

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：16201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630152

研究課題名(和文) 電磁ポテンシャルの導入による回路・電磁界混合解析

研究課題名(英文) Mixed Circuit and Electromagnetic Analysis by Introducing Electromagnetic Potentials

研究代表者

丹治 裕一 (Tanji, Yuichi)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：10306988

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：回路の物理設計を行うためにはその電磁気学的な性質を考慮した回路解析が必要である。しかしながら、従来の数値電磁界解析手法は回路解析との親和性に乏しく、逆に、電磁界を回路素子で表現して回路解析を行う方法では電磁界を見ることができない欠点がある。この解決のため、本研究では電磁ポテンシャルの導入、非線形回路素子の容積の考慮など様々な観点から検討を行い、電磁界解析における回路素子の取り扱いについて新たな手法を提案した。本手法に基づいて、回路シミュレータと電磁界解析手法として知られているFDTD法を結合した所、回路・電磁界混合解析が双方の柔軟性を損なうことなく、効率良く実行できることが確認できた。

研究成果の概要(英文)：Circuit simulations which consider electromagnetic effects of circuits are required for the physical designs. Conventional electromagnetic analysis lacks flexibility to circuit simulations. Conversely, even if a circuit analysis which expresses the electromagnetic field as circuit elements is used, we cannot observe the electromagnetic field so that it is a fault of this scheme. To resolve these problems, we examine the mixed analysis from various points of view. For example, vector and scalar potentials are introduced, and volume of nonlinear circuit elements is considered. As a result, a new method for treating circuit elements in electromagnetic analysis is proposed. Based on this method, the circuit simulator and FDTD method, which is well-known as a numerical electromagnetic analysis, are combined. We confirm that the mixed circuit and electromagnetic analysis can be efficiently carried out without loss of flexibility to both analyses.

研究分野：電子情報工学

キーワード：シミュレーション工学 高密度実装 高速伝送回路設計 システムオンチップ ハイパフォーマンス・コンピューティング

### 1. 研究開始当初の背景

回路の物理的な構造を考慮して、その電磁気学的な性質を把握しながら、回路設計を行う要求が高まっている。先端の無線通信回路では動作周波数は数十 GHz に達しており、受動部分を分布定数系として取扱いながら能動素子のモデルを接続した回路解析が行われるようになった。高速デジタルシステムでは配線の分布定数的な現象(遅延、反射、漏話)が信号の誤伝送を引き起こすため、配線の電磁気学的な性質を考慮して伝送される信号の信頼性を確保することが必要になっている。さらに、電子システムを正しく動作させるには様々な大きさの直流電源が必要であるが、この変換に用いられる DC-DC、DC-AC コンバータは小型化のためスイッチング特性を有している。このスイッチングが外部に電磁干渉を引き起こすため、回路から発生する電磁界を把握する必要が出て来ている。

一方、従来の数値電磁界解析手法は回路解析との親和性が乏しく、逆に、電磁界を回路素子で表現して回路解析を行う方法では電磁界を見ることができない欠点がある。それゆえ、上記の要求を満たすために、回路・電磁界双方の解析の自由度を損なうことなく混合解析を行える数値解析アルゴリズムの提案及びそれに基づいた解析ツールの開発が望まれている。

### 2. 研究の目的

通常電磁界解析では、電界と磁界のみを計算する。これに対して、電磁界解析の回路解析への親和性を高めるために、本研究では電界、磁界に合わせて、電磁ポテンシャル(ベクトルポテンシャル、スカラーポテンシャル)を導入する。数値解析法としては、FDTD(時間領域差分)法を改良する。ここで、FDTD法における電界、磁界の関係を(電界、スカラーポテンシャル)(磁界、ベクトルポテンシャル)のように置き換えることを考える。回路解析との混合には、(株)半導体理工学センターとの共同研究の成果物である回路シミュレータ FALCON を用いる。ここで、電磁界解析において電磁ポテンシャルを合わせて計算することで、電磁界解析と回路解析が柔軟に結合できるようになると考えられる。

電磁界解析は大きな演算コストを必要とするため、計算機の並列性を活用した高速化が必要である。そこで、共有メモリ型の計算機での実装に適した OpenMP による並列化、スーパーコンピュータと同様の分散メモリ型の計算機での実装に適した MPI による並列化、パーソナルコンピュータのグラフィックプロセッサである GPU を用いた並列化を検討し、回路・電磁界の混合解析を効率良く行う方法について検討を行う。

### 3. 研究の方法

(1) FDTD 法を用いて、電界、磁界、ベクトル

ポテンシャルを求める方法を検討した。まず、基本方程式として、アンペアの法則、ファラデーの法則、ローレンツゲージを用いた。FDTD 法における Yee の格子に対して、ベクトルポテンシャル(ベクトル P)、スカラーポテンシャル(スカラー P)を配置する。次に、時間領域において数値積分法を適用し、(電界、スカラーポテンシャル)(磁界、ベクトルポテンシャル)を時間間隔で半ステップずつずらしながら時間応答を求める。ここで、ベクトル及びスカラーポテンシャルの解析全体に及ぼす影響を評価した。

(2) 回路・電磁界混合解析には、(株)半導体理工学センターと共同開発した FALCON を用いる。回路解析と電磁界解析の結合には、回路ベース FDTD 法の思想に基づく方法を用いる予定であったため、その前段階として、回路ベース FDTD 法の FALCON へ実装を検討した。

(3) 電磁界解析では、線形の回路素子の容積を考慮することは容易である。しかしながら、ダイオードなどの非線形素子については、容積を考慮することは困難であった。そこで、電磁界解析における回路素子の取り扱いをより柔軟にするため、非線形素子の容積を考慮する FDTD 法の検討を行った。

(4) FDTD 法と FALCON の結合には、回路ベース FDTD 法の思想に基づく手法を用いる。しかしながら、検討を進めた所、電磁界解析部分の FDTD 法において、非線形回路は FDTD 法の 1 セルのみにはしか接続できないことが分かった。そこで、多セルにも接続可能なように、本手法の拡張を行った。

(5) 電磁界解析部分の演算効率の改善のため、並列計算機構の利用について検討を行った。まず、近年、GPU と同等の演算効率かつ様々な計算にも柔軟に対応できることで注目を浴びているインテル Xeon Phi の効果について評価を行った。その後、研究内容(4)で提案を行った手法を、共有メモリ型の計算機での実装に適した Cilk Plus 及び OpenMP を用いて実装を行った。さらに、スーパーコンピュータと同様の分散メモリ型の計算機での実装に適した MPI による実装も合わせて行った。

### 4. 研究成果

(1) 数値電磁界解析では以下のマックスウェル方程式を解く。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2)$$

式(1)における右辺第 2 項がオームの法則  $\mathbf{i} = \sigma \mathbf{E}$  である。しかしながら、電気回路の立場から、オームの法則はポテンシャルに関し

て成立するため、スカラーポテンシャル $\phi$ を用いた $\mathbf{i} = -\sigma \text{grad} \phi$ が正しいと考えられた。そこで、文献調査を行ったところ、砂川「理論電磁気学」において、電磁界のオームの法則はポテンシャルだけでなく起電力を含める必要があることが説明されており、 $\mathbf{i} = \sigma \mathbf{E}$ としている従来の定式化が正しいことが分かった。そこで、式(3)のローレンツゲージ、電磁ポテンシャルと電界との関係式(4)を用いて、FDTD法による解析を行った。

$$\text{div} \mathbf{A} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad} \phi \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{A}$ はベクトルポテンシャルを表している。

図1に示したYeeの格子のように、ベクトルポテンシャル及びスカラーポテンシャルを配置し、(電界、スカラーポテンシャル)、(磁界、ベクトルポテンシャル)を半ステップずつずらしながら計算を行った。

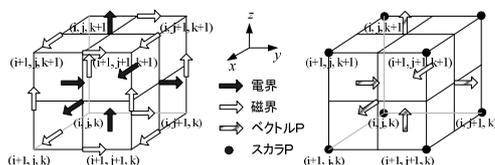


図1 FDTD法におけるYeeの格子

図2に平行2導体線路を抵抗で終端し、正弦波入力を与えた場合の解析結果を示す。比較のため、電磁ポテンシャルを導入しない場合と導入した場合の応答の偏差を%で表示している。図2より、初めの20ステップでは偏差が大きいが、解析が進むにつれてわずか数%になっていることが分かる。ただし、初めの20ステップでは応答の大きさも小さいため、大きな偏差が応答全体に及ぼす影響は小さいと考えられる。それゆえ、電磁ポテンシャルの電磁界に及ぼす影響は小さいと判断できる。そこで、研究計画を変更して、

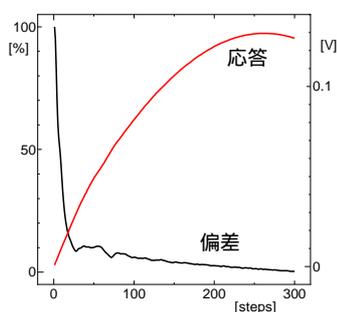


図2 電磁ポテンシャルの導入によって得られた応答と従来法との偏差

電磁ポテンシャルを用いずに、回路・電磁界混合解析を行う方法について検討することにした。

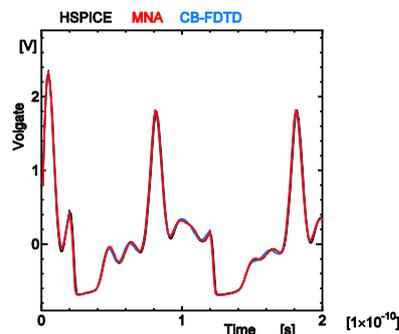


図3 回路ベース FDTD法の応答

(2)回路・電磁界混合解析ツールを作成するために、その前段階として、回路ベース FDTD法の FALCON への実装を行った。ここで、回路と電磁界を混合して解析を行うためには、線形部分と非線形部分の回路を分割して解析を行うことが必要となる。そこで、FALCONのソースコードを改良し、回路ベース FDTD法及び回路分割手法の導入を行った。導入には、インテルコンパイラ 11.1 及び数値演算パッケージとしてインテル・マスカネルライブラリを用いた。すなわち、試作ツールは OpenMP を用いた並列化に対応している。

図3に、電子システムのパッケージのモデルである平面回路のモデルに CMOS インバータを接続して解析を行った結果を示す。ここで、HSPICEは業界標準のシミュレータによる解析結果、MNAは通常の方法、CB-FDTDは回路ベース FDTD法の解析結果を示している。図3より開発したシミュレータは、商用のシミュレータと同等の解析精度であることが分かる。

次に、計算時間の比較を表1に示す。ここで、Planeとは平面回路にインバータを多数接続した回路であり、Coupleとは多導体システムのモデルであるインダクタ、キャパシタ、抵抗の各行列からなる線形回路にインバータを接続した回路を表している。表1において、MNAは通常の方法、FDTDは回路ベース FDTD法、分割とは回路ベース FDTD法に回路分割手法を適用した場合を表している。回路ベース FDTD法を導入することによって、平面回路では10倍、多導体システムでは15倍の演算効率が達成できている。さらに、回路分割手法を導入することによって、平面回路では25倍、多導体システムでは140倍まで演算効率が向上した。

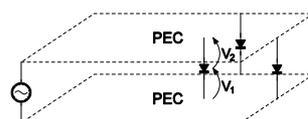


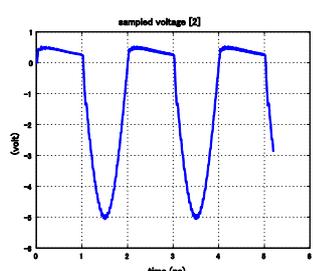
図4 非線形素子の容積の考慮

表 1 計算時間の比較

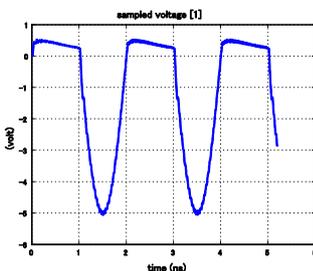
種類	MNA	FDTD	分割
Plane1	107.5	12.4	6.6
Plane2	1,110	101.7	46.9
Plane3	4,485	413.5	178.7
Couple1	231.5	70.8	11.8
Couple2	6,700	1,052	126.3
Couple3	78,042	5,584	558.7

(3)FDTD における非線形素子の取り扱いは、マクスウェル方程式におけるアンペアの法則の外部電流にキルヒホッフの法則を導入するというものである。従って、図 1 の Yee の格子の 1 セルに非線形素子が接続されることになる。一方、非線形素子の容積を考慮する場合には、横方向の広がりに対して特性を分割することはできるが、縦方向には非線形特性のため、特性を分割することは許されない。そこで、従来では、縦方向には 1 セルのみ非線形特性を仮定し、他のセルには完全導体を配置する方法が取られて来た。しかしながら、完全導体部分の電磁界は正しく求めることができない。そこで、縦方向の電圧を各セルの電界を積分した和に取ることによって解析を行う方法を提案した。従来法では 1 変数のニュートン法が実行されるのに対して、本手法では多変数のニュートン法、すなわち、ニュートン・ラフソン法が適用されることになる。

図 4 のように、縦方向 2 セルの非線形素子が配置された電磁界システムを、本手法を用いて解析を行った。図 5 に (a) $V_1$ 、(b) $V_2$  の解析結果をそれぞれ示す。ここで、非線形特性としては、ダイオード特性が仮定されており、それぞれの電圧の最大値は 0.4V 程度である。すなわち、これらの和がダイオードの特性に



(a)



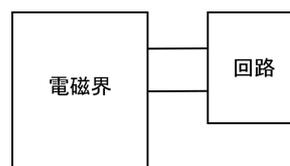
(b)

図 5 非線形素子の応答

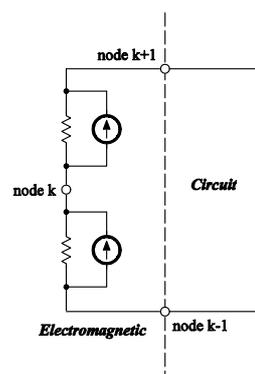
対応しており、妥当な解析結果が得られていることが分かる。

(4)研究成果(2)では回路の線形部分と非線形部分を分割して解析する方法が適用された。これを図 6(a)のように電磁界と回路が接続されたシステムの解析に適用することを考える。ここで、回路の代入の法則から、分割点における電流値あるいは電圧値を有する電源を用いると、回路を 2 つに分割できることが分かっている。そこで、図 6(a)の電磁界システムと回路の分割点での電流を用いることで、これらのシステムを分割することを考える。この場合には分割点の電流源は縦方向に複数接続されることになる。ここで、電流源が接続される節点が複数存在するため、その取扱いが困難となる。そこで、回路理論における電流源の解釈を用いると、前後 2 点のみに 1 つの電流源を接続すれば良いことが分かる。

さらに、FDTD 法の 1 セルを回路で表現すると、抵抗と電流源によって表される。従って、回路・電磁界混合解析は、図 6(b)のような等価回路で表すことができる。この場合には、回路、電磁界双方は個別に解析され、分割点における特性を得る場合のみ、図 6(b)の等価回路が用いられる。ここで、回路内に非線形素子を含むことも許されるため、電磁界解析法である FDTD 法と回路シミュレータは容易に接続することが可能となる。



(a)



(b)

図 6 回路・電磁界混合解析

(5)本研究の当初の目的では、PC のグラフィックプロセッサである GPU を利用して、混合解析を効率良く実行可能な解析ツールを開発する予定であった。しかしながら、回路解

析部分の FALCON が GPU を用いた場合には実装が困難であることが分かった。そこで、GPU と同様に並列性が高く、計算の柔軟性にも優れている Xeon Phi を用いることに変更した。

1.1GHz, 57 コアの並列性を有している Xeon Phi で実行できる FDTD 法の実装を行った。しかしながら、FDTD 法における Yee のセルは  $100 \times 100 \times 100$  の例題が実行できず、実行できる場合にも、8 コアを有する Intel Xeon E5-1620, 3.7GHz よりも計算速度が遅いという結果が得られた。そこで、Xeon Phi を用いた実装には効果がないと判断し、Xeon Phi を用いた混合解析ツールの開発は行わなかった。

研究成果(4)で提案した方法を FALCON 上に実装した。図 7 に実装した概要を示す。ここで、FDTD 法、図 6(b)の等価回路を作成する C++クラスの記述が FALCON に追加された。FDTD 法の電磁界の計算では、Cilk Plus を用いてマルチコア化を行っている。さらに、図 6(b)の分割点での解析は、FALCON の解析エンジンを用いて行っており、OpenMP によるマルチコア化が図られている。

スーパーコンピュータなどの分散メモリ型の計算機では、並列化に MPI を用いることが必要である。MPI とは、図 8(a)のようにプロセッサ(コア)間で通信を行うインターフェースであり、OpenMP とは異なり、初めから多コア、あるいは、多コンピュータで実行することが前提とされる。従って、FDTD 法を、MPI を用いて並列化する場合には、図 8(b)のように解析領域を分割して、それぞれの領域に各プロセッサ(コア)を割り当てる必要がある。そして、領域をまたぐ電界、磁界の値はプロセッサ間で通信が行われる。この部分に MPI の組み込み関数を用いることになる。

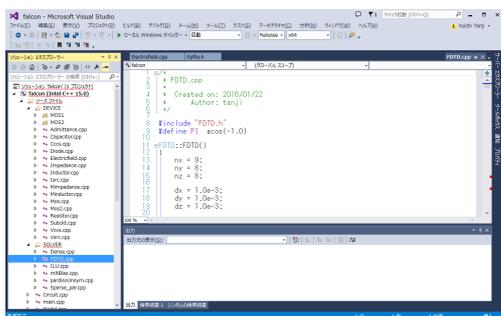
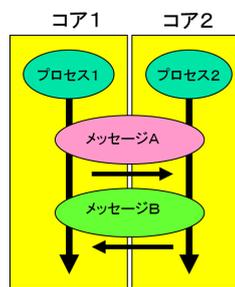


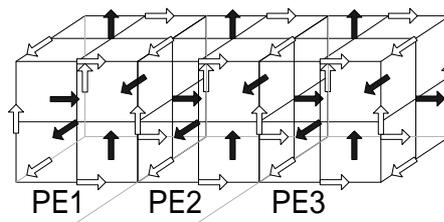
図 7 回路・電磁界混合解析の FALCON 上での実装

回路・電磁界混合解析を行う場合にも、分割された解析領域は有効となる。ここで、各領域の電磁界解析は、それぞれ、FALCON を呼ぶことになる。Cilk Plus 及び OpenMP を用いた実装が、FALCON から FDTD 法を呼んでいるのに対して、MPI を用いた実装では逆転していることに注意するべきである。

双方の実装を Intel Parallel Studio XE 2015 を用いて行った。例題として、導体



(a)



(b)

図 8 MPI を用いた回路・電磁界混合解析

システムに非線形素子が接続した系の解析を行った所、上記の 2 つの実装で同じ結果が得られた。この結果は数値演算パッケージである MATLAB の解析結果とも一致しており、正しい実装ができたと考えている。

本研究では、回路解析との親和性があり、かつ、電磁界の情報を失わない混合解析ツールの開発を目指して研究を行った。上記に述べた実装はこの目的を果たしていると言える。ただし、この達成は、電磁ポテンシャルではなく、回路分割手法の概念であったことを最後に述べておく。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Y. Tanji, "Fast Transient Simulation of Large Scale RLC Networks Including Nonlinear Elements with SPICE Level Accuracy," IEICE Trans. on Fundamentals, vol. E98-A, no. 5, pp. 1067-1076, May 2015.

Y. Tanji, "Fourier Expansion Method for Positive Real Approximation of Sampled Frequency Data," IEICE Trans. on Fundamentals, vol. E97-A, no. 9, 1937-1944, Sep. 2014.

〔学会発表〕(計 11 件)

丹治裕一, 回路シミュレータ SPICE の数学的背景と高速化について, VLSI 夏の学校, 日本学術振興会シリコン超集積化システム第 165 委員会, 京都, 2015 年 9 月.

S. Kondo, K. Tanaka, and Y. Tanji,

“ GPU Implementation and its Evaluation of Particle Swarm Optimization,” 2015 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, 2015年11月, 香港

丹治裕一, “電磁界解析における非線形素子の容積の考慮,” 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2015年1月, 大分

丹治裕一, “大規模 RLC 回路の解析における行列分割手法と回路分割手法の比較,” 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2014年10月, 松山

Y. Tanji and H. Kamei, “Behavioral Modeling of Class E Amplifiers Based on Modified Nodal Analysis Formulation,” The 10th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2013年5月, 北九州

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

丹治 裕一 (TANJI YUICHI)

香川大学・工学部・教授

研究者番号: 10306988