

# FDTD 法を用いた地中レーダシミュレーションの GPU 実装による高速化

Acceleration of Ground Penetrating Radar Simulation by FDTD Method on GPU

小関 勇気<sup>1)</sup>, 園田 潤<sup>1)</sup>, 昆 太一<sup>2)</sup>, 佐藤 源之<sup>3)</sup>

Yuki KOSEKI, Jun SONODA, Taichi KON, and Motoyuki SATO

1) 仙台高等専門学校 2) NTT アドバンステクノロジー株式会社 3) 東北大学 東北アジア研究センター

**Key Words:** CUDA, FDTD, ground penetrating radar simulation

## 1 まえがき

地中レーダ GPR (Ground Penetrating Radar) は非破壊で高速な探査が可能であり, 地層調査や地下資源探査など, 幅広い用途で用いられている. GPR 探査では不均質土壌による不要反射の影響から, 探査目標の識別が困難な場合がある. この問題の解決方法としてシミュレーションとの比較による地下構造の逆解析が考えられる [1]. しかし, シミュレーションに用いられる FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法は計算時間増大の問題がある. そこで, FDTD 法による GPR シミュレーションを GPU により高速化できれば, 測定結果との比較が容易になり, GPR 探査の高精度化が期待できる.

本研究では, GPU 上の FDTD 法による GPR シミュレーションの高速化を検討する. 本稿では, 二次元および三次元 GPR シミュレーションの GPU 実装と計算時間の評価を示す.

## 2 FDTD 法による GPR シミュレーションの GPU 実装

FDTD 法は, マクスウェル方程式を空間と時間でそれぞれ差分化し, 差分方程式に変換して電磁界計算を行う. 差分法であるためアルゴリズムが簡単であるが, 時間と空間の計算ループが生じる. FDTD 法を用いて GPR シミュレーションを行う場合, 走査によるデータ取得回数分のこの計算ループが生じるため, 計算時間が増大する. 本研究では GPU によって二次元および三次元 GPR シミュレーションの高速化を行う.

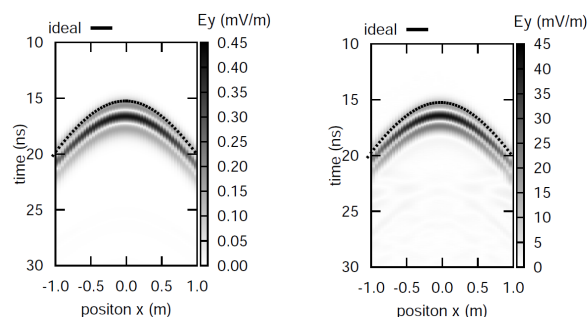
解析モデルは, 二次元は  $1024^2$ , 三次元は  $256^3$  の領域を考え, 地中の比誘電率を  $\epsilon_r = 4.0$ , 導電率を  $\sigma = 0.001 \text{ S/m}$  とし, 地下 1.0 m に直径 0.1 m の円筒型空洞があるモデルを考える. 波源は電流源  $J_y$  でガウシアンパルスを励振する. 空洞真上の地表面を原点とすると, 電流源は地表面から  $z$  方向に 0.1 m 離し,  $x$  方向に  $-0.1 \text{ m}$  から  $+1.0 \text{ m}$  まで 0.04 m 毎に走査させる. 吸収境界条件には Mur の 1 次吸収境界条件を用いる. セルサイズは  $\Delta = 0.01 \text{ m}$ , 時間ステップは  $\Delta t = 1 \times 10^{-11} \text{ s}$  とし, 3000 ステップの計算を行う. 計算は単精度で行う.

図 1 に GPU によるシミュレーション結果を示す. 理論値と比較すると, 理論値と同時刻に空洞による反射が現れており, GPU が正しく計算されていることが分かる.

## 3 GPU の FDTD 法におけるキャッシュの効果

新しいアーキテクチャ GF100 の GPU には L1/L2 キャッシュが備わっている. このキャッシュの効果を二次元 FDTD 法の 1000 ステップ計算において, 共有メモリ使用の有無による計算時間の比較を行い評価する. 共有メモリの利用は文献 [2] で提案されている手法を用いる. 使用する GPU は, GT200 系の GPU である GTX 285 と Tesla C1060, GF100 系の GPU である GTX 580 と Tesla C2070 である.

共有メモリ未使用時の計算時間を  $t$ , 共有メモリ使用時の計算時間を  $t_{sm}$ , 共有メモリにより計算時間が短縮された割合  $t_{sm}/t$  として表 1 に示す. 表 1 から, GF100 である Tesla C2070 と GTX 580 では共有メモリの使用による計算時間の大きな変化はないことが分かる. これは L1/L2 キャッシュの効果により, 共有メモリを使わなくても共有メモリ使用時と同等の性能が得られたと考えられる. そこで以下, GF100 の GPU を用いて共有メモリを使用せずに評価を行う.



(a) 2D result (b) 3D result  
図 1: 地中レーダシミュレーション

表 1: 共有メモリの有無による計算時間の比較

GPU	problem size	$t$ (s)	$t_{sm}$ (s)	$t_{sm}/t$
GTX 285	$1024^2$	0.50	0.40	0.81
	$4096^2$	7.38	5.86	0.79
Tesla C1060	$1024^2$	0.81	0.62	0.76
	$4096^2$	12.08	9.16	0.76
GTX 580	$1024^2$	0.249	0.247	0.99
	$4096^2$	3.86	3.80	0.98
Tesla C2070	$1024^2$	0.41	0.40	0.98
	$4096^2$	6.25	6.05	0.97

表 2: GPR シミュレーション時間

GPU	problem size	$T_G$ (s)	$T_C$ (s)	speed-up
GTX 580	$1024^2$	54.80	4527.24	82.61
	$256^3$	1918.36	167145.5	87.13
Tesla C2070	$1024^2$	81.08	4527.24	55.84
	$256^3$	3585.25	167145.5	46.62

## 4 GPR シミュレーションの計算時間評価

図 1 のシミュレーションに要する計算時間を評価する. GPU は GTX 580 と Tesla C2070 の 2 台を使用し, コンパイラは CUDA nvcc 3.1 を用いる. 比較対象の CPU は Intel Core i7 980X (3.33GHz) の 1 コア, コンパイラは gcc 4.4.3, 最適化オプションとして  $-O3$  を与える.

表 2 に図 1 の計算に要した GPU の計算時間  $T_G$  と CPU の計算時間  $T_C$  を示す. 2 次元シミュレーションでは, CPU に対して Tesla C2070 では 56 倍, GTX 580 では 82 倍の高速化ができ, CPU で 75 分要した計算が GPU では 1 分程度で行える. 3 次元では, CPU に対し Tesla C2070 では 46 倍, GTX 580 では 87 倍の高速化ができた. 本計算に CPU では 46 時間要したが, GPU では数十分程度で行えることを示した.

## 5 むすび

本稿では, GPU による GPR シミュレーションの高速化について検討した. GPR シミュレーションの GPU による高速化では, 高速 CPU Intel Core i7 980X (3.33GHz) に対し, 二次元では最大 82 倍, 三次元では最大 87 倍の高速化を実現した. この結果から, GPU 実装は GPR シミュレーションの高速化に有効であることを示した.

### 参考文献

- [1] H.Zhou et al., IEEE TGRS, pp. 86–91, Jan. 2005.
- [2] 高田 ほか, FIT2009, pp.389–394, Sept. 2009.