

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：63902

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656560

研究課題名(和文)ミリ波伝送素子最適構造設計用電磁波シミュレーション技法の開発

研究課題名(英文)Development of electromagnetic propagation simulation for millimeter-wave guide elements

研究代表者

中村 浩章(Nakamura, Hiroaki)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：30311210

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)：核融合プラズマにおける電子サイクロトロン加熱(ECH)システムのミリ波伝送効率の向上を目指し、電磁波伝播(時間領域空間差法：FDTD)シミュレーションシステムの開発を行ってきた。研究成果として、マイターバンド用のFDTDシミュレーションコードと可視化システムを開発し導波路内の電磁波を解析した。可視化によりコルゲートが渦電流をせき止め、表面電流を抑制することがわかった。マイターバンドのミラーにおける熱分布を実験と理論とシミュレーションで比較した結果、ほぼ一致した。さらに、誘導電流の計算をできるように改良し、マイターバンド・マイターバンド型偏波器における電磁波伝搬のシミュレーションできた。

研究成果の概要(英文)：To improve millimeter-wave transmission efficiency of the electron cyclotron heating (ECH) system in the nuclear fusion plasma, we developed electromagnetic wave propagation simulation (time domain space difference method: FDTD). As research results, we developed a FDTD simulation code in visualization system for miter bend. This code is useful not only for miter bend but also to analyze the electromagnetic waves of the waveguide. Using this code, it was found that corrugated waveguide suppresses eddy currents. The results were compared with experiment of the heat distribution in the mirror of the miter bend. From this comparison, it was almost the same. Furthermore, it is improved to allow the calculation of the induced current. Then it was possible to simulate the electromagnetic wave propagation in a mitered bend and a mitered bend polarizer.

研究分野：計算科学

キーワード：導波管 時間領域空間差分法 FDTD法 電子サイクロトロン加熱 ミリ波 マイターバンド 核融合

### 1. 研究開始当初の背景

高温プラズマ達成のため、電子加熱にはサイクロトロン周波数(50~200GHz)の電磁波を高出力で供給する必要がある(現在建設中のITERでは170GHzのミリ波で一経路あたり約1 MWの設計)。効率よく加熱を行うためには、電磁波発生源であるジャイロトロンからプラズマ実験装置への電磁波伝送系の効率化が必要となる(ITERでは92%の伝送効率の仕様)。この伝送系は、中性子遮蔽のため直線経路のみで構成できないため、以下のような二種類のミリ波伝送コンポーネントで構成される。

- ① □ コルゲート導波管：直線経路の構成要素
- ② □ マイターバンド：90度伝送経路を曲げる要素

これらはいずれも内壁面がコルゲート(櫛の歯)状に微細加工されている。この形状は近似理論(J.L.Doane, *Infrared and Millimeter Waves*, 13(1985) p.123)による試作品の作成・測定を繰り返すことで、改良されてきた。しかし、伝送モードの純度向上・伝送効率の改良という最終調整段階では、従来の近似理論による設計では不十分である。そこで、建設中の京速コンピュータ(神戸)及びITERの幅広いアプローチ(ITER-BA)のスーパーコンピュータ(六ヶ所村)の利用を想定した、大規模な電磁波伝播(時間領域空間差法：FDTD)シミュレーション法による「ミリ波伝送系コンポーネント最適構造設計」を目指すに至った。

### 2. 研究の目的

核融合プラズマにおける電子サイクロトロン加熱システムのミリ波伝送系効率の向上を目指し、以下の機能を持つ電磁波伝播(時間領域空間差法：FDTD)シミュレーションシステムを開発する。これにより、ミリ波伝送コンポーネント(コルゲート導波管・マイターバンドなど)の最適化形状の提案を行う。

- (機能1) □ ミリ波伝送コンポーネントを「まるごと」計算可能にする大規模並列化。
- (機能2) □ コンポーネント内壁面金属の電磁波応答特性の組み込み(実金属化)。
- (機能3) □ バーチャルリアリティ(VR)を用いた導波管構成要素の三次元形状設計と計算結果解析。

### 3. 研究の方法

FDTDシミュレーション技法を①エンジン部 ②プリポスト処理部 ③探査機能部に分け開発する。

- ① □ 電磁波計算エンジン部の開発は、全メンバーを二分して独立して三次元直交座標系版と、擬三次元円筒座標系版を作成し、計算の信頼性向上のため相互チェックする。それぞれ(1)完全導体から実金属へ、(2)単ノード計算から複数ノード並列化計算という手順で開発を進める。
- ② □ バーチャルリアリティ(VR)によるデー

タ入力・計算出力処理(プリポスト処理)については、VR研究を行って来た甲南大・核融合研で行う。

以上により開発したミリ波伝送系FDTDシミュレーションシステムを用い、最終年度には、研究目的であるコルゲート導波管およびマイターバンドの最適形状の提案を、全員が協力し行う。

### 4. 研究成果

核融合プラズマにおける電子サイクロトロン加熱システムのミリ波伝送系効率の向上を目指し、電磁波伝播(時間領域空間差法：FDTD)シミュレーションシステムを開発を行ってきた。

初年度は、ミリ波伝送コンポーネントであるコルゲート導波管を取り上げ、FDTD法による伝送効率の評価法の確立を行った。直線状の円筒導波管として内面が微細な櫛歯状に加工されたコルゲート導波管(図1)が用いられている。このコルゲート導波管は、導波管内面が櫛歯形状になり長手方向に誘導電流が流れづらい構造になっている。

具体的な研究成果として、(1)電磁波シミュレーションに適している時間領域差分(FDTD)法を用いて解析する系に適合したシミュレーションコードを開発し、(2)そのコードを直線コルゲート導波管に適用して動作確認を行い、(3)コルゲート導波管の櫛歯形状を変化させたときの相違について調べた。誤差の評価には、解析的に解ける矩形導波管を対象に、シミュレーション結果との比較を行い、セルサイズ依存性を調べた。コルゲート導波管の櫛歯形状を変えることによる伝送効率への影響について調べることも行った。

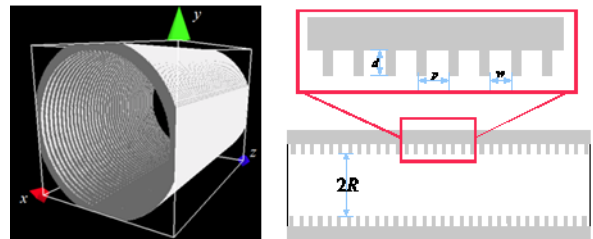


図1：計算対象とする直線状円筒コルゲート導波管のセル形状および断面図

次年度は、マイターバンド用のFDTDシミュレーションコードと可視化システムを開発し導波路内の電磁波を解析した。可視化によりコルゲートが渦電流をせき止め、表面電流を抑制することがわかった。マイターバンドのミラーにおける熱分布を実験と理論とシミュレーションで比較した結果、ほぼ一致した。シミュレーションではマイターバンドでわずかにモード変換が発生し、まだら模様が確認された(図2)。タブレット端末を用いた独自のユーザーインターフェースを開発したことにより、直感的な操作による可視化

と解析を行うことが可能となった。シミュレーションコードと可視化システムをマイターベン드의内部形状の設計に活かし、伝送系の伝送効率向上に役立つツールを開発することができるようになった。

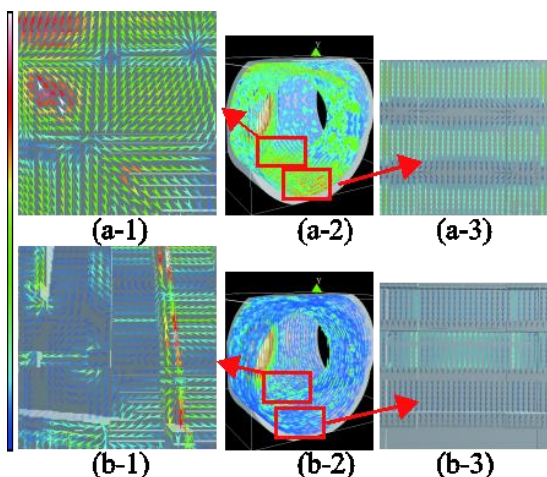


図 2 : (a) 溝なしマイターベンと (b) 溝ありマイターベン드의表面電流の比較. 拡大画像の矢印は電流の向きを示す.

最終年度は、金属壁を完全導体として扱えるように改良を行った。前年度までに開発した本研究で開発した FDTD コードでは、金属壁を完全導体として扱っていた。この完全導体という描像では、金属と真空との境界面の厚さがゼロ極限の金属表面上に、理想的な電流が存在するという近似で、マクスウェル方程式を解くということを行っている。それより、この理想的な電流は、表面近傍の磁場を用いて電流値を計算していた。この近似の範囲では、金属内部には電磁波が侵入しないため、それにより誘起される電流の計算も行わない。それゆえ、計算が軽くなるという利点があった。しかし、現実的には、ECH で用いる周波数領域では電磁波の金属への侵入長は、短いが有限である。そこで、この誘起電流の計算をこれまで開発したコードに組み込み改良を行った。改良したコードを用いて、マイターベンと、および、マイターベンと型偏波器における HE<sub>11</sub> モードの入射電磁場がどのように伝播されるか (図 3) について、シミュレーションを行うことができた。

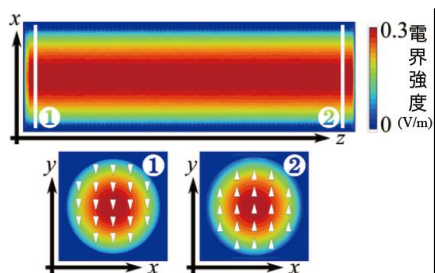


図 3: 偏波器の電場強度分布図

## 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 5 件)

- ① Y. Tamura, T. Umetani, N. Kashima and H. Nakamura: "Dynamic Gesture Classification using Skeleton Model on RGB-D Data", Proc. International Conference on Mathematical Modelling in Physical Sciences, Journal of Physics: Conference Series 490 (012103), pp. 1-4, 2014. DOI:10.1088/1742-4596/490/1/012103. (査読あり)
- ② Yoshihisa FUJITA, Soichiro IKUNO and Hiroaki Nakamura: "Transmission Efficiency in Complex-Shaped Waveguide using Real Metals", Plasma Fusion Res. 9, 3401074 (2014). DOI: 10.1585/pfr.9.3401074. (査読あり)
- ③ Naoya Kashima, Hiroaki Nakamura, Yuichi Tamura, Atsushi M. Ito, Shin Kubo: "Interactive visualization system to analyze corrugated millimeter-waveguide component of ECH in nuclear fusion with FDTD simulation", Journal of Physics: Conference Series, Volume 490, Issue 1, 2014, Article number 012179. DOI: 10.1088/1742-6596/490/1/012179. (査読あり)
- ④ H. Nakamura, N. Kashima, A. Takayama, K. Sawada, Y. Tamura, S. Fujiwara and S. Kubo: "Optimization of a corrugated millimeter-wave waveguide and a miter bend by FDTD simulation", J. Phys.: Conf. Ser. **410** (2013) 012046(4pages) doi:10.1088/1742-6596/410/1/012046(査読あり)
- ⑤ Y. Tamura, H. Nakamura, T. Okamura, N. Kashima, S. Fujiwara and S. Kubo: "FDTD simulation of millimeter-wave corrugated waveguides with cylindrical symmetry model", J. Phys.: Conf. Ser. **410** (2013) 012029(4 pages) doi:10.1088/1742-6596/410/1/012029(査読あり)

[学会発表] (計 23 件)

- ① 藤田宜久, 生野壮一郎, 久保伸, 中村浩章: "表面電流を考慮した FDTD による導波管の伝送効率に関する検証", 第 23 回 MAGDA コンファレンス in 高松, 12. 4-5. 2014. OS4-02、香川県高松市.
- ② Hiroaki Nakamura, Yoshihisa Fujita, Shin Kubo, Soichiro Ikuno: "Millimeter-wave propagation simulation in corrugated waveguide", 24th International Toki Conference, Nov. 4-7, 2014, Ceratopia Toki, Toki-city.

- Gifu, Japan, P6-27.
- ③ Y. Fujita, S. Ikuno, S. Kubo and H. Nakamura: “Electromagnetic wave propagation in waveguide considering influence of induced current”, 24th International Toki Conference, Nov. 4-7, 2014, Ceratopia Toki, Toki-city. Gifu, Japan, P6-28.
- ④ 藤田宜久, 生野壮一郎, 中村浩章: “誘導電流密度がコルゲート導波管の伝送損失に及ぼす影響”, プラズマシミュレータシンポジウム 2014, 9月10日-12日、2014年、核融合科学研究所, 岐阜県土岐市.
- ⑤ Y. Fujita, S. Ikuno and H. Nakamura: “Influence of Dispersive Media on Transmitting Efficiency of Waveguide”, ISPlasma2014, March 2-6, 2014, Meijo University, Nagoya, Japan. 06aP24
- ⑥ 藤田宜久, 中村浩章, 生野壮一郎, 久保伸: “MTDMを用いた導波管の2次元実金属シミュレーション”, 「自然科学における階層と全体」シンポジウム, 2. 20-21. 2014, 愛知県名古屋市.
- ⑦ 加島直弥, 中村浩章, 伊藤篤史, 高山有道, 田村祐一, 下妻隆, 高橋裕己, 久保伸, “FDTDを用いたマイターバンド内の電磁波伝搬シミュレーションと可視化”, 非線形・可視化部門研究会, 核融合科学研究所, 2013年12月9日-10日、岐阜県土岐市.
- ⑧ N. Kashima, H. Nakamura, A. Takayama, A. M. Ito, Y. Tamura and S. Kubo, “Visualization of electromagnetic waves using FDTD simulation through the miter bends”, 23rd International Toki Conference (ITC-23), Toki, Gifu, Japan, November 18-21, 2013. (ポスター発表)
- ⑨ Y. Fujita, T. Itoh, S. Ikuno, and H. Nakamura, “Investigation of transmission efficiency in complex-shaped waveguide using real metals”, 23rd International Toki Conference (ITC-23), Toki, Gifu, Japan, November 18-21, 2013. (ポスター発表)
- ⑩ N. Kashima, H. Nakamura, A. Takayama, A. M. Ito, A. M. Ito, Y. Tamura, S. Kubo, “Visualization of electromagnetic waves using FDTD simulation through the miter bend”, 23rd International Toki Conference (ITC-23), Toki, Gifu, Japan, November 18-21, 2013. (ポスター発表)
- ⑪ 藤田宜久, 中村浩章, 生野壮一郎, 久保伸 “ミリ波伝搬素子コルゲート導波管の実金属シミュレーション”, 日本物理学会 2013年秋季大会, 徳島大学, 2013年9月25日-28日, 徳島県徳島市.
- ⑫ 加島直弥, 中村浩章, 伊藤篤史, 田村祐一, 久保伸, “FDTDを用いた伝送路内の電磁波伝搬シミュレーションと可視化”, プラズマシミュレータシンポジウム 2013, 核融合科学研究所, 2013年9月11日-12日、岐阜県土岐市.
- ⑬ N. Kashima, H. Nakamura, Y. Tamura, A. M. Ito and S. Kubo, “Interactive visualization system to analyze corrugated millimeter-waveguide component of ECH in nuclear fusion with FDTD simulation”, International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences, Prague, Czech Republic, September 1-5, 2013. (口頭発表: 中村)
- ⑭ Y. Tamura, T. Umetani, N. Kashima and H. Nakamura, “Dynamic gesture classification using skeleton model on RGB-D data”, International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences, Prague, Czech Republic, September 1-5, 2013. (ポスター発表)
- ⑮ 加島直弥, 中村浩章, 伊藤篤史, 田村祐一, 久保伸, “FDTDを用いた伝送路内の電磁波伝搬シミュレーションと可視化”, プラズマ科学のフロンティア 2013, 核融合科学研究所, 2013年8月21日-23日、岐阜県土岐市.
- ⑯ Y. Fujita, S. Ikuno and H. Nakamura, “Electromagnetic field analysis of a Drude-Lorentz model using meshless time domain method”, The 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPS, July 14-19, 2013 International Conference Halls, Makuhari Messe Chiba, Japan (ポスター発表)
- ⑰ 加島直弥, 中村浩章, 高山有道, 田村祐一, 久保伸, “マイターバンドの FDTD シミュレーション”, 非線形・可視化部門研究会, 核融合科学研究所, 2013年3月14日-15日、岐阜県土岐市.
- ⑱ N. Kashima, H. Nakamura, A. Takayama, Y. Tamura and S. Kubo, “FDTD simulation on transmission of millimeter wave through miter bends”, 5th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials, Nagoya, Japan, January 28-February, 2013. (ポスター発表)
- ⑲ Yuichi Tamura, Hiroaki Nakamura, Takeshi Okamura, Naoya Kashima, Susumu Fujiwara, Shin Kubo: “FDTD simulation of millimeter-wave corrugated waveguides with cylindrical symmetry model”, International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences, September 3-7, 2012, Budapest Hungary. (出席・ポスター発表)
- ⑳ Y. Fujita, T. Itoh, H. Nakamura, S. Ikuno: “Three-dimensional analysis of electromagnetic wave propagation using meshless time domain method”, 22nd International Toki Conference, Toki,

Gifu, Japan, November 19-22, 2012  
(P4-20). (出席・ポスター発表)

- ⑳ T. Okamura, N. Kashima, H. Nakamura, A. Takayama, Y. Tamura, S. Sawada, S. Kubo: “Analysis of electromagnetic wave propagation in a corrugated millimeter wave guide by three-dimensional Finite-Difference Time-Domain simulation”, 22nd International Toki Conference, Toki, Gifu, Japan, November 19-22, 2012 (P4-22).
- ㉑ Hiroaki Nakamura, Arimichi Takayama, Keiji Sawada, Yuichi Tamura, Susumu Fujiwara, Shin Kubo: “Optimization of a corrugated millimeter-wave waveguide with the Drude-Lorentz dielectric constant by FDTD simulation”, International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences, September 3-7, 2012, Budapest Hungary.
- ㉒ H. Nakamura, Y. Tamura, K. Sawada, S. Kubo: “FDTD simulation of millimeter-wave corrugated waveguides”, 4rd International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials, March 4-8, 2012, (P2033A) 中部大学, 愛知県春日井市.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 浩章 (NAKAMURA Hiroaki)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号：30311210

### (2) 研究分担者

田村 祐一 (TAMURA Yuichi)  
甲南大学・知能情報学部・教授  
研究者番号：50311212

久保 伸 (KUBO Shin)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号：80170025

### (3) 連携研究者

なし