electromagnetic and circuit simulators.

まず、通常のFDTD法の手続きによって空間の磁界が計算される。つぎに、素子周囲の磁界から素子を流れる電流値 (I) が算出され、回路シミュレータの電流源に設定される。続いて回路解析が実行され、素子の端子間電圧 (V) が計算される。つぎに、素子が配された差分格子辺の電界値が端子間電圧から算出される。それ以外の電界値は通常のFDTD法の手続きによって計算される^{(8),(9)}

電磁波と回路の連携解析の例を図-7に示す。図-7

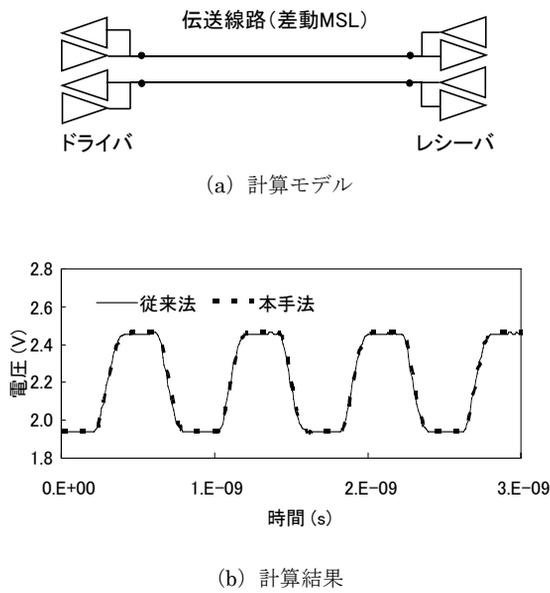


図-7 電磁波と回路の連携解析の例
Fig.7-Example of calculation results when linking simulation.

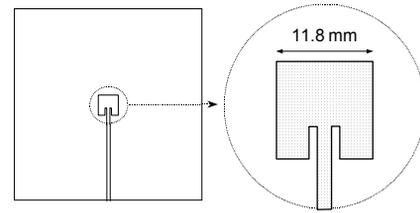
(a) のように、CMOSトランジスタから成るドライバとレシーバを差動MSL (Microstrip Line) で接続し、クロック信号を伝送させている。ドライバとレシーバの回路動作は回路シミュレータで、差動MSLの伝送特性は電磁波シミュレータで計算する。図-7 (b) に、レシーバの電圧波形を示す。実線は従来法（線路を梯子回路で近似する方法）、破線は本手法による計算結果である。両者は良好に一致しており、本手法の妥当性が確認できる。

計算事例

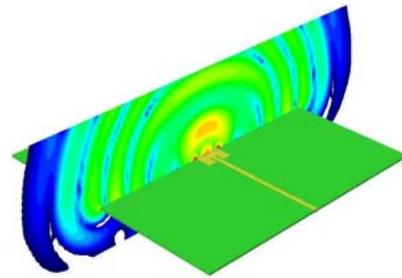
本章では、Poyntingを用いた計算事例を示す。

● パッチアンテナ

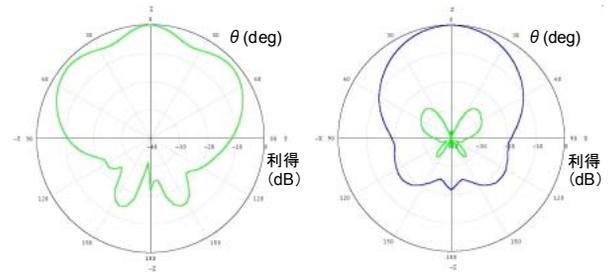
図-8は、パッチアンテナの計算事例である。図-8 (a) のように、比誘電率が3.274の基板上に形成した一辺11.8 mmの方形パッチに、MSL給電するモデルを作成し、MSL端部よりガウシアンパルスを印加する。図-8 (b) にパッチから電磁波が放射する様子を、図-8 (c) に放射パターンを示す。ここで、放射電磁界の計算には、FDTD法によって算出された近傍電磁界を、遠方電磁界に変換する機能を使用している。また、放射パターンは、測定値と±1 dB程度以内の差異で一致することを確認している⁽¹⁰⁾



(a) パッチアンテナモデル (平面図)



(b) 放射電磁界のスナップショット



(c) 放射パターン

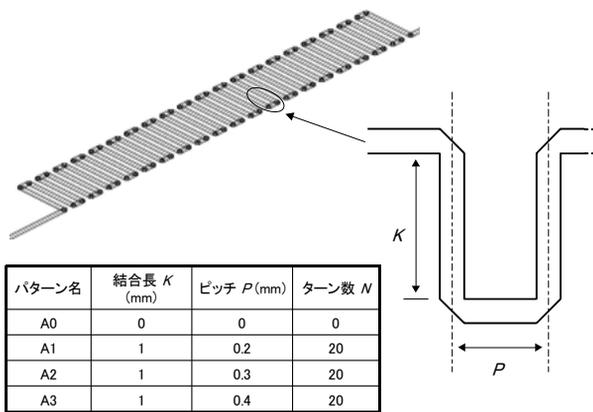
図-8 パッチアンテナの計算事例
Fig.8-Calculation results for patch antenna.

● ミアンダライン

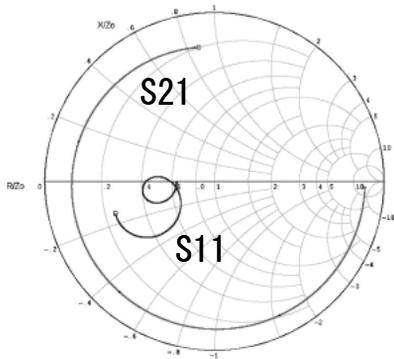
図-9は、ミアンダライン（折れ曲がり形状のMSL）の計算事例である。図-9 (a) のように、ミアンダラインのピッチを変化させた3通り（パターン名：A1～A3）のモデルについて、Sパラメータを算出している。図-9 (b) は、Sパラメータをスミスチャート表示した結果である。表-1に、位相の計算値と実測値を比較した結果を示す。ここでは、折れ曲がり形状がない場合（直線のMSL、パターン名：A0）に対する相対値で示している。計算値と実測値が良好に一致していることを確認できる。

● プリント回路基板

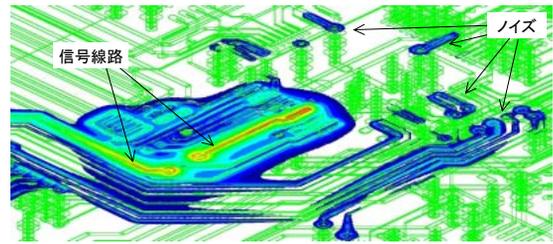
プリント回路基板のノイズ問題は、その種類、原因、メカニズムが多岐にわたり、かつ相互に関連しているため、現象の再現や対策の効果をシミュレー



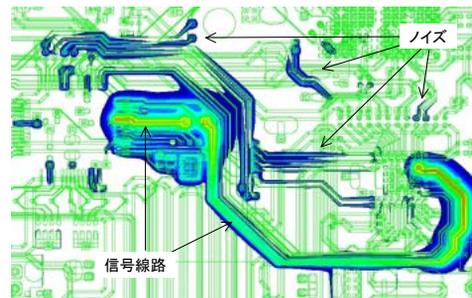
(a) ミアンダラインの計算モデル



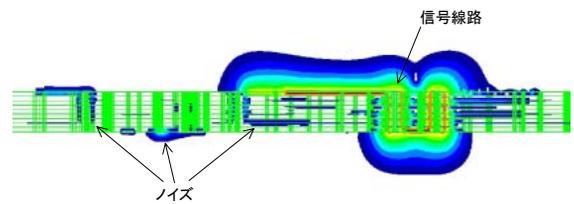
(b) スミスチャート



(a) 電界強度/鳥かん図



(b) 電界強度/平面図



(c) 電界強度/断面図

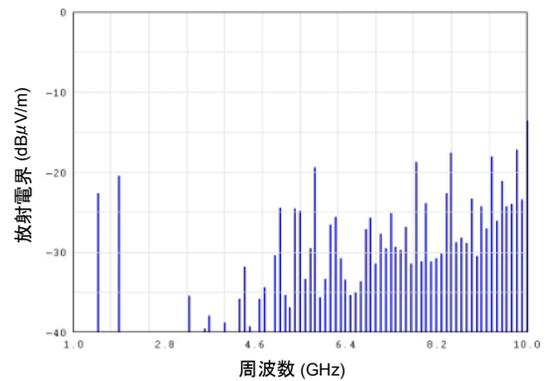
図-9 ミアンダラインの計算事例
Fig.9-Calculation results for meander line.

表-1 ミアンダラインの位相相対値
(1 GHzでの相対値) の比較

	A1/A0	A2/A0	A3/A0
計算値 (%)	82.4	88.1	94.2
測定値 (%)	86.5	91.5	92.1

シオンするためには、基板全体を解析する必要がある。一方、基板を丸ごとFDTD法で電磁波解析することは、その計算規模が膨大であることから、従来は実用上不可能と考えられていた。しかし近年、前述したように、PCクラスタを用いた並列計算をすることで十分可能になってきている。

ここでは、サイズ185 mm×87 mm×2 mm、層数10、配線幅約100 μmの基板を解析した例を示す。計算モデルは、基板CADデータをインポートして作成した。領域分割による格子数は約2.1億、時間ステップ数は25 000 (物理的解析時間は1.3 ns) とした。ある配線の一端に信号源を、他端に終端抵抗



(d) 放射スペクトル

図-10 プリント回路基板の計算事例
Fig.10-Calculation results for PCB.

を設定し、台形波を印加した。周囲の配線はすべて整合終端した。

基板の電界分布を図-10 (a) ~図-10 (c) に示す。信号源を設定した配線付近の電界強度が強いことや、

周囲の配線にノイズが乗っている様子、さらに、電源-グラウンド間の絶縁層を伝わってノイズが拡散する様子が確認できる。これは、ある時刻のスナップショットであるが、アニメーションで描画することもできる。また、特定周波数の強度分布も算出可能である。

10 m法^(注2)に対応した放射スペクトル（水平偏波）を図-10（d）に示す。これは、アンテナと同様に、基板周囲の近傍電磁界を遠方電磁界に変換する機能を用いている。

以上のシミュレーションを32 CPUのPCクラスタ（CPU：Xeon 3.6 GHz）で実行した場合、計算時間とCPUあたりの所要メモリは、それぞれ3.75時間と542 Mバイトであった。このレベルの計算コストであれば、製品開発の過程において、本シミュレーションを有効活用できると考えられる。

む す び

本稿では、電磁波解析ソフトPoyntingの概要、機能、計算事例を紹介した。電磁波解析への期待は今後もますます増大し、対処すべき問題はさらに複雑化・多様化・大規模化していくと考えられる。このようなニーズに応えるべく、これからもPoyntingの機能拡張を実施していく予定である。

参 考 文 献

(1) 富士通：汎用3次元電磁波解析ソフトウェア Poynting製品ホームページ。

<http://jp.fujitsu.com/solutions/hpc/app/poynting/>

(2) 長谷川信也ほか：光ナノテクノロジー分野での解析

(注2) 国際規格に則り、被測定装置から10 mの距離にあるアンテナで機器からの電磁波を測定する方法。

を支援する光シミュレータ。 *FUJITSU*, Vol.56, No.4, p.299-306 (2005).

- (3) K. S. Yee : Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media . *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol.14, p.302-307 (1966).
- (4) A. Taflove : Computational electrody-namics. MA, Artech House, 1995.
- (5) T. Namiki : A new FDTD algorithm based on alternating direction implicit method. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.47, No.10, p.2003-2007 (1999).
- (6) T. Namiki : 3-D ADI-FDTD method - Unconditionally Stable Time-Domain Algorithm for Solving Full Vector Maxwell's Equations. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.48, No.10, p.1743-1748 (2000).
- (7) T. Namiki et al. : Accuracy Improvement Technique Applied to Non-Uniform FDTD Cells Using High-Order Implicit Scheme. *IEEE AP-S Digest*, 2001, p.56-59.
- (8) M. Piket-May et al. : FD-TD Modeling of Digital Signal Propagation in 3-D Circuits With Passive and Active Loads. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* Vol.42, No.8, p.1514-1523 (1994).
- (9) 並木武文：電磁波解析と回路解析の時間領域における融合シミュレーション。日本シミュレーション学会第18回計算電気・電子工学シンポジウム論文集，p.261-264, 1997.
- (10) T. Namiki et al. : Improving radiation-pattern distortion of a patch antenna having a finite ground plane. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol.51, No.3, p.478-482 (2003).