

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：55401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25560094

研究課題名(和文)電気系複合シミュレータの開発と教育への適用

研究課題名(英文)Development of Combined Simulator for Electrical Engineering Education

研究代表者

外谷 昭洋(Toya, Akihiro)

呉工業高等専門学校・電気情報工学分野・助教

研究者番号：20616180

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：近年の技術の進歩に伴い、複合的横断的な知識を持つ人材の育成が求められている。本研究では、電気分野の技術を複合的に理解する人材を育成するため、電磁界解析と電気回路解析を融合させて行う複合型教育用シミュレータの開発を行った。

今回の研究期間では、主にMathworks社製数値計算ソフトウェアMatlabで開発を行い、電磁界解析法に時間領域差分法、電気回路解析法に修正接点解析法を用いてプログラム開発を行った。また、両プログラムの融合には電流源法を用いた。試作したシミュレータについて、既存シミュレータとの解析結果比較を行うなどし、実用性の検討を行った。

研究成果の概要(英文)：Recently, in the field of electronics, engineers who understand various fields are required. But now, effective educational tools to foster engineers who are familiar with diverse fields are not provided for general use.

In this study, we developed a simulator with a graphical user interface (GUI) for education using Matlab, which combined the electromagnetic (EM) field simulator and the circuit simulator. They are combined by current source method that considered fringe effect. By the transient simulation, the behavior of the proposed simulator is confirmed.

研究分野：電気回路工学

キーワード：複合型シミュレータ FDTD法 修正接点解析法 電流源法 GUI

1. 研究開始当初の背景

近年の技術の進歩に伴い、複合的横断的な知識を持つ人材の育成が求められている。電気系分野においては、電気回路、電磁気学、電子回路、制御工学のそれぞれの技術分野を学ぶが、それらの関連性を理解できる人材が少ないため、複合的に理解できる人材の育成が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、電気分野の技術を複合的に理解する人材を育成するための、複合型教育用シミュレーションツールを開発し、教育効果を確認することを目的としている。シミュレータについては、将来的にモータ等の機械・制御系のシミュレーションまで包含する予定であり、今回提案する3年間の研究期間においては、電気回路と電磁気学を融合した直観的かつ視覚的なシミュレータの開発を行い、教育現場での実地検証を行うことを目標とする。

3. 研究の方法

本研究では、Java プログラム言語での電磁界解析ソフト開発と数値計算ソフトウェア Matlab(Mathworks 社製)でのアルゴリズム検証を行った。

Java プログラム言語での開発に関しては1年目で行い、Java 設計ツール“NetBeans”を活用し、電磁界解析プログラムの開発とグラフィカルユーザーインターフェース(GUI)の開発を行った。

2年目以降は、開発スピードを加速するため、数値解析ソフトウェア Matlab を使用し、電磁界解析プログラムの開発と電気回路解析プログラムの開発、両プログラムの融合を行った後、Matlab 上での GUI 開発を行った。また、GUI 化したプログラムについては、Matlab の Java 変換機能を使用し、Java のプログラムに変換する。

4. 研究成果

(1)NetBeans でのプログラム開発

電磁界解析手法として、回路解析と相性の良い、時間領域差分法(FDTD法)[1]を用いた。この方法は空間的に格子状に区切った各節の電界と磁界について、マクスウェルの方程式から導出される解析式により計算する方法である。計算のタイミングは、図1(a)で示す通り、電界と磁界を交互に計算し、ある時間の電界Eは0.5ステップ前の磁界と1ステップ前の電界から計算され、ある時間の磁界Hは0.5ステップ前の電界と1ステップ前の磁界から計算される形になる。空間的には、図1(b)に示すように電界と磁界のメッシュが交互に組まれる形になっており、これにより電磁界の計算が可能になっている。

Java プログラム言語で FDTD 法をプログラム化し、中心にかけた電界によって励起される電磁界の様子を解析した。結果を図2に示

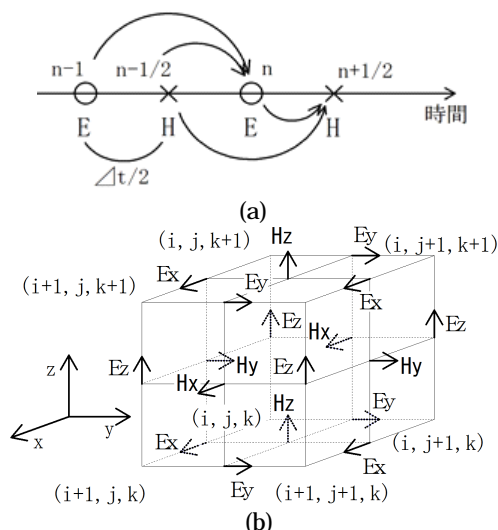


図1 FDTD 法 (a)時間解析イメージ (b)空間解析イメージ

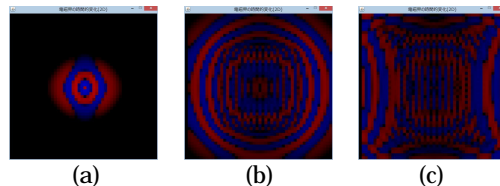


図2 Netbeans による Java 電磁界プログラム (a) ステップ数:200 (b) ステップ数:550 (c) ステップ数:750

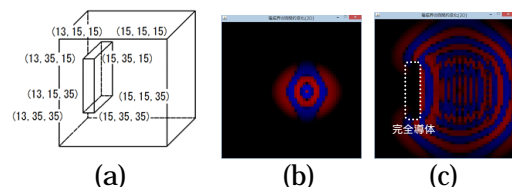


図3 Netbeans による完全導体辺の Java 電磁界プログラム (a) 解析構造 (b) 解析結果 ステップ数:200 (c) 解析結果:ステップ数 500

す。ステップ数の増加により、電界が波紋のように広がることを確認した。また、解析境界である画面の端で電界が反射していることから、境界条件の付加が必要であることが明らかになった。

また、図3(a)のように解析空間中に完全導体を置いた場合の解析も行い、プログラムの実効性を確認した。図3(b)に見られるようにステップ数200の時の電界の分布は完全導体がない図2(a)と同様な分布となっているが、図3(c)でみられるように、ステップ数が多くなり電界がより拡散された時には、完全導体での反射がみられるものとなった。

これにより、Java プログラム言語を用いた FDTD 法について試作を行い、定性的にはあるが検証を行い、電磁界解析プログラムの試作を完了した。

しかしながら、開発スピードに問題があるため、数値計算解析ソフト Matlab を使い開発を進め、複合シミュレータの解析理論の確立とプロトタイプの作成を行うことを検討することとなった。

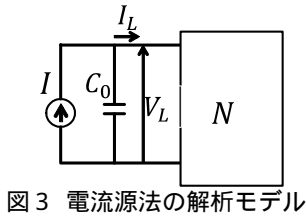


図3 電流源法の解析モデル

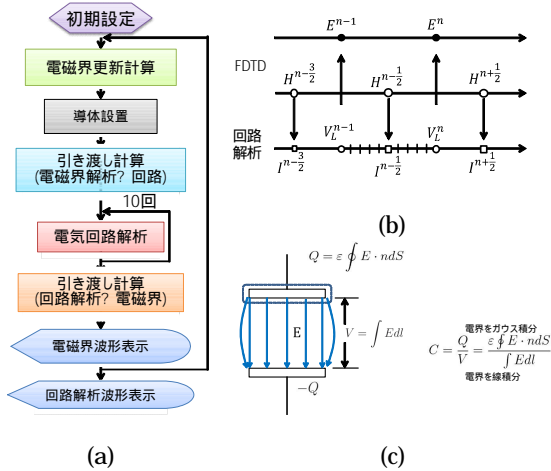


図4 電流源法による解析手順 (a)フローチャート (b)解析タイミングのイメージ (c)ガウス積分によるキャパシタンスの抽出

(2)Matlab でのプログラム開発

Matlab を用いて、回路シミュレータの開発および、電磁界シミュレータとの融合、GUIの開発を行った。

回路シミュレータについては、時間領域での解析を行うことから、修正接点解析法を用いた[2][3]。これは、キルヒホッフの電流則をベースに回路方程式を立て、逆行列から解を求める方法である。この方法の中で、キャパシタンスやインダクタンスによる微分項については後退オイラー法を適用し、時間領域での解析を行うものである。

FDTD 法による電磁界解析結果との融合については、電流源法[4]を適用した。この手法は、電磁界解析結果を等価電流源 I と等価容量 C_0 で表現し、回路解析に組み込み計算し、回路解析で計算された電圧 V_L を電磁界解析に組み込み計算する手法である。今回開発した複合シミュレータについては、図4(a)のフローチャートで表される通り、回路解析10回に対して電磁界解析を1回行う形式としている。また、複合シミュレータを FDTD 法で実現するため、電界と磁界の計算については、図4(b)に示す通り交互に行っている。等価容量 C_0 の計算については、フリンジ容量も考慮し、図4(c)のように計算した。ここでは導体周辺の電界を面積分し電荷 Q を求めた後、この Q を導体間の電界を線積分して得られた電位差 V で割ることで等価的にキャパシタンスを計算した。

図5に Matlab を使用した複合シミュレータの解析結果を示す。今回は図5(a)の RC 直列回路の過渡解析を行う。ここで、キャパシ

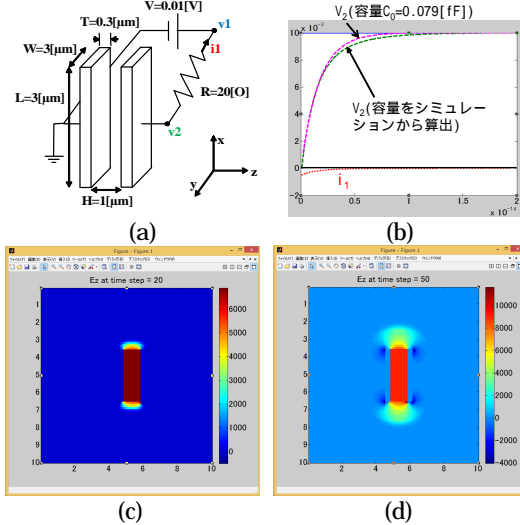


図5 Matlab による複合シミュレーション (a)解析条件 (b)回路解析結果 (c)電磁界解析結果 ステップ数:20 (d)電磁界解析結果 ステップ数:50

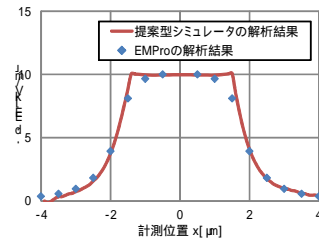


図6 平板中間部の電界分布の既存電磁界シミュレータとの比較

タンス(並行平板コンデンサについては電磁界解析で解析し、電圧源および電気抵抗を回路解析用の部品として付加し、複合シミュレーションを実現している。電気回路部分の解析結果を図5(b)に示す。R と C の間の端子電圧 V_2 に着目すると、複合シミュレータの解析結果と並行平板コンデンサを等価容量 0.079pF として計算した場合の計算結果が、ほぼ等しくなり複合シミュレータの実効性を確認した。

電磁界シミュレーションについては図5(c)(d)のようになり、並行平板コンデンサの電磁界シミュレーションが実現できている。電磁界シミュレーションの精確性を検証するため、既存の電磁界シミュレータ EMPro(Keysight 社製)と並行平板の中間部の電界分布について比較を行った(図6)。提案するシミュレータが平板全体に電界をかけており、EMPro が平板の中心のみに電界をかけているため、平板間の端部 ($\pm 1.5\mu\text{m}$) に誤差が含まれるものの、おおよそ同様の分布をしているため、精度が担保されていると考えている。

なお、NetBeans のシミュレータで問題となっていた解析境界部の電磁界については、PML(Perfect Matching Layer)の導入により解消している。

続いて、Matlab の GUIDE 機能を使用し、GUI を作成した。作成した GUI を図7に示す。この GUI では構造の表示や解析に使う画面のほ

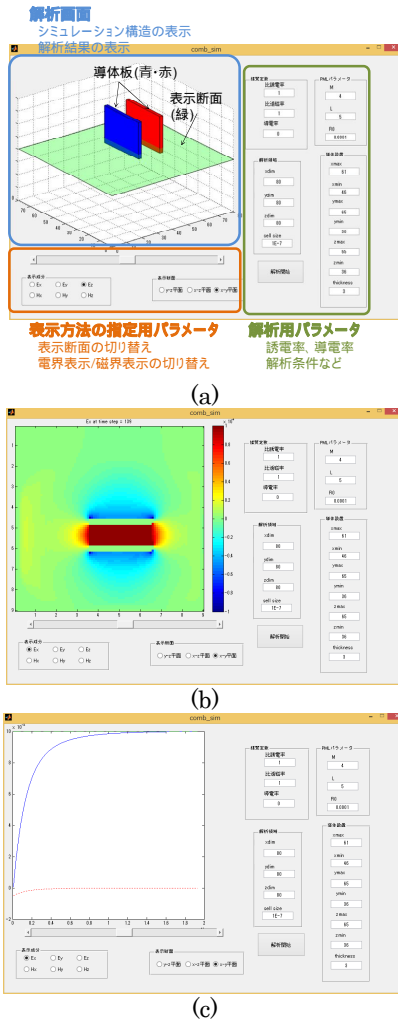


図7 GUIDE 機能を使った複合シミュレータのGUI (a) 初期画面 (b) 電磁界解析結果表示画面 (c) 回路解析結果表示画面

かに、電界/磁界の表示切り替えや表示断面をパラメータで指定するエリアや解析用のパラメータを指定するエリアを付けている。

これらのパラメータを指定し、解析した結果を図7 (b)(c)に示す。電磁界解析については、指定した表示断面に基づいて表示するようになっており、回路解析結果については、電磁界解析が終了後表示する形になっている。

(3)使用者の感想

時間の都合上、授業に適用できるまでの開発はできていないが、開発したGUIプログラムを公開し学会等でヒアリングを行い、速度やGUIに改良の余地があるものの、好評を得ることができた。

<参考文献>

- [1] 橋本修他, "FDTD 時間領域差分法入門", 1996, 森北出版株式会社
- [2] 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", 2014, pp.1-36, VLSI 夏の学校
- [3] 盛 健次他, "MATLAB 言語を用いた回路シミュレータの開発", 2014, pp.1-13, LSI と

システムのワークショップ

[4] 宇野 享, "FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析", 1998, pp.176-183, コロナ社

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 3 件)

(1) 今岡聖也, 外谷昭洋, "電気系複合シミュレータの開発", 第76回応用物理学会秋季学術講演会, 講演予稿集, 15a-PA1-25, 2015年9月15日, 名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市).

(2) Seiya Imaoka, Akihiro Toya, "Development of Combined Simulator for Electrical Engineering Education", Proc. of 5th International Symposium on Technology for Sustainability, Universiti Teknologi Mara (Malaysia), 4-5 August 2015.

(3) 今岡聖也, 外谷昭洋, "電気系複合シミュレータの開発", 第63回応用物理学会春季学術講演会, 講演予稿集, 21a-P2-41, 2016年3月21日, 東京工業大学 大岡山キャンパス(東京都・目黒区).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

外谷 昭洋 (Akihiro Toya)

呉工業高等専門学校・電気情報工学野・助教

研究者番号: 20616180