

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 1 日現在

機関番号：50102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23700046

研究課題名（和文）高速大規模電磁界解析手法の開発および電磁環境影響評価手法への適用

研究課題名（英文）Development of fast large-scale electromagnetic field analysis method and applying for EMC environment.

研究代表者

武居 周 (TAKEI AMANE)

苫小牧工業高等専門学校 電気電子工学科・准教授

研究者番号：40598348

研究成果の概要（和文）：

本報告書において、階層型領域分割法に基づく full-wave 電磁界解析手法の高速化検討および大規模解析の実問題への適用を試みた。まず高速化手法として、階層型領域分割法における釣り合い問題の反復計算に対して有効な前処理手法として知られている BDD(Balancing Domain Decomposition)前処理の導入を検討した。続けて大規模解析の実用問題として約 2 千万複素自由度規模の通勤電車内環境モデルによる電磁界解析を実施し、解析が可能であることを示した。また、NICT 数値人体モデルを用いた体内の大規模解析に適用し、PC クラスタを用いて実用時間内に解析が可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：

This paper describes an evaluation of electromagnetic compatibility based on a full-wave analysis of electromagnetic fields using a parallel finite element method with the balancing domain decomposition method. The environment chosen is the interior of a commuter train. A train containing seats, handrails and 48 human bodies is precisely modeled using a large-scale finite element mesh with Nedelec elements and about 21 million degrees of freedom. The results show that the environmental impact of electromagnetic fields due to cellular phone use in the train can be successfully evaluated. And, this paper describes large-scale full-wave analysis of electromagnetic fields by the finite element method with an iterative domain decomposition method using numerical human body models. A stationary vector wave equation for the high-frequency electromagnetic field analysis is solved taking an electric field as an unknown function. The mesh is efficiently divided by using the domain decomposition data structure when elements are generated from the voxel data of NICT numerical human body model.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数値解析

科研費の分科・細目：計算科学・計算科学

キーワード：full-wave 有限要素電磁界解析, 階層型領域分割法, BDD, NICT 数値人体モデル

## 1. 研究開始当初の背景

申請者は電磁環境のリスク評価の高精度化に寄与することを目指して高周波電磁界解析手法および環境問題に対する適用に関

して検討している。これまでに反復型領域分割法に基づく並列有限要素法に関する研究・開発を進め、提案手法により部屋スケールの高周波電磁環境解析が可能であること

を示した。しかし、1 ケースの計算に数時間から数日を要することから、電磁界源の配置パターンを変更するなどのパラメトリックスタディを用いたより綿密な影響評価を行うためには、計算の高速化が課題となっていた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は反復型領域分割法の核となる領域間のつり合い計算の高速化のための BDD 前処理の開発と、本手法による高精度な電磁環境影響評価手法の確立である。

## 3. 研究の方法

本研究課題では、数値解析手法に基づく高精度な電磁環境影響評価手法の確立を目指し、手法の高速化のために、これまでの研究において検討を進めてきた反復型領域分割法に基づく高周波電磁界問題に対する有効な前処理手法となる BDD を新規に開発する。BDD の開発において、粗いグリッドを構成する  $Z^i$  ベクトルを電磁界問題において使用する辺要素の性質を満たす必要があり、本研究で扱う 3 次元高周波電磁界問題において使用する辺要素によって離散化された関数空間に対する  $Z^i$  ベクトルを開発する。並行して、数値電磁界環境モデルの検討および開発を進め、また、計算に使用する PC クラスタを構築し、数値例を蓄積する。具体的には、平成 23 年度は前処理の開発およびベンチマーク問題による精度検証、性能検証を行い、平成 24 年度において人体を含む実環境モデルによる影響評価問題への適用を行い、高速化の効果を確認し、有効な環境影響評価手法であることを実証する。

## 4. 研究成果

### (1) BDD 前処理適用による高速化

本研究において開発を行った高周波電磁界解析手法に適用している並列化手法である階層型領域分割法は、部分領域問題解法に直接法を適用することにより、インターフェース問題の収束特性が改善し手法の高性能化に寄与することがわかったが、高周波問題特有の不安定性は依然残ったままである。このインターフェース問題の収束特性の不安定性を改善するために、BDD 前処理の電磁界問題への適用検討を進めた。BDD は、解析領域に対して粗いグリッドを用いて領域間のつり合い問題の収束性を向上させるマルチグリッド法の考え方を前処理として適用する方法であり、Numann 問題を解いた時の解に粗いグリッドによる修正解を加えるアルゴリズムである。

まず、COCG 法の各反復ステップにおいて得られる残差  $r$  に対して、 $z = M^{-1}r$  を求めることを考える。以下に、BDD による前処理行列を求める手順を示す。

### ステップ1: $\lambda^i$ を求める

$$Z^{(i)T} D^{(i)T} R_B^{(i)T} \left( r - S \sum_{j=1}^N R_B^{(j)} D^{(j)} Z^{(j)} \lambda^j \right) = 0, \quad i = 1, \dots, N$$

$D^{(i)}$  は対角成分のみを持つ重み行列

### ステップ2: $s^i$ を求める

$$s = r - S \sum_{j=1}^N R_B^{(j)} D^{(j)} Z^{(j)} \lambda^j = 0, \quad s^{(i)} = D^{(i)} R_B^{(i)T} s, \quad i = 1, \dots, N$$

### ステップ3: 各領域においてローカル問題を解く

$$S^{(i)} u^{(i)} = s^{(i)}, \quad i = 1, \dots, N$$

### ステップ4: $\mu^i$ を求める

$$Z^{(i)T} D^{(i)T} R_B^{(i)T} \left( r - S \sum_{j=1}^N R_B^{(j)} D^{(j)} (u^{(j)} + Z^{(j)} \mu^{(j)}) \right) = 0, \quad i = 1, \dots, N$$

### ステップ5: $z$ を計算

$$z = \sum_{i=1}^N R_B^{(i)} D^{(i)} (u^{(i)} + Z^{(i)} \mu^{(i)})$$

電磁界問題は 1 節点につき 1 自由度を持つため、頂点自由度において同様の自由度配置である熱伝導問題を参考に、インターフェース上の節点 1 つに対する  $Z_p^{(i)}$  は式(1)のような決め方が考えられる。

$$Z_p^{(i)} = [1] \quad (1)$$

式(1)を用いて作成した前処理行列  $M^{-1}$  によって、図 1 に示すアンテナモデルを用いたテスト計算を行った。自由度は約 1 万である。

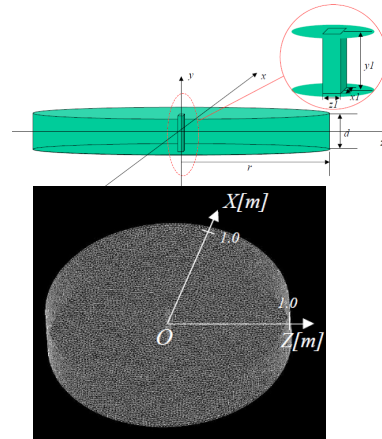


図 1 テスト計算用アンテナモデル

階層型領域分割法におけるインターフェース問題の残差ノルム収束履歴に関して、対角スケール前処理 (Diag) との比較を図 2 に示す。

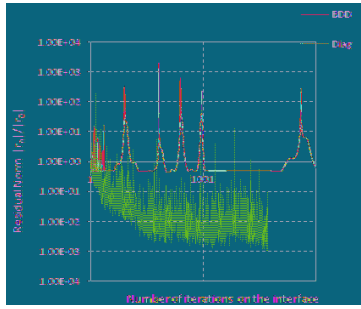


図2 インターフェース問題の残差ノルム収束履歴

この結果より、式(1)による前処理は正常に機能しておらず、電磁界問題に対しては不適切であることがわかった。

この粗いグリッドを頂点情報をもとに辺要素関数空間が持つ性質を満たすように構成する必要があり、本研究において検討を進めている。具体的には次の手順によって前処理行列を作成することを検討している(図3)。

1. インターフェース上の辺要素自由度がある点 $P_j$ を選択する。
2.  $P_j$ を挟む頂点上の点 $P_{j-1}$ ,  $P_{j+1}$ を選択する。
3.  $P_{j-1}$ ,  $P_{j+1}$ における基底関数 $\lambda_{j-1}$ ,  $\lambda_{j+1}$ より,  $\text{grad } \lambda_{j-1} + \text{grad } \lambda_{j+1}$ を求め、これを $Z_p^{(i)}$ とする。

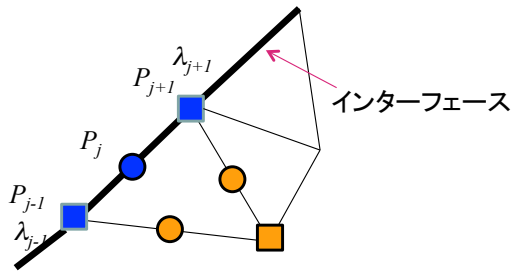


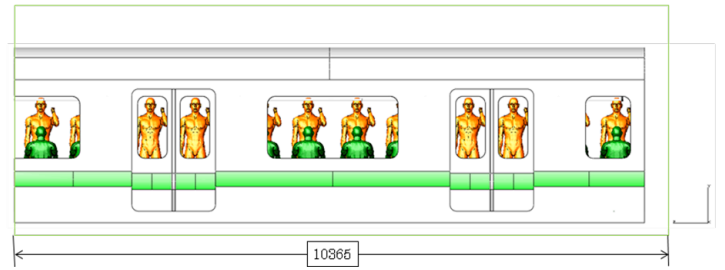
図3 頂点情報の辺要素関数空間への繰り入れ

$$Z_p^{(i)} = [\text{grad } \lambda_{j-1} + \text{grad } \lambda_{j+1}] \quad (2)$$

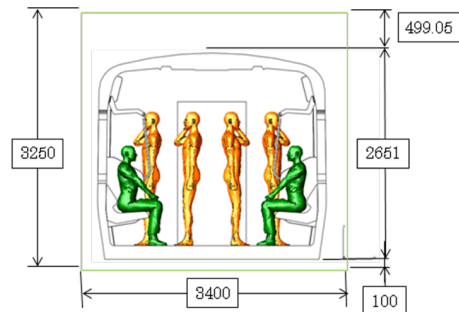
式(2)を用いて作成した前処理行列 $M^{-1}$ を用いるコードを現在実装・確認中である。

### (2) 実環境問題への適用

実環境問題への適用のために、人体を含めた通勤電車内環境のモデリングを行い、計算を行った。通勤電車内には車体壁や手すりなどの金属や人体などの誘電体などが存在する。これらの形状や幾何学的配置の差異によって電磁界分布が変化する。したがって、計算に用いる数値環境モデルを構築する際、実環境が正確に再現されるようにモデリングする必要がある。図4(a), (b)にそれぞれモデルの側面と断面の模式図を示す。

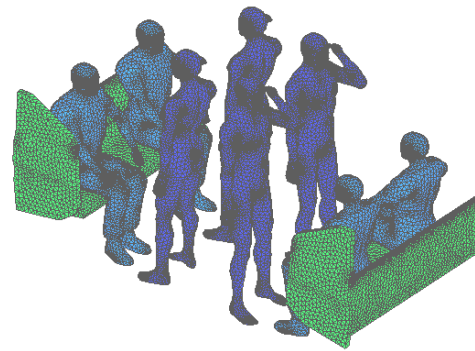


(a) 側面

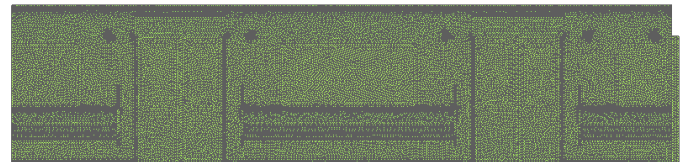


(b) 断面

図4 通勤電車モデル (unit: mm)



(a) 表面パッチ



(b) メッシュ

図5 CADモデルに基づく数値モデル

表1 材料定数

Material	Permittivity (F/m)	Conductivity (S/m)
Air	8.854e-12	0.0
Seat	7.083e-10	0.50
Handrail	7.083e-10	5.760e+7
Car body	7.083e-10	5.760e+7
Human bodies	7.083e-10	0.52

このモデルには実車内に存在するプラスチックやゴムなどの誘電体、金属部品および48体の人体モデルが含まれている。立ち客の数が32体であり、それぞれの人体モデル付近に使用中の携帯電話をモデル化するための放射源を配置し、立ち客全員が通話を行っている状況を再現する。本解析では、人体は水で近似する。また、座席および座席横の仕切り板をプラスチックとして扱う。各材料に与えた材料定数を表1に示す。Nedelec四面体一次要素を用いて要素分割する。Fig. 4にメッシュ分割図を示す。分割する要素一辺の最大長さは0.0375[m]であり、解析周波数800[MHz]の波長の10分の1に設定している。解析情報を表2に示す。要素数は18,652,438、自由度数は21,860,675複素自由度である。放射源として、モデル化する携帯電話(PCD)は、広く普及している従来型の800[MHz]帯アナログ携帯機(送信出力:0.8[W])とする。モデル放射源は理想的な電圧源および電流源を考え、形状はダイポールアンテナとする。電圧源を1[V]に正規化し、電流源を0.8[A]に設定する。本数値実験における前処理は、対角スケール前処理を適用している。

使用した計算機環境は、Intel Core i7 (2.93 GHz / L2 256KB/L3 8MB/Quad Core/QPI 4.8GTs)のマルチコアCPUおよび12GBのメモリが搭載されているPCクラスタ16台(62-core)である。本解析では、1人が通話した状態を模擬したものを合計32人分計算し、最後に足し合わせることによって、全員が通話した状態を再現した。また、それぞれの計算において波長を長さの単位として計算を行った。このとき、位置ベクトル $\mathbf{x}$ 、電流密度ベクトル $\mathbf{J}$ 、角周波数 $\omega$ は、波長を $\lambda$  [m]、光速を $c$  [m/s]として式(3)のように変更される。

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &\rightarrow \mathbf{x} / \lambda, \\ \mathbf{J} &\rightarrow \mathbf{J} \lambda^2, \\ \omega &= 2\pi f = 2\pi c / \lambda \rightarrow \omega = 2\pi c. \end{aligned} \quad (3)$$

この変換によって、見かけ上の周波数が300[MHz]となり、収束性が改善される。図6に、式(3)による変換を行った場合(Improvement)と従来の計算方法(Ordinary)による比較を示す。従来の方法では今回の計算ではインターフェース問題が収束しなかったが、式(3)の変換によって収束性が改善され計算が完了した。32ケースの計算時間の平均は6.5[h]であった。図7に解析結果を示す。

表2 解析情報

No. of Elements	18,652,438
No. of DOF	21,860,675
Platform	16-node PC cluster with Intel Core i7 940 2.93 GHz
No. of cores	62
Main memory per node	12 GB
Elapsed time (sec)	23,400

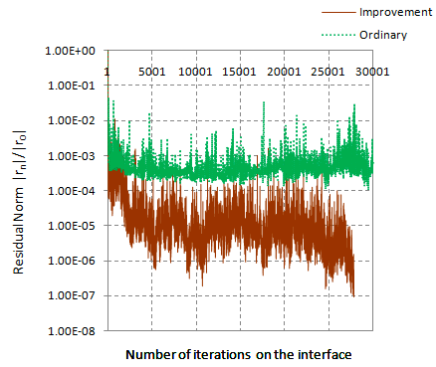


図6 インターフェース問題の残差ノルム収束履歴

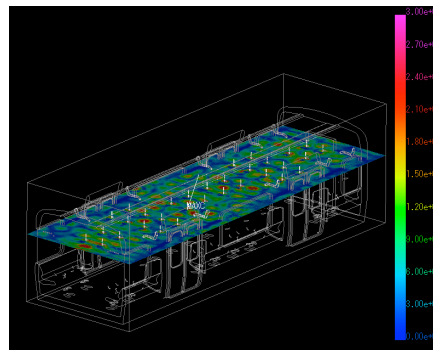


図7 通勤電車内の電界

### (3) 数値人体モデルへの適用

#### ① ボクセルから四面体メッシュへの変換

NICTにおいて公開されている数値人体モデルは、1辺2mmの立方体を1つのボクセルとして、そのボクセルが占める臓器(空気領域を含む)を番号で表現したバイナリデータである。成人男性モデルの場合、左右320ボクセル、前後160ボクセル、高さ866ボクセルの領域内の臓器データがchar型で表現されており、データサイズは44,339,200バイトである。本研究で用いる解析ソフトウェアは、四面体専用のコードであるので、今回はボクセルデータを四面体メッシュに変換して数値解析を行った。

本解析では、図8の様に、1つのボクセルを5つの四面体に分割した。メッシュの位相の整合性が取れるように、面を挟んで接する2つのボクセルは、それぞれ図8(a)と図8(b)の分割が交互に行われる様にする。

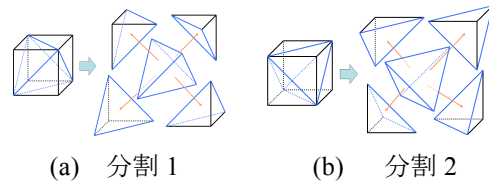


図8 1ボクセルから5つの四面体を生成

#### ② メッシュ生成アルゴリズム

本節では、ボクセルメッシュのデータ構造を用いて、本研究で用いる解析ソフトウェア

のための2階層に領域分割された四面体メッシュの生成法を説明する。

図9は2階層に領域分割されたメッシュの生成の手順である。まず、ファイルから数値人体データを読み取る。

次に、ボクセルデータの双対グラフを作成して、METISライブラリによってpart分割される。メッシュ全体に関する計算は、このpart分割される所だけであるが、この時は、METISライブラリに渡すデータは“ボクセル数x6”の大きさのint型配列を作ることができれば良い。成人男子データの場合は、約1Gバイトである。ボクセルデータがpart分割された後は、図10の様に四面体に分割する。図10(a)はボクセルメッシュであり、図10(b)は四面体に分割された後のメッシュである。図11(a)は、part分割されたメッシュの皮膚データを抽出した結果であり、図11(b)は内蔵データを抽出した結果である。

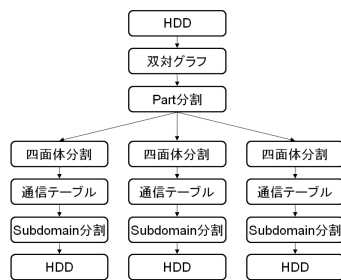
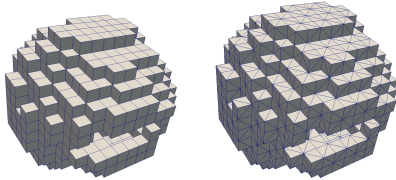
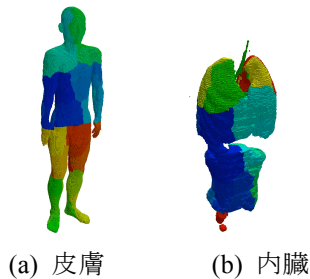


図9 階層型領域分割型メッシュ生成手順



(a) ボクセルデータ (b) 四面体メッシュ

図10 ボクセルから四面体への変換



(a) 皮膚 (b) 内臓

図11 Part分割

本手法によるメッシュ生成を行った。ここで用いた計算機環境は、Intel Core2 Quad Q6600 (2.40 GHz / L2 8 MB) のマルチコアCPUおよび12GBのメモリが搭載されているPCクラスタ8台(32 Processor element)である。胴周りのみ抜き出したモデルと、全身のモデルに対して4mmピッチ、2mmピッチで要素生成した際に要した計算時間を表3に示す。これらのうち、全身を2mmピッチで要素生

成した最も規模が大きいモデルであっても生成に8時間程度しか要さず、実用時間内の数値モデル作成が可能であることが示された。

表3 メッシュ生成に要した時間

	四面体要素数	分割part数	Part当たりの分割subdomain数	計算時間
胴周り(4mm)	320万	32	1000	10分間
胴周り(2mm)	2560万	32	8000	56分間
全身(4mm)	2700万	80	4000	54分間
全身(2mm)	2.2億	80	23000	8時間

### ③ Full-wave 電磁界解析

解析では、表3において最大規模となる全身を2mmの大きさのボクセルで構成したモデルを用いた。解析に用いた計算機環境は、Intel Core2 Quad Q6600 (2.40 GHz / L2 8 MB) のマルチコアCPUおよび16GBのメモリが搭載されているPCクラスタ20台(80 Processor element)である。解析周波数を70 [MHz]、300[MHz]として、この2ケースについて計算を行った。図12にインターフェース問題<sup>2)</sup>の残差ノルム収束履歴を示す。またTable. 2に計算時間および1 coreあたりの平均メモリ使用量を示す。

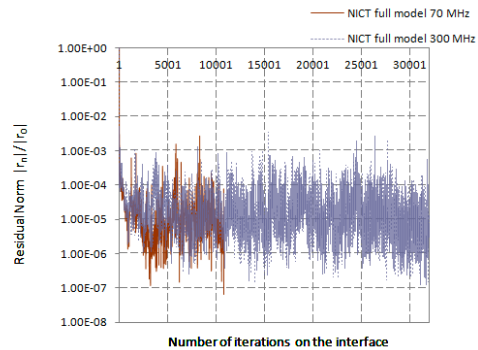


図12 インターフェース反復計算残差ノルム

表4 計算時間・使用メモリ量

Case	Freq. [MHz]	Iter. counts	CPU time[h]	Mem. [G Byte]
1	70	10,755	34	3.0
2	300	34,793	109	3.0

解析周波数が70 [MHz]のケースでは、34時間で計算が完了した。解析周波数が300[MHz]のケースでは、収束性が極端に悪化し、計算に109時間を要した。Full-wave電磁界解析において、解くべき行列の条件数が周波数や材料構成に依存することが知られている。今回の2つの計算例において数値例を示すことが出来たが、今後、インターフェース問題の安定化手法の開発が課題である。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1. 武居周, 室谷浩平, 吉村忍, 金山寛, “数値人体モデルを用いたマイクロ波帯域の有限要素電磁界解析,” 日本シミュレーション学会論文誌, Vol.4, No.3(2012), pp.81-95.
  2. M. Ogino, A. Takei, H. Notsu, S. Sugimoto and S. Yoshimura, “Finite Element Analysis of High Frequency Electromagnetic Fields using a Domain Decomposition Method based on the COCR method,” Theoretical and Applied Mechanics Japan, Vol.61(2012), pp.171-183.
- [学会発表] (計 15 件)
1. A. Takei, S. Sugimoto, M. Ogino, S. Yoshimura, and H. Kanayama, “EMC analysis in a livin environment by parallel finite element method,” Proceedings of Compumag2011, Sydney, Australia, July 12-15, 2011, USB/ PB7.3.
  2. A. Takei, K. Murotani, S. Yoshimura, H. Kanayama, “Large-scale full-wave analysis of electromagnetic field by the finite element method using numerical human body models,” Proceedings of 10th World Congress on Computational Method(WCCM), São Paulo, Brazil, Jul8-13, (2012).
  3. M. Ogino, A. Takei, H. Notsu, S. Sugimoto, S. Yoshimura, “An Iterative Method based on the Domain Decomposition Method for Large-scale Complex Symmetric Linear Systems,” Proceedings of 10th World Congress on Computational Method(WCCM), São Paulo, Brazil, Jul.8-3, (2012).
  4. 荻野正雄, 武居周, 野津裕史, 杉本振一郎, 吉村忍, “COCR 法を用いた高周波電磁界の大規模有限要素解析,” 電気学会静止器/回転機合同研究会資料, SA-11-47, RM-11-060(2011)
  5. 武居周, 室谷浩平, 吉村忍, 金山寛, “数値人体モデルを用いたマイクロ波帯域の大規模有限要素電磁界解析,” 電気学会静止器/回転機合同研究会資料, SA-11-08, RM-11-061(2011)
  6. 武居周, 室谷浩平, 吉村忍, 金山寛, “反復型領域分割法による大規模 full-wave 電磁界解析,” 第 24 回計算力学講演会講

演論文集(2011), CD-ROM. (フォーラム F1. 低炭素社会向けシミュレーション技術【**基調講演**】)

7. 荻野正雄, 武居周, 野津裕史, 杉本振一郎, 吉村忍, “COCR 法に基づく領域分割法を用いた高周波電磁界有限要素解析,” 第 61 回理論応用力学講演会講演論文集, O16-01(2012)【**基調講演**】
8. 武居周, 室谷浩平, 吉村忍, 金山寛, “数値人体モデルを用いた大規模 full-wave 有限要素電磁界解析,” 第 61 回理論応用力学講演会講演論文集, OS16-03(2012)
9. 荻野正雄, 武居周, 野津裕史, 杉本振一郎, 吉村忍, “大規模複素対称問題に適した反復型領域分割法の検討,” 第 17 回計算工学講演会講演論文集, OS04, F-1-3(2012)【**基調講演**】
10. 武居周, 室谷浩平, 吉村忍, 金山寛, “数値人体モデルを用いた大規模 full-wave 電磁界解析,” 第 24 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD24) (2012)
11. 武居周, 室谷浩平, 吉村忍, 金山寛, “数値人体モデルによる大規模電磁界解析手法の性能評価,” 電気学会静止器/回転機合同研究会資料, SA-12-108, RM-12-123 (2012)
12. 武居周, 室谷浩平, 吉村忍, 金山寛, “数値人体モデルによる大規模 full-wave 電磁界解析手法の性能評価,” 第 25 回計算力学講演会講演論文集(2012), CD-ROM.
13. 熊谷隼人, 武居周, 村本充, “多周波共用アンテナ技術に関する基礎研究,” 第 62 回理論応用力学講演会講演論文集, OS22-03(2013)
14. 荻野正雄, 武居周, 杉本振一郎, 金山寛, “大規模電磁場解析に対する反復型領域分割法の収束性に関する数値的検討,” 第 62 回理論応用力学講演会講演論文集, OS22-01(2013)
15. 武居周, 杉本振一郎, 荻野正雄, 吉村忍, 金山寛, “反復型領域分割法による電磁環境の大規模 full-wave 解析,” 第 62 回理論応用力学講演会講演論文集, OS22-03(2013)