

H\_030

統合 Yee 格子を用いたヒト頭部光パルス伝搬解析時間の短縮  
 Time Reduction of Optical Pulse Propagation Analysis for an Adult Head by Simplifying  
 Optical Coupling Through Cerebrospinal Fluid

小泉 慎吾      松浦 啓文      加藤 宏樹      谷藤 忠敏  
 Shingo Koizumi   Takafumi Matsuura   Hiroki Kato      Tadatoshi Tanifuji

1. まえがき

波長 700-900nm の近赤外光を用いて酸化及び還元ヘモグロビンの光吸収係数差を利用して、生体の血中酸素濃度分布を測定し脳機能診断を行う拡散光トモグラフィ (DOT) 実現の可能性が指摘されている<sup>(1)</sup>。DOT を用いた脳機能診断を実現するためには、非散乱体である脳髄液 (CSF) を含み光学的に不均一な人頭部の光伝搬解析が必要不可欠である<sup>(2)</sup>。筆者等が定式化した FDTD(Finite Difference Time Domain)法を用いた非散乱体を含む不均一散乱体の光パルス伝搬解析法<sup>(3)(4)</sup>は、非散乱体を介した散乱体間の光結合計算に膨大な時間を要する。本報告は、この光結合計算時に複数の Yee 格子を統合することで解析時間を短縮する方法を提案する。

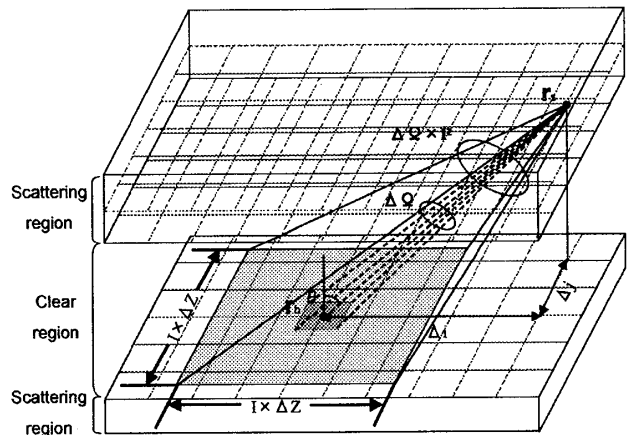


図1. 統合 Yee 格子を用いた散乱体間の光結合

2. ヒト頭部光パルス伝搬解析時間短縮法

現在の FDTD 法を用いたヒト頭部解析における Yee 格子は 0.5mm が上限で 2 次元光パルス応答解析に 45 分程度を要する。解析時間短縮のため以下の方法を検討した。

2.1 統合 Yee 格子を用いた解析時間短縮

現在の解析では対向する散乱体間の光結合を個々の Yee 格子毎に計算している。この計算を図1に示すように  $I^2$  個に統合した Yee 格子単位で行うと計算時間が大幅に短縮できる可能性がある。図2は各 Yee 格子間の光伝搬時間を FDTD 法の時間の間隔  $\Delta t = \Delta z/c$  で規格化した結果を示す。 $\Delta i, \Delta j$  は  $\mathbf{r}_s$  と  $\mathbf{r}_o$  間の Yee 格子座標差を示す。図から少なくとも隣接する Yee 格子間の伝搬時間差はほぼ同一タイムスロット  $\Delta t$  以内に収まり、統合 Yee 格子による計算時間短縮の可能性があることがわかる。

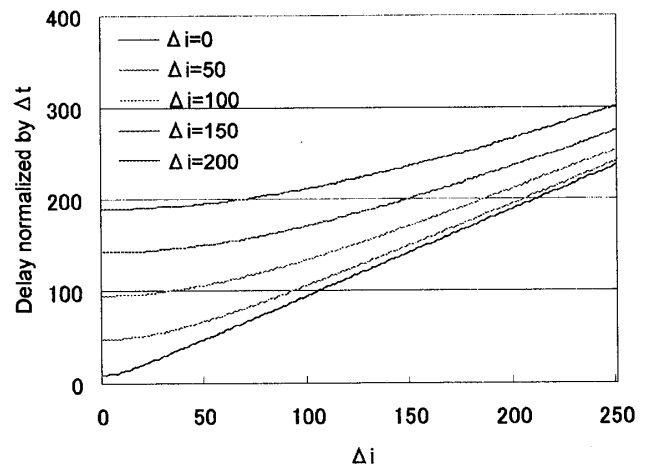


図2. 光源からの距離に対する光伝搬時間

2.2 Yee 格子サイズの拡大による解析時間短縮

本解析は Yee 格子サイズを 2 倍にすると計算時間は 15 秒程度に短縮できる。このため散乱体表面の Yee 格子で励起される拡散光を組み込むことが可能な境界条件<sup>(5)</sup>を用いて、Yee 格子サイズ拡大の可能性を検証した。

3. 光パルス伝搬解析時間短縮効果

前節に示した解析法を用いて図3に示す脳髄液を含む4層人頭部モデル(70mm×100mm×12mm)<sup>(6)</sup>の解析時間と解析精度の関係を調べた。

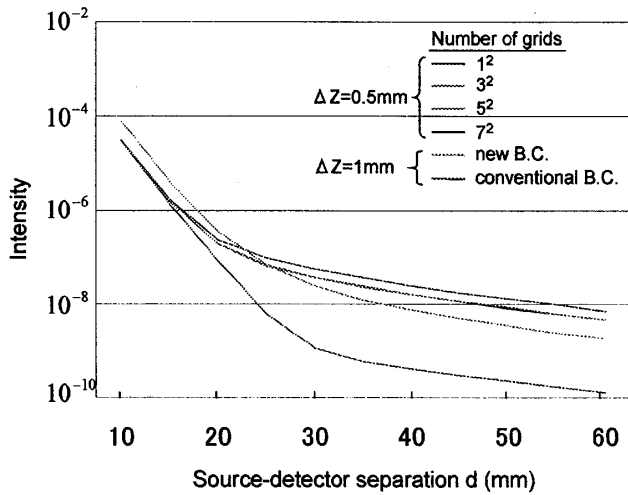
3.1 統合 Yee 格子数を一定にした場合

9 個、25 個、49 個結合した Yee 格子を用いて光パルス応答を解析した。光パルス応答から算出した光強度及び平均遅延時間の検出器間隔依存性を図4(a)及び(b)に示す。これらの結果から 25 個の統合 Yee 格子を用いても、平均

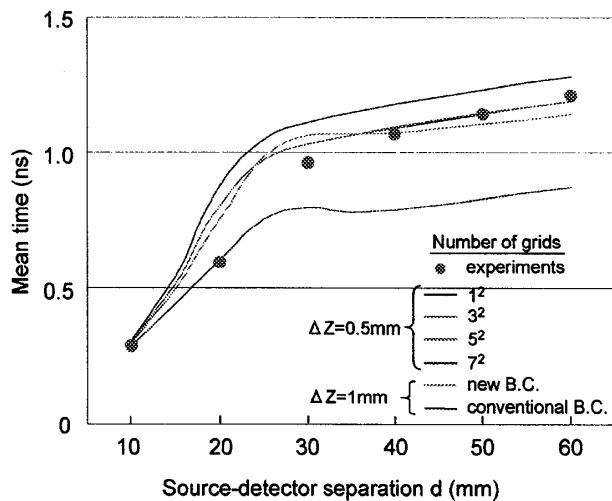
14mm	White matter	$\mu_s = 0.008 (\text{mm}^{-1})$	$\mu_a = 0.0 (\text{mm}^{-1})$
4mm	Gray matter	0.025	2.5
2mm	CSF	0.01	0.001
10mm	Skull	0.04	2.0

図3. ヒト頭部モデル

誤差は光強度の場合で 1.7%、平均遅延時間で 0.2%程度に止まっていることが分かった。また、図5に後方散乱光パルス波形例を示す。この図から 25 個の統合 Yee 格子



(a) 光強度の検出器間隔依存性



(b) 平均遅延時間の検出器間隔依存性

図4. 光強度と平均遅延時間の光源・検出器間隔依存性

を用いても解析誤差は無視できることがわかる。図6に解析時間を示す。25個の Yee 格子を統合することにより8分(従来の18%)に短縮可能なことが分かった。

### 3.2 統合 Yee 格子数を可変とした場合

図1に示す  $|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_b|$  に応じて統合する Yee 格子変えることで更なる解析時間短縮の可能性を検討した。その結果、49個の統合 Yee 格子を使用可能な領域が狭く解析時間は十数秒の短縮に留まった。

### 3.3 Yee 格子サイズを拡大した場合

表面 Yee 格子に拡散光を組み込むことが可能な境界条件<sup>(6)</sup>を適用し、Yee 格子サイズを0.5mmから1.0mmへ拡大し解析を行った。光結合計算時の Yee 格子統合数は9個とした。この場合の光強度、平均遅延時間の検出器間隔依存性を図4(a)、(b)、後方散乱波形を図5に示す。平均遅延時間、後方散乱波形の解析誤差は小さいが、光強度の誤差がやや大きい。解析時間は17秒となり、 $\Delta Z=0.5\text{mm}$ の解析時間の約6%まで短縮することができた。なお図4(a)及び(b)に示すように従来の境界条件を用いる

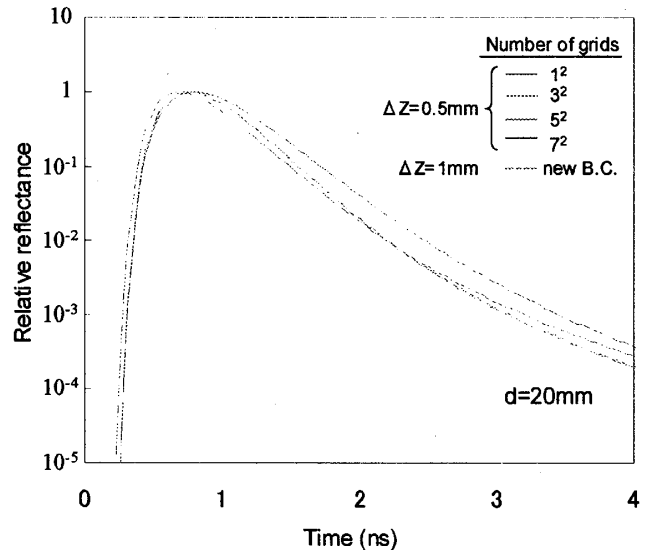


図5. 後方散乱光パルス例

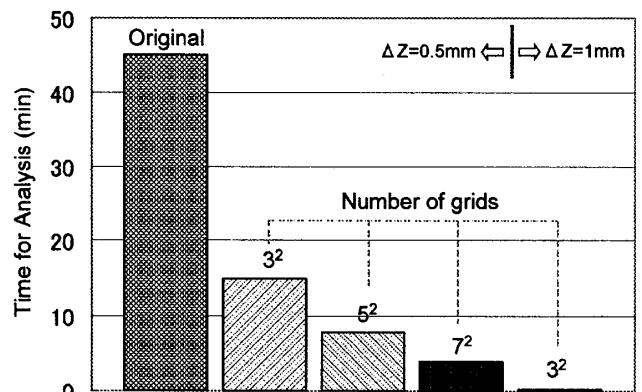


図6. 解析時間

と  $\Delta Z=1\text{mm}$  で計算した光強度及び平均遅延時間は大きな誤差を伴うことがわかる。

## 4. まとめ

筆者らが定式化した非散乱体を含む散乱体中の FDTD 解析法を脳髄液を含む人頭部に適用し、散乱体間の光結合計算時に Yee 格子を統合、また、Yee 格子サイズを拡大することでの解析時間の短縮を検討した。その結果、Yee 格子を統合することで誤差を抑えつつ解析時間を従来の18%まで短縮し、Yee 格子を拡大することで更に3%まで短縮することが出来た。これを、三次元ヒト頭部モデルに対して本法を適用すると55分要するが更なる短縮が望まれる。

一文献—(1)Y. Hoshi *et al.*, Neurosci. Lett. vol.65, no.1, pp.5-8, 1993. (2) M. Firbank *et al.*, Phy. Med. Biol. vol.41, pp767-783, 1996. (3) T. Tanifuji *et al.*, Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp.1094-1097, 2003 (Cancun Mexico). (4) 谷藤 他, 第2回情報科学技術フォーラム, 情報技術レターズ, LH-002, pp.147-148, 2003. (5) T. Tanifuji, unpublished. (6) E. Okada *et al.*, Applied Optics, vol. 36, no. 1, pp. 21-31, 1997.