

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：32692

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560418

研究課題名(和文) Open FOAMを用いた電磁界数値解析法のマイクロ・ナノデバイス解析への応用

研究課題名(英文) New Numerical Method by using Open FOAM for the analysis of the novel designs and realization of micro/nano devices

研究代表者

黒田 道子 (KURODA, Michiko)

東京工科大学・コンピュータサイエンス学部・教授

研究者番号：70225308

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：電磁界数値解析の移動境界問題の提案である。ローレンツ変換を考慮した時間格子と空間格子の座標変換を導入した新しいアルゴリズムを提案した。平成23年度は、回転運動と平行移動、誘電体を導入した場合について計算精度を確認できた。平成24年度はローレンツ逆変換を行い、静止座標上での計算結果を示すことができた。また、波源の移動の電波伝搬解析も実現できた。平成25年度は、交差点モデルにおいて2つの移動する波源からの電波伝搬解析を行った。並列計算法Open MPを導入し、計算時間の短縮ができた。今後、ナノ・マイクロ波の領域、移動通信の領域等で重要な計算手法となる移動境界問題の数値計算法を提案できたといえる。

研究成果の概要(英文)：A numerical technique for the analysis of the Electromagnetic field by moving sources or moving bodies can be significantly important for the realization of mobile communication system or micro/nano devices. Overset Grid Generation method combined with the FDTD method and Lorentz transformation is proposed for the analysis of the EM field with moving boundaries. By overlapping one moving sub mesh on a static main mesh, each mesh is calculated alternately by using interpolation technique. For higher velocity value, Lorentz transformation is applied to the FDTD method. This technique is applied for the rotating motion and moving source. It is also applied for the analysis of the cross section for mobile communication system, when the input source is moving towards the moving body. This technique is applied for the analysis of EM fields with moving sources by using parallel computing technique, Open MP. Thus, it will give a great impact to many areas.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：移動境界 重合格子 FDTD法 ローレンツ変換 移動波源

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者黒田は、1991年に電磁界数値解析の分野に初めて移動境界問題を導入して以来、電磁界の移動境界問題に取り組んできています。電磁界数値解析法を用いて移動境界問題を解析するためには、理論式を用いた手法や単純な補間法を用いて行われていた。これらの手法では複雑な運動や形状に対応できないため、代表者は数値流体の分野で提案されている重合格子法と電磁界数値解析法である FDTD 法を組み合わせた数値解析法を考案した。しかし、電磁界問題では移動速度が光速に近い場合も取り扱うため数値流体分野で使われている重合格子法をそのまま適用することはできない。

我々のグループでは運動系と静止系を重合格子法の主格子と副格子で表現するという新しい手法を考案し、FDTD 法にローレンツ変換を導入するアルゴリズムを開発した。両方の慣性系では、高速な場合はローレンツ変換を用いるため時間格子間隔と空間格子間隔が一定ではなく、通常の FDTD 法を使用することができない。そこで、時間と空間に補間法を導入することでこれを解決することができた。この結果、これまで理論解析にのみ頼っていた高速移動する電磁界境界問題などの解析に適用できるようになり、その適用範囲は限りなく広がったと言える。この手法は、FDTD 法を用いて振動する境界や高速に近い速度で運動する物体や波源を直接数値解析できる点に特徴があり、電磁界と振動など複数の運動現象が絡み合う複雑な電磁界連成問題の解析法を確立でき、電磁界数値解析法を格段に向上させる新しいシミュレーション法として国内外で注目されている。最近では、レーザ内の電子の運動や MEMS などの可変機能を持つデバイス、カーボンナノチューブの解析などに振動する電磁界解析が求められるようになってきており、この手法の応用が広く期待されている。ただ、大容量の数値解析に計算時間がかかるため、今回は Open FOAM という並列計算が簡易かつ大容量の計算ができる手法を取り入れる。

## 2. 研究の目的

研究代表者黒田は電磁界の移動境界問題に取り組んでいるが、これまでローレンツ変換を FDTD 法に組み入れる手法を考案し高速の場合にも適用できるアルゴリズムを考案した。近年では、レーザ内の電子の運動解析や MEMS などの可変機能を持つデバイスさらにはカーボンナノチューブなどの解析に電磁界振動連成の数値解析が求められてきており、この手法は国内外で注目されている。ここでは、大容量の数値解析が可能な Open FOAM という新しい数値解析法を導入し、この手法をマイクロ・ナノデバイスの機構を解

析する数値解析法に適用し、新しい現象の解明に取り組む

## 3. 研究の方法

研究代表者黒田は、これまで移動境界問題を電磁界数値解析の分野に導入し、FDTD 法を用いて数値解析を行い、理論値との比較を行ってきた。重合格子法という流体の分野で用いられていた数値解析法を電磁界数値解析の分野へ初めて導入した。しかし、数値流体の分野で使用できた重合格子法は電磁界にそのまま適用することはできない。電磁界問題では、光速に近い速度の場合の計算も求められる。そこで、黒田は、ローレンツ変換を FDTD 法に導入する手法を開発し、1次元問題については理論値と比較しよい一致をみている。この手法をさらに複雑な回転運動や3次元問題、複数の波源の移動などに適用した後、マイクロ波デバイスやカーボンナノチューブなどの動作解析、移動通信などに適用できるよう OpenMP という並列計算を導入した。

## 4. 研究成果

電磁界移動境界問題の数値解析法に取り組んだ。重合格子法を FDTD 法に導入し、主格子と副格子間で高速の場合にも適用できるようにローレンツ変換を考慮した時間格子と空間格子の座標変換を考案した新しいアルゴリズムを提案した。直線運動を回転運動に変えるため、主格子と副格子間で高速の場合にも適用できるようにローレンツ変換を考慮した時間格子と空間格子の座標変換を考案し副格子を回転させ、この計算結果を理論値と比較を行い精度の確認を行った。さらに、副格子を誘電体として誘電体の回転問題の解析を行った結果は理論値とよい一致を見た。このように誘電体の回転を数値解析できることにより、カーボンナノチューブなどの数値解析に適用できることが証明でき、今後広く応用が期待される。これらの成果のうち、回転運動についての成果をまとめた論文は、2011年8月に ACES Journal に掲載された。精度に関する研究は、2011年7月の IEEE APS で発表した。国内では、2011年9月電子情報通信学会ソサエティ大会、11月の電気学会電磁界理論研究会などで発表した。一方で、この手法は可変容量コンデンサを有する回路からの不要電波の解析にも適用できることが確認され、この成果は、2012年3月電子情報通信学会総合大会で発表した。このようにして、得られた成果は国内外の学会で発表し、高い評価を得ている。2012年度はローレンツ逆変換を行い、静止座標上での計算結果を示すことができた。このことより、実用化に向けた大きな成果を得たと言える。一方、これまでは移動物体に対する電波伝搬の解析を行っていたが、波源の移動を導入することができた。この結果を用いて移動波源からの電波伝搬解析も行うことが

可能になり、より実用化に近づけたと言える。誘電体を導入した場合についてのシミュレーションを行ったが、これらの成果のうちで論文誌としては、2013年1月に電子情報通信学会英文論文誌に採録された。国際会議では、2012年4月に ACES 2012、2012年12月 IEEEAPACE2012 で発表した。一方でこの手法は可変容量コンデンサを有する回路からの不要電波の解析にも応用できることが確認された。この成果は、2012年11月電気学会電磁界理論研究会で発表した。波源が移動する場合においては、2013年3月電子情報通信学会総合大会で発表した。

2013年度は、実際の速度に適用できるように交差点モデルの解析を行った。2つの移動する波源からの電波伝搬解析を行った。この際、膨大な計算時間を短縮するため並列計算法の一つである Open MP を導入した。この結果、交差点モデルにおいて2つの波源からの電波伝搬解析を含めて行うことができた。この成果は、2013年5月に電気学会論文誌、2013年12月 Microwave and Optical Technology Letters に採録された。国際会議では、2013年5月 EMTS2013、2013年11月 APMC2013 で発表した。2014年8月 ICEAA2014、2014年10月の EuMW2014 でも発表予定である。国内では、2014年3月電子情報通信学会総合大会で発表した。以上のように電磁界数値解析に移動する物体、移動する波源を導入する数値計算を提案できた。今後、ナノ・マイクロ波の領域、移動通信の領域等で益々必要とされる重要な数値解析法を提案でき、当初の目標を達成できた。

#### 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)

[雑誌論文] (計 4 件)

- (1) Y. Shimizu, Akimasa Hirata, Michiko Kuroda, "FDTD Analysis of Emission from Capacitor with Mechanical Motion", Microwave and Optical Technology Letters/pp2821-2824 vol.55, no.12, December, 2013
- (2) Shafrida Sahrani, Michiko Kuroda, "Numerical Technique for the Analysis of Electromagnetic Field by Moving Dielectric Body", IEEE Trans FM vol.133No.5, pp255-259, May, 2013 (DOI:10.154/ieejfm.133.255)
- (3) Shafrida Sahrani, Michiko Kuroda, "FDTD Analysis with Overset Grid Generation Method for Rotating Body and Evaluation of Its Accuracy", IEICE Trans. ELECTRON., Vol.E96-C, No.1, pp35-41, January, 2013
- (4) Shafrida Sahrani, Hiroshi Iwamatsu, Michiko Kuroda, "A Novel Approach for the Analysis of Electromagnetic Field with

Rotating Body", ACES Journal, vol.26, No.8, pp651-659, August, 2011

[学会発表] (計 14 件)

- (1) Takuya Akata, Shafrida Sahrani, Michiko Kuroda, "Numerical Analysis of the EM Field from a Moving Source and the Application for a Moving Vehicle", EuMC2014, October, 2014, Rome
- (2) Shafrida Sahrani, Takuya Akata, Michiko Kuroda, "EM Field in a Street Cross Section from Moving Vehicle", ICEAA2014, August, 2014, Aruba
- (3) 赤田達也、黒田道子、"FDTD 法を用いた移動波源と移動車両間の電波伝搬解析"、電子情報通信学会総合大会、2014年3月21日、新潟大学
- (4) Shafrida Sahrani, Tatsuya Akata, Michiko Kuroda, "FDTD Method for the Analysis of the EM Field from a Moving Source", APMC2013, Nov., 2013, Seoul
- (5) Y. Shimizu, A. Hirata, M. Kuroda, "FDTD Analysis of Unwanted Emissions from a Variable Capacitor with Sinusoidal Motion", EMTS2013, May, 2013, Hiroshima
- (6) 赤田達也、黒田道子、"FDTD 法を用いた交差点における移動車両からの電波伝搬解析"、電子情報通信学会総合大会、2013年3月、岐阜大学
- (7) 赤田達也、黒田道子、"交差点における波源の移動を考慮した電波伝搬解析" 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会 160、2013年3月2日、東海大学
- (8) Shafrida Sahrani, Michiko Kuroda, "Numerical Analysis of the Electromagnetic Wave Scattering from a Moving Dielectric Body by Overset Grid generation Method", IEEE APACE2012, December, 2012, Melaka, Malaysia
- (9) 清水悠平、平田晃正、黒田道子、"器械運動する可変コンデンサからの不要放射の時間領域解析"、電気学会電磁界理論シンポジウム、EMT-12-161, 2012年11月、熊本
- (10) Shafrida Sahrani, Michiko Kuroda, "Characteristic of EM Field by a Rotating Body and Its Numerical Error", ACES2012, pp370-374, April 2012 Columbus OH
- (11) Shafrida Sahrani, Michiko Kuroda, "Accuracy Study of the Overset Grid Generation Method with Rotational Motion Based on the Cell Size", 電磁界理論シンポジウム、EMT-11-147, 2011年11月18日、富山
- (12) 回海波、黒田道子、佐藤明雄、"FDTD 法を用いた交差点における電波伝搬損失度特性に対する電波伝搬"、電気学会電磁界

理論シンポジウム、EMT-11-122, 2011 年 11 月  
17 日、富山

(13) Shafrida Sahrani, Michiko Kuroda,  
“Numerical Technique for Investigation of the  
Relation Between the Angular and the Phase  
Shift in a Rotating Body”, 電子情報通信学会  
エレクトロニクスソサエティ大会、C-1-12,  
2011 年 9 月、札幌

(14) Shafrida Sahrani, Hiroshi Iwamatsu,  
Michiko Kuroda,” Overset Grid Generation  
Method in Relativistic Rotating Body and its  
Influence on Accuracy”, IEEE APS2011, July,  
2011, Spokane, USA

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

黒田 道子 ( KURODA, Michiko )  
東京工科大学・コンピュータサイエンス学  
部・教授

研究者番号：70225308