

TSUBAME 共同利用 令和 2 年度 学術利用 成果報告書

GPU クラスタを用いたミリ波帯大規模広帯域電波伝搬シミュレーション  
Large-Scale Propagation Simulations of Ultra-Wideband Electromagnetic Fields in Millimeters Wave  
Frequencies Using GPU Cluster

チャカロタイ ジェドヴィスノフ  
Jerdvisanop Chakarothai

国立研究開発法人情報通信研究機構  
National Institute of Information and Communications Technology  
URL: www.nict.go.jp

これまでのミリ波帯電波伝搬解析において、地面等の複素誘電率の分散特性が Cole-Cole モデルによって表され、電磁界解析に盛り込むことが困難であった。本研究において、新たな周波数依存型 FDTD 法を用いることにより、一度の解析で複数点の周波数における解を求めることができ、かつパルス波形の伝搬特性を求めることができた。大規模 GPU クラスタにより高速化を行った結果、4 ノード(16 GPU)による計算時間(10000 ステップ)は 58 分で終わることができ、通常ワークステーションによる 24 並列での計算よりも約 20 倍速い結果が得られた。

Since dielectric properties of natural materials such as soils are frequency-dependent and they are often expressed by the Cole-Cole model, it is difficult to incorporate the material properties into time-domain electromagnetic simulations for analyses of propagation in millimeter-wave band. In this study, we use a new finite-difference time-domain method and perform parallelization on the TSUBAME 3.0 GPU cluster to accelerate the calculation of millimeter-wave propagations. As a result, the acceleration rate performed on the 4 nodes with 16 GPUs was approximately 20 times faster than that using common workstation with 24 parallel threads.

*Keywords: Large-scale simulations, Electromagnetic pulse, Frequency-dependent, Finite-difference time-domain method, millimeter-wave*

## 背景と目的

5G や Beyond 5G の次世代無線通信技術はミリ波帯電波が利用される。しかし、ミリ波帯電波は波長が短く、表面が凹凸な地面や物体から散乱されやすいため、従来のレイトレーシング法や光学近似法による受信電力の予測が困難である。そこで、本研究では、様々な伝搬環境(地表上・室内など)におけるミリ波帯広帯域電波の受信電力を高精度に予測するために、大規模電磁界シミュレーションを新たに開発する。加えて、地面やコンクリートなどの広帯域な電磁的分散特性を考慮できるようにする。

本プロジェクトでは、ミリ波帯の電波伝搬計算のために、TSUBAME3.0 の GPU クラスタを用いて、高速に解析を行うとともに、物質との相互作用を正確にモデリングするために、電磁的特性の周波数分散を考慮できる手法を組み込み、広帯域パルス電磁界に対する大規模電磁界シミュレーション技術を確立することを目的とする。

## 概要

ミリ波帯における電波は他の周波数帯と比較して、電波の直進性が大きく、見通し伝搬の形態が多い。しかし、ひとたび電波伝搬のフレネルゾーン内に該当帯域電波の吸収体・散乱・反射体などが存在すると、受信電力の予測手法の複雑さが増大し、不確かさが大きくなる。そこで、本研究では、様々な伝搬環境(地表上・室内など)におけるミリ波帯広帯域電波の受信電力を高精度に予測するために、大規模電磁界シミュレーションを新たに開発する。加えて、地面やコンクリートなどの広帯域な電磁的分散特性を考慮できるようにする。

## 結果および考察

TSUBAME3.0 の GPU クラスタによる大規模電磁界シミュレーションのための並列化周波数依存型時間領域有限差分 (Frequency-Dependent Finite-Difference Time-Domain, (FD)<sup>2</sup>TD)法を開発した[1]-[5]。各ノードにおいて 4 つの GPU を同時に

使用し、並列化を行った。また計算速度を加速するために、GPU 間での通信を NVIDIA の GPUDirect 技術によって直接行うと共に、各ノード間の通信については、MPI(Message Passing Interface)によって行った。本研究ではモデルの大きさに合わせて、計算に使用する並列ノード数を設定し、開発した並列化 FDTD 法の計算性能及び妥当性を以下のように確認した。

まず、Cole-Cole 分散特性を有する誘電体球モデルに対して、大規模並列化周波数依存型 FDTD 法による解析を行った。誘電体球の半径は 0.1 m で、分散特性を考慮するために、必要な項数は 21 項であった。最大 256 GPU (64 ノード)を同時用いたときの計算効率(理想的な計算時間と実際の計算時間との比)は 82%であった。計算速度に換算すると、55 億セルの電磁界値を更新することができた。誘電体球内に吸収されるエネルギー(Specific Energy Absorption)分布を比較した結果、2%以下の差異で一致したため、本手法の妥当性検討を確認することができた(図 1)。

これまでのミリ波帯電波伝搬において、地面の複素誘電率の分散特性が Cole-Cole モデルによって表され、電磁界解析に盛り込むことが困難であったことから、単一周波数によって解析が行われてきた。本研究において、新たな周波数依存型 FDTD 法を用いることにより、一度の解析で複数点の周波数での解を求めることができ、かつパルス波形そのものを求めることができる。特に、地中レーダ等において、実際のパルス波形を信号処理に用いることができることから、高精度・高分解能なイメージング手法の開発にも有用であると考えられる。また GPU により高速を行い、ミリ波帯電波伝搬に用いると共に、大規模 GPU クラスタにより高速化を行った結果、4 ノード(16 GPU)による計算時間(10000 ステップ)は 58 分で終わることができ、24 コアの CPU で並列したワークステーションによる計算速度よりも約 20 倍速い結果である。さらに、ノード数を増やすことにより、計算速度を向上させることができる(図 2)。

さらに、ミリ波帯の伝搬電波解析では、これまで大規模で計算時間が長かったものを GPU クラスタの使用により現実的な計算時間で解を得ることができ、今後のミリ波帯の研究を加速させることができる。

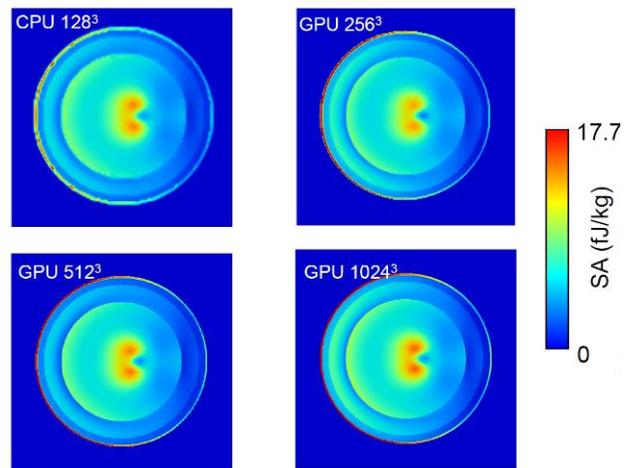


図 1 Cole-Cole 分散特性を有する誘電体球モデルに吸収されるエネルギーの分布

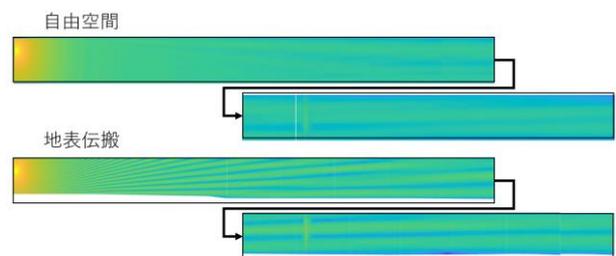


図 2 ミリ波帯電波の地表の電波伝搬解析(自由空間伝搬及び地表電波伝搬)

#### まとめ、今後の課題

本研究は、GPU クラスタを用いることによって高速にモデル環境内における電波伝搬の解析が可能となり、様々な条件における伝搬モデル推定のためのデータを取得できた。さらに、同一環境内における複数デバイスによって形成された電磁環境を解析でき、次世代無線通信システムの設計にとって非常に重要な技術である。今後は、大規模計算に適した吸収境界条件の設定や計算高速化、さらなる高周波化してテラヘルツ帯電波に対する電波伝搬解析が課題である。

本研究の目標を達成するために、東京工業大学の TSUBAME3.0 の GPU クラスタの計算資源を多く利用させて頂いた。また GPU クラスタの不具合が生じたときに早急かつ丁寧に対応して頂いたことに感謝する。おかげで、FDTD 法による大規模電磁界シミュレーション分野においては、Cole-Cole 分散特性を考慮できる周波数依存型 FDTD 法の大規模並列化が可能となり、

多くの研究会・国際会議での発表を行うことができ [6]-[10], 非常に大きな成果が得られた。今後, 学術論文への執筆・投稿も進める予定である。

### 参考文献

- [1] Jerdvisanop Chakarothai, “Novel FDTD scheme for analysis of frequency-dependent medium using fast inverse Laplace transform and Prony’s method,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 67, no. 9, pp. 6076-6089, Sep. 2019. DOI: 10.1109/TAP.2018.2878077
- [2] Jerdvisanop Chakarothai, Soichi Watanabe, Kanako Wake, “Numerical dosimetry of electromagnetic pulse exposures using FDTD method,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 66, no. 10, pp. 5397-5408, Oct. 2018. DOI:10.1109/TAP.2018.2862344.
- [3] チャカロタイジエドヴィスノブ, 和氣加奈子, 渡辺聡一, 陳強, 澤谷邦男, “超広帯域電磁界解析のための周波数依存性 FDTD 法,” 電子情報通信学会 和文論文 C, vol. J102-C, no. 5, pp. 102-113, May 2019.
- [4] 小内利仁, チャカロタイジエドヴィスノブ, キックアルフレード, 鈴木敬久, 柴山純, “GPU を用いた超並列計算による高速逆ラプラス変換及び Prony 法を適用した周波数分散性 FDTD スキームの高速化に関する検討,” 電子情報通信学会 和文論文 C レター, vol. J102-C, no. 5, pp. 156-160, May 2019.
- [5] Jerdvisanop Chakarothai, Katsumi Fujii, “A unified approach for treatment of frequency-dependent materials in FDTD method,” ISAP 2019, Xi’an, China, Oct. 30, 2019.
- [6] チャカロタイジエドヴィスノブ, 勝巳藤井, “高速逆ラプラス変換と Prony 法を適用した広帯域時間領域電磁界解析及びその応用,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, CS-1-5, pp. S9-S10, 2020 年.
- [7] 鈴木敬久, 小内利仁, 柴山純, チャカロタイジエドヴィスノブ, “FILT 及び Prony 法を用いた(FD)<sup>2</sup>TD スキームの並列化とパフォーマンス評価,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, CS-1-6, pp. S11-S12, 2020 年.
- [8] 李鯤, チャカロタイジエドヴィスノブ, 勝巳藤井, 和氣加奈子, 有馬卓司, 宇野亨 “FDTD 法を用い

た人体近傍 UWB 信号の到来波電力遅延特性解析,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-19-7, pp. 323, 2020 年.

[9] Jerdvisanop Chakarothai, Katsumi Fujii, “Retrieval of Debye Parameters from Cole-Cole Model for Broadband FDTD Analyses,” ISAP 2020, Osaka, Japan, Jan. 25-28, 2021.

[10] Li Kun, Jerdvisanop Chakarothai, Katsumi Fujii, “FDTD analysis of pulsed electromagnetic fields for intra-vehicle UWB radios using a voxel human head model,” International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC) 2020, H1-1, Dec. 12, 2020.