

## [共同研究成果]

**細線化ならびに多層化されたプリント基板の FDTD 解析における高速化の検討**

長野工業高等専門学校 春日 貴志

プリント基板は高速大容量のデータ処理や多機能化に伴い、多層化ならびに配線の細線化が行われている。有限差分時間領域 (FDTD) 法を用いた電磁界解析を実行する場合、プリント基板構造により最小の単位セルサイズが決定するが、セルサイズに対して基板面積が広いと解析が膨大となる。本研究では、MPI による計算の高速化について検討した。セル数によるベクトル化率についての検討では、256 の倍数の前後においてベクトル長は増えるが、演算時間とベクトル化率に大きな影響がないことがわかった。また、ノード数の比較では、ノード数を増やすことで概ね増えたノード数だけ高速化が実現できていることが分かった。SX-ACE と SX-Aurora TSUBASA (以下、SX-Aurora) の比較では、SX-ACE に対して SX-Aurora は約 4~5 倍の高速化が実現できることが明らかとなった。

## 1. はじめに

5G や 4k・8k 放送などの普及により、大容量データを処理する電子機器の性能は向上している。電子機器の高性能化に伴い、プリント基板内の信号伝送は高速化している。プリント基板内の信号伝送における信号品質 (Signal Integrity: SI) の改善や、ノイズ放射 (Electromagnetic Interference: EMI) を低減させるためには、設計時に回路シミュレータや電磁界シミュレータにより SI や EMI の検討<sup>[1~4])</sup>を行った上で、設計へフィードバックする。しかしながら、高性能化や高機能化により、プリント基板の部品点数は増加しており、信号配線が増加するために基板の多層化ならびに配線の細線化が進んでいる。現在、プリント基板の層間の距離や線路幅、線路間隔は約 0.1mm オーダーが多い。このような基板の電磁界解析を行うためには、構造的な寸法を正しく解析モデルに反映させるため、線路構造よりも小さなセルでモデル化する必要がある。小さなセルサイズに対し、基板の面積は大きいと、電磁界解析を行う際には大規模解析となる。

本報告では、厚みに対して表面積が遙かに大きいプリント基板を対象とした電磁界解析において、MPI を用いた有限差分時間領域 (FDTD) 解析の高速化について検討した。また、今回は SX-ACE と SX-Aurora の更新時期に共同研究に採択されたこともあり、それぞれのコンピュータ同士の性能の比較も行った。

## 2. 解析対象

図 1 に解析対象のプリント基板モデルを示す。今回は、計算の高速化に関する内容であるため、プリント基板は簡易的なモデルとした。FDTD 解析における単位セルサイズは  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1\text{mm}$  である。時間ステップは 10,000 ステップとした。

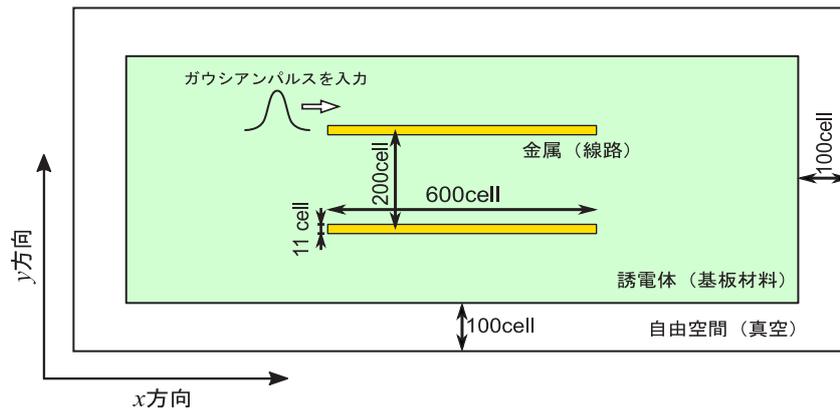


図1 プリント基板

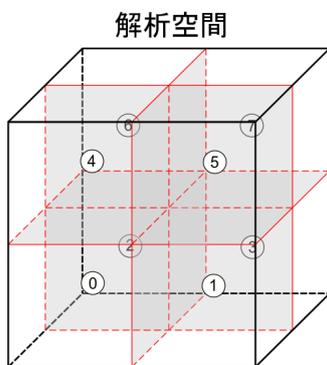


図2 MPIによる解析イメージ

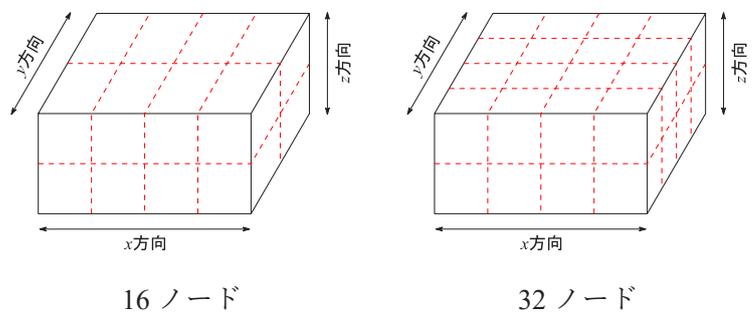


図3 16ノードと32ノードの区分

FDTD 解析を行う場合，MPI プロセス数の違いによる解析の高速化を行う．図2に MPI プロセスを用いた8ノードの空間分割のイメージ図を示す．FDTD 法の場合，プリント基板とその周辺を取り巻く自由空間，解析の最外殻に吸収境界条件（ABC）として Perfect Matched Layer（PML）を設ける必要がある．プリント基板と自由空間の電界と磁界は，各ノード共に共通のアルゴリズムにより解析が行えるが，PML は最外殻に適用されるため，ノード毎に PML の配置を変更する必要がある．このため，MPI プロセス数が増えるほど PML の解析プログラムの行数が増える．

比較対象として，16ノードと32ノードのイメージを図3に示す．16ノードはx方向に4分割，y方向に2分割した．32ノードはxとy方向をそれぞれ4分割した．z方向に分割数を増やさない理由としては，プリント基板の厚みは薄いため，z方向のセル数が増加しない傾向があるためである．一方で，xとy方向は基板の平面方向にあたり，基板面積が増えるほどセル数が増大する．

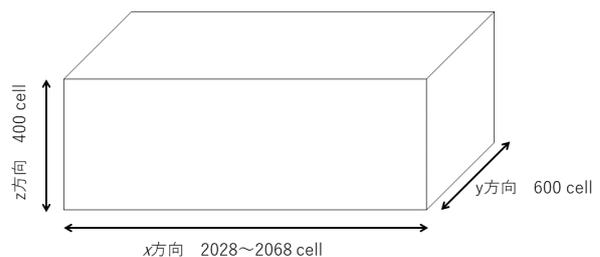


図4 ベクトル化率の検討図

### 3. ベクトル化率の検討

セル数に対するベクトル化率を検討するため、図4の解析モデルにより解析を行った。x方向のセル数は2028から2068cellまで変化させた。x方向を他のyやzよりも大きくすることで、x方向をベクトル演算させる。演算にはSX-Auroraを用いた。図5にMPI8の解析における解析時間 (Real Time), 平均ベクトル長, ベクトル演算率の変化を示す。なお、この値はRank0~7プロセスの平均値である。ベクトル演算率に注目すると98%以上になっており、高効率な計算ができているといえる。またセル数が2064 cell と 2068 cell のときを比較すると、2068 cell では平均ベクトル長が28.8, ベクトル演算率が0.12%低下し、Real Time が9.3秒増加した。セル数が2068 cell のときにReal Timeが増加しベクトル演算率が低下したのはMPI通信の処理によるものと考えられる。

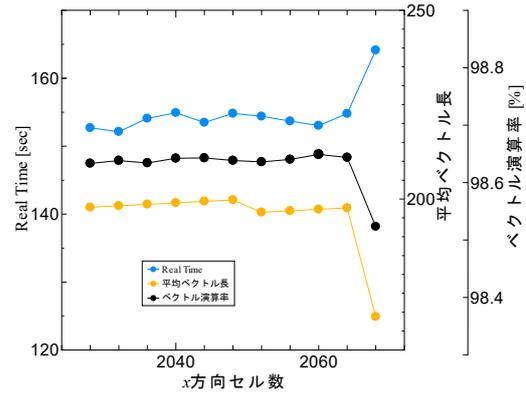


図5 MPI 8による演算時間とベクトル長, ベクトル演算率 (SX-Aurora)

図6にMPIプロセス数16 (以下MPI16)による演算時間と平均ベクトル長, ベクトル演算率を示す。MPI16では、解析空間の中央のノードには、吸収境界条件PMLの解析が、最外殻のノードと比較して少ない。このため、ベクトル長や演算率については、ノードにより異なる。演算時間については、PMLの違いによる差は見られなかった。x方向セル数が2044 cellになったとき、急激にReal Timeが28.1秒増加した。

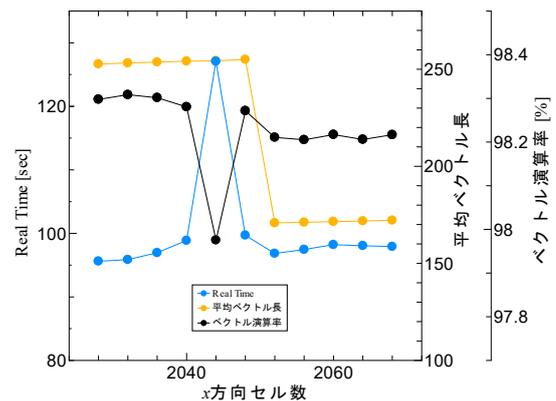


図6 MPI 16による演算時間とベクトル長, ベクトル演算率 (SX-Aurora)

平均ベクトル長について、x方向セル数が2048 cell (=256 × 8) までは高い平均ベクトル長を維持しているが、2052 cellでは平均ベクトル長が低下した。これは1プロセス当たりの解析空間のx方向セル数が256の倍数より大きくなったために、9個目のベクトル長の効率が落ちたためと考えられる。

また、ベクトル演算率については、x方向セル数が2044 cellではベクトル演算率が低下した。セル数が2044 cellのときにReal Timeが増加しベクトル演算率が低下したのはMPI通信の処理によるものと考えられる。

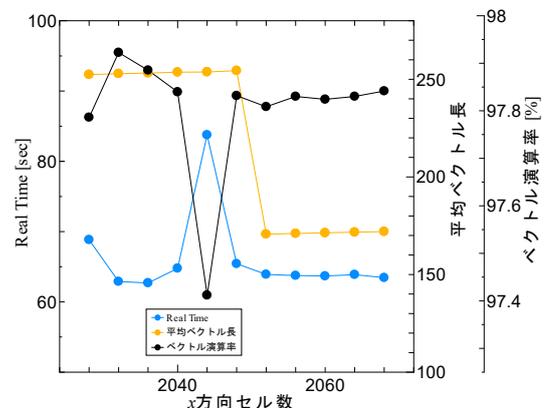


図7 MPI 32による演算時間とベクトル長, ベクトル演算率 (SX-Aurora)

図7にMPI32での演算時間とベクトル長, ベクトル演算率の結果を示す。MPI16と同じ傾向が得られた。MPI8だけ異なる傾向になった理由としてはPMLの影響である。PMLは、電波吸収のために9層設けている。面に対して吸収層の厚みのセル数が少ないため、ベクトル長に影響

響が出たと考えられる。

#### 4. ノード数による比較

図 8 に MPI のノード数を変化させた際の演算時間を示す。(a)が SX-ACE, (b)が SX-Aurora による演算時間である。SX-Aurora の MPI8 の 1400cell についてはメモリ量が足りないため計算が実行できなかった。

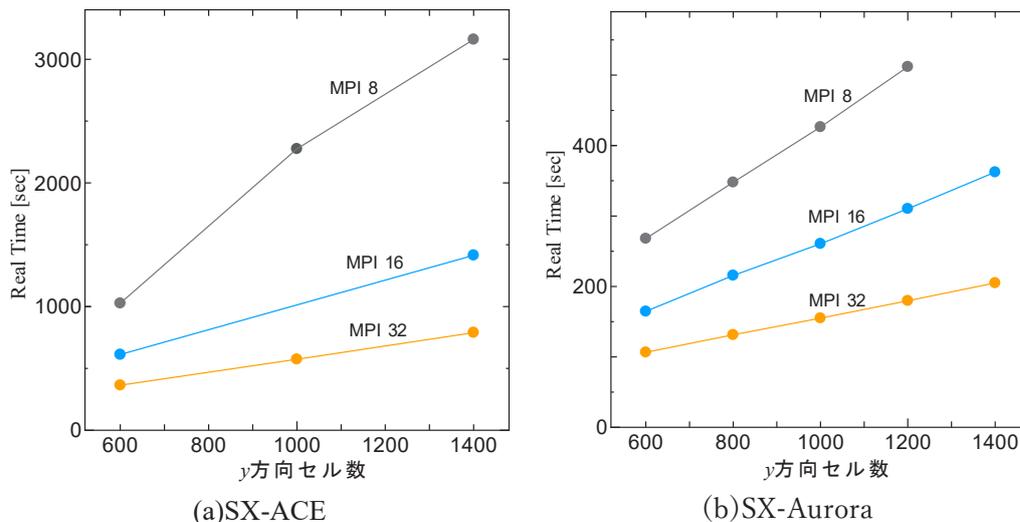


図 8 ノード数による演算時間の比較結果

SX-ACE の 1400cell で比較すると, MPI8 に対して MPI16 では 43%, MPI32 では 25%に時間が短縮し, 高速化が実現できる。一方, SX-Aurora の 1200cell では, MPI8 に対して MPI16 では 60%, MPI32 では 35%に時間が短縮した。ノード数が 2 倍, 4 倍に増えたにも関わらず, 演算時間が 50%, 25%にならなかった理由としては, 分割処理やプロセス間通信によるオーバーヘッドの影響と考えられる。

SX-ACE と SX-Aurora との比較では, MPI 8 の 1000cell のとき, 演算時間は SX-ACE が 2275.7 秒, SX-Aurora が 426.4 秒であり, SX-ACE よりも 18.7% に時間が短縮した。同じく, MPI16 では 25.6%, MPI32 では 26.0%まで時間が短縮した。新しい SX-Aurora では, 約 4~5 倍の高速化が実現できた。

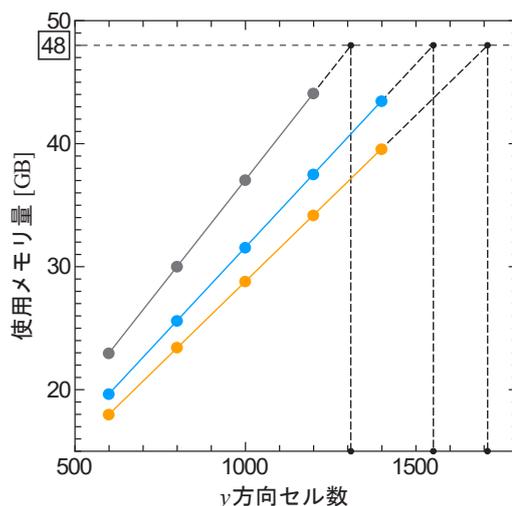


図 9 使用メモリ量の推定 (SX-Aurora)

SX-Aurora の MPI8 でメモリ制限により計算が実行できなかったことについて考察する。SX-Aurora の VE のメモリ上限は 48GB である。図 9 に, MPI 8, 16, 32 の解析で使ったメモリ量を示す。解析規模に比例して使用するメモリ量が増加していく様子を読み取れる。1 つの VE に搭載されているメモリは 48 GB であるため, これ以上メモリを消費するような解析はできない。MPI 8, 16, 32 で解析できる最大の空間の規模を予想すると, 図 9 のメモリ使用量の予測の点線と横軸との交点を読み取り, x 方向を 4200, z 方向を 400 と一定にしたとき

$$\text{MPI 8: } 4200 \times 1300 \times 400\text{cell}$$

$$\text{MPI 16: } 4200 \times 1550 \times 400\text{cell}$$

$$\text{MPI 32: } 4200 \times 1700 \times 400\text{cell}$$

程度と推定した。細線化した基板などの解析のため, これ以上のセル数のモデルを扱う場合には, 使用す

るノード数を増やして計算を分散させる必要があると考えられる。

#### 5. まとめ

本報告では、厚みが薄く、面積が広いプリント基板構造のような偏った解析対象を想定し、SX-ACE ならびに SX-Aurora により計算の高速化について検討した。その結果、セル数によるベクトル化率についての検討では、256 の倍数の前後においてベクトル長は増えるが、演算時間とベクトル化率に大きな影響がないことがわかった。また、ノード数の比較では、ノード数を増やすことで概ね増えたノード数だけ高速化が実現できていることが分かった。SX-ACE と SX-Aurora の比較では、SX-ACE に対して SX-Aurora は約 4~5 倍の高速化が実現できている。ただし、SX-Aurora の VE のメモリ上限が 48GB であるため、解析規模が大きくなると実行できないことが分かり、大規模解析には MPI の数を増やすことが不可欠である。

今後、プリント線路の細線化や高密度化が進むと予想され、解析に求められる規模が 10 年前から飛躍的に大規模化している。このため MPI64 や MPI128 についても検討が必要である。

#### 謝辞：

本研究は、令和 2 年度萌芽型課題「MPI によるプリント基板の電磁界解析法の高速化」として行った。高速化に対して、東北大学サイバーサイエンスセンターからの支援に感謝する。

#### 参考文献

- [1] T. Kitazawa, R. Kitahara, T. Yamagiwa, J. Chakarothai, Y. Hayashi, T. Kasuga, "Basic Study on a Novel FDTD Method Implemented Frequency Dispersion of PCB", 2021 Joint IEEE International Symposium on EMC+SIPI and EMC Europe, TP-WED-8B-4, (2021).
- [2] 北澤太基, 春日貴志, 林優一他, “FDTD解析を用いたFR-4基板の異方性が与える信号伝送への影響の検討”, 電子情報通信学会環境電磁工学研究会, EMCJ2021-17, (2021.7)
- [3] 北澤太基, 春日貴志他, “コネクタにおける信号伝送評価のための3D解析モデルの構築”, 電子情報通信学会環境電磁工学研究会, EMCJ2020-67, (2021.1).
- [4] 北澤太基, 春日貴志他, “周波数分散性を組み込んだFDTD法によるFR-4基板の信号伝送解析に関する基礎検討”, 電子情報通信学会環境電磁工学研究会, EMCJ2020-44, (2020.10).