

スパコン活用大規模電波伝搬／電磁界シミュレーション

Radio Propagation and Electromagnetic Field Simulation Techniques for Large-Scale Model using Supercomputer

宇野 博之
Hiroyuki Uno

油井 辰憲
Tatsunori Yui

福田 博之
Hiroyuki Fukuda

渡辺 浩亘
Hironobu Watanabe

穴田 雅之
Masayuki Anada

斎藤 裕
Yutaka Saito

要 旨

将来の複雑かつ大規模化していく電波環境において、ますます重要になってくる電波伝搬解析や電磁界解析のシミュレーション技術を、並列計算処理が可能なスーパーコンピュータTSUBAMEに実装することにより、大幅な計算能力の向上を図った。本稿では、実験住宅内の電波伝搬特性や大型車両に搭載したアンテナ特性を解析することにより、大規模なモデルを実用的な計算時間で解析できることを示す。解析の結果、スタンドアロンパソコンを用いた場合に比べると、電波伝搬シミュレーションでは約17倍の高速化を達成し、電磁界シミュレーションでは約25倍の大規模なモデルの解析を実現した。

Abstract

With an abrupt change in the radio wave environment, simulation techniques such as radio propagation analysis and electromagnetic field analysis are becoming ever more significant. This paper shows how a dramatic reduction in the calculation time can be realized by implementing these simulation techniques in the supercomputer TSUBAME. As compared with a stand-alone computer, the calculation time can be reduced to about 1/17th in a radio propagation simulation and a large-scale model with a mesh size of about 25 times can be analyzed in an electromagnetic field simulation.

1. はじめに

近年、第4世代移動通信システムや無線LANシステムなど、多種多様な無線システムが実用化されている一方で、第5世代移動通信システムなど、さまざまな周波数帯を用いた新規の無線システムの導入が検討されている[1]。また、あらゆる機器に無線通信機能を搭載してインターネットに接続するIoT (Internet of Things) が昨今注目されており、それに対応した機器が急速に増加していくことが予想されている。このように、さまざまな無線システムがあらゆる場所や地域に数多く導入され、電波環境が複雑化し、急激に変化していくため、無線システムを設計評価するうえで、特に無線機器が集中して配置される住宅や市街地などの大規模な通信環境における電波伝搬解析や電磁界解析のシミュレーション技術が今後ますます重要になってくる。

一方で、家電機器や電気自動車への充電用途などに利用するWPT (Wireless Power Transfer: ワイヤレス電力伝送) システムの研究も近年活発に行われており、一般家庭や商業施設などのさまざまな場所への普及が見込まれている[2]。WPTシステムは、広い周波数範囲にわたり漏えい電磁界を発生するため、周辺に配置された無線機器の動作に影響を及ぼす懸念があることが報告されており[3]、他の無線システムとの共存を図るうえで、漏えい電磁界の影響を商業施設などの大規模なエリアで解析する

技術は重要となる。

以上のように、無線システムを取り巻く環境は、日々変化し、複雑かつ大規模化してきている現状を踏まえると、これに対応できるシミュレーション技術を早期に確立していく必要がある。そこで著者らは、将来の大規模モデルの解析に向けた開発環境構築を目的として、複数の計算ノードを用いた並列計算が可能なスーパーコンピュータ (以降、スパコン) に、シミュレーション技術を実装した環境を開発した。これにより、従来のスタンドアロンパソコンを用いた開発環境に比べて、大幅な計算能力の向上を達成した。

本稿では、東京工業大学のスパコンTSUBAME 2.5 (以降、TSUBAME) に実装したRay-Launching法電波伝搬シミュレーションや有限積分法電磁界シミュレーションを用いて、大規模な解析モデルのシミュレーションを実現したので、その解析結果と計算ノード数に対する計算時間について報告する。

2. スパコン活用シミュレーション技術

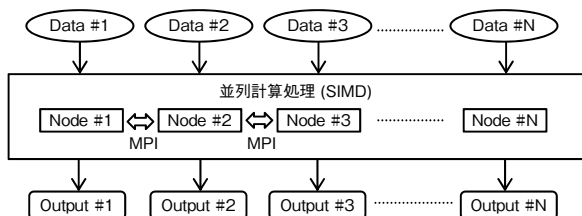
第1表に、本稿で用いたスパコンTSUBAMEのシステム仕様を示す[4]。CPU 2基とGPU 3基を搭載した複数の計算ノードを高速ネットワークで接続した構成で、5.7 PFLOPS (倍精度浮動小数点演算) のピーク性能を実現できる。

第1表 スパコン TSUBAME 2.5 構成

Table 1 Specifications of TSUBAME 2.5

CPU	Intel Xeon (注1) X5670 2.93 GHz, 6 cores x 2slot, with Hyper Threading
GPU	NVIDIA Tesla (注2) K20X x 3
メモリー	54 Gbyte
ローカルディスク	SSD 120 Gbyte
ネットワーク	QDR Infiniband x 2 (80 Gbit/s)
計算ノード数	1408ノード
OS	SUSE Linux (注3) Enterprise Server 11 SP3
MPI	OpenMPI 1.6.5

第1図は、複数の計算ノードを用いた並列計算モデルを示しており、SIMD (Single Instruction Multiple Data Stream) モデルと呼ばれている。計算ノード数にしたがって、計算規模を拡張できるため、スケーラビリティに優れているという特徴を有する。スパコンの並列計算処理における計算ノード間の制御は、MPI (Message Passing Interface) ライブラリ規格に準拠した命令の実行により行われ、プログラム中の計算処理に対し、MPI命令を用いた並列計算に対応することで、大規模なシミュレーションが可能となる。本稿では、Ray-Launching法電波伝搬シミュレーションに関して、既存のスタンドアロンパソコンにおけるCPUを用いた計算に対し、C++言語を用いたMPI拡張を行うことにより、複数計算ノードを用いた並列計算に対応した。また、有限積分法電磁界シミュレーションでは、GPUと複数計算ノードを用いた並列計算を行うことにより、大規模な解析モデルのシミュレーションを実現した。なお、TSUBAMEを採用した理由としては、産業利用向けに開放されているスパコンのなかで、筆者らの利用目的である電波伝搬解析や電磁界解析に比較的合致しているためである。



第1図 SIMDによるスパコン活用時の計算処理
Fig. 1 SIMD computer architecture

(注1) IntelおよびXeonは、Intel Corp.の登録商標または商標
(注2) NVIDIAおよびTeslaは、米国および他国のNVIDIA Corp.の商標および登録商標
(注3) Linus Torvalds氏の日本およびその他の国における登録商標または商標

3. 住宅内における電波伝搬シミュレーション

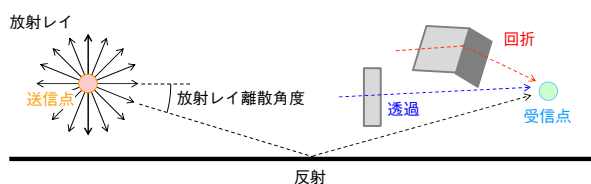
本章では、住宅内に配置されたWPTシステムから発生する漏えい電磁界の住宅内の電磁界分布の解析事例について述べる。

第1章でも述べたように、WPTシステムからは、広い周波数範囲にわたり漏えい電磁界が発生されるため、他の無線システムとの共存およびWPTシステムの品質向上の観点から、漏えい電磁界を解析する技術が重要となる。例えば、住宅への設置を考えると、住宅全体を含む大規模な空間を解析する必要があり、TSUBAMEを用いた解析が有用である。ここでは、WPTシステムの動作周波数の高次高調波が5 GHz帯無線システムへ影響を及ぼす可能性について調査することを目的として、住宅内における5 GHz帯漏えい電磁界分布を解析した結果を示す。

3.1 シミュレーション手法

シミュレーションには、幾何光学的解析手法に基づくRay-Launching法を用い、独自に開発した電波伝搬シミュレータ[5]をTSUBAMEに実装し、並列計算を行う。

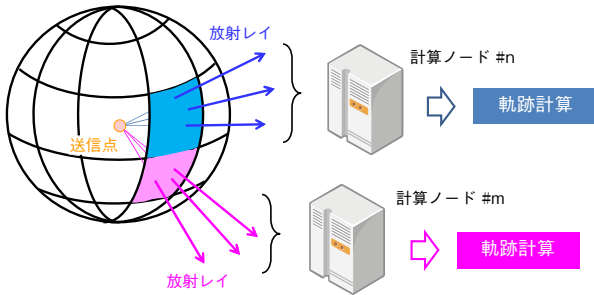
Ray-Launching法は、第2図に示すように、送信点から放射される電波をレイ (光線) とみなし、送信点から離散的に放射したレイが受信点に到達するまでの軌跡を求めることで、送受信間の電波伝搬特性を推定する解析手法である。この解析手法は、電磁界シミュレーションのような空間を複数のメッシュで分割して解析する手法と比較すると、大規模な空間における解析に適している。



第2図 Ray-Launching法の概要
Fig. 2 Ray-Launching method simulation

また、Ray-Launching法は、放射した各レイが受信点に到達するまでの軌跡を独立に計算できるため、各レイの軌跡を並列に計算することができる。第3図に示すように、送信点から放射されるレイを方向ごとに分割し、各計算ノードに配分して並列計算を行うことで、計算時間の短縮を図っている。さらに、並列計算において、第1表に示すような最大80 Gbit/sの高速ネットワークを有するTSUBAMEを用いることにより、各計算ノードの計算結果を高速に転送することが可能となり、大幅な計算時

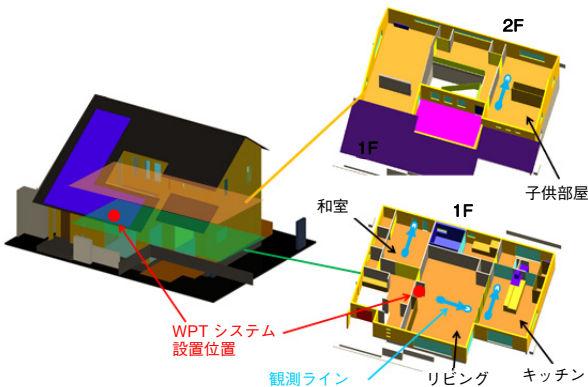
間短縮および大規模なモデルの解析を実現することができる。



第3図 Ray-Launching法の並列計算方法
Fig. 3 Parallel computing technique of Ray-Launching method

3.2 シミュレーションモデル

第4図に、木造2階建て実験住宅のシミュレーションモデルを示す。送信点となるWPTシステムを1階リビングに設置し、5 GHz帯無線機器を受信点として、住宅内の漏えい電磁界分布を評価する。WPTシステムおよび5 GHz帯無線機器の放射指向性については、電磁界シミュレーションを用いて解析し、Ray-Launching法に反映することで、より現実的な環境を再現して解析が可能となる。受信位置は、第4図に示す4箇所の観測ライン（見通し内地点：リビング、見通し外地点：キッチン、子供部屋、和室）とし、漏えい電磁界の受信電力の中央値を用いて評価する。なお、計算条件として、反射回数10、透過回数10、回折回数2、放射離散角度1度とする。このときの放射レイ数は、41332本である。

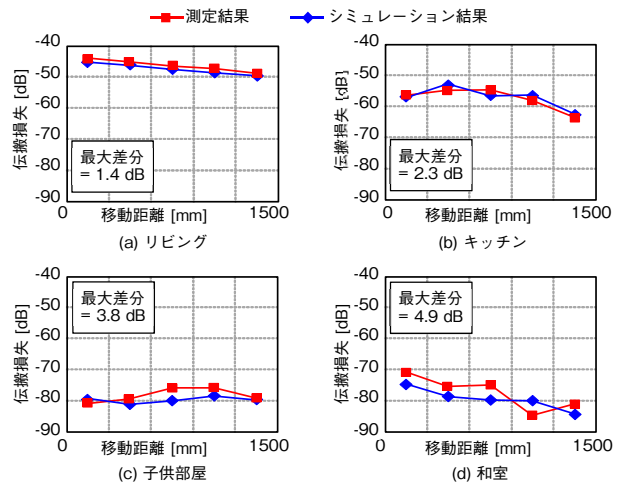


第4図 実験住宅のシミュレーションモデル
Fig. 4 Simulation model of case-study house

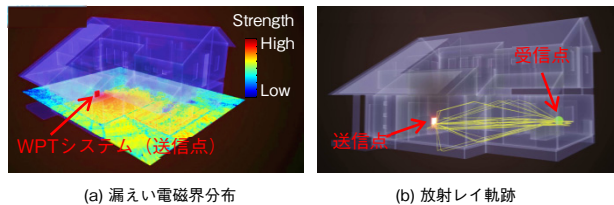
3.3 シミュレーション結果

第5図は、各観測ラインにおける測定結果とシミュレーション結果である。ここでは、各測定ラインの移動距

離は1200 mmとした。全ての観測ラインにおいて、測定結果とシミュレーション結果の差が±5 dB以内であり、シミュレーション結果が妥当であることが確認できる。また、第6図に、住宅1階の漏えい電磁界分布とキッチンに受信点がある場合の放射レイの軌跡を示す。このように、TSUBAMEで計算した膨大な解析データを視覚的に把握できるように、効率良く電波を可視化する技術の開発も行っている。



第5図 各観測ラインにおける測定結果とシミュレーション結果
Fig. 5 Measurement and simulation results of each receiving line

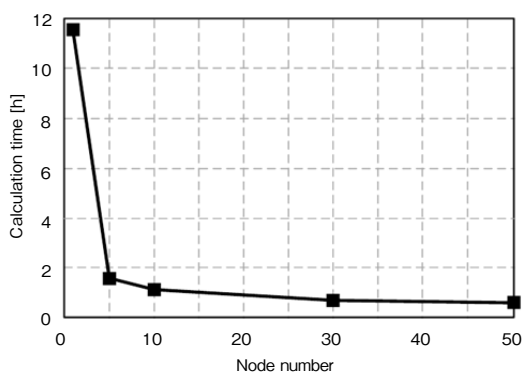


第6図 漏えい電磁界分布および放射レイ軌跡
Fig. 6 Leaked electromagnetic field and locus of radiating ray

本シミュレーションにおける計算ノード数に対する計算時間を第7図に示す。単一計算ノード（スタンドアロンパソコン）の計算時間が11.6時間であるのに対し、計算ノード数5では約1.6時間となり、5倍以上の高速化を実現できていることがわかる。これは、複数計算ノードに放射レイを分割したことにより、1計算ノードあたりの解析レイ数を大幅に削減できたためである。また、本シミュレーションでは、受信点に到達した放射レイにおいて、同一軌跡を伝搬する他の放射レイの存在有無を判定する処理を行っているが、この判定処理を各計算ノードで対応することによる計算量削減効果もあり、計算ノード数以上の改善が得られていると考えられる。

一方で、計算ノード数を30とした場合、計算時間が0.7時間に短縮され、約17倍の計算速度向上を実現できているが、計算ノード数が10以上において、並列化による計算効率の向上効果が低下していることがわかる。これは、レイの放射方向によって受信点までの反射回数や減衰量などが変化するため、各計算ノードにおける計算量に偏りが生じたことが要因の1つと考えられ、さらなる高速化に向けての検討課題である。

以上のように、計算ノード数を30以上とすることで、1時間以内で住宅規模のモデルを解析でき、TSUBAME活用による効果が得られている。今後は、商業施設や市街地など、さらなる大規模なモデルでの解析に向け、計算アルゴリズムの改良やGPGPU (General-Purpose computing on Graphics Processing Units) 対応などのさらなる計算速度向上を図っていく。



第7図 計算ノード数に対する計算時間

Fig. 7 Calculation time as function of node number

4. 大型車両に搭載したアンテナ電磁界シミュレーション

本章では、電磁界シミュレーションによる大型車両に搭載したアンテナの放射特性の解析事例について述べる。

近年、自動車から得られる多種多様な情報、例えば、車両の走行履歴などのプローブ情報を活用するサービスが注目されており、バスやトラックなどの業務用車両から順次普及していくと想定されている。このため、無線通信品質確保の観点から、大型車両に搭載した状態でのアンテナ性能評価が重要となるが、大型車両であるために、車両全体の影響を含む性能評価には大掛かりな設備と膨大な労力が必要となる。そのため、電磁界シミュレーションを用いてアンテナ解析することは、効率的な開発の観点から望ましい[6]。しかしながら、電磁界シミュレーションでは、解析空間を波長の数十分の一程度の大きさで分割する必要があることから、大型車両全体を含

む解析には、大規模な解析技術が必要となる。スタンドアロンパソコンを用いた電磁界シミュレーションでは、一般的に1億メッシュ程度のモデルの解析が限界であるが、TSUBAMEでは、GPUと複数計算ノードを用いてメッシュを分割して並列計算処理を行うことにより、大規模モデルの電磁界解析を実現している。解析では、隣接する空間のメッシュの分割方法を工夫することにより、メッシュ分割時における計算誤差の低減を図っている。ここでは、大型車両としてバスに搭載したアンテナを解析し、実用的な計算時間で大規模なモデルを解析できることを示す。

4.1 シミュレーションモデル

解析条件を第2表に示す。電磁界解析手法には、有限積分法を用い、解析周波数は、一例としてセルラー通信を想定した3.5 GHzに設定した。このときの解析メッシュ数は24.9億メッシュである。

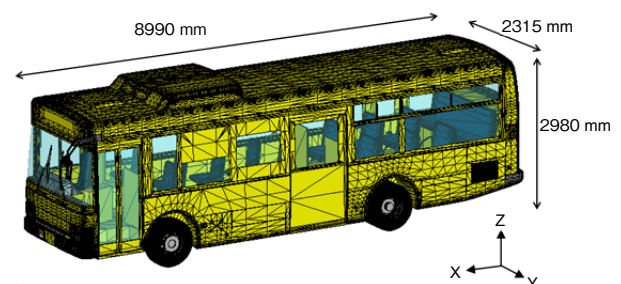
第8図に、大型車両のバスモデルを示す。大きさは全長8990 mm×全幅2315 mm×全高2980 mm、ボディおよびホイールは金属、座席シート、ダッシュボード、窓ガラス、バンパーは誘電体でモデリングしている。

第9図は、アンテナ配置位置である。ここでは、車両への設置容易性や外観上の問題から、バス車両内に設置することを想定し、前方ダッシュボード上およびルーフ中央裏のそれぞれの配置位置で解析を行う。なお、本解析では地面はモデリングしていない。

第2表 解析条件

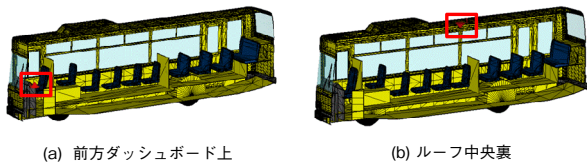
Table 2 Calculation conditions

電磁界解析手法	有限積分法
解析周波数	3.5 GHz
車両モデル	バス
アンテナ形状	1/4波長モノポールアンテナ (垂直配置)
アンテナ配置位置	(a) 前方ダッシュボード上 (b) ルーフ中央裏
解析メッシュ数	24.9 億メッシュ



第8図 バスの解析モデル

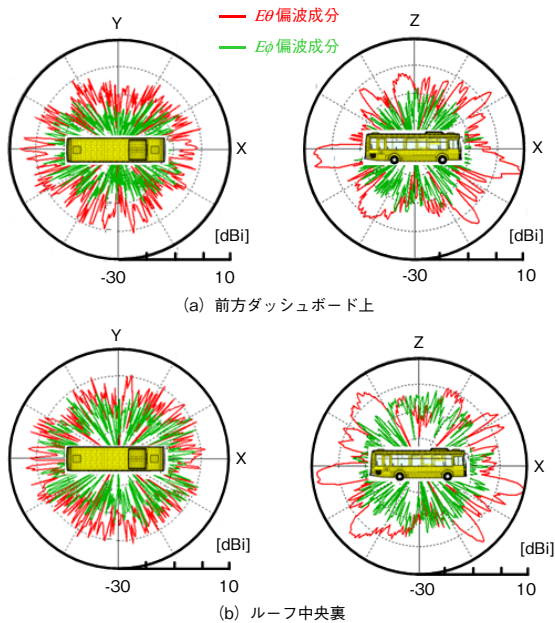
Fig. 8 Simulation model of bus



第9図 アンテナ配置位置
Fig. 9 Installation position of antenna

4.2 シミュレーション結果

各アンテナ配置位置におけるアンテナ放射指向性を第10図に示す。第10図において、XY面（水平面）とXZ面（垂直面）を示しており、アンテナ配置位置によって放射指向性が大きく変化することが確認できる。XZ面の放射指向性より、前方ダッシュボード上配置では前方上方、ルーフ中央裏配置では前後の斜め下方に最大放射方向が向くことがわかる。また、座席シートなどが存在する車室内においては、多くの反射や回折が生じるため、放射指向性に放射が落ち込む多数のスルが発生している。

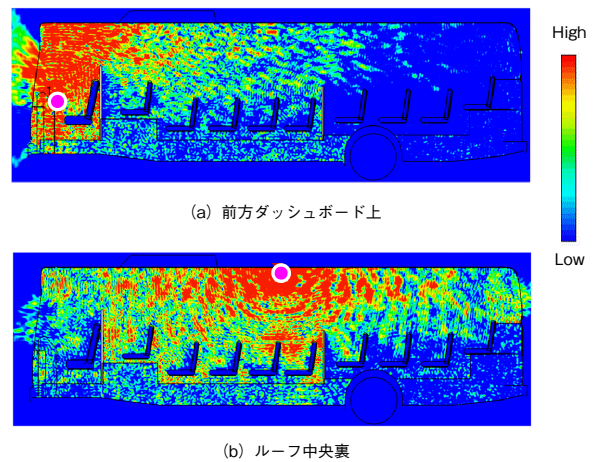


第10図 アンテナ放射指向性
Fig. 10 Radiation patterns

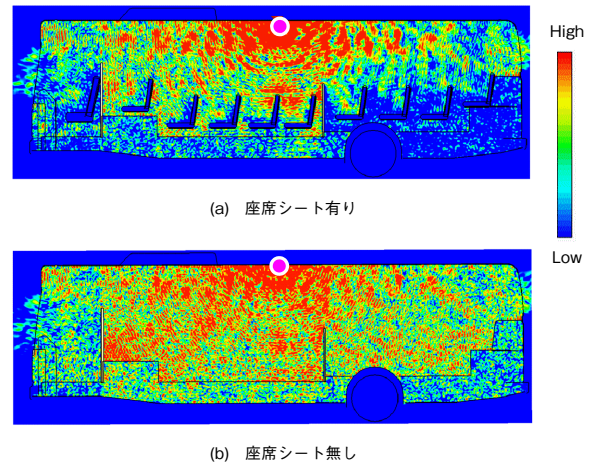
第11図は、各アンテナ配置位置における車両内の電界分布である。それぞれXZ面の電界分布であり、図中の丸印の位置にアンテナが配置されている。ルーフ中央裏配置では、比較的バス車両全体に電界が分布しやすい傾向があるのに対して、前方ダッシュボード上配置では、座席シートや運転席背面の仕切り板による遮蔽効果により、車両後方への電界強度が低くなっていることが確認でき

る。

第12図は、ルーフ中央裏配置における座席シート有無による電界分布を示している。第12図より、座席シートの遮蔽によって電界が減衰する傾向や、座席シートからの反射波に起因する定在波が生じていることが確認できる。今後は、乗客などの人体影響の把握やさまざまなアンテナ形式の違いによる特性把握を行うことにより、アンテナの最適な設置位置などを判断できると考えられる。

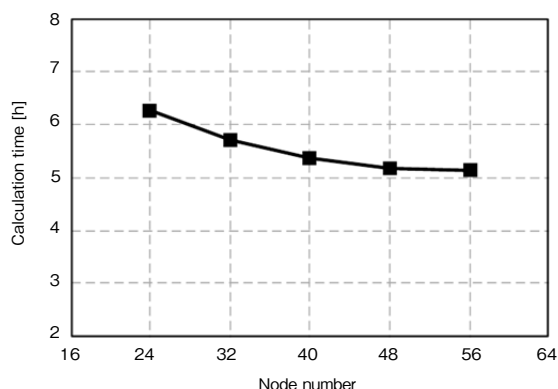


第11図 車両内の電界分布
Fig. 11 Electric field distributions in bus



第12図 座席シートの電界分布への影響
Fig. 12 Electric field distribution impact of seat

ルーフ中央裏配置におけるTSUBAMEの計算ノード数に対する計算時間を第13図に示す。計算ノード数を増やすことで計算時間を短縮でき、48ノード以上で解析時間が約5時間となる。このように、TSUBAMEを用いることにより、約25億メッシュの大規模モデルを約5時間という実用的な計算時間で解析することが可能となる。



第13図 計算ノード数に対する計算時間

Fig. 13 Calculation time as function of node number

5. まとめ

本稿では、Ray-Launching法電波伝搬シミュレーションや有限積分法電磁界シミュレーションをスパコンTSUBAMEに実装し、実験住宅内の電波伝搬特性や大型車両に搭載したアンテナ特性を解析することにより、大規模なモデルを実用的な計算時間で解析できることを示した。今後は、電波伝搬シミュレーションのさらなる計算速度向上に向けて、計算アルゴリズムの改良やGPGPU対応などに取り組んでいく予定である。また、さまざまな無線システム開発に対して本シミュレーション技術を適用し、課題の事前把握や定量的な評価などに活用することで、新規無線システムの早期導入に貢献していきたいと考えている。

全ての計算は、文部科学省の先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業の補助をいただき、東京工業大学のスパコンTSUBAME2.5を用いて行った。また、第3章で述べた内容は、総務省平成26年度電波資源拡大のための研究開発「ワイヤレス電力伝送による漏えい電波の環境解析技術の研究開発」の成果の一部である。

参考文献

- [1] Y. Okumura, "5G mobile radio access system using SHF/EHF Bands," 2014 Asia-Pacific Microwave Conference, FR1A-1, pp.908-910, Dec. 2014.
- [2] 篠原 真毅, "無線電力伝送の送電距離に対する理論と技術," 電気情報通信学会論文誌B, vol. J96-B, no.9, pp.881-893, 2013.
- [3] K. Takagi et al., "Analysis of electromagnetic field leaked from wireless power transfer system in case-study house," IEEE Wireless Power Transfer Conference 2015, P2.5, May 2015.
- [4] 東京工業大学, "TSUBAME2システム構成," TSUBAME計算

サービス, <http://tsubame.gsic.titech.ac.jp/tsubame2-system-architecture>, 参照 Oct. 23, 2015.

- [5] 高木健治 他, "FDTD法とRay-Launching法による携帯機アンテナの実効利得評価," 信学技報, AP2003-159, Nov. 2003.
- [6] S. Horiuchi et al., "Comparisons of simulated and measured electric field distributions in cabin of a simplified scale car model," IEICE Trans. Commun., vol. E90-B, no. 9, 2007.

執筆者紹介



宇野 博之 Hiroyuki Uno
(株) パナソニック システムネットワークス開発研究所
Panasonic System Networks R&D Lab. Co., Ltd.
工学博士



福田 博之 Hiroyuki Fukuda
(株) パナソニック システムネットワークス開発研究所
Panasonic System Networks R&D Lab. Co., Ltd.



穴田 雅之 Masayuki Anada
(株) パナソニック システムネットワークス開発研究所
Panasonic System Networks R&D Lab. Co., Ltd.



油井 辰憲 Tatsunori Yui
(株) パナソニック システムネットワークス開発研究所
Panasonic System Networks R&D Lab. Co., Ltd.



渡辺 浩巨 Hironobu Watanabe
(株) パナソニック システムネットワークス開発研究所
Panasonic System Networks R&D Lab. Co., Ltd.



斎藤 裕 Yutaka Saito
(株) パナソニック システムネットワークス開発研究所
Panasonic System Networks R&D Lab. Co., Ltd.
工学博士