

## 回転対称構造解析用局所一次元FDTD法の開発 とマイクロ波素子設計への応用

柴山, 純 / SHIBAYAMA, Jun

---

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

科学研究費補助金研究成果報告書

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

4

(発行年 / Year)

2011-05

## 様式 C-19

## 科学研究費補助金研究成果報告書

平成23年5月9日現在

機関番号：32675  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2009～2010  
 課題番号：21760266  
 研究課題名（和文）回転対称構造解析用局所一次元FDTD法の開発とマイクロ波素子設計への応用  
 研究課題名（英文）Development of a locally one-dimensional FDTD method for the analysis of circularly symmetric structures and its application to the design of microwave devices  
 研究代表者  
 柴山 純（SHIBAYAMA JUN）  
 法政大学・理工学部・講師  
 研究者番号：40318605

## 研究成果の概要（和文）：

回転対称構造を効率よく解くための局所的次元法に基づく差分時間領域（BOR-LOD-FDTD）法を開発した。回転方向の高次モードさえも扱える、より一般的な定式化を行った。結果として、空洞共振器の高次モード解析において、従来の陽的な法に比べ計算時間を28%にまで短縮できた。加えて、LOD-FDTD法を3次元（3-D）問題が扱えるように拡張した。さらに、周波数依存型の3-D LOD-FDTD法の開発も行った。

## 研究成果の概要（英文）：

The body-of-revolution finite-difference time-domain method based on the locally one-dimensional scheme (LOD-BOR-FDTD) has been developed for the efficient analysis of circularly symmetric structures. In particular, the general formulation is presented in order to treat higher-order modes with respect to the rotational direction. As a result, the computational time is reduced to only 28% of that of the conventional explicit method for the analysis of resonance frequencies of higher-order modes for a circular cavity resonator. In addition, the LOD-FDTD method is extended to a three-dimensional (3-D) version. Furthermore, a frequency-dependent 3-D LOD-FDTD method is developed to analyze plasmonic devices.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,400,000	420,000	1,820,000

研究分野：機能素子工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：Body of Revolution (BOR)、FDTD法、LOD-FDTD法、円筒座標系、回転対称構造

## 1. 研究開始当初の背景

申請者が世界に先駆けて提案した局所的次元法に基づく陰的有限差分時間領域（LOD-FDTD）法が極めて効率よい陰的手法であると、国内だけでなく国外の多くの研究者によって明らかにされてきていた。その際、

特に国外において LOD-FDTD 法の改良、拡張が進んでいたが、それらは直交座標系のみでの検討であった。そこで、回転対称構造を効率よく解くための円筒座標系に基づく LOD-FDTD 法の開発が取り組むべき最重要課題であった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、回転対称構造を効率よく解析するための、円筒座標系に基づく LOD-FDTD 法を新たに開発し、これまで種々の光デバイス解析を行ってきた実績を基にマイクロ波デバイスの解析、設計を行うことである。まず、回転対称構造を取り扱うために、回転方向の界の振る舞いを解析的に取り込む Body of Revolution (BOR) FDTD 法に LOD 法を適用する。最低次モードの解析に加え、高次モードの解析も行う。さらに、より一般的な円筒座標系に基づく LOD-FDTD 法を開発する。その際、中心軸の離散化に注意が必要である。LOD 法のアルゴリズムに整合する、中心軸の条件式の導出にも努力を払う。LOD-BOR-FDTD 法、円筒座標系 LOD-FDTD 法が完成した後、回転対称構造のマイクロ波デバイスを解析する。解析的に扱えないモデルを取り上げ、新たな知見を得る。研究成果の発表も逐次行っていく。

## 3. 研究の方法

陰的な LOD-BOR-FDTD 法の開発を行った。基礎検討として、回転方向に界の変化のない基本モードを解くための定式化を行った。交互方向陰解法に基づく手法 (ADI-BOR-FDTD 法) では、差分式右辺の演算数が乗・除算で 40、加・減算で 58 なのに対し、本手法ではそれぞれ 22、38 と、極めて簡素なアルゴリズムが構築できた。円筒空洞共振器を解析し、ADI-BOR-FDTD 法で得られた共振周波数と同一の結果を 70% の計算時間で算出することができた。さらに、高次モードも扱えるように、より一般的な LOD-BOR-FDTD 法の定式化を行い、全モードの解析が可能になった。

LOD-BOR-FDTD 法が完成したので、3次元円筒座標系 LOD-FDTD 法の構築に取り掛かった。同時にワークステーションの立ち上げを行った。しかしながら、3次元円筒座標系において中心軸の取り扱いが極めて困難であり、中心軸上の界の破綻が避けられなかった。そこで、まず 3次元直交座標系 (3-D) LOD-FDTD の開発に取り掛かった。3-D LOD-FDTD では空間刻み幅を大きく選べる場合、従来の手法に比べて効率の良い計算を行うのが困難であった。これは数値分散誤差の増加が原因であった。そこで、分散制御パラメータを導入することで、中心波長付近での分散誤差を大幅に低減できることを明らかにした。さらに、金属媒質を含むデバイスを解析できるように、3-D LOD-FDTD 法を周波数依存の手法に拡張した。ワークステーションの利用がプラズモニックデバイスの解析に役立った。結果として、極めて効率よく 3次元のデバイス解析が行えるようになった。

## 4. 研究成果

LOD-BOR-FDTD 法の確立によって、BOR 法を用いて扱えるすべてのモードが効率よく解析できるようになった。特に、空洞共振器の高次モードの共振周波数の計算では、ADI-BOR-FDTD 法、及び従来の BOR-FDTD 法に比べ、計算時間をそれぞれ 63%、28% にまで短縮できた。結果を IEEE の国際会議 International Conference on Wireless Information Technology and Systems で発表した。陰的手法としては、初めて全モードが扱えるようになったので、回転対称構造の効率よい解析に威力を発揮できる。

さらに、3-D LOD-FDTD 法に分散制御パラメータを導入し、従来計算時間を短縮できなかった、誘電体導波路解析においても効率よい解析が可能になった。加えて、世界に先駆けて 3-D LOD-FDTD 法を周波数依存型に拡張した。ワークステーションの利用と相まって、プラズモニックデバイスが効率よく解析できるようになった。これら 2つの成果に関しては、それぞれ IEEE の雑誌論文に投降し、両者とも論文の採録が決定した。今後は、種々のプラズモニックデバイスの解析・設計に応用し、微小サイズの機能素子の提案を行っていく。

## 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 7 件)

1. [査読付き] J. Shibayama, R. Ando, J. Yamauchi, and H. Nakano, "Frequency-dependent 3-D LOD-FDTD method for the analysis of plasmonic devices," **IEEE Photonics Technology Letters**, vol. 23, 2011, in print.
2. [査読付き] J. Shibayama, R. Ando, J. Yamauchi, and H. Nakano, "A 3-D LOD-FDTD method for the wideband analysis of optical devices," **IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology**, vol. 29, 2011, in print.
3. [査読付き] J. Shibayama, J. Yamauchi, and H. Nakano, "Analysis of plasmonic waveguides and gratings using implicit finite-difference methods," **Advances in OptoElectronics**, vol. 2011, Article ID 287284, 2011.
4. [査読付き] J. Shibayama, "Three-dimensional numerical investigation of an improved surface plasmon resonance waveguide sensor," **IEEE Photonics Technology Letters**, vol. 22, no. 9, pp. 643-645, 2010.
5. [査読付き] J. Shibayama, A. Nomura, R.

- Ando, J. Yamauchi, and H. Nakano, "A frequency-dependent LOD-FDTD method and its application to the analyses of plasmonic waveguide devices," **IEEE Journal of Quantum Electronics**, vol. 46, no. 1, pp. 40-49, 2010.
6. [査読付き] J. Shibayama, R. Ando, J. Yamauchi, and H. Nakano, "An LOD-FDTD method for the analysis of periodic structures at normal incidence," **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, vol. 8, pp. 890-893, 2009.
  7. [査読付き] J. Shibayama, B. Murakami, J. Yamauchi, and H. Nakano, "LOD-BOR-FDTD algorithm for efficient analysis of circularly symmetric structures," **IEEE Microwave and Wireless Components Letters**, vol. 19, no. 2, pp. 56-58, 2009.
- [学会発表] (計 2 1 件)
1. J. Shibayama, T. Oikawa, J. Yamauchi, and H. Nakano, "Technique for improving the implicit BOR-FDTD method based on the locally one-dimensional scheme," 13th International Symposium on Microwave and Optical Technology (ISMOT 2011), accepted, 2011, Prague, Czech.
  2. 安藤, 柴山, 山内, 中野, "プラズモン導波路解析のための周波数依存型 3 次元 LOD-FDTD 法," 電子情報通信学会総合大会, C-1-15, 2011 年 3 月 16 日, 首都大学東京.
  3. 柴山, 山内, 中野, "陰的 FDTD 法の時間刻み幅の上限に関する一考察," 電子情報通信学会総合大会, C-1-18, 2011 年 3 月 16 日, 首都大学東京.
  4. 柴山, 及川, 安藤, 山内, 中野, "改良型 LOD-BOR-FDTD 法によるファイバグレーティングの解析," 電子情報通信学会総合大会, C-1-27, 2011 年 3 月 16 日, 首都大学東京.
  5. 若林, 柴山, 山内, 中野, "サブ波長グレーティングを利用した広帯域ミラーの LOD-FDTD 解析," 電子情報通信学会総合大会, C-1-28, 2011 年 3 月 16 日, 首都大学東京.
  6. 山内, 吉村, 周東, 柴山, 中野, "Drude-CP モデルを用いたクレッチマン型 SPR センサの BPM 解析," 電子情報通信学会総合大会, C-3-22, 2011 年 3 月 14 日, 首都大学東京.
  7. J. Shibayama, K. Watanabe, R. Ando, J. Yamauchi and H. Nakano, "Simple frequency-dependent FDTD algorithm for a Drude-critical points model," Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference, WE1D-4 (全 3 頁), DEC 8 2010, Yokohama.
  8. 柴山, 渡部, 山内, 中野, "台形則に基づく Recursive Convolution 法による Drude-Critical Point モデルの解析," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-1-8, 2010 年 9 月 15 日, 大阪府大.
  9. 若林, 柴山, 山内, 中野, "傾斜入射時における周期構造解析のための LOD-FDTD 法 (II)," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-1-11, 2010 年 9 月 15 日, 大阪府大.
  10. 安藤, 柴山, 山内, 中野, "改良型 3 次元 LOD-FDTD 法による光導波路解析," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-1-12, 2010 年 9 月 15 日, 大阪府大.
  11. Y. Wakabayashi, J. Shibayama, J. Yamauchi, and H. Nakano, "An LOD-FDTD method for the analysis of a periodic structure at oblique incidence," Asia-Pacific Radio Science Conference, BEFKa-4 (全 1 頁), SEP 24 2010, Toyama.
  12. J. Shibayama, Y. Wakabayashi, J. Yamauchi, and H. Nakano, "Wideband analysis of periodic electromagnetic elements," International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, Session 12 (全 4 頁), SEP 21 2010, Sydney, Australia.
  13. J. Shibayama, R. Ando, J. Yamauchi, and H. Nakano, "General formulation of an efficient implicit BOR-FDTD

method based on the locally one-dimensional scheme,” IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems, 304.5, 前4頁, SEP 1 2010, Honolulu, Hawaii.

14. 安藤, 柴山, 山内, 中野, “3次元 LOD-FDTD 法による導波路グレーティングの解析,” 信学技報, vol. 110, no. 156, OPE2010-35, pp. 69-74, 2010年7月29日, 札幌.
15. 若林, 柴山, 山内, 中野, “傾斜入射時における周期構造解析のための LOD-FDTD 法,” 電子情報通信学会総合大会, C-1-20, 2010年3月16日, 東北大学.
16. 柴山, 安藤, 山内, 中野, “LOD-BOR-FDTD 法による円筒空洞共振器の高次モード解析 (II),” 電子情報通信学会総合大会, C-1-21, 2010年3月16日, 東北大学.
17. 柴山, 山内, 中野, “陰的 FDTD 法の最近の研究動向,” 電子情報通信学会総合大会, CS-1-7, 2010年3月17日, 東北大学.
18. J. Shibayama, R. Ando, J. Yamauchi, and H. Nakano, “Analysis of a photonic bandgap structure using a periodic LOD-FDTD method,” Asia Pacific Microwave Conference, TU1B-1, 全4頁, DEC 8 2009, Singapore.
19. J. Shibayama, R. Ando, A. Nomura, J. Yamauchi, and H. Nakano, “Analysis of a plasmonic microcavity using the frequency-dependent LOD-FDTD method,” Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications, IMB4, 全3頁, JUL 13 2009, Honolulu, Hawaii.
20. 柴山, 安藤, 渡部, 山内, 中野, “改良型 LOD-FDTD 法による導波路グレーティングの解析,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-1-21, 2009年9月17日, 新潟大学.
21. 柴山, 安藤, 山内, 中野, “周期構造解析のための LOD-FDTD 法,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, CS-1-3, 2009年9月18日, 新潟大学.

[その他]

ホームページ等

<http://kenkyu-web.i.hosei.ac.jp/Profile>

s/17/0001656/profile.html

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

柴山 純 (SHIBAYAMA JUN)

法政大学・理工学部・講師

研究者番号: 40318605