

8. 大規模電磁界数値解析を用いた航空機電磁環境推定

機上等技術領域 ※ニッ森 俊一、河村 暁子、米本 成人
北海道大学 日景 隆、野島 俊雄

1. はじめに

携帯電話，パソコン等の携帯電子機器（Portable Electronic Device, PED）は，航空機内で使用されると機上搭載装置等に電磁干渉（Electromagnetic Interference, EMI）を引き起こす可能性がある。このため，機内での PED の使用は世界的に制限されており，我が国でも「機内迷惑防止に係る航空法の一部改正法」において航空機の運航に支障を及ぼす恐れのある PED を告示し，それらの使用を制限している。しかし，告示に記載する PED は新技術の開発に伴い常に見直す必要があるため，電子航法研究所では最近の PED の調査とそれらの機上装置への干渉に関する分析・評価を行っている[1]。

従来使用が禁止されていた携帯電話やアクティブ型 IC タグのような意図的に電波を発射する PED（Transmitting PED, T-PED）について，飛行の安全を維持しつつ機内で使用可能とする条件の研究が最近世界的に行われている。電子航法研究所はこの研究に参加し，PED からの精度良い電磁放射測定法や機内の電磁環境予測法等の検討を進めている[2]。また，携帯電話等が機内で使用される場合を想定し，航空機の飛行安全性審査手順に関する調査・研究を進めている。

本稿では，航空機の機内外電磁環境推定および PED から機上無線装置までの伝搬路の経路損失予測に適用可能な技術として，大規模電磁界数値解析技術の概要とその意義を紹介する。具体的には，航空機内での無線通信機器利用を想定し，機器から放射される電磁波の機内分布について，大型計算機を用いた分散メモリ型並列処理を適用した数値計算を行う。

まず，時間領域差分法（Finite-Difference Time-Domain method, FDTD）[3]を用いた大規模並列演算手法について述べ，並列処理のための定式化について説明する。次に，航空機

内部における無線端末装置からの放射電界分布について解析結果例を示す。具体的には，携帯用端末からの 800 MHz 帯の電磁界放射を想定し，機内電界強度の二次元分布を示す。さらに，機内電磁界のポインティングベクトル分布も示し，詳細な電磁環境評価結果が得られる見通しを明らかにする。

2. FDTD 法を用いた大規模並列演算手法

FDTD 法は，マクスウェルの微分方程式を時間領域で直接解く方法であり，1 階偏微分方程式を扱えることから，計算機負荷は比較的低く，その解析アルゴリズムは数値解析に適合している。さらに，車や航空機のように複雑な構造を有する解析モデル，人体のような損失性媒質および分散性媒質など様々な解析対象について電磁界応答を求める手法として有効である[4]。

FDTD 解析では，解析領域を Yee セルと呼ばれる微小領域に分割し，離散的な時間における各セルの電磁界成分を計算する。セルサイズは，正確な結果を得るために十分に小さく設定する必要があるが，解析周波数の 1/10 波長以下とするのが一般的である。このようなことから，航空機のように波長に比較して大規模な解析モデルに対して FDTD 法に基づく解析を行う場合，空間を離散化するためのセル数が増大し，主記憶容量が小規模な PC 単体では計算を実行することが不可能である。そこで，大型計算機または PC クラスタなどを利用した分散メモリ型並列処理を行うことで大規模なモデルの解析が可能となる。

そこで，合理的な解析時間および優れたデータの信頼性の観点から，基本計算単位であるノードを複数有する大型計算機を用いる。大型計算機は複数のプロセッサとメモリから構成されるノードを複数有し，1 ノードあたりの主記憶容量が数 10 GB ないし 100 GB 以上である。さらに，自動並列化コンパイラ等

の利用環境が活用できる。そのため、大きな解析空間を複数ノードに分割し、各ノードで同時に並列計算することにより高精度な解析を合理的な計算時間内で行うことが可能である。

本稿では、複数ノードと MPI (Message Passing Interference) ライブラリを用いた分散メモリ型並列 FDTD 解析を行う [5]。

2.1 並列処理のための定式化

本節では、分散メモリ型並列処理に基づく FDTD 法について述べる。図 1 に分散メモリ型並列処理のための解析空間領域分割例を示す。同図左に示す三次元解析空間を複数の領域に分割し、それを同図中央に示すように各ノードに振り分けて並列実行する。ただし、上下に隣り合う領域間でデータの共有を行わなければならないことから、同図右に示すようにこれら領域間で重複する部分をあらかじめ設定しておく。

図 2 に FDTD 解析法の分散メモリ型並列処理による手順を示す。初期化部分において並列化の準備を行う。次に、図中吹き出しで示した部分においてノード間でのデータ送受信を行う。電界および磁界のいずれについても、完全整合層 (Perfect Matched Layer, PML) 吸収境界条件を適用した直後にデータの送受信を行う。このように、分散メモリ型並列処理において、プログラム中の解析部分の変更はわずかである。

上記解析を実現可能とするのが MPI ライブラリである。MPI ライブラリを用いることで大規模な単一解析モデルを複数のノードに分割して並列処理を行うことが可能となり、ノード間で分割面に属する電磁界成分を重複させ、タイムステップごとにノード間で電磁界成分のデータ共有を行う。ノード間でのメッセージ通信 (データ通信) は並列処理特有のオーバーヘッドとなり、高速処理の障害要因になる。したがって、送受信されるデータ量および送受信回数を最小化し、処理の高速化を実現する必要がある。また、解析モデルをノード毎に分割すること、計算負荷を均等にすることなどの工夫を行う。

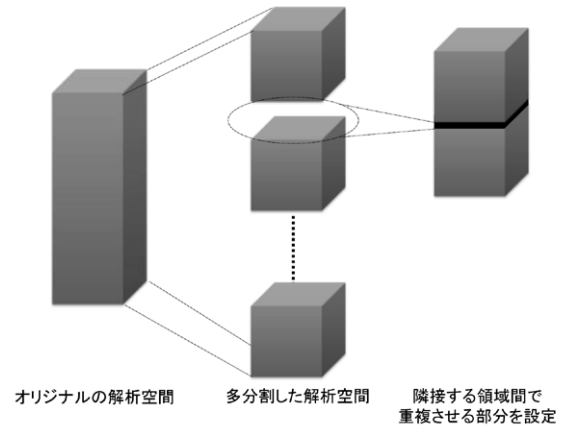


図 1 分散メモリ型並列処理のための解析空間領域分割例

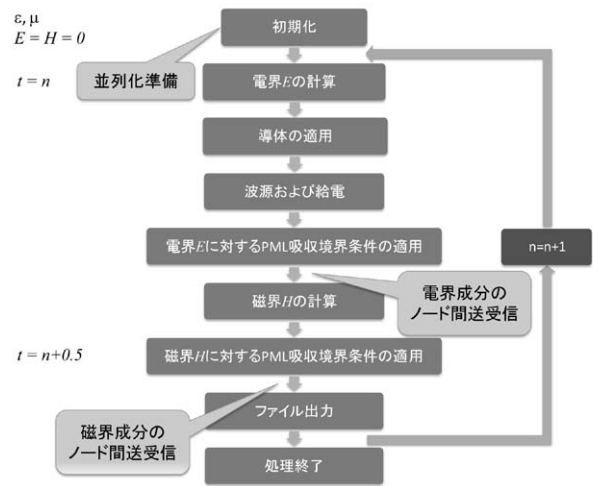
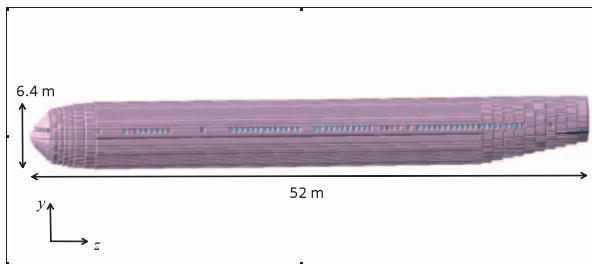


図 2 分散メモリ型並列処理に適した FDTD 解析法

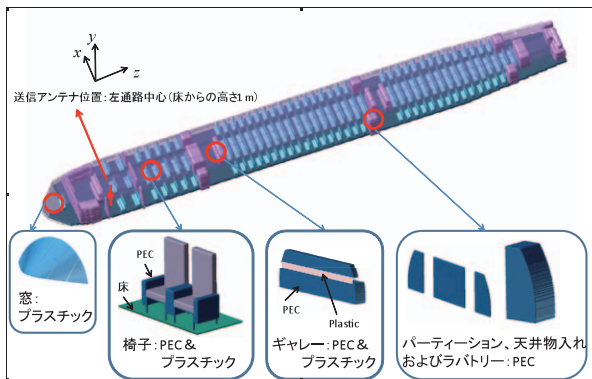
2.2 航空機数値解析モデル

図 3 に FDTD 解析に用いる航空機モデルを示す。ここで、図 3 (a) に示す航空機の胴体部分は、高さ 6.4 m、全長 52 m のボーイング社製 777-200 を模擬し、座席はビジネスクラス相当の 12 席を含む 342 席を配置する。航空機は、機体胴体を支えるために、金属の環状の骨格が胴体を取り囲む構造になっているため、モデリングでは、機体の骨格を模擬した環状の金属柱を、筐体の内側に機種方向から 500 mm 間隔で配置する。また、図 3 (b) に主な機内構造物を示す。

材料パラメータを表 1 に示す。材質として、航空機の筐体は完全導体 (Perfect Electric



(a) 航空機モデルの概観



(b) 主な内部構造物

図 3 FDTD 解析に用いる航空機モデル

Conductor, PEC) とし、窓はプラスチックとする。また、椅子の肘掛と足は完全導体とし、シートとして完全導体で裏打ちされた誘電体を設置した。ギャレーは完全導体とプラスチックを図 3 (b) に示すように配置し、その他パーティション、天井物入れおよびラバトリーは一律に完全導体とする。プラスチック部の材料定数は、比誘電率 2.26、導電率 10^{-7} を使用し、座席の誘電率は、比誘電率 1.6、導電率 10^{-7} の仮想プラスチックとした。

次に、800 MHz における数値解析パラメータを表 2 に示す。モデルのセルサイズは一辺 10 mm の立方体とし、翼を除く機体の胴体全てを包含する解析領域を設定している。この解析領域は均等に 6 個のエリアに分割して計算される。解析領域の外側に設置する吸収境界条件は、8 層の三次 PML を使用する。なお、図 3 に示す航空機内の概観および構造図ではセルを間引き、100 mm おきに描いている。航空機モデルの解析空間に含まれるセル数は $673 \times 673 \times 5298$ であり、解析に必要な

表 1 材料パラメータ

Body	Perfect Electric Conductor (PEC), Thickness 10 cm
Partition	PEC, Thickness 5 cm
Seat(surface)	Relative permittivity $\epsilon_r=1.6$, Conductivity 10^{-7} S/m
Seat(frame)	PEC
Window glass	Thickness 1 cm, Relative permittivity $\epsilon_r=2.26$, Conductivity 0.003 S/m

表 2 数値解析パラメータ

Problem space	$673 \times 673 \times 5298$ (x, y, z)
Cell size (cubic)	$\Delta=1$ cm
Frequency	810.05 MHz
Absorbing B. C.	PML (8 layers)
Required memory	720 GB (120 GB*6-node)
Iteration	800
Reference plane	1.0 m
Antenna	$\lambda/2$ dipole, Input 0.1 W
Number of guard cells	22 (in all directions)

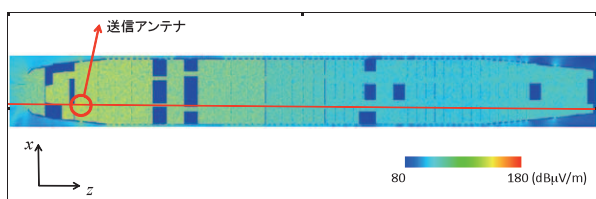
主記憶容量は約 720 GB である。

励振源は、図 3 (b) に示す床面からの高さ 1 m に設置した垂直偏波の半波長ダイポールアンテナであり、送信波は入力電力 0.1 W の連続波とする。

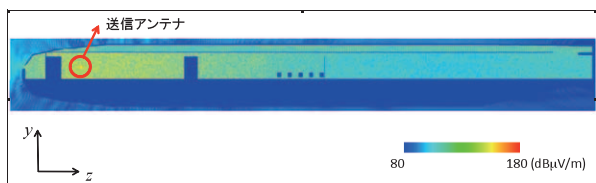
3. 解析結果例

図 4 (a) に床から 1 m の高さの面に対する水平面内の二次元電界強度分布を示す。さらに、図 4 (b) に図 4 (a) 中の赤線部における垂直面内の二次元電界強度分布を示す。図中の色が電界強度振幅の絶対値 (3 軸合成値) を示しており、赤い部分を 180 dB μ V/m、青い部分を 80 dB μ V/m として二次元的にカラーマップを作成している。なお、外枠の青線は機体の外壁、内部に見られる青い枠はギャレー、ラバトリー等の完全導体の内部を示している。

暖色の点が電界強度振幅の絶対値が高い場所、寒色の点が絶対値が低い場所を示している。図から明らかなように、ギャレー等で



(a) 水平面内二次元分布（高さ 1 m）



(b) 垂直面内二次元分布

図 4 機内電界強度二次元分布

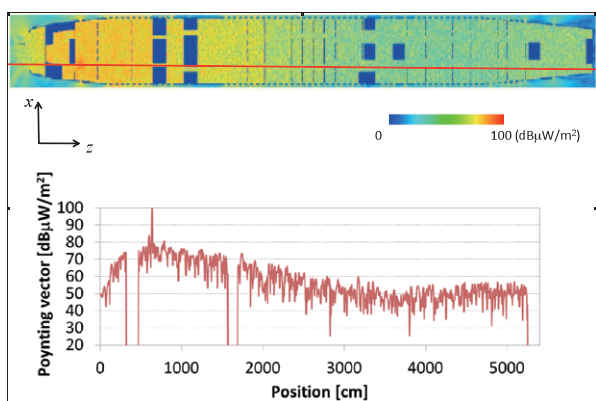


図 5 機内ポインティングベクトル分布

仕切られたゾーンごとに、同じゾーン内では波源から遠ざかるに従い、電界強度が弱まる傾向が見られる。また、壁面や内部構造物からの反射等により定在波が発生し、狭いエリアでみた場合には電界強度が細かく変動していることが確認できる。

さらに、図 5 に機内電磁界強度のポインティングベクトル分布 (x 軸方向) を示す。二次元分布は赤い部分を $100 \text{ dB}\mu\text{W}/\text{m}^2$ 、青い部分を $0 \text{ dB}\mu\text{W}/\text{m}^2$ としている。また、一次元分布は機内長手方向、高さ 1 m の軸上のポインティングベクトルである。このように、大規模電磁界数値解析を行うことで、広大な解析空間が求められる機内電磁環境の詳細解析が可能である。

5. まとめ

本稿では、航空機内外の電磁環境を詳細か

つ正確に推定可能な大規模電磁界数値解析技術について、分散メモリ型並列処理に基づく FDTD 法の検討を行った。航空機内のように大きな解析空間を必要とする場合、解析空間を複数ノードに分割し、各ノード間の電磁界を共有する並列演算を行うことで大規模な解析を正確かつ合理的な計算時間内で実行可能である。

また、搭載アンテナおよびケーブル等をモデル化することで、機上無線装置までの EMI 予測が期待される。これにより、新造機等の EMI 評価の簡略化が可能となる。今後、解析モデルの材料パラメータおよび機内構造等の詳細に検討し、実際の機内電界測定値との比較検討を行う予定である。

参考文献

- [1] 山本憲夫他, “携帯電子機器による機上装置への電磁干渉に関する研究,” 2006 年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, BK-1-4, SS-7, Sep. 2006.
- [2] 河村暁子他, “信頼度を用いた電子機器からの電磁波放射評価,” 2007 年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-4-46, p. 309, Sep. 2007.
- [3] K. S. Yee, “Numerical solution of initial boundary value of problem involving Maxwell’s equations in isotropic media,” *IEEE trans. Antennas and Propagation*, vol. 14, no. 5, pp. 302-307, May 1966.
- [4] J. Wang, O. Fujiwara, S. Watanabe and Y. Yamanaka, “Computation with a Parallel FDTD system of human-body effect on electromagnetic absorption for portable telephones,” *IEEE trans. Microwave Tech. and Theory*, vol. 52, no. 1, pp. 53-58, Jan. 2004.
- [5] C. Guiffaut and K. Mahdjoubi, “A parallel FDTD algorithm using the MPI library,” *IEEE Antennas and Propagation Mag.*, vol. 43, no. 2, pp. 94-103, Apr. 2001.