

平成 25 年度 産業利用トライアルユース:先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業
『みんなのスパコン』TSUBAME による日本再生
成果報告書

利用課題名 大規模三次元電磁界シミュレーションのトンネルモデルへの適用
英文: Large Scale 3D Electromagnetic Simulation for Tunnel Applications

利用課題責任者 川村 雅彦
Masahiko Kawamura

所属 構造計画研究所
Kozo Keikaku Engineering, Inc.,
URL <http://www.kke.co.jp>

邦文抄録(300 字程度)

トンネルのような大規模な問題に対しても FDTD 法は精度的に適用可能であることを確認するために、FDTD 法による市販の電磁界解析プログラム XFDTD を用いて、大規模なトンネルモデルの数値シミュレーションを実施し結果の評価を行うことで、トンネル内での電磁波シミュレーションの有効性を検証した。さらに、大規模モデルのシミュレーションにおける GPU 並列処理による計算速度向上のため、メッシュ数等の計算条件に対して高度なスケーリング性を実現する方法とその高速化効果を検証した。その結果、大規模解析と現実的な解析時間のためには GPU クラスタが必須であり、TSUBAME を利用することで、その実現性と高速化効果を検証できた。

英文抄録(100 words 程度)

In order to assess the accuracy of FDTD method even for large models like tunnels, a commercial electromagnetic field analysis program based on the FDTD method (XFDTD) was used to perform a numerical simulation inside a large tunnel model. The results verified the effectiveness of electromagnetic simulations inside tunnels. In addition, to improve calculation speed by GPU parallel processing in large models, ways on how to achieve a high degree of scaling with respect to calculation conditions such as the number of mesh, etc were investigated and verified. As a result, GPU clusters are essential to analyze large models within a reasonable time. By utilizing TSUBAME, the feasibility and speed ups were verified.

Keywords: 大規模電磁界シミュレーション、GPU クラスタ、FDTD 法、高速化、スケーリング性

背景と目的

近年、自動車や鉄道などの交通分野においては、トンネル内での通信利用が盛んに行われており、トンネル内での電磁波の振る舞いを事前にシミュレーションすることが必要となってきた。これまで 1 億メッシュを超えるような大規模なモデルのシミュレーションでは処理時間的に限界のあった電磁界解析プログラムは、近年の GPU クラスタによるマルチスレッド処理が可能な計算機リソース環境で、トンネルのような大規模問題でも計算が可能となった。

そこで本課題では、FDTD 法による市販の電磁界解析プログラム XFDTD[1][2]を用いて、大規模なトンネルモデルの数値シミュレーションを実施し結果の評価を行うことで、トンネル内での電磁波シミュレーションの有効

性を検証した。また、大規模モデルのシミュレーションにおける GPU 並列処理による計算速度向上のため、メッシュ数等の計算条件に対して高度なスケーリング性を実現する方法とその高速化効果を検証した。検討するトンネルモデルは、大規模モデルであるため、十分な GPU クラスタを持つ TSUBAME 2.0 の利用が必須となる。

概要

本課題は、以下の2つのステップにより実施した。

(1)トンネル内での電磁界シミュレーションの有効性検証

FDTD 法による市販の電磁界解析プログラム XFDTD を用いて、大規模なトンネルモデルの数値シミュレーションを実施し、既存手法であるレイトレース法[3]

等による電界強度分布結果との比較による評価を行うことで、トンネル内での電磁界シミュレーションの有効性を検証した。

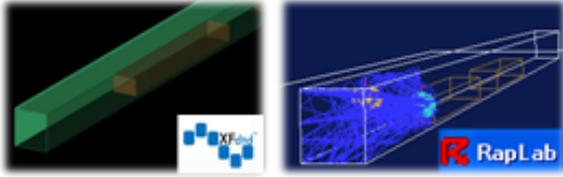


図1 FDTD 法とレイトレース法

(2) スケーリング性の実現方法と高速化効果の検証

FDTD 法のアルゴリズムはメッシュ数に比例して計算時間が増加するため、計算時間短縮の効果的な解決方法として GPU による並列処理の利用が考えられる。ただし、多くの並列処理を行った場合でも、CPU-GPU 間のデータ転送やスレッド間のタイミング調整のためのオーバーヘッドがかかり、単純に GPU コア数に比例した高速化は期待できない場合があることがわかっている。

そこで更なる計算速度向上のため、メッシュ数(セル数)等の計算条件に対して高度なスケーリング性を実現する方法と、その高速化効果を検証した。

結果および考察

(1) トンネル内での電磁界シミュレーションの有効性検証

□ 解析モデル

以下に示す解析モデル(図2)の組み合わせにより、レイトレース法および推定式との比較を行った。

- ・送信点位置: 中央(TxCenter) / 中央からオフセット(TxSide)
- ・断面形状: 方形モデル / 馬蹄形モデル
- ・車両: あり / なし

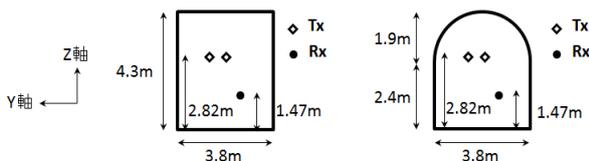


図2.1 解析モデル(断面形状と送信点位置)

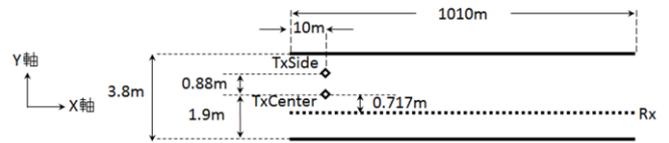


図2.2 解析モデル(水平断面図と送信点位置)

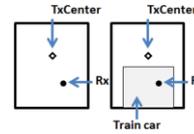


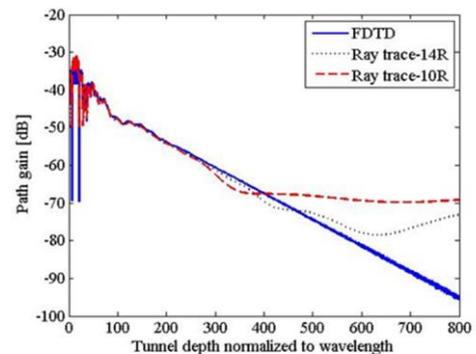
図2.3 解析モデル(車両あり/なし)

主な解析パラメータは以下のとおりである。

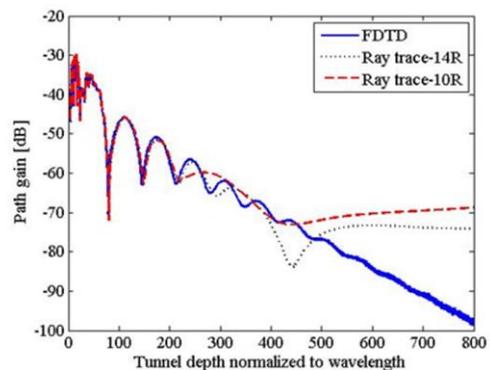
- ・周波数: 400MHz
- ・セルサイズ 0.02m~0.024m
- ・Tx アンテナ: 半波長ダイポールアンテナ(垂直偏波)
- ・Rx アンテナ: 無指向性アンテナ(垂直偏波)
- ・トンネルの材質: コンクリート(比誘電率 5.0-j0.1)
- ・車両の材質: 銅(導電率 5.96×10^7 S/m)

□ 解析結果

図3.1および図3.2に、FDTD 法とレイトレース法の比較結果を示す。

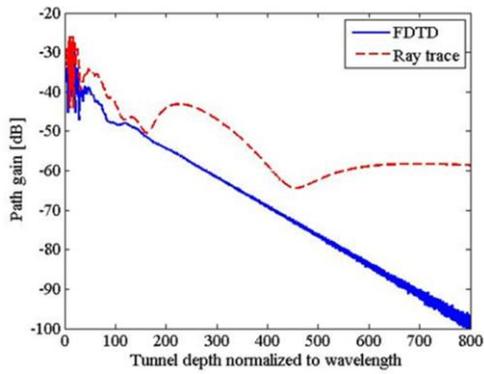


方形モデルの伝搬利得の比較 (TxCenter)

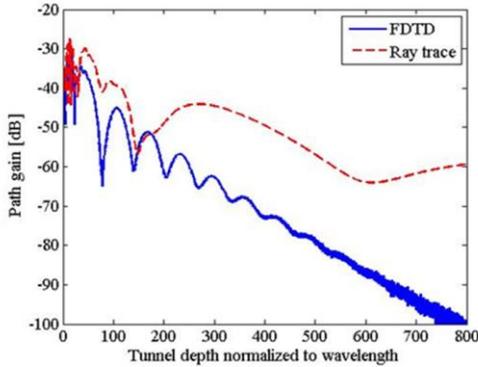


方形モデルの伝搬利得の比較 (TxSide)

図3.1 FDTD 法とレイトレース法の比較(方形モデル)



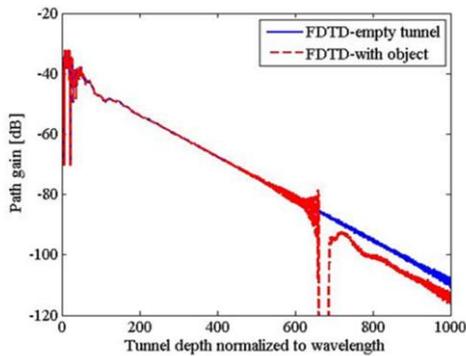
馬蹄形モデルの伝搬利得の比較 (TxCenter)



馬蹄形モデルの伝搬利得の比較 (TxSide)

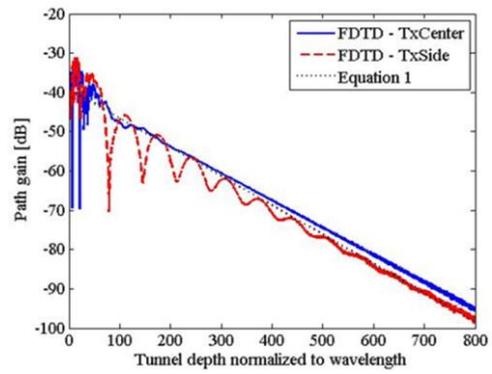
図3. 2 FDTD 法とレイトレース法の比較(馬蹄形モデル)

図4. 1に FDTD 法における車両あり/なしの比較結果を図4. 2に FDTD 法と推定式[4]の比較結果を示す。また、図5に方形トンネル断面の電界強度分布の例を示す。トンネル深部に進むにつれ、基本モードが支配的になっていることがわかる。

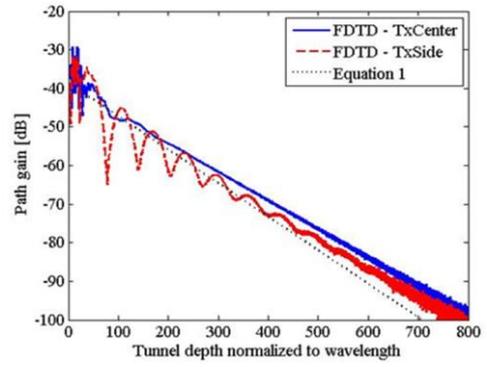


方形モデルにおける車両あり/なしの比較 (TxCenter)

図4. 1 FDTD 法における車両あり/なしの比較



方形モデルの伝搬利得の比較



馬蹄形モデルの伝搬利得の比較

図4. 2 FDTD 法と推定式の比較

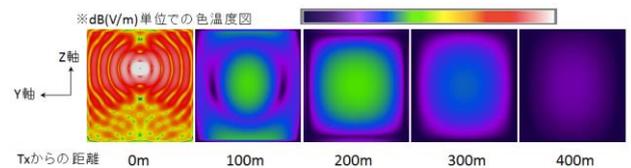
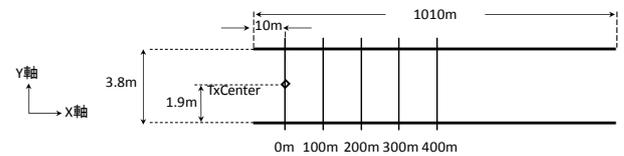


図5 方形トンネル断面の電界強度分布

□ 有効性検証

- ・ 方形モデルの場合、FDTD 法では T_x から 800λ 、レイトレース法では 200λ の距離まで、また馬蹄形モデルの場合、FDTD 法では T_x から 400λ 、レイトレース法では 50λ の距離まで妥当な減衰特性を導出できた。
- ・ FDTD 法で得られた減衰係数は推定式と良い一致が見られ、トンネル深部ではシングルモードになっていることが確認できた。
- ・ 今回の形状では方形および馬蹄形モデルの減衰係数はほぼ一致していた。

- ・ FDTD 法の計算時間は TSUBAME2.0 で 10 ノードを利用した場合、MPI+GPU で約 2 時間 15 分であり、GPU クラスタを利用することで十分に解析可能である。

(2) スケーリング性の実現方法と高速化効果の検証

FDTD 解析の速度を評価するにあたり、以下スループット(単位時間あたりに計算される FDTD セル数)を指標とする。前掲の 1km トンネルモデルにおいて、OpenMPI+GPU の解析では最大 20.7 [Gcell/sec]、OpenMPI のみの解析では最大 1.62 [Gcell/sec] のスループットが出ており、GPU 上の解析の有効性が示されている。

GPU クラスタ上の FDTD 解析の特性を理解するため、本検証では 2 種類の電磁界解析モデル(Sim1, Sim2)について、必要メモリ、セル数、GPU 数、タイムステップ数、メモリアロケートの方法、MPI プロセスの分散の仕方などを変更してベンチマークを実行した。

図 6 および 7 は解析実時間と総セル数×タイムステップ数の相関を表したものである。同じモデルであれば演算性能はほぼ一定値を保っているが、Sim1 と Sim2 それぞれで 2 種類の相関に分かれている。

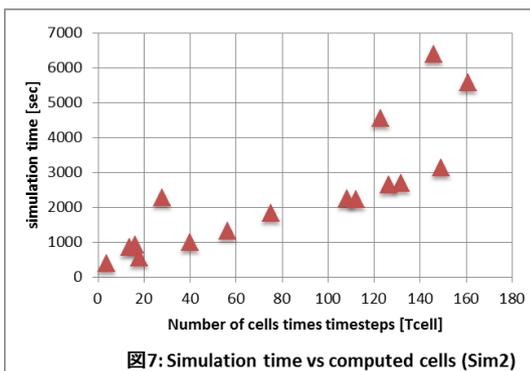
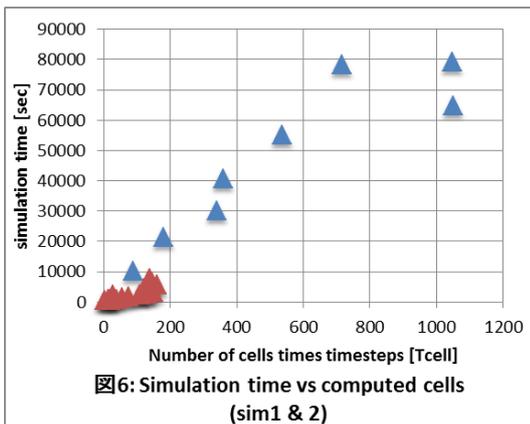


図 8 および 9 は、Sim1 と Sim2 それぞれについて、スループットを GPU メモリの占有率の関数で表したものである。双方のモデルにおいて、スループットと占有率の間に正の相関が見られる。

Sim2 については与えられた占有率に対してスループットの高いモデルと低いモデルに分けられる(図 9)。これらは同じ電磁界解析モデルであるが、高スループットを実現した系列は全て、解析空間(直方体)を最長軸に垂直な面で等分割し各 GPU に割り振ったものである。電磁相互作用は近接相互作用であり、分割面付近のセルを異なる GPU で重複計算させ、隣り合う領域を担う GPU 間で共有する。高スループットを実現したモデルは、このレイテンシがうまく隠蔽できていることを示していると思われる。

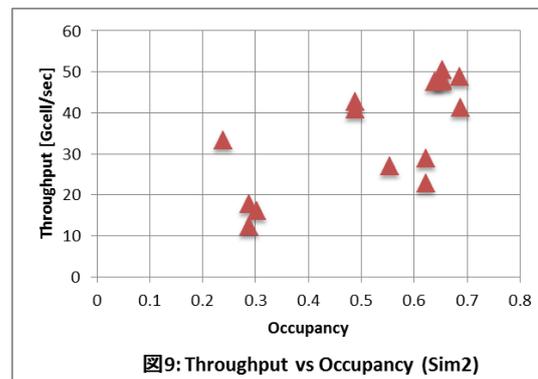
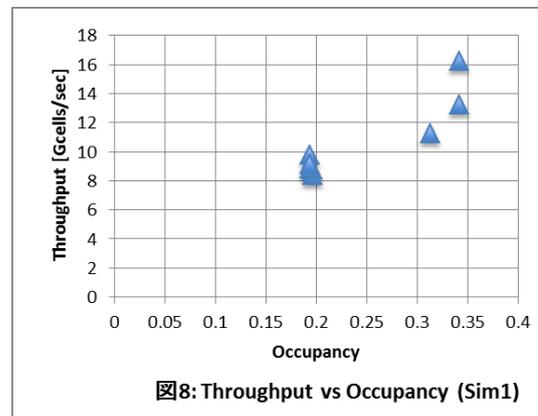
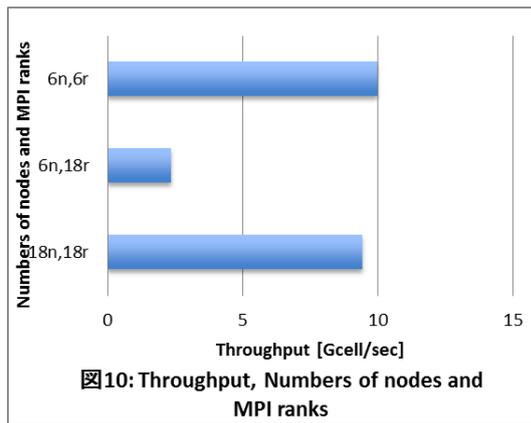


図 10 は 18 GPU を用いた同一モデルの解析について、ノード数(n)、MPI ランク数(r)、各 MPI プロセスの利用 GPU 数(g)を $(n,r,g) = (6, 6, 3), (6, 18, 1), (18, 18, 1)$ の 3 通りに変化させた場合のスループットである。占有率はほぼ同一であるが、各 MPI プロセスを異なる物理ノードへ分割する方が演算性能が高いという結果が得られた。



実際の電磁界解析モデルでは、メモリやセル数、タイムステップ数が多様になる。しかし、GPU メモリの占有率、解析空間の形状と GPU へのアロケートの方法、MPI プロセスの負荷分散を考慮することにより、FDTD 計算において高い演算性能が得られるという一般的傾向が確かめられた。

まとめ、今後の課題

トンネルのような大規模な問題に対しても FDTD 法は精度的に適用可能であることを確認した。また、大規模解析と現実的な解析時間のためには GPU クラスタが必須であり、TSUBAME を利用することで、その高速化効果を検証できた。なお利用成果として、4編の論文を発表した。[5-8]

本課題では 300 億セル以上のモデルでの検証も行ったが、今後は TSUBAME2.5 および更に大規模なモデルでの高速化効果を検証したい。

参考文献

- [1] XFDTD, Remcom, Inc., State College, USA, 1994, <http://www.remcom.com/xf7>
- [2] XFDTD, Kozo Keikaku Engineering, Inc., <http://network.kke.co.jp/products/xfDTD/>
- [3] RapLab, Kozo Keikaku Engineering, Inc., <http://network.kke.co.jp/products/raplab/>
- [4] Y. Yamaguchi, T. Abe, and T. Sekiguchi, "On the approximate equation for the attenuation constant in tunnels with arbitrary cross section," IEICE Trans. Commun. vol. J67-B, no. 3, pp. 352-353, Mar. 1984.

- [5] Gilbert Siy Ching, Kensuke Tsuda, Yukiko Kishiki, "Comparison of Propagation Characteristics Using Ray Tracing Method and FDTD for Wireless Services inside Tunnels," IEICE Technical Report, AP 39-44, July 2012.
- [6] Gilbert Siy Ching, Kensuke Tsuda, Yukiko Kishiki, Masahiko Kawamura, "Field Predictions inside Electrically Large Tunnel with Objects Using FDTD", in 2012 IEICE Society Conference, A-17-8, Sep. 2012.
- [7] Kensuke Tsuda, Gilbert Siy Ching, Yukiko Kishiki, "Analysis of Tunnel Propagation Characteristics at 400MHz Using FDTD and Ray Tracing Methods", IEICE Technical Report, Technical Meeting on Electromagnetic Theory, EMT-13-009, Jan. 2013.
- [8] Gilbert Siy Ching, Kensuke Tsuda, Yukiko Kishiki, "Analysis of Path Gain Inside Tunnels Based on FDTD and Ray Tracing Methods", 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS2013), 23PM2E-02, May 2013.