

デジタルAV事業分野におけるEMC設計技術

EMC Design Technology for Development of Digital AV Products

房 安 浩 嗣
Hirotsugu Fusayasu

大 迫 周 平
Shuhei Oosako

廣 瀬 一 郎
Ichiro Hirose

要 旨

製品の高性能化・小型化が進展しているデジタルAV機器開発では、信号周波数の高速化に伴い、輻射ノイズに代表されるEMC（Electromagnetic Compatibility）問題に対する対策難易度が向上してきている。

本稿では、従来のEMC対策手法から、設計上流で製品品質を設計し、後戻り工数を削減できるように、FDTD（Finite Difference Time Domain）法による数値解析技術、近傍電磁界の測定分析技術、EMCチェックの判定技術からなるEMC設計技術を開発し、薄型TVやDSC（Digital Still Camera）といったデジタルAV機器へ適用したので報告する。

Abstract

In the development of digital AV equipment, high performance and miniaturization of products are progressing and countermeasures for Electro-Magnetic Compatibility (EMC) problems caused mainly by radiation noise are getting difficult. In this paper, to realize higher quality in the upstream processes of the design and to reduce backtracking, EMC design technologies were developed that consist of numerical analysis technology by the Finite Difference Time Domain (FDTD) method, measurement analysis technology for the surrounding electromagnetic field, and EMC design rules organized based on past technical know-how. This technology is applied to the flat-panel TVs and Digital Still Cameras (DSC).

1. はじめに

AV機器のデジタルネットワーク化の進展と、ブルーレイディスクや地上デジタル放送に代表される映像ソース源の高画質化によって、機器には著しく高い処理能力が求められ、LSIの動作周波数の高速化が進んでいる。また、同時に動作電圧の低レベル化および機器の小型化が進んでいる。近年、これに伴って電子機器やシステム間の電磁妨害波によって電子機器の故障や誤動作を起こすことが問題となっている。そこで、電子機器などに対し、EMC（電磁両立性：Electromagnetic Compatibility）対策を施すことが必要となっている¹⁾。

プリント基板および機器の高速・高密度化に伴って、ノイズ源がクロストークしアンテナ化する配線が増えて輻射ノイズが増大するため、EMC対策の難易度が高くなっている。従来のEMC対策設計ではノイズ源がクロストークを起こしている配線部分や2次放射源のアンテナとなっている配線の究明に時間がかかり、その対策にはプリント基板の再設計や機構部品の追加が発生し、開発期間の長期化とコスト増加を引き起こしている。

そこで、筆者らは従来の対策手法から、設計上流で製品品質を設計し、後戻り工数を削減できるように3つの要素技術からなるEMC設計技術を開発し、これらの技術を薄型TVやDSCといったデジタルAV機器へ適用した。

まず、第2章で従来のEMC設計における課題を述べる。第3章で1つ目のアプローチとして、クロストーク発生箇

所を特定するための数値解析技術を説明する。第4章で2次放射源のアンテナを特定するための測定分析技術を、第5章でクロストーク発生と2次放射源となる配線のアンテナ化を設計段階で防ぐための設計ルールのチェック技術を紹介し、第6章で本技術の成果をまとめる。

2. EMC設計における課題

EMC設計では、ノイズ経路となるプリント基板の配線が数千以上もあってそのリターン経路は複雑である。機器全体のノイズ経路となるとさらに複雑度は増すため、空間のおよび線路的な電磁結合を予測することが困難である。

そこで、数値解析および測定分析による可視化技術と一般的なEMC設計ルールを遵守した設計のためのEMCチェック技術を検討した。

数値解析技術では、従来、30 MHz～1 GHzといった広帯域かつ前述の複雑なプリント基板の大規模電磁界問題を解くことが困難であった。そこで、クラスタPCからなる並列計算環境構築によるプリント基板CAD（Computer Aided Design）と連動したFDTD法²⁾ベースの基板まるごとEMC解析および3DCAD（3 Dimension CAD）と連動した筐体（きょうたい）EMC解析技術を開発した。

測定評価技術では、従来から市販の測定装置でプリント基板近傍の電磁界の強弱は可視化できたが、EMC対策につながる分析までは困難であった。そこで、近傍電磁

界分布から対策手法を導く測定分析技術を構築した。

EMC設計ルールチェック技術では、従来から市販のツールでルールを遵守できていない箇所の抽出はできたが、エラー数が膨大となり、OK/NGの判定が困難であった。そこで、回路図CADおよびプリント基板CADと連動したEMC設計ルールチェックの判定技術を開発した。

3. EMC問題の数値解析技術

数値解析技術として、物理現象を表現する基礎方程式を空間、時間で離散化する数値解析手法の選定と、年々レベルアップする計算機環境への対応、さらには新規解析技術に取り組むことで、精度と計算時間の両立を図り、限られた時間内でのアウトプットの極大化を行っている。

3.1 基板まるごとEMC解析技術

EMC問題に対する電磁界数値解析手法としては、3次元の複雑な形状や材料定数の異なる物質の解析に適しているという特長を有するFDTD法からなる富士通(株)製の電磁波解析ソフトウェアPoynting^{®(注1)3)}を用いた。

FDTD法は、次式で表されるマクスウェルの方程式を時間および空間両座標において直接差分化を行い、励振源からの電磁界分布を逐次計算していくYeeのアルゴリズム⁴⁾に帰着する数値計算手法であり、過渡解あるいは周波数応答を直接求めることができる。

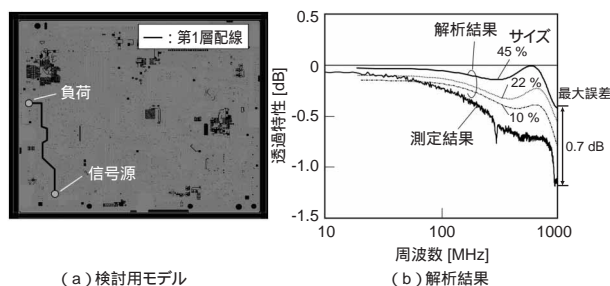
$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

$$\nabla \times H = \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 E は電界強度 [V/m]、 H は磁界強度 [A/m]、 μ は透磁率、 ε は誘電率、 σ は導電率である。

本解析手法は、安定条件を満たすために、最小メッシュ間隔が小さくなると計算の時間刻み幅も小さく設定する必要があり、モーメント法や有限要素法といった他の手法⁵⁾に比較して解析時間が長くなるという欠点があるが、アルゴリズムが簡単で並列計算に向くため、筆者らはクラスタPCからなる並列計算環境を構築することで、実用に耐えうるレベルの計算時間を実現している。

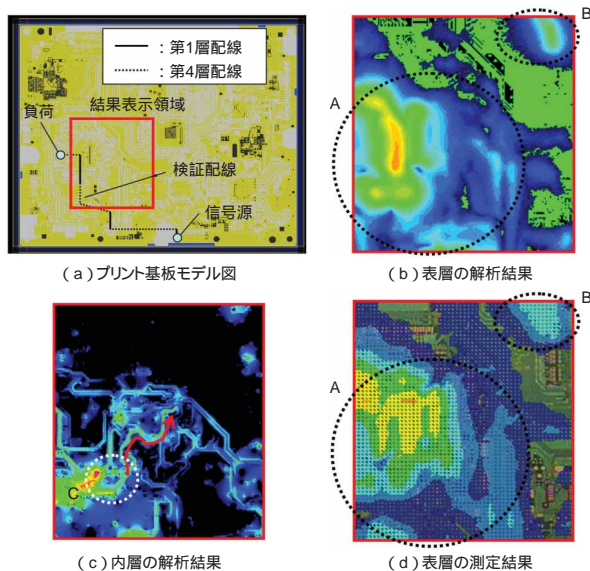
本解析手法をEMC問題に適用するにあたって、メッシュサイズの検討を行った。第1図に、検討に用いた多層プリント基板の解析モデルと、通過特性の解析と測定の比較を示す。



(a) 検討用モデル (b) 解析結果
第1図 メッシュサイズ検討結果
Fig. 1 Study of mesh size

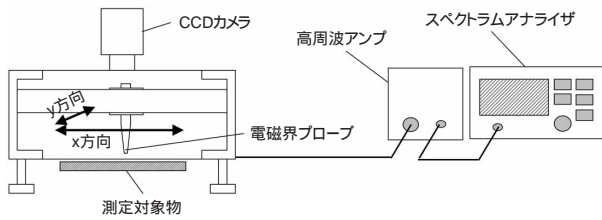
メッシュ間隔としては、45°配線をメッシュ分割したときに配線がとぎれない条件を最大のメッシュ間隔とし、最小線幅の45%から10%まで変化させた。第1図より、最小線幅の45%であってもEMC検討に十分な精度となる3dB以内の誤差に収まることがわかる。

次に、多層プリント基板のノイズ源の伝搬における解析と測定を比較する。第2図に、基板から距離2mmの面での周波数300MHzでの磁界分布の比較を示す。測定は、汎用の測定装置である第3図の(株)ノイズ研究所製ESV-3000を用いた。本測定器は、微小電磁界プローブをxおよびy方向に走査することでプリント基板などの2次元平面上の近傍電磁界分布を自動測定するものである。また、本体内蔵のCCD(Charge Coupled Devices)カメラでプリント基板などの測定対象物の画像を取得し強度分布図との合成表示が可能である。測定可能帯域は30MHz~3GHz、最小測定ピッチは1mmである。



(a) プリント基板モデル図 (b) 表層の解析結果 (c) 内層の解析結果 (d) 表層の測定結果
第2図 多層プリント基板のノイズ源の伝搬結果
Fig. 2 Comparison of measured and analyzed results

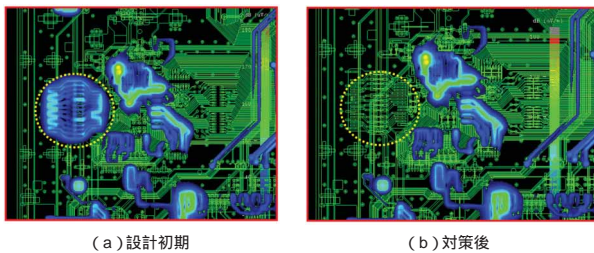
(注1) 富士通(株)の登録商標



第3図 近傍電磁界測定装置
Fig. 3 RF near-field emission measurement system

第2図 (b), (d) より、解析と測定の結果はよく一致しており、図中のA部分では信号配線に沿って伝搬する磁界成分が観測され、B部分では配線以外のところに発生する磁界成分が可視化できる。B部分に発生する磁界成分は、第2図 (c) より、内層のC部分で元の信号配線と交差する他の配線にクロストークした電流が図中の矢印の向きに伝搬し、Bの下層 (内層) まで達したものにより発生していると推定される。

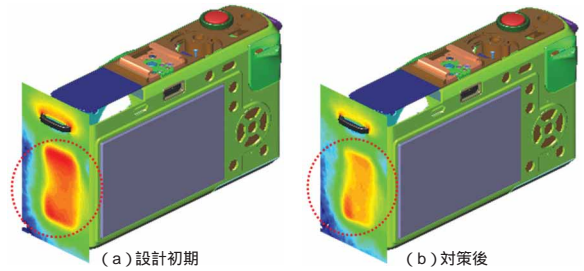
本解析手法の薄型TVのデジタル回路基板への適用事例を、第4図に示す。解析対象の基板サイズは190 mm × 210 mmで、215 302 752セルに分割し、30 000ステップの計算を行った。ある配線の一端に信号源を、他端に終端抵抗を配置し、ガウシアンパルスを印加した。24 CPUで約8時間の計算である。第4図より、設計初期には第2図の多層プリント基板と同様に内層でのクロストークにより、ケーブルが接続される図中の点線部分に磁界が大きく噴き出していたが、この原因となる箇所を対策することで、ケーブルが接続される部分への漏れが格段に改善されていることがわかる。



第4図 プリント基板の解析結果
Fig. 4 Analyzed results for Print Circuit Board (PCB)

3.2 筐体EMC解析技術

本解析手法のDSCの金属筐体への適用事例を、第5図に示す。3DCADのデータを取り込むことで、正確なモデリングが可能となっている。解析領域を34 553 601セルに分割し、11 957ステップの計算を行った。ある配線の一端に信号源を、他端に終端抵抗を配置し、ガウシアンパ



第5図 DSCのEMC解析結果
Fig. 5 Analyzed results for DSC

ルス印加した。24 CPUで約1時間の計算である。第5図より、設計初期には図中の点線で示す部分よりノイズ成分が大きく吹き出していたが、ノイズ源となるケーブルの処理を適切にすることで、筐体から吹き出るノイズ成分が格段に改善されていることがわかる。

3.3 高速化手法の検討

次に、さらなる大規模問題を解くことを目的に高速化手法の検討を行った。

FDTD法では、開放領域を計算する場合、解析領域の外壁からの反射が起こらないように吸収境界を考慮する必要がある。この吸収境界の選択によって計算時間と精度が大きく変化する。一般的に計算時間を優先させる場合にはMurの吸収境界条件が用いられ、精度を優先させる場合にはPML (Perfectly Matched Layer) 吸収境界条件⁶⁾が用いられる。しかしながら、計算時間と精度の両立は困難であるという課題があった。

そこで、計算時間と精度を両立させる方法として、流体解析の分野で注目されているCIP法 (Constrained Interpolation Profile Method)⁷⁾に着目し、CIP法をFDTD法の吸収境界として適応することで解析時間の短縮を図った。この手法を以後、CIP-FDTD法⁸⁾と表記し、PMLを用いたFDTD法をPML-FDTD法と表記する。

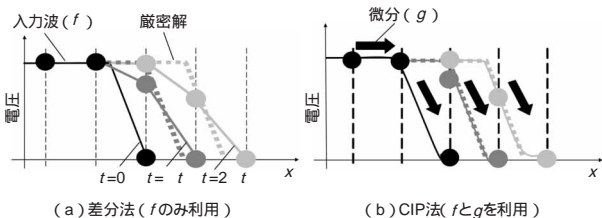
CIP法は、移流方程式と呼ばれる時間とともに物や波が伝播する方程式を高精度に解くことができる解析手法であり、無反射境界のため、数値解析における不安定が発生することが少ない。一般の一次元移流方程式は次式のように書くことができる。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \dots \dots \dots (3)$$

f は伝播する波動などの関数、 u は波の速度である。 u が一定であれば、波は形を変えずに伝播する。ここで、(3) 式を x で偏微分すると、次式が得られる。

$$\frac{\partial g}{\partial t} + u \frac{\partial g}{\partial x} = -\frac{\partial u}{\partial x} g \dots\dots\dots (4)$$

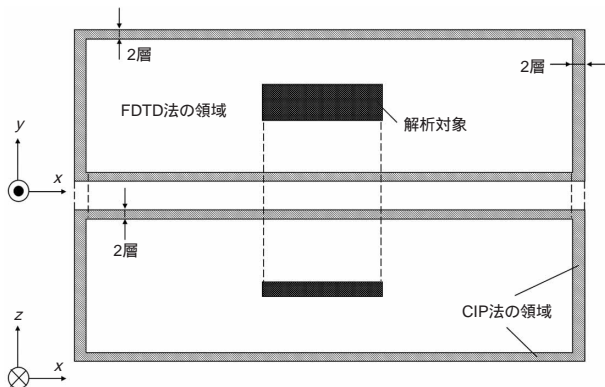
ここで、 $g = \partial f / \partial x$ とする。伝播速度 u が一定の場合には、(4) 式は右边が0となり、(3) 式と同様の形となるので、微分値 g が u の速度で伝播することになる。よって、関数 f とその微分値 g の時間経過が移流方程式に基づいて追跡できる。第6図は、 f のみを使った差分法と f と g を使ったCIP法のプロファイルを示している。第6図に示すように微分値さえも速度 u で伝播するので、メッシュ間のプロファイルが移動前の形と非常に近くなるのがCIP法の特徴である。



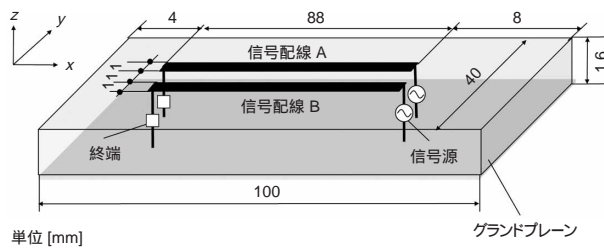
第6図 CIP法と差分法の比較
Fig. 6 Comparison of calculations

このような特徴を有するCIP法は、FDTD法と同様直交格子を用いているので、格子点上の値をFDTD法からCIP法に受け渡すことができる。第7図に、CIP-FDTD法による解析領域全体図を示す。斜線で囲んである部分が、CIP法により吸収境界を模擬してある層で、それより内側の領域はすべてFDTD法を用いて解析を行った。

次に、高速伝送方式の1つである差動伝送線路の解析をCIP-FDTD法により行った。第8図に、マイクロストリップ線路からなる差動伝送線路の解析モデルを示す。基板



第7図 CIP法を導入したFDTD法の解析図
Fig. 7 FDTD analysis applying CIP method



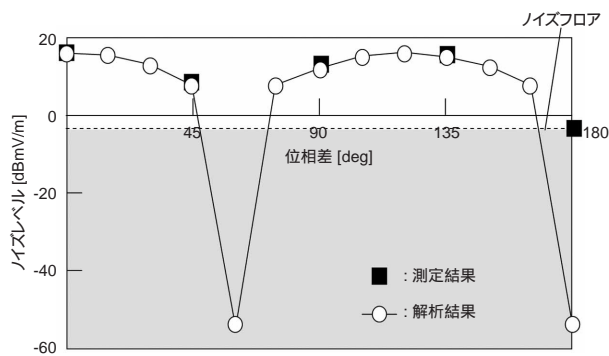
第8図 解析モデル
Fig. 8 Analyzed model

サイズは、100 mm × 40 mm × 1.6 mmであり、基板上中央に線路幅、線間が共に1.0 mmの1対の平行線路を配置し、線路は50 Ωで終端した。基板の比誘電率は4.8である。

解析領域を1 000 000セルに分割し、67 000ステップの計算を行った。信号源には、周波数25 MHz、振幅0.2 Vの台形波を用いた。

位相差を変化させたときの3 m遠方での電界強度の解析値および測定値を比較した。比較対象の周波数は、入力波25 MHzの3次高調波である75 MHzとした。

第9図に、75 MHzにおける解析結果および測定結果の比較を示す。この結果より、測定ではノイズフロア以下は測定不能であることから、180°を除くと測定と解析の誤差は3.0 dB以内であり、本解析はEMC検討には十分な精度であるといえる。



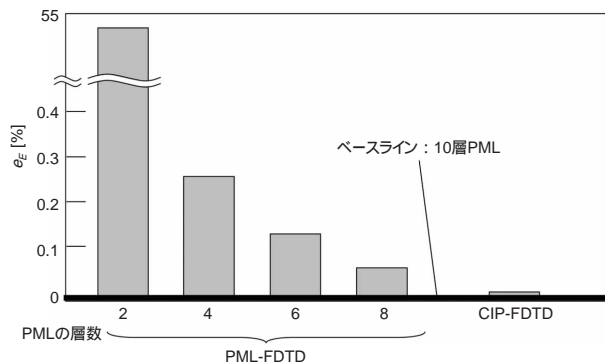
第9図 測定と解析の比較
Fig. 9 Noise level of 3rd harmonics of input signal

次に、第8図のモデルを用いてPML-FDTD法とCIP-FDTD法の解析精度の比較を行った。ここで、精度の比較は、次式を用い、PMLを10層としたときを基準として3 m遠方での電界強度における評価を行った。以下、PMLを n 層としたときを n 層PMLと表記する。

$$\epsilon_E = \left| \frac{10PMLs - nPMLs}{10PMLs} \right| \times 100 \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $10PMLs$ は10層PMLにおける解析値、 $nPMLs$ はPMLの層数を n としたときの解析値であり、誤差 ϵ_e は右辺に示されるような10層PMLを基準としたときの各解析値との誤差と定義した。

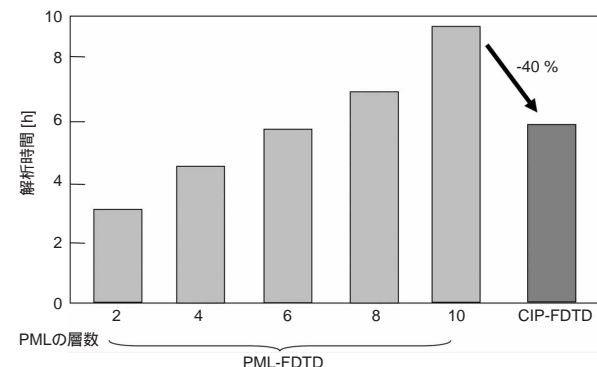
結果を、第10図に示す。2層PMLでは誤差の値が大きく、これは、吸収境界面からの反射が起こり、この反射波が遠方界での計算誤差要因になったと考えられる。また、CIP-FDTD法とPML-FDTD法を比較すると、ほぼ10層PMLと同じ精度であることがわかる。



第10図 10層PMLに対する精度の比較
Fig. 10 Accuracy of analysis

次に、10層PMLとの解析時間の比較を行った。結果を、第11図に示す。第11図より、CIP-FDTD法はPML-FDTD法に比べて解析時間が約40%減少していることがわかる。

以上より、CIP-FDTD法を用いることによって、10層PMLと同程度の精度を保持しつつ、解析時間を10層PMLと比べて約40%減少させることが可能となった。



第11図 解析時間の比較
Fig. 11 Computation time

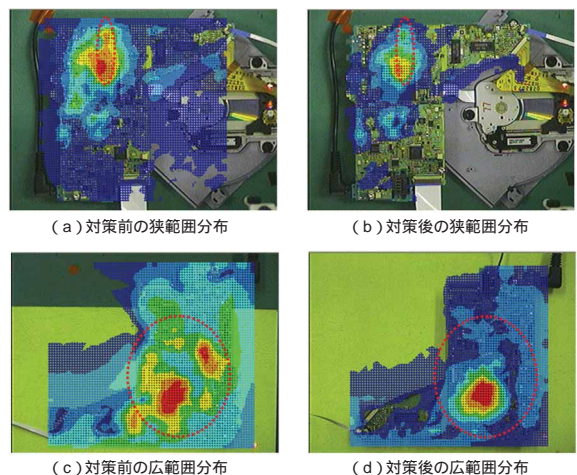
4. 近傍電磁界分析技術

EMC検討は、通常、電波暗室で行われ、測定方法としては、測定物から水平距離3 mまたは10 mの位置に設置した電界強度測定用のアンテナを高さ1 m~4 mまで掃引し、かつ測定対象物を360°回転させ、30 MHz~1 GHzの各周波数で最大受信電界強度を測定する。この測定には膨大な時間がかかり、この測定で得られる結果は3 mまたは10 mでの電界強度であるため、電磁波がどこから発生し、どのように伝わっているかはわからない。そこで、前述した第3図の汎用測定器を用いてノイズ源の可視化を行った。本測定では、測定自体は比較的容易であるが、従来、可視化した結果からノイズ要因の切り分けが困難であるという課題があった。

そこで、近傍磁界の広がり方として狭範囲と広範囲に分類できることに着目し、それぞれに対する対策箇所と対策方法をまとめた分析技術を構築した。

ポータブルDVDプレイヤーにおける近傍磁界測定結果を、第12図に示す。狭範囲分布の例を第12図(a),(b)に示す。第12図(a)では、点線で示すように近傍磁界が細長く広がっている。この中心部には、クロック信号を伝送するパターンが存在している。これに対して、信号配線にフェライトビーズを挿入する対策を行うことで、第12図(b)に示すように配線上の近傍磁界レベルが低減できる。

広範囲分布の例を、第12図(c),(d)に示す。第12図(c)は、点線で示すように近傍磁界が広範囲に広がっている。この範囲はグラウンドの種類が数多く存在し、細切れになっている。これに対して、グラウンド間を接続するためのコンデンサ追加により、第12図(d)に示すように



第12図 近傍磁界測定結果
Fig. 12 Measurement results

広範囲の近傍磁界レベルが低減できる。

以上のように近傍磁界測定を利用することで、プリント基板上のノイズ源を効率的に低減することができ、早期の輻射ノイズ低減ができる。

5. EMC設計ルールのチェック技術

EMC設計では、回路・基板設計の段階でプリント基板上の配線や、配置するEMC対策部品の有無や位置など、過去の知見から得られたEMC設計ルールを守ることで、問題箇所をあらかじめ削減することが有用である。

設計段階におけるEMC設計ルールの遵守状態を確認するツールとして、たとえば日本電気(株)製DEMITASNX^{®(注2)}やMentor^{®(注3)} Graphics Corp. 製Quiet Expert^{™(注3)}など、数社からEMCチェッカーが市販されている。市販のツールでルールを遵守できていない箇所を抽出する場合、エラー数が膨大となりOK/NGの判定が困難となる場合がある。そこで、回路図CADおよびプリント基板CADと連動したEMC設計ルールのチェック判定技術を構築した。特徴としては、市販のEMCチェッカーでルール遵守できていない箇所を抽出し、独自アルゴリズム⁹⁾でOK/NG判定を行うものである。

これにより、設計段階であらかじめ問題箇所の絞り込みを行うことができるようになり、問題箇所に対しては、前述の数値解析および測定分析で課題解決を行い、EMC問題の早期解決が可能となった。

6. まとめ

FDTD法による数値解析技術、近傍電磁界の測定分析技術、EMCチェックの判定技術からなるEMC設計技術を開発し、薄型TVやDSCといったデジタルAV機器へ適用した。数値解析技術では、クラスPCを構築し並列で計算させることで、基板まるごと解析や金属筐体解析を実用に耐えうるレベルの計算時間で実現し、さらに差動伝送線路の解析ではCIP-FDTD法により解析時間を40%減少させることができた。測定分析技術では、近傍磁界の広がり方に着目した分析技術を構築し、チェック技術では、エラー箇所のOK/NG判定を行うシステムを構築した。

今回構築したEMC設計技術の当社AVCネットワークス社での適用は10以上の商品カテゴリーに及び、設計上流での製品品質の作りこみが実現でき、最大80%のEMC対

策工数と対策費用の削減に効果が得られた。

今後は、本解析手法をプリント基板、筐体、ケーブルからなる実機セットまるごとに近い複雑モデルへの適用に向けて検討する予定である。

最後に、本検討を進めるにあたり、FDTD法のプリント基板問題への適用に際しソフトウェア開発でサポートしていただいた富士通(株)の並木部長、およびFDTD法の高速度化手法検討にご助言いただいた同志社大学の石原教授、藤原教授に、心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 仁田周一 他: デジタル回路のEMC (オーム社) (2002) .
- 2) 宇野亨: FDTD法による電磁界およびアンテナ解析 (コロナ社) (1998) .
- 3) 並木武文 他: 電磁波解析ソフトウェアPoynting FUJITSU 59, No.5, pp.576-582 (2008) .
- 4) K. S. Yee: Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. IEEE Trans. Antennas Propagat. 14, No.4, pp.302-307 (1966).
- 5) 渋谷昇 他: EMI/EMCのための数値計算モデリング技術 (三松出版) (2006) .
- 6) J. P. Berenger: A perfect matched layer for the absorption of electromagnetic waves. Journal of Computational Physics. 114, No.1, pp.185-200 (1994).
- 7) 矢部孝 他: CIP法 (森北出版) (2003) .
- 8) H. Fusayasu, et al.: A novel technique combining CIP method with FDTD method for implementing efficient absorbing boundary condition in 3-D high frequency electromagnetic field analysis. IEEE Trans. Magnetics. 44, No.6, pp.1470-1473 (2008).
- 9) S. Hamada, et al.: Element arrangement check device and printed circuit board design device. US Pat. US 7 353 483 B2 (2008).

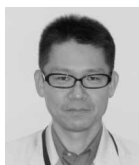
著者紹介



房安浩嗣 Hirosugu Fusayasu
AVCネットワークス社 技術統括センター
Technology Planning & Development Center,
AVC Networks Company



大迫周平 Shuhei Oosako
AVCネットワークス社 ネットワーク事業グループ
Network Business Group, AVC Networks Company



廣瀬一郎 Ichiroh Hirose
AVCネットワークス社 映像・ディスプレイデバイス事業グループ
Visual Products and Display Devices Business Group, AVC Networks Company

(注2)(株) NEC情報システムズの登録商標

(注3) Mentor Graphics Corp. の登録商標および商標