平成29年度

戦略的基盤技術高度化•連携支援事業 戦略的基盤技術高度化支援事業

「超高速信号用プリント基板の開発設計支援の ためのシミュレーション解析技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成30年3月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 株式会社信州TLO

目 次

第1章	研究開発の概要	
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2	研究体制	9
1-3	成果概要	11
1-4	当該研究開発の連絡窓口	12
第2章	本論	
【1】超	8高速信号におけるプリント基板特性の解明と	
	シミュレーションへの展開	13
[1-1]	プリント基板の誘電率測定	13
[1-2]	誘電体を含めた FDTD 解析法の確立	15
[1-3]	FDTD-MAS 解析法による放射解析	18
【2】次	マ世代型プリント基板設計フローの開発	19
[2-1]	PCB-CAD との連携とシミュレーション後の	
	ポスト処理機能の開発	19
[2-2]	実プリント基板回路における検証解析と実測	21
第3章	全体総括	
3-1	最終目標に対する達成度と課題	25
3-2	事業化の展開について	25

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1)研究の背景

本研究開発は、以下を背景としている。

【高度化指針における課題及びニーズ】

- (十二) 測定計測に係る技術に関する事項
- 1 測定計測に係る技術において達成すべき高度化目標
- (3) 川下分野横断的な共通の事項
 - ① 川下製造業者等の共通の課題及びニーズ
 - ア. 高機能化

信号伝送速度は急激に高速化し、プリント基板実装は高密度化している。従来からの、 プリント基板を製作し電装部品を実装する試作評価に頼る設計開発方法では、試作回数 がますます増加し、製品化に至るまでの開発期間の長期化が懸念される。

川下企業である電子機器メーカー、自動車メーカーからは、プリント基板設計、特に超高速信号用プリント基板の設計において、納期の短縮、信号品質・電源品質の向上、電磁波ノイズの低減を実現させることを強く望まれている。これらを実現させるためには、プリント基板設計時にシミュレーション技術を導入し、試作回数を減らすことが必要であるが、現状のシミュレーションソフトでは、超高速信号に対して十分な精度が得られず、また計算速度も遅く、設計を支援するレベルではない。

以上のことから、超高速信号用プリント基板の実装設計の時間短縮と品質向上を実現すべく、超高周波信号における電磁界シミュレーションの精度を高める技術を開発し、 試作回数の削減による新製品開発の設計プロセスの高効率化を図る。

(1-1) 超高速信号とその影響

情報通信機器などにおいて、扱うデータ量が飛躍的に増加している。大容量データを高速で処理するために、電子機器内の信号伝送速度の高速化が進んでいる。また機器間の信号インタフェースについても同様で、SSD(フラッシュメモリドライブ)においては、そのインタフェースのベースクロックは12.5Gbpsへと高速化し、信号の周波数としては、50GHz レベルとなる。このような高速半導体や高速信号インタフェースを実装するプリント基板においては、10GHz を超えるクラスの信号伝送を可能とする技術が求められる。

このような 10GHz 超レベルの超高速信号では、従来の信号と性質が大きく異なる。 このような超高速信号を扱うプリント基板の設計では、以下のような問題が発生し、そ の設計作業は非常に困難なものとなっている。

- タイミングマージンの減少
- 容量性寄生成分の影響の増大、伝送時の減衰量の増加
- ・線路間のクロストークの増加、素子間の相互干渉の増加
- ・ 電源グランドパターンからのノイズの放射

通常の 1GHz 未満の情報通信機器・情報家電のプリント基板(PCB)の設計では、PCB-CADによるパターンの設計結果を、シミュレーションによって信号の様子を確認し、設計の修正を行う。これを繰り返すことにより、プリント基板の試作回数を減らし、開発時間の短縮を行っている。

現在市販されているトップクラスのシミュレーションソフトでも、5GHz を超えるあたりから実測値と解析値の乖離が見られ、超高速信号用のプリント基板設計では、現在世の中に存在するシミュレーションソフトでは対応できない状況がある。この結果として、プリント基板のパターン設計後に、試作を行い、その評価により設計の修正を行う、という、シミュレーション導入以前の開発スタイルとなってしまっている。

従来のシミュレーションソフトが、超高速信号用プリント基板の解析に対応できない 理由はいくつかあり、これらに対応することで、新たなシミュレーション環境を作るこ とができる。

- 1) 超高速信号におけるプリント基板の振る舞い(特性)が十分に解明されていない。
- 2) 電磁界解析法に有限要素法を使っており、超高速信号においては計算量が非常に大きくなる。
- 3) 汎用シミュレーションプログラムという位置づけのためパターン設計を高速化 するための特化した機能がない。

絶縁物の誘電率などの特性についての研究は、長い年月進められてきているが、それらは純粋な物質に対しての物理理論の観点からのアプローチである。特に、1GHz を超える超高速信号の領域では、誘電体の特性は信号の周波数により大きく変化してしまう分散性(周波数依存性)が知られているが、その変化の様子はごく一部の物質について

しか明らかにされていない。プリント基板のようにガラス繊維、合成樹脂、銅箔による 複合材料においては、超高速信号の領域における特性についての情報は皆無である。

(1-2) 電磁波ノイズ

超高速信号の特徴として、上記の電気信号としての困難さに加えて、電磁波としての振る舞いが強くなることがある。その結果として空間への電磁波ノイズの放射が大きくなり、他の電子回路に影響を与える。この性質は電磁妨害(EMI)と呼ばれている。また同時に空間からの電磁波ノイズの影響を受けやすくなる(電磁感受性(EMS)と呼ばれる)。この EMI と EMS の両者を合わせて電磁両立性(EMC)と呼んでおり、この電磁波への特性を評価することが必須となっている。

通常の EMI 評価は、電波暗室あるいはオープンサイトと呼ばれる専用測定施設に対象となる機器を持ち込み、電磁波ノイズの強さを測定している。この測定は専用施設へ行かなくてはならず、これも製品開発において大きな負担となっている。

また逆の電磁波ノイズの影響による電子機器の誤動作への対応では、電磁波ノイズによる電気信号の変化を直接観察することはできない。このため試作基板に対しての対策と評価の作業が必要であり、その原因箇所の特定や対策のマージンの確認などに多くの労力を要する。

この EMC の評価についてもシミュレーションを活用することでサイトでの評価回数 を減らす動きがある。しかし、従来のシミュレーションソフトでは、パターン上の信号 の評価と同時に行えない、あるいは行えても計算時間が非常にかかるという欠点があっ た。

(1-3) シミュレーション技術

プリント基板での電磁界解析技術としては、 モーメント法、有限要素法と本研究で実施する FDTD 法 (Finite Difference Time Domain method: 有限差分時間領域法)がある。図 1 に解析技術の分類を示す。モーメント法と有限要素法は、周波数領域で解析する方法である、単一の周波数における空間の電磁界を解析した後、周波数を変化させ再び空間を解析する手法である。

モーメント法 (Method of Moment: MoM)

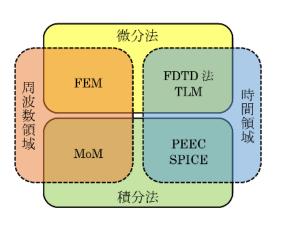


図 1 電磁界解析技術の分類

はアンテナ解析手法としていち早く解析手法が実際に実行された手法である。主にアン テナからの電磁界解析に用いられる手法であり、解析が複雑である。

有限要素法(Finite Element Method: FEM)は、機構の構造解析や熱解析にも用いられる手法でありプリント基板における電磁界解析にも多くの研究・開発分野で用いられている。一方で、1GHz 以上の高周波で解析セル数が増大し、計算と実測が必ずしも一致しないなど、実用レベルでの問題も依然として残っている。

FDTD 法はマクスウェルの電磁界方程式を差分化し、3次元空間を伝搬する電磁界の時間変化を解析できる手法である。FDTD 法の特徴には、以下のようなものがある。

- アンテナやプリント基板から発生する電磁波放射や、信号線路の伝送特性の時間 応答が観測できる。
- 波形をフーリエ変換することで、周波数特性も得ることができる。
- 時間領域で解析するため、ひずみ波や非線形素子の解析も可能である。
- 大きな空間を対象としてメッシュの数が増すと、計算量が膨大となり、計算時間 とメモリ量が増大する。
- 1GHz 以上では誘電体の分散性(周波数依存性)を考慮しないと計算が一致しない。

FDTD-MAS 法は FDTD 法の改良であり、放射源から、3m 以上離れた空間までを同時に電磁界解析するために、解析対象のプリント基板及びその周辺を細かいセルで詳細にモデル化し、一方、遠方界を粗いセルでモデル化して解析する手法である。FDTD 法の弱点である大空間の解析における計算時間とメモリ量を削減する計算手法である。FDTD-MAS 法は、本研究開発のメンバーである長野工業高等専門学校(長野高専)の春日准教授が、電子回路の計測およびシミュレーションの長年の研究の中で開発した強力なシミュレーション技術であり、特許化されている(特許 3824561)。

加えて、プリント基板の開発設計を効率化することに特化させた機能を用意する。従来、広く使用されているシミュレーションソフトはプリント基板専用ではなく、汎用のシミュレーション解析プログラムとして作られている。このため、プリント基板の設計データからシミュレーションのためのデータを作成するには、非常に手間がかかり、設計者の負担が大きかった。プリント基板 CAD の設計データから FDTD 法および FDTD-MAS 法でのデータに変換する機能を作成する。

また、得られたシミュレーション結果をもとにプリント基板のパターンの修正を行う のであるが、シミュレーションの結果を設計者が早く正確に認識し、正しい修正を行え る必要がある。そこで、シミュレーション結果をわかりやすく表示する機能も実現する。

(2)研究の目的

超高速信号は設計が難しいこともあり、試作の回数が増加し、設計期間がさらに長期になってしまっている。川下企業である家電メーカーにおいては、信頼性の高い新製品を的確な時期に市場に投入することが製品販売の大きな鍵になっており、プリント基板設計に対して信頼性の向上と納期の短縮を強く求めている。特に試作による評価は、プリント基板の製作、部品の集結、実装、評価と、時間と費用が非常に負担となる。この試作回数を減らすことができるシミュレーション技術が求められている。今回の研究開発の成果となるシミュレーション解析とそれを活用したプリント基板設計により、設計期間の短縮と、コストの削減が可能となる。

10GHz 超の信号伝送が数年後に主流となることが予想でき、現段階から 10GHz 超の3次元シミュレーション解析プログラムを開発することは川下産業における製品化までの開発期間の短縮及び開発コスト削減効果に大きく寄与し、国際的な競争力の維持・復活に貢献できる。また、自動車の電装化が進み、自動車内での到来電磁波によるプリント基板回路の誤作動は安全上重要な問題である。イミュニティ試験(電磁妨害耐性試験)についても 1GHz を超える帯域で実施されており、イミュニティ試験に対応可能なシミュレーション解析プログラムは自動車分野においても活用できると期待できる。

(3)研究の目標

【高度化指針で定める高度化目標】

(十二) 測定計測に係る技術に関する事項

- 1 測定計測に係る技術において達成すべき高度化目標
- (3) 川下分野横断的な共通の事項
 - ② 高度化目標
 - ウ. 評価(分析・解析)の効率性向上

超高速信号用のプリント基板を効率よく設計するためには、超高速信号についての電磁界シミュレーションを精度よく高速に実施できることが重要である。シミュレーションを行うことで試作を行わなくても設計結果の評価が可能となり、試作回数を減らすこ

とができ、プリント基板の設計時間はもとより、製品全体の開発期間についても大幅な 短縮が可能となる。この超高速信号シミュレーションについては、以下を満足するもの でなければならない。

- 10GHz 以上の超高速信号において、十分な精度を持つこと。(従来は 20~40dB 以上の誤差が発生していた)
- •信号(SI)の解析に加えて、対象機器の周囲の電磁波ノイズのシミュレーションもできること。
- ・プリント基板設計のフローの中で、PCB-CADによる設計作業との連係動作が可能で、設計変更をすぐにシミュレーションでき、またシミュレーション結果をすぐに修正に反映できること。

これらより、以下を目標とする。

【1】超高速信号におけるプリント基板特性の解明とシミュレーションへの展開

1GHz 以上の周波数におけるプリント基板の特性の計測を行い、その特性に対応したプリント基板上の信号を解析する FDTD シミュレーションプログラム、およびさらに空間への放射の解析が可能な FDTD-MAS シミュレーションプログラムを作成する。その上で、基本要素からなるプリント基板の試作・評価を実施し、超高速信号用プリント基板のシミュレーション解析の結果と実測値と比較する。

【1-1】 プリント基板の誘電率測定

プリント基板の特性データとして比誘電率、誘電体損失などの測定系を確立し測定を 行う。 スーパーハイビジョンの信号伝送である 24Gbps の信号伝送を想定して、周波 数帯域としては 26.5GHz 以下を測定する。

【1-2】 誘電体を含めた FDTD 解析法の確立

プリント基板の誘電体特性データを反映させたFDTDシミュレーション技術を開発する。実測と解析結果の差の目標値をプリント基板上の信号で3dB以内とする。

【1-3】 FDTD-MAS 解析法による放射解析

1GHz 以上の電磁波放射の FDTD-MAS 法による解析と実測との比較を行い、実測と解析結果の差の目標値を 6dB 以内とする。計算時間は設計に高速で反映させるため 6時間以内を目指す。

【2】次世代型プリント基板設計フローの開発

超高速信号用のプリント基板の設計において、設計者の作業を円滑にし、品質の良い プリント基板を早く、精度良く作成できる環境を整備する。

【2-1】 PCB-CAD との連携とシミュレーション後のポスト処理機能の開発 PCB-CAD のデータをシミュレーションに適した形に変換する、またシミュレーション結果を的確に表示するソフトウェアを作成する。

【2-2】 実プリント基板回路における検証解析と実測

実際の情報家電用の超高速信号用プリント基板に準じたレベルのプリント基板の試作を行う。プリント基板の開発設計においてはシミュレーション解析を実施し、プリント基板設計プロセスの評価を行う。

(4) 実施結果

【1】超高速信号におけるプリント基板特性の解明とシミュレーションへの展開 【1-1】 プリント基板の誘電率測定

5 種類のガラスエポキシタイプのプリント基板を対象として、誘電率を 1GHz~26.5GHz の周波数範囲について測定を行った。水平方向については SPDR 法により、垂直方向については平衡型円板共振器法により測定を行った。これにより従来知られていなかった 1GHz 以上の周波数でのプリント基板の誘電率を明らかにすることができた。この周波数領域においては、まだ誘電率の測定が確立されておらず、今回の研究開発により平衡型円板共振器法の測定精度を上げることができた。

【1-2】 誘電体を含めた FDTD 解析法の確立

上の【1-1】で測定した誘電率のデータを用いて、FDTD 法のシミュレーション解析を行った。FDTD 法による解析は、プリント基板上の信号線をとおる信号に対してである。測定したSパラメータから伝送線路解析ソフトを用いてミックスドSパラメータを求め、FDTD 法の解析結果と比較・評価を行った。その結果、実測値と解析結果との差は 3dB 以内であることを確認した。

【1-3】 FDTD-MAS 解析法による放射解析

1GHz 以上の電磁波放射について、FDTD-MAS 法による解析と実測との比較を行い、 空間における電磁界解析として精度 3dB 以内、解析時間 3 時間という非常に良い結果 を得ることができた。さらに、放射ノイズの影響についても想定することが可能と思われる。

【2】次世代型プリント基板設計フローの開発

【2-1】 PCB-CAD との連携とシミュレーション後のポスト処理機能の開発 シミュレーション解析の前処理として、プリント基板 CAD の回路パターンのデータ をシミュレーション解析用に変換し、さらに解析項目の設定を行う機能を実現した。

後処理では、波形表示、電磁界分布の表示機能を実現し、空間的、時間的に広がりを 持つデータをわかりやすく静止画あるいは動画に表示することができるようになった。 加えて表示データ作成の高速化についても開発を進め、シミュレーション解析から表示 までの時間を短縮することができた。

前処理と後処理の両方が完成し、これによりプリント基板設計作業からシミュレーション解析へ、またシミュレーション解析の結果をプリント基板設計へ反映させることを連続的に行うことが可能となり、超高速信号用プリント基板設計の効率化が実現できる。

【2-2】 実プリント基板回路における検証解析と実測

製品レベルのプリント基板の信号について、パターンの設計からシミュレーション解析を行い、設計時における有効性について検証を行った。高速差動信号におけるクロストークについて、シミュレーション解析の効果を確認した。特に、パターン設計 CADプログラムとシミュレーション解析プログラムとをつなぐセットアップ機能、およびシミュレーション解析の結果を効果的に表示し、パターンの修正を容易にするポスト処理機能により、パターンの修正・改良作業を飛躍的に効率化することができ、パターン設計の迅速化を実現できることを確認した。

1-2 研究体制

(1)研究組織

事業管理:補助事業者

株式会社信州TLO

総括研究代表者(PL)	アルティメイトテクノロジィズ株式会社	取締役
		中村 篤
副総括研究代表者(SL)	アルティメイトテクノロジィズ株式会社	リーダー
	開発グループ	池田 哲平

(2)管理員

所属		氏名	
株式会社信州TLO		代表取締役社長	大澤 住夫
	技術移転グループ	部長	勝野 進一
	総務部		横山 友美
			滝澤 智子

(3)研究員

所属		氏名	
アルティメイトテクノロ		取締役	中村 篤 (PL)
ジィズ株式会社	開発グループ	リーダー	池田 哲平(SL)
			富岡 雅弘
		設計担当	小池 真矢
		システム担当	上原 将己
		設計担当	伊藤 琢也
長野工業高等専門学校	電気電子工学科	准教授	春日 貴志
長野県中小企業振興セン	精密・電子・航空技	部長	花岡 健一
ター	術部門 電子部	技師	竹内 英樹
		研究員	寺島 潤一

(4) アドバイザー

	氏名	
東芝デベロップメントエン	デジタル応用システム開発グルー	久保 昭彦
ジニアリグ株式会社	プ	
株式会社図研	EDA 事業部 EL 開発部	松沢 浩彦
公益財団法人長野県中小企	プロジェクト支援コーディネータ	紅林 孝夫
業振興センター		

1-3 成果概要

(1) 超高速信号におけるプリント基板特性の解明

プリント基板の特性については、従来は 1GHz 以下の周波数でしか測定がなされていなかったが、1GHz 以上の周波数帯においてプリント基板の特性を測定する方法を確立した。水平方向の複素誘電率については SPDR 法が有効であり、垂直方向については平衡型円板共振器法が有効である。平衡型円板共振器法については、測定装置メーカーと測定方法の改良を行い、精度を上げることに成功した。

電子機器で使用されているガラスエポキシのプリント基板の測定を実施し、26GHz までの周波数について誘電率を測定した。これによりプリント基板の種類による差を明らかにすることができ、また新規のプリント基板の特性を効率よく測定する環境を整えることができた。

(2) 超高速信号に対応するシミュレーション技術の開発

今回の研究開発で得られた1GHz以上の周波数でのプリント基板の誘電率のデータを使い、超高速信号に対するプリント基板の電磁界シミュレーション解析を実現した。プリント基板上の信号線の信号についてはFTDT法を用い、プリント基板の周りの空間に放射される電磁波については、FDTD-MAS法を用いる。

いずれのシミュレーション解析においても、十分な精度での解析が可能であることを確認した。また、解析にかかる時間についても高速化を達成しており、プリント基板の設計の作業時に活用することが可能なレベルと言える。

(3) PCB-CAD との連携とシミュレーション後のポスト処理機能の開発

今回のシミュレーション解析は、あくまでもプリント基板設計時に活用するものであ り、プリント基板設計作業を効率的に行うことを目的としている。このためにプリント 基板の設計者が直接シミュレーション解析のプログラムを使用できるよう、解析を補助 する機能を用意している。

プリント基板 CAD (PCB-CAD) のデータから、シミュレーション解析のプログラム 用データへ変換する機能を実現している。加えて解析に必要な設定などもシミュレーション解析プログラムに与える。

もう一つの機能として、シミュレーション結果を効果的に表示する機能を実現している。シミュレーション結果は空間としての広がりとともに、時間的な広がりも含んでいる。このため波形として表示するのが適する場合、静止画として表示するのが適する場合もある。これらを簡単に選択し、適切に

表示する機能を実現した。これにより、プリント基板設計者は、シミュレーション解析 の結果を効率よく理解することができる。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

問合せ担当者 株式会社信州TLO 技術移転グループ 勝野進一

住所: 〒386-8567 長野県上田市常田3-15-1 信州大学内

電話: 0268-25-5181

FAX:0268-25-5188

E-mail: info@shinshu-tlo.co.jp

第2章 本論

本章では、実施内容の詳細について述べる。

【1】超高速信号におけるプリント基板特性の解明とシミュレーションへの展開

超高速信号でのプリント基板の特性測定と、対応するシミュレーション技術を開発する。

【1-1】 プリント基板の誘電率測定

目標:

プリント基板の特性データとして比誘電率、誘電体損失などの測定系を確立し測定を 行う。 スーパーハイビジョンの信号伝送である 24Gbps の信号伝送を想定して、周波 数帯域としては 26.5GHz 以下を測定する。

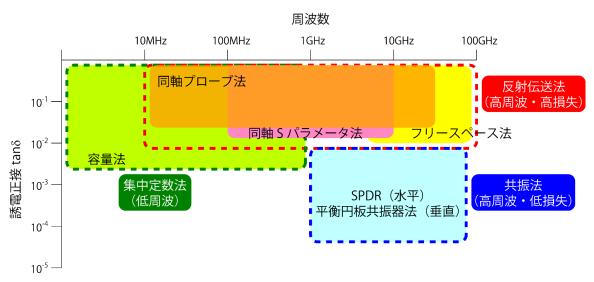


図2 代表的な誘電率測定法

実施内容:

図2に代表的な誘電率の測定方法を示す。誘電率の測定方法は集中定数法、反射伝送法、共振器法の3つに大別でき、それぞれの方法は周波数帯や測定する材料によって使い分けることができる。集中定数法では、1GHz までの周波数帯域しか測定できない。また、反射伝送法では低損失材料を評価する際に、ポートのマッチング特性の影響が強く表れるため、ネットワークアナライザの測定不確かさが増大し、試料の誘電正接 tan δを高確度に測定できない。そこで、本研究では1GHz 以上の高周波帯で低損失材料の測定に適している共振器法により複素誘電率を測定した。

垂直方向の複素誘電率測定

垂直方向の複素誘電率の測定方法には平行平板コンデンサ法および平衡型円板共振器法がある。図3に平行平板コンデンサ法、図4に平衡型円板共振器法を示す。平行平板コンデンサ法は、被測定物の上下に電極を付加し、電極間のインピーダンスから複素誘電率を求める手法である。電極ならびに挟み込んだ試料を集中定数素子として扱うこと

ができる 10MHz から 1GHz までの周波帯域における測定法である。固体、液体ともに測定可能な手法であり、低周波における測定として有用である。

それに対し、1GHz以上の周波帯域においては、 TMo₁ モードを利用した平衡型円板共振器法がある。図5に平衡型円板共振器法の構造を示す。中

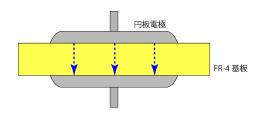


図3 平行平板コンデンサ法

央に励振空洞用の穴が空けられた電極で、誘電体試料を挟みこむ。誘電体試料は2枚用意し、誘電体試料の間には円形の銅板を挿入する。同軸線路は、遮断導波管を介して励振空洞用の穴と接続し、ネットワークアナライザからの信号を励振することで、円板の中心に電界成分を持つTMomoモードを選択的に励振することができ、薄い基板や損失の多い材料に対しても測定が可能である。高次の高調波成分でも測定出るため、一つの共振器で複数の測定点が得られる。

水平方向の複素誘電率測定

水平方向の複素誘電率の測定方法には SPDR(スプリットポスト誘電体共振器)がある。図5に SPDR の構造を示す。SPDR 法は、薄膜・薄板試料の誘電体評価に用いられ、円形導波管の内部に2つの誘電体共振器が配置されており、電界は誘電体共振器とそのギャップ中に挟まれた試料に集中する。電界の集中の結果、導波管の導体損の影響が抑えられ、より低損失材料の測定が可能となる。測定に利用される TE₀₁ モードは試料が置かれた位置における電界の時間変化が小さいため、試料と誘電体共振器の間の空隙の影響が少なく、試料加工精度がそれほど要求されない。試料面に沿った方向の誘電率が測

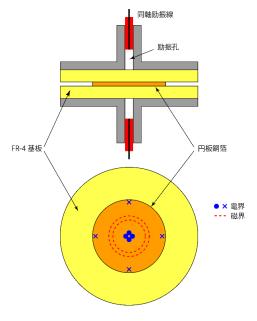


図 4 平衡型円板共振器法

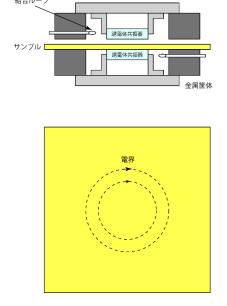
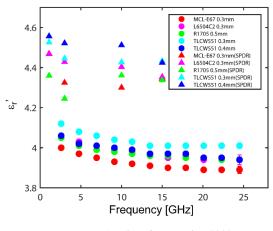


図5 SPDR



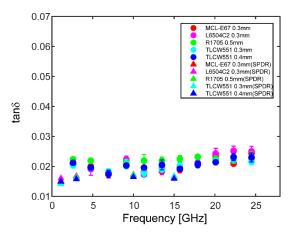


図 6 比誘電率 ϵ_r , の周波数特性

図7 誘電正接 tan δ の周波数特性

定でき、1GHzから20GHzの範囲の共振器が実用化されている。しかし、平衡型円板 共振器法とは異なり、共振周波数のみ測定が可能である。

複素誘電率の周波数特性

図6に誘電率 ε , の周波数特性、図7に誘電正接 $\tan\delta$ の周波数特性を示す。図6および図7の丸いマーカは平行平板コンデンサ法および平衡型円板共振器法による測定結果を示し、 $0.01\,\mathrm{GHz}$ から $1\,\mathrm{GHz}$ までは平行平板コンデンサ法、 $1\,\mathrm{GHz}$ から $26.5\,\mathrm{GHz}$ までは平衡型円板共振器法により測定した ε , および $\tan\delta$ の値である。また、三角のマーカは SPDR 法による測定結果を示す。

図6より、平衡型円板共振器で測定した ε , の値に比べ、SPDR 法で測定した ε , が 0.3 程度大きいことがわかる。SPDR 法は水平方向の誘電率を測定しており、平衡型円板共振器法では垂直方向の誘電率を測定している。FR-4 基板はガラス繊維で織った布をエポキシ樹脂で固めておりに水平方向と垂直方向で構造が異なる。水平方向と垂直方向で異方性を持っており、誘電率に影響を与えることが報告されている。この異方性の影響により、SPDR 法と平衡型円板共振器における誘電率の測定値に違いが生じたと考えられる。

【1-2】 誘電体を含めた FDTD 解析法の確立

目標:

プリント基板の誘電体特性データを反映させたFDTDシミュレーション技術を開発する。実測と解析結果の差の目標値をプリント基板上の信号で3dB以内とする。

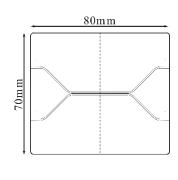
実施内容:

VNA による伝送特性測定法

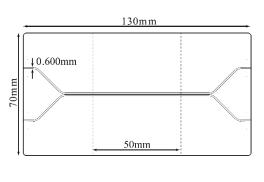
図8に差動線路の伝送特性評価用基板を示す。差動線路の伝送特性は、ミックスドモード S パラメータを測定する。測定には 4port ネットワークアナライザ(Agilent N5222A、最高周波数 26.5GHz)を用いた。ネットワークアナライザは、同軸ケーブルで測定対象デバイス(Device Under Test: DUT)と接続し、DUT との接続部分で校正することで、DUT 部分の S パラメータが測定できる。一般的には、同軸ケーブルの先端で SOLT 校正や E-cal 校正が実施される。プリント基板と同軸ケーブルを接続するため基板エッジコネクタを用いる。通常の SOLT 校正の場合、基板エッジコネクタを含む差動線路の特性を測定することになり、純粋な差動線路部分のみの特性を測定することはできない。

そこで、本研究では自動フィクスチャ除去(Auto Fixture Removal: AFR)を用いた。 AFR とは、差動線路からコネクタ周辺などの不要部分のみで作製した基板の伝送特性を 差し引くこと

よって、差動 線路の DUT 部分のみの伝 送特性を測定 できる機能で ある。



(a)



(b)

図8 差動線路の伝送特性評価用基板

誘電率からの伝送特性の算出方法

減衰定数 α は式(1)に示すように導体の表皮効果による減衰 α 。および誘電体の損失による減衰 α の和により算出できる。

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_d$$

表皮効果による減衰・。は式(2)で求められる。

$$\alpha_{\rm c} \approx \frac{1}{Z_0 \omega} \sqrt{\frac{f \pi \mu}{\sigma}} = \frac{R_{\rm s}}{Z_0 \omega}$$

ここで、R。は平面導体の表面抵抗である。

一方、誘電体損によるαは式(3)により算出できる。

$$\alpha_{\rm d} = \frac{\pi f \sqrt{\varepsilon_{\rm re}}}{c} \tan \delta \frac{\varepsilon_{\rm r} (\varepsilon_{\rm re} - 1)}{\varepsilon_{\rm re} (\varepsilon_{\rm r} - 1)}$$

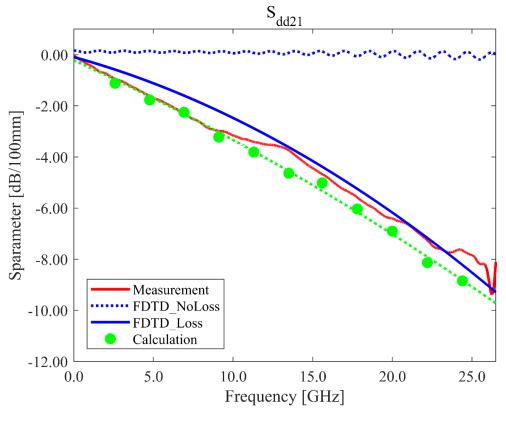


図9 差動線路の伝送特性 Sdd21

複素誘電率と伝送特性との関連性を明らかにするために、伝送特性の実測値と計算値を比較した。図9に伝送特性 S_{dd21} の測定結果および複素誘電率から算出した S_{dd21} の結果を示す。実線は S_{dd21} の実測値、丸いマーカは平衡型円板共振器で測定した複素誘電率から求めた S_{dd21} 、三角のマーカは SPDR により測定した複素誘電率から求めた S_{dd21} の結果である。 S_{dd21} は伝送線路の長さで変化するため、100mm の長さで規格化した。

図9より、SPDRで測定した複素誘電率より算出した S_{d21} は実測値に対して最大で約 0.3~dB の差であるのに対し、平衡型円板共振器で測定した複素誘電率より算出した S_{dd21} は実測値に対して最大で約 2.5~dB の差となり、SPDR より算出した結果が近いことが明らかとなった。

図6および図7で示した ε r' および $\tan\delta$ より、SPDR は垂直方向の誘電率 ε r' より 0.3 大きい。一方、平行平板コンデンサ法ならびに SPDR による $\tan\delta$ は約 0.015 で あるが、平衡型円板共振器による $\tan\delta$ は大きくばらついている。 $\tan\delta$ =0.015 より も大きい値を示した周波数では、実線の S_{dd21} からも大きくずれており、 S_{dd21} は $\tan\delta$ による影響が大きいことが分かった。

先の【1-1】のプリント基板の誘電率測定より求めた複素誘電率を、FDTD 解析に組み入れて S_{dd21} を求めた。損失を入れない場合は OdB 付近となるが、損失を含めることで VNA による S_{dd21} や複素誘電率から算出した S_{dd21} とほぼ一致した。本項目の目標は、実測と解析結果の差が 3dB 以内であったことから、この目標を十分達成できた。

【1-3】 FDTD-MAS 解析法による放射解析

月標:

1GHz 以上の電磁波放射の FDTD-MAS 法による解析と実測との比較を行い、実測と解析結果の差の目標値を 6dB 以内とする。計算時間は設計に高速で反映させるため 6時間以内を目指す。

実施内容:

EMC の放射電界測定 規格に準じた解析を目的 として、FDTD-Multiple Analysis Space (FDTD-MAS)法による 電磁界解析を実施した。

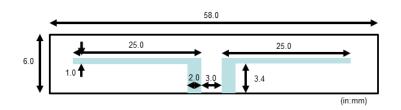


図 10 ダイポール型基板構造

図 10に放射源となるダイポール型基板構造を示す。プリント基板にダイポール型の配線パターンを配線した。基板の厚みは 0.5mm であり、本検討で使用した誘電体基板を用いている。プリント基板は長野県工業技術総合センター 精密・電子・航空部門(長野県岡谷市)にある電波暗室で測定を行った。VNA でアンテナの入力インピーダンスを測定した結果 2.445GHz で整合がとれたため、2.445GHz で放射特性を測定した。

FDTD-MAS 法については、プログラムの一部を高速化対応させることで、計算時間の短縮を図った。図 11 に電界 Ex 分布の解析結果を、図 12 に指向性の解析と測定結果をそれぞれ示す。電磁界解析に要した時間は 2.8 時間であり、目標としていた 6 時間の半分で解析が実行できた。プログラムの高速化対応による成果であると考えられる。指向性の結果から、主偏波成分での解析と測定結果の差は小さい。Null 点で差は見られたが、ノイズレベルでの誤差と考えられるため、実測と解析結果の差が 6dB 以内であるという目標は達成できた。

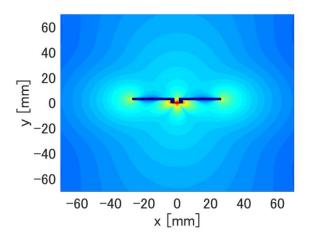


図 11 電界 Exの分布

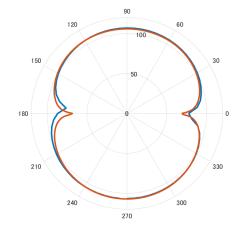


図12 電界 Exの指向性特性

【2】次世代型プリント基板設計フローの開発

超高速信号用のプリント基板の設計において、設計者の作業を円滑にし、品質の良い プリント基板を早く、精度良く作成できる環境を整備する。

【2-1】 PCB-CAD との連携とシミュレーション後のポスト処理機能の開発

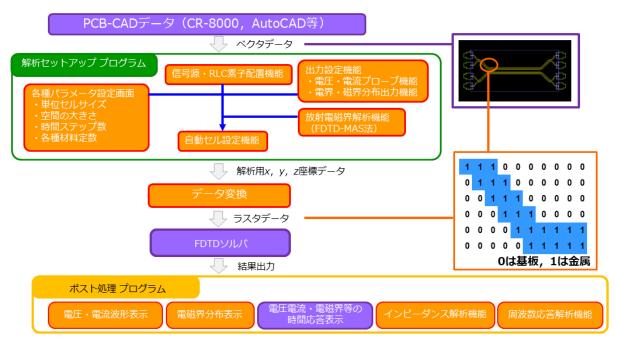
目標:

PCB-CAD のデータをシミュレーションに適した形に変換する、またシミュレーション結果を的確に表示するソフトウェアを作成する。

実施内容:

図 13 に PCB-CAD データから FDTD 法•FDTD-MAS 法の解析プログラム(FDTD ソルバ)へのデータ変換と、FDTD ソルバによる解析結果の表示に関する開発の流れを示す。PCB-CAD からの ASCII データを FDTD 法で読み取り可能なラスタデータへ変換する。CAD からの ASCII データをラスタデータに変換するためには、FDTD 法の単位セルを与える必要があり、解析セットアップの入力画面を設ける。その後、FDTD ソルバでラスタデータを読み込み、各空間における要素(基板や金属など)と一致した電界計算式を用いる。FDTD 解析を実行し、解析結果はポスト処理プログラムで自動的に図示できるようにする。

- 図 13 の解析フローの詳細を図 14 に示す。変換プロセスは以下の通りである。
- (1) PCB-CAD より、基板ならびに部品データが書かれた ASCII データを出力する。



データ処理の流れと自動化予定の機能

図 13 PCB-CAD データから FDTD ソルバ・結果表示までの開発の流れ

Design Force 上で、出力したい基板の範囲を指定できるため、解析をコンパクトにすることができる。

- (2) ASCII データを Viewer により PCB パターンの表示をさせる。
- (3) 図 15 に示す解析パラメータ設定画面上で、単位セルサイズや出力結果表示などを手入力する。
- (4) ラスタデータは2次元であるため、図16のような層構成を入力する画面を用いて、 厚み方向の情報を入力する。
- (5) PCB パターンの表示上で、信号源や測定ポートの設定を行う。
- (6) FDTD 解析を実行する。スーパーコンピュータ用あるいは PC 用の FDTD 解析ソルバを用いる。
- (7) 解析結果をポスト処理プログラムにより画像もしくは動画に変換し表示する。

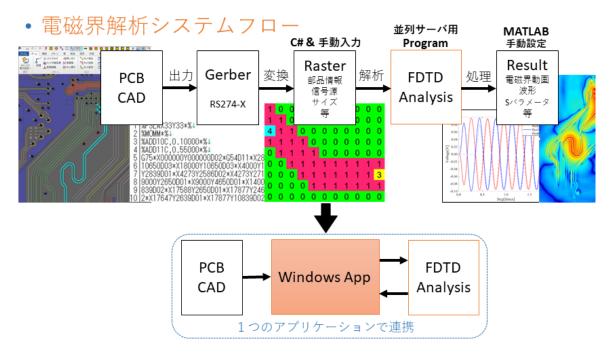


図 14 電磁界解析システムのフロー

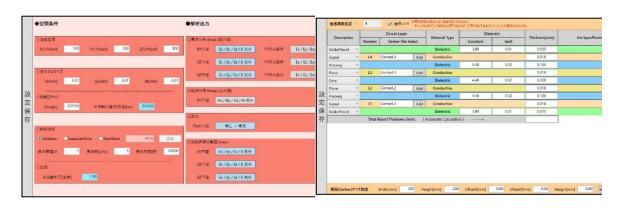


図 15 FDTD 解析のパラメータ設定

図 16 層構成の入力画面

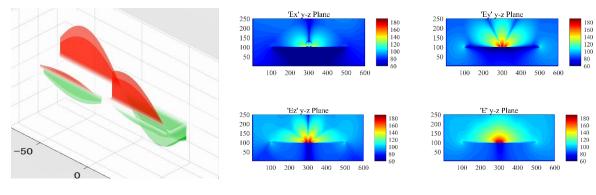


図 17 電磁界の3次元動画

図 18 プリント基板の電界解析の断面表示

図 17 に電磁界の3 次元動画を、図 18 に電界の断面方向の分布図をそれぞれ示す。 出力機能としては、

- ・電磁界動画、3D 電磁界動画の表示
- 電界分布表示
- ・ 基板断面のベクトル表示
- ・波形、パラメータ出力
- 任意の動画やグラフを出力可能

があり、ユーザーが任意で結果表示を選択できるようにした。FDTD とのプリとポスト機能を一つのアプリケーションで統一させることで、データの受け渡しを簡素化することができた。

【2-2】 実プリント基板回路における検証解析と実測

月標:

実際の情報家電用の超高速信号用プリント基板に準じたレベルのプリント基板の試作を行う。プリント基板の開発設計においてはシミュレーション解析を実施し、プリント基板設計プロセスの評価を行う。また、試作したプリント基板の性能を実測し、信号および電磁ノイズ放射の両面から、開発したシミュレーションプログラムの実用的な性能評価を行う。

実施内容:

プリント基板の開発設計において、超高速信号の配線レイアウトの難しさが年々高まってきている。これには高速化(信号の立上り/立下り時間の短縮)するにつれて、配線間の結合(クロストーク)が顕在化するにも関わらず、これを設計段階で確認する有効

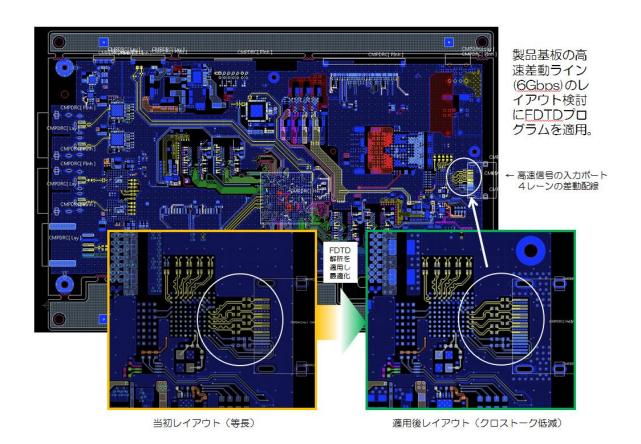


図 19 実プリント基板設計へのシミュレーションプログラム適用例

な方法がないことが原因と考えられる。クロストークに対する計算手法は古くから存在するが、煩わしい計算を要するものや、結果を把握しにくいものが多く、レイアウト設計者が自分で配線の良否を確かめられるものは殆どない状況にある。これまでの多くのシミュレーション解析プログラムが解析の専任者向け、かつ専門知識を持たないと解釈できない結果を出力していることに対し、ここで開発したシミュレーション解析プログラムは、クロストークなどの電磁現象を直観的に理解しやすい動画像で提供することを特徴としている。

プリント基板のレイアウト設計において、開発したシミュレーションプログラムを適用した例を図 19 に示す。基板右辺のコネクタからトランシーバLSIまでの区間(白丸で囲った部分)に高速差動ラインを4レーン配置するものである。コネクタは各レーンの P/N 端子が上下に並んでいるのに対して、トランシーバLSIでは P/N 端子が左右に配置されている。こうした配置の場合、P/N 配線に長さの違いがあると、伝搬時間の差ができ、端子を通過する時刻に差が生じ、通信特性が劣化することが知られている。このため、P/N のどちらか短くなる配線を屈曲(ミアンダライン)させて通過時間を揃えることがよく行われてきた。一方、限られた面積のなかでミアンダラインを設けることは、隣接するレーンとの間隔を狭めるため、クロストークを増大する傾向があり、通信特性を劣化させる。

配線の等長性とクロストーク抑制を両立させる必要があるものの、レイアウト設計の 段階でこのバランスを検討する手段がこれまでなかった。開発したシミュレーションプ ログラムでは、信号の伝搬やクロストークの発生を時間的変化(動画)で示すため、設計者がレイアウトの効果を直観的に確認することができ、プリント基板設計時の開発効率が向上する。

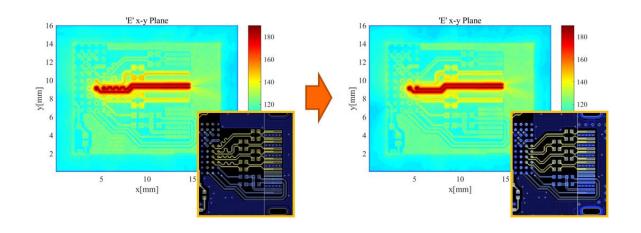


図 20 実プリント基板への適用例 「配線レイアウトとクロストーク」

開発したシミュレーションプログラムは、任意のエリアについて解析することができるため、基板全体にわたるレイアウトを終えてからでないと解析できないといった制約はない。図 20 に示す適用例では、下から2つ目のレーンを駆動した際に、隣接するレーンに発生するクロストーク電圧の大きさを色表示している。実際のプログラムでは動画で色が濃くなる過程が観察できるため、信号が駆動ラインに近接した部品ランド付近など通過した際に顕著にクロストークを発生していることがわかり、僅かな長さであっても配線間隔を狭めてはならないことが認識できる。

本例では配線を直線化し、レーン間隔を広げることで目標レベルの抑制ができ、製品 基板のパターン設計に反映した。

開発したシミュレーションプログラムでは、配線パターン上を信号が移動(伝搬)する時間変化を動画表示する特徴を備えている一方、従来からの方法(定点で観測される電圧の時間変化をグラフ表示)で表示することができる(図 21)。5GHz と 2OGHz では、同じ横軸で比較した場合、信号のパルス幅が 1/4 になること、信号レベルが安定しにくいことなど、特定の観測点(送端、受端)で比較できる。また、差動信号に特有のP/N信号の極性を赤/緑で配線パターン上に示すことができる。この表示では信号の極性が変化するクロスポイントの伝搬が確認しやすく、隣接配線に発生するクロストーク電圧の極性がよみとれることから、結合メカニズム(電界/磁界)を判断することができる。本比較例でも 2OGHz では 5GHz よりクロストークが大幅に増大し、今後クロストーク対策がより重要なレイアウト設計の課題となることがわかる。

信号が配線に沿って伝搬する際、そのエネルギー100%が導体内に閉じ込められているわけではなく、配線下の誘電体や配線上空の空気中に沁みだすように電磁波として伝搬する成分が存在する。こうした電磁波が特定の方向に強め合い、ビーム状の放射を作っていないか、開発したシミュレーションプログラムで確認することができる。図 22

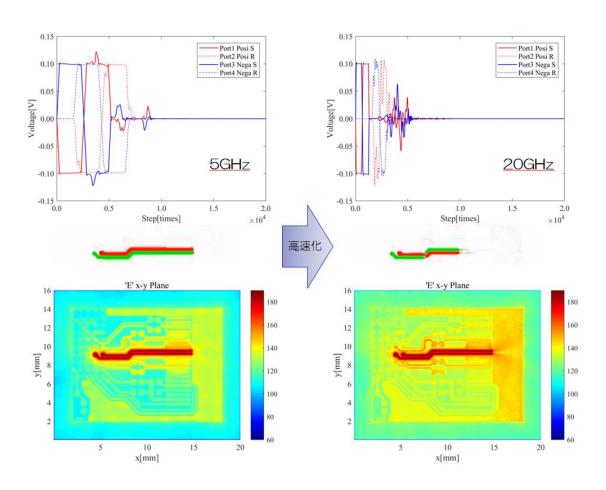


図 21 実プリント基板への適用例 「信号速度とクロストーク」

に観測面を 0.5mm ずつ上空に移動した配線上空の電界分布図を示す。こうした分布はこれまで特定の周波数成分に対して予測することは容易だったものの、幅広い周波数成分を含む波形(デジタル)について観察できるようになったことで、輻射抑制に対する配線レイアウトの良否が判断しやすくなった。

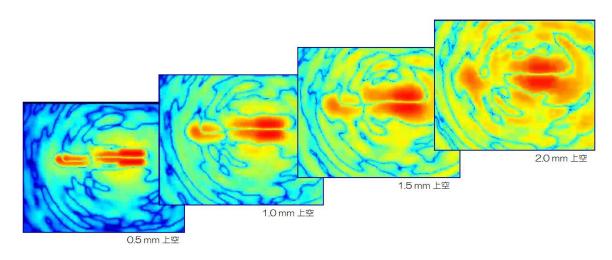


図 22 実プリント基板への適用例 「差動配線上空の電界分布」

第3章 全体総括

3-1 最終目標に対する達成度と課題

本事業での研究開発では、26GHz までの超高速信号に対し、シミュレーション解析が可能であることを示した。シミュレーション解析の結果は精度も解析時間も十分なものであり、実用性が高い。

課題点としては、26GHz を超える領域への対応がある。信号の高速化は留まることはなく、さらなる高速化がすすむであろう。また、解析時間についても、ユーザーからより高速化を求められるものと思われる。これらへの対応は容易ではないが、今回の事業において研究開発環境が整備されており、それらを活用することで、前進が期待できる。

3-2 事業化の展開について

アルティメイトテクノロジィズ株式会社は現在プリント基板設計を業務として行っている。その中においてシミュレーション解析は、すぐに活用できる技術であり、顧客への新たなサービスとして提供をすすめることが可能である。

また、シミュレーション解析のプログラム自体を他の場面で活用することも可能である。例えば、プリント基板設計 CAD と組み合わせたシステムを構築するなどである。これについては、CAD ソフトとの連携が必要であり、CAD ソフトメーカとの共同作業が必要となる。今後、市場の状況を確認しながら、展開の可能性について検討していく。