自然災害軽減のための超高速・高精度3次元地下構造イメージング

代表研究者	亰	田		潤	仙台高等専門学校 知能エレクトロニクス工学科	准教授
共同研究者	佐	藤	源	之	東北大学 東北アジア研究センター 教授	

研究の目的

近年,大型台風や地震など自然災害に対するインフラ整備が急務になっている.特に,住宅地や道路・堤防などの地盤沈下や断層変位などの地下探査を効率的かつ高速に実施することが求められている.地下探査に広く用いられている手法に地震探査法があるが,分解能が5m程度であることから浅層部や分解能以下の変位量検出が困難である[1].これに対して,地中レーダ(Ground Penetrating Radar: GPR)は,波長が数十センチ程度であるため,地震探査法に比べて分解能が高く浅層部の探査や地下変位の調査に適した手法であり,これまでに埋設管探査や地下水調査など様々な分野に用いられている[2]~[4].このようにGPRでは深さ方向の分解能が比較的高いことから,地盤沈下や断層などの地下構造変位を検出できる可能性があり,これまでに GPR を用いた浅層部の断層調査やトレンチ位置決め調査などが行われている[5].しかしながら,GPR 探査の問題点として地中の不均質さによるクラッタの影響からレイリー基準程度の地下変位の検知も困難であることが予想されるが,これまで地下変位に対しての検出精度は評価されていなかった.

一方,これまで FDTD (Finite-Difference Time-Domain)法[6][7] による不均質大地の GPR シミュレーションが行われている[8]~[10]. FDTD 法は,時間領域での解析であることや任意の形状の散乱体をモデル化できることなどから GPR シミュレーションに適した手法である.しかしながら,比較的計算量が多い手法であるため,計算時間の増大が問題であった.特に,不均質大地における地下変位の検出特性の解析のような多数のモデルを計算する場合には,計算時間はさらに増大するため,これまで解析が困難な問題であった.

そこで本研究では、GPR での不均質大地中での地下変位の検出特性の把握を目的に、GPU (Graphics Processing Unit)クラスタによる FDTD 法によるシミュレーションを行い、地中媒質の不均質さに対する地下変位の検出特性の統計的解析を行う.統計的手法を用いる場合、多数の地中モデルに対する解析が必要となるため、GPU クラスタを用いて複数モデルの高速シミュレーションを試みる[11].本研究では、(1)2次元および3次元FDTD 法を用いて不均質大地モデル100 個に対する地下変位の検出特性を定量的に明らかにするとともに、(2)(1)の解析で要した計算時間を評価し GPU クラスタの有効性を示している.

2 GPU クラスタを用いた FDTD 法による高速 GPR シミュレーション

2-1 FDTD 法の GPU 実装

FDTD 法を用いた GPR シミュレーションでは,地上で波源を走査させ,地中からの反射の時間応答を各走 査点で観測する.このため,FDTD 法の時間と空間のループが走査点数分だけ生じ,計算時間が増大する.そ こで本研究では,FDTD 法を GPU 実装することによって高速化する[12].

FDTD 法の GPU 実装では,電磁界計算の空間ループを複数のスレッドで並列計算することにより高速化を 実現する. GPU では,演算コアと GPU メモリ間は 100 GBytes/s 以上と高速であるが, CPU メモリと GPU メ モリ間は PCI Express 2.0× 16 による 8 GBytes/s 程度であるので CPU と GPU 間の通信を少なくする必要 がある. 以下に, GPU における FDTD 計算の手順を示す.まず,(1)時間ループに入る前に初期電磁界や電 気定数の配列を CPU から GPU メモリに転送する.時間ループでは,(2) CPU へ電磁界値を転送することなく GPU で電磁界計算と吸収境界条件の計算を行い計算が終了した後に,(3) 結果を GPU から CPU へ転送する.

2-2 GPU クラスタにおけるモデル分割法の適用

FDTD 法による GPR シミュレーションにおいては、より多くの地中モデルに対し短時間で計算できること が望ましい. GPU を用いることにより高速に計算することが可能になるが、多くのモデルを高速に計算する ためには、複数台の GPU を搭載した GPU クラスタの利用が有効である.一般的にクラスタ型の計算機で並列 計算を行う場合には、解析領域をそれぞれのプロセッサに分割する図1(a)に示す領域分割法が用いられる. しかしながら、FDTD 法の並列計算においては、プロセッサ間で分割領域端の電磁界値の交換が必要であり、 FDTD 法の毎時間ステップに各プロセッサ間でデータ転送が生じる.例えば № の解析領域を1 次元分割し、 単精度浮動小数点変数を使用して並列計算した場合,時間ステップごとに各プロセッサ間で 16 № Bytes の 通信量が生じる. 高速インターコネクトである Infiniband QDR を用いた場合でも,その通信帯域は高々5 GBytes/s であるので,各プロセッサでの通信が計算のボトルネックになる. このため, GPU クラスタでの効 率的な計算を実現するためには, GPU 間の通信量が少ない分割法が必要である.

そこで本研究では、図1(b)に示すモデル分割法を適用する.モデル分割法とは、図1(b)のように複数の解析モデルを一つずつ複数のプロセッサに割り振り、タスク並列で計算する分割法である.モデル分割法は大規模領域の計算には適さないが、各プロセッサ間で通信が生じないため、多くのモデルを短時間で解析するため有効な手法である.本研究で用いる GPU クラスタは5 台の PC に搭載された2 台の GPU,計10 台の GPU によって構成される. CPU は Intel Core i7 2600K 3.4 GHz, GPU は NVIDIA Geforce GTX 580 である. 各 PC 間は1 Gbps Ethernet で接続されており、10 台の GPU によって最大 10 個の地中モデルの FDTD シミュレーションが同時に実行可能である.



3 GPU クラスタを用いた FDTD シミュレーションと相互相関による地下変位検出特性

3-1 解析モデル

一般的に、GPR の深さ方向の分解能はレイリーの基準である 1/4 波長である.しかしながら、クラッタ等の影響により不均質大地中では 1/4 波長程度の地下変位の検出は困難であると考えられる.そこで、FDTD 法による GPR シミュレーションにより、どの程度の地中の不均質さに対して 1/4 波長程度の地下変位を検出できるかを検討し、GPR 探査における地下変位の検出範囲を定量的に評価する.ここでは、(1) 不均質大地中の2 次元および3 次元の FDTD 法による GPR シミュレーションを行い、均質大地と不均質大地の GPR プ



ロファイルの相互相関値を用いて地下変位検出を統計的に明らかにする. さらに, (2) (1) の解析に要する 計算時間評価を行い, GPU クラスタを用いたモデル分割法の有効性を示す. 地下変位検出の解析モデルを図 2 に示す. 地中を比誘電率 ϵ_{r1} , ϵ_{r2} , 導電率 σ_1 , σ_2 の 2 層構造とする. 層の厚さを D, 変位量を d, 変位 角を θ とする. 不均質大地をモデル化するために, 図 2 の地中媒質全体に対して, 一辺の大きさが s で比 誘電率 $\epsilon_r = 1.0 \sim 8.0$ の媒質を γ の割合で一様に分布させる. 波原として電流源 Jy を地表面から 0.1 m 離した点に設置し, パワースペクトルが-30 dB になる周波数が 800 MHz のガウシアンパルスを励振する. 変位上端部の真上の地表面を原点とし, 電流源 Jy を地上で x 軸方向に x = -1.0~+1.0m まで 0.05 m 毎に 走査させ, 地中からの反射波 Ey を観測する. FDTD 法の解析パラメータは, セルサイズが 0.01 m, 時間ステ ップが 1×10⁻¹² s である. また, 吸収境界条件は 16 層の PML である.

3-2 2次元解析における地下変位の検出特性

まず、2 次元モデルの解析について示す. 解析領域は 10.24 m × 10.24 m で、10.24 m × 9.24 m を地中 とする. 図2の解析モデルにおいて、比誘電率 ε_{r1} = 3.0、 ε_{r2} = 4.0、導電率 σ_1 = σ_2 = 0.001 S/m、 θ = 90°とし、GPRの波長 λ (= 0.2 m)に対して層の厚さ D = 20 λ 、変位 d = $\lambda/4$ とする. 地中の不均質さのパ ラメータについては、不均質媒質の大きさ s を分散 0.01の正規分布で与え、その平均値を $\lambda/20 \sim \lambda/2$ ま で $\lambda/20$ 毎に変化させる. また、不均質媒質の分布 γ は、 γ = 1 \sim 10 個/m² の間で 1 個/m² 毎に変化させ る. この s と γ の組合せ 100 通りの不均質大地モデルに対し、FDTD 法による GPR シミュレーションを行 う. さらに、均質大地と 100 個の不均質大地モデルで得られる GPR プロファイルの相互相関値により地下変 位の検出可能範囲を評価する.



図3(a)から(d)に比較的均質大地(s = $\lambda/20$, $\gamma = 1$ 個/m²)と不均質大地(s = $\lambda/4$, $\gamma = 5$ 個/m²)に おける地中モデルとその GPR プロファイルを示す.図3(a)の比較的均質な場合では図3(b)のように地 下変位を確認できるが、図3(c)の不均質大地では図3(d)のようにクラッタの影響が強く現れ地下変位の 検出が困難になることが分かる.

図4にsと γ に対する2次元問題における相互相関値を示す.図4中の破線は相関値0.8を示している. ここで例えば、相関値が0.8以上を検出可能とすると、0.1 λ の媒質が10個/m²から0.3 λ の媒質が1個/m²の割合で分布している大地であれば、1/4波長程度の変位を検出できることを明らかにした.



3-3 3次元解析における地下変位の検出特性

次に、3 次元モデルの解析について示す.解析領域は 2.56 m× 2.56 m× 3.84 m で、2.56 m× 2.56 m × 2.56 m を地中とする.比誘電率 ε_{r1} = 3.0、 ε_{r2} = 4.0、導電率 $\sigma_1 = \sigma_2$ = 0.001 S/m、 θ = 90°、層の 厚さ D = 6.4 λ 、変位 d = $\lambda/4$ とする.地中の不均質さのパラメータ s は、分散 0.01 の正規分布で与え、 その平均値を $\lambda/20 \sim \lambda/2$ まで $\lambda/20$ 毎に変化させる.また、不均質媒質の分布 γ は、 γ = 10 \sim 100 個 /m³ の間で 10 個/m³ 毎に変化させる.この s と γ による不均質大地モデルを用いて、3.2 節の 2 次元解析 と同様に、相互相関値により地下変位の検出可能範囲を評価する.図 5 (a)から(d) に比較的均質大地(s = $\lambda/20$, γ = 10 個/m³)と不均質大地(s = $\lambda/4$, γ = 50 個/m³) における地中モデルと GPR プロファイルを 示す.図 5 (a) の比較的均質な場合では図 5 (b) のように地下変位を確認できるが、図 5 (c) の不均質 大地では図 5 (d) のようにクラッタの影響により変位検出は困難になることが分かる.





図6にsとy に対する3次元問題における相互相関値を示す.図6中の破線は相関値0.8を示している. ここでも2次元解析と同様に,相関値が0.8以上を検出可能とすると,0.17 λの媒質が100個/m²から0.36 λの媒質が10個/m²の割合で分布している大地であれば,1/4 波長程度の変位を検出できることを明らか にした.



図6 3次元問題における相互相関による地下変位検出特性

3-4 100 モデル解析に対する計算時間評価

3.2 および 3.3 節で示したような多くのモデルを計算するにあたって、GPU クラスタとモデル分割法を用 いて効率化を図った.ここで、本手法の計算時間を CPU と比較することで評価する.比較の CPU は Intel Core i7 980X 3.33GHz 1 コアおよび仮想 10 コアと、Intel Core i7 2600K 3.4 GHz 10 コア(5 CPUs 各 2 コア使 用)である. CPU のコンパイラは gcc 4.4.3 であり最適化 03 を与える. 図7 (a) に 2 次元解析の計算時間 を示す. 図7 (a) より、モデル 100 個の計算時間は、CPU 1 コアで 556.7 時間(約 23 日)、仮想 10 コアで 92.8 時間(約 4 日)、10 コア(5 CPUs 各 2 コア使用)で 46.5 時間(約 2 日)であった. 一方で、GPU 10 台 で構成される GPU クラスタを用いてモデル分割法により解析することで、100 個のモデルを 0.5 時間で行う ことができた. 図7 (b) に 3 次元解析における 100 モデルの解析時間を示す. ここで、CPU におけるモデ ル 100 個の計算は、測定困難な時間になることが予想されるため、モデル 1 個の計算時間を測定し、これか ら概算している. 図7 (b) から、モデル 100 個の計算時間は、CPU 1 コアで 35368 時間(約 50 ヶ月:4 年)、 仮想 10 コアで 5895 時間(約 250 日:約 10 ヶ月)、10 コア(5 CPUs 各 2 コア使用) で 3266 時間(約 136 日: 約 5 ヶ月)であった. 一方で、GPU 10 台の GPU クラスタを用いたモデル分割法により、100 個のモデルを 22 時間で行うことができた.

以上のように、本研究のような複数モデルを計算する必要がある統計的な解析は、これまでの CPU を用いた方法では計算時間が長くなるため現実的ではなかったが、GPU クラスタの利用によって解析が容易になることを示した.





4 まとめ

本研究では、不均質大地中での GPU クラスタを用いた FDTD 法による GPR シミュレーションを行い、統計 処理によって地下変位の検出特性を示した.この結果、地中の不均質さに対する地下変位の検出特性を定量 的に明らかにした.また、多数のモデルに対する解析を効率的に行うために、GPU クラスタとモデル分割法 を適用し、その計算時間を評価した.CPU では数日から数ヶ月要する解析が数時間~1 日で行えることを示 し、本手法は多数の地中モデルに対する解析を要する場合に有効な手法であることを示した.

今後の展開として、不規則表面を考慮した解析や実験との比較検証などが挙げられる.

A 付録 GPU クラスタを用いた領域分割法による大規模 GPR シミュレーションの高速化

A-1 大規模計算における計算環境

3章で説明した GPU クラスタによるモデル分割法を用いれば、多くのモデルを短時間で計算できることを示した.しかしながら、モデル分割法では、計算できる領域が1台の GPU メモリに限られることから、大規模な解析は困難である.大規模な解析を考慮する場合は、プロセッサ間の通信が生じる領域分割法を適用する必要がある.ここでは、領域分割法による大規模 GPR シミュレーションについて評価する.

大規模解析で使用する GPU クラスタの仕様は、ノード数は2 ノードであり、各ノードに GPU Tesla C2075 を3台、CPU Xeon E5-2643を2台搭載している.ノード間は Infniband QDR で接続しており、HCA は QLogic 社の QLE7340、SW は QLogic 12000を使用している.並列化ライブラリとして MPI を採用し MVAPICH2 1.9a2 を用いている.コンパイラは、ホスト側のコードには gcc 4.4.6、GPU 側のコードには CUDA 5.0を用いてい る. OS は CentOS 6.3 を使用する.

A-2 FDTD 法の並列計算による計算時間評価

まず, FDTD 法の GPU クラスタによる並列計算特性を検討する. 並列計算特性検討では,小規模問題(256×256×256 セル)と大規模問題(1024×256×256 セル)に対して GPU の台数効果を評価する. 評価として 使用する GPU の数を1~6 台まで変化させ,1 台に対する計算速度向上比を評価する. 計算は全て単精度と する. また,並列計算において,解析領域を1 次元分割している. 図8 に GPU の台数による計算速度向上 比の評価結果を示す. 図8 中の実線は理論値である. 図8 より, GPU の台数が少ない場合では理論値と実測 値がよく一致することが分かるが, GPU の台数が増加すると相対的に通信量が増加するために,速度向上比 が理論値よりも下回る傾向がみられた. 例えば,6 台使用時では,速度向上比の理論値は6倍であるが,小 規模解析では4.1 倍,大規模解析では5.3 倍の速度向上であった.



図8 FDTD 法の並列計算における速度向上の GPU 台数効果

図9に、GPU4台使用時の解析サイズに対する計算速度向上比を示す.図9のように、解析サイズが大き くなるにつれ速度向上比は理論値(4倍)に近づくことが分かる.このように解析サイズが大きくなれば、通 信量の影響が小さくなるため、並列計算の効率は上昇すると考えられる.以上から、GPUクラスタによる FDTD 法の領域分割計算は、小規模領域では計算効率が低下するが、大規模解析では、高効率に並列計算できると 期待できる.



図9 解析サイズによる速度向上比(GPU4 台使用)

A-3 大規模 GPR シミュレーションへの適用・評価

大規模 GPR の順解析問題として図 10 に示す護岸堤防中の鉄筋探査シミュレーションを考える. 解析サイズは, 10.24 m×2.56 m×2.56 m であり,吸収境界条件条件として,PML の 16 層を適用する. 走査距離は5.0 mとし,走査分解能を0.05 m,走査点を計100 点とする. セルサイズは,0.01 m,時間ステップは1×10⁻¹¹ s であり,各走査点で5000 ステップの解析を行う.図10(b) にシミュレーションによるレーダプロファイルを示す.図11 に実際の護岸堤防における地中レーダ探査の実験結果を比較のため示す。図10(b)に等間隔で双曲線状の反射が等間隔に連なって現れており,鉄筋からの反射が観測できていることが確認できる.図10のシミュレーション結果と図11の実験はよく一致しており,シミュレーションの妥当性を確認できた.

本計算に要した計算時間を評価する. CPU Xeon E5-2643(3.3 GHz) の 16 コアでの並列計算では,本計算 に1 週間要したが,6 台の GPU で構成される GPU クラスタでは3.4 時間で計算できた.以上のように大規 模 GPR シミュレーションでは, CPU を用いた場合1 つの解析モデルに対し数日以上要するが, GPU クラスタ を用いることで,高々数時間で計算できることを示した.



(a) 解析モデル(堤防中の鉄筋探査シミュレーション(走査距離 5.0 m))



(b) シミュレーションによるレーダプロファイル 図 10 堤防中の鉄筋検出のための大規模 GPR シミュレーション



(a) 実験風景



(b) 地中レーダで得られた護岸堤防のレーダプロファイル 図 11 護岸堤防における地中レーダ探査とレーダプロファイル

【参考文献】

- [1] 阿部信太郎, 宮腰勝義, 井上大榮, "GPR と反射法地震探査を併用した活断層調査,"地質ニュース 538 号, pp. 7-11, June1999.
- [2] 佐藤源之, "地中レーダによる地下イメージング," 信学論(C), vol.J85C, no.7, pp.520–530, July 2002.
- [3] David Daniels, Ground Penetrating Radar 2nd Ed., IEE, 2004.
- [4] A. S. Turk, K. A. Hocaoglu, and A. A. Vertiy, Subsurface Sensing, John Wiley & Sons Inc, 2011.
- [5] 宮下由香里,木村治夫,堀川春央,伊藤順一,牧野雅彦,住田達哉,"山口県岩国断層帯熊毛断層にお ける地中レーダ探査-トレンチ掘削地点選定のための調査事例-,"活断層・古地震研究報告, no.11, 2011.
- [6] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol.14, no.3, pp.302–307, May 1966.
- [7] A. Taflove, Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, Artech House, Norwood, 1995.
- [8] 宮崎保光, 園田 潤, 上乗有希, "ランダム媒質中物体の電磁波散乱に関する FD-TD 法による統計的解 析,"電学論(C), vol.119, no.1, pp.35–41, Jan. 1997.
- [9] F. L. Teixeira, C. C. Weng, M. Straka, M. L. Oristaglio and T. Wang, "Finite-difference time-domain simulation of ground penetrating radar on dispersive, inhomogeneous, and conductive soils," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol.36, no.6, pp.1928–1937, June 1998.
- [10] L. Gurel and U. Oguz, "Simulations of ground-penetrating radars over lossy and heterogeneous grounds," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol.39, no.6, pp.1190-1197, June 2001.
- [11] 園田 潤, 小関勇気, 昆 太一, 佐藤源之, "GPU クラスタにおけるモデル分割を用いた FDTD 法による 地中レーダシミュレーションの高速化," 信学総大 CS-1-6, March 2012.
- [12] 小関勇気, 園田 潤, 昆 太一, 佐藤源之, "FDTD 法を用いた GPR シミュレーションの GPU 実装によ る高速化," 信学技報 EMCJ2011-50, pp.37-42, July 2011.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
地中レーダによる不均質大地中の断層変 位検出の FDTD 法を用いた検討	2012 年電子情報通信学会通信ソ サイエティ大会通信講演論文集1	2012年9月
OpenACC による高精度最適2次 FDTD 法の GPU 実装の評価	2012 年電子情報通信学会通信ソ サイエティ大会エレクトロニクス 講演論文集 1	2012年9月
GPU クラスタを用いた FDTD 法による地中 レーダにおける地下変位検出特性の統計的 解析	信学技報	2013 年 1 月