

TSUBAME 共同利用 平成 26 年度 産業利用 成果報告書

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
Research and development of environment analysis technique of leaked electromagnetic field from
wireless power transfer

池田 和彦
Kazuhiko Ikeda

(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.
<http://panasonic.co.jp/avc/psnrd/>

家庭用電子機器などの給電に用いられるワイヤレス電力伝送(WPT)システムが近年検討されている。WPT システムから漏えいする電磁界は、他の電子機器の動作に影響を及ぼす可能性があるため、漏えい電磁界による干渉影響の把握が課題であり、様々な設置環境や周波数帯における定量的な評価が必要となる。WPT システムでは、数次高調波における漏えい電磁界も発生することから、GHz 帯を使用する無線機器への干渉も懸念されるため、GHz 帯の漏えい電磁界評価も必要である。そこで本研究開発では、これまでに筆者らが開発した Ray Launching 法による電波伝搬シミュレータを用いて、戸建て実験住宅内の WPT システムからの漏えい電磁界特性を解析し、測定結果との比較検証を行う。また、TSUBAME 2.5 を用いた並列計算により、実用的な時間内に大規模な空間における漏えい電磁界特性の解析が可能となることを示す。

The wireless power transfer (WPT) system has been actively developed in recent years. Since the electromagnetic field leaked from the WPT system may interfere with the other devices that use the GHz band, it is required to quantitatively evaluate the electromagnetic interferences over a wide range of frequencies in various installation conditions. In this paper, we propose an approach for analysis the electromagnetic field of the high-harmonic component or the microwave WPT system in the case-study house by simulation using the Ray Launching method. The validity of the proposed simulation method is confirmed by comparing the simulation and the measurement results. Moreover, we also show that the electromagnetic field properties in a huge space can be analyzed within a practical time using the supercomputer TSUBAME 2.5.

Keywords: 無線電力伝送, 漏えい電磁界, Ray Launching

背景と目的

近年、電波の利用方法としては、通信だけではなく、電力伝送技術が注目されている。2015 年以降の実用化が予定されているワイヤレス電力伝送(WPT)システムとして、電気自動車用の大電力(数 kW)を伝送するものや、家電機器用の中電力(数百 W)を伝送するものなど、多種多様な方式開発が進められている。

WPT システムは、一般家庭や集合住宅への普及が見込まれており、使用範囲として住宅内に限らず屋外の駐車場も含めた広い空間が想定されている。上記のような環境において、今後普及が進む WPT システムと他の機器との共存を図るためには、WPT システムから発生する数十 kHz~数 GHz の広い周波数範囲にわたる漏えい電波が近接する機器に与える影響を解析

することが必要となる。しかしながら、数十 kHz~数 GHz の周波数範囲において漏えい電波の様々な特性をシミュレーションにより評価する技術はこれまで確立されていない。漏えい電波の特性を FDTD(Finite-Difference Time-Domain)法などの電磁界シミュレーション技術により解析する場合は、計算規模は波長に依存する。例えば 3.5GHz 帯や 5.3GHz 帯などの周波数帯では、住宅内またはそれ以上の空間で計算規模が膨大となり、実用的な時間内に解析することが困難となる。

本研究開発では、WPT システムをはじめとする各種電子機器が密集して設置された環境における漏えい電波の特性を解析できるシミュレーション環境の構築を目的として、3.5GHz 帯と 5.3GHz 帯の漏えい電磁界を

対象に次に示す検証を行う。幾何光学的解析手法に基づく Ray Launching 法電波伝搬シミュレータを開発し、戸建て実験住宅内における WPT システム漏えい電磁界の測定結果とシミュレーション結果の差分 $\pm 5\text{dB}$ 以内を目標に比較検証を行うことで、本シミュレーションの妥当性を示す。また、本シミュレータに対し、スーパーコンピュータ TSUBAME 2.5 を用いた並列計算の適用により、戸建て実験住宅周辺の構造物を含む大規模な空間において、実用時間内に漏えい電磁界特性の解析が可能となることを示す。

Ray Launching 法の概要

Ray Launching 法を用いた幾何光学伝搬解析手法は、送信点から放射される電波を図 1 に示すように電波を光線(Ray)とみなし、送信点から離散的に放射した Ray 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、計算量が送信点から放射される Ray 間の離散角度に依存する。そのため、大規模な空間においても、他の解析手法(例えば FDTD 法)と比較して計算量を抑えられる利点がある。

Ray Launching 法の特徴として、放射した各 Ray が受信点に到達するまでの軌跡計算を独立に行えることが挙げられる。本特性を利用し、各 Ray について並列計算を行うことにより、計算時間を短縮することができる。図 2 に、本シミュレーションで採用した並列計算方法を示す。TSUBAME 2.5 は複数の計算ノードが高速通信で接続された構成であるため、送信点から放射される Ray を方向毎に分割し、各計算ノードに配分することで複数の計算ノードを用いた並列計算を行う。

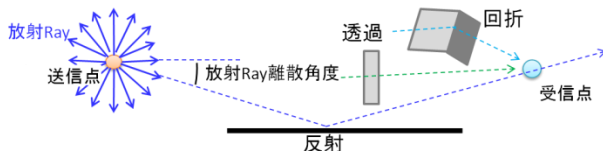


図 1 Ray Launching 法

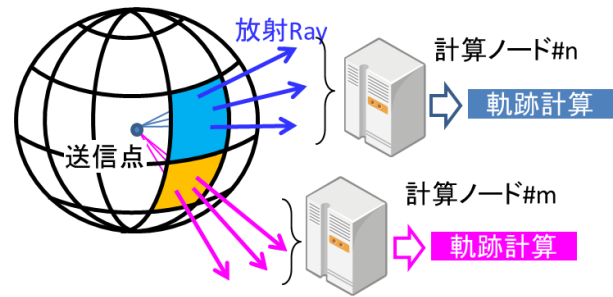


図 2 TSUBAME 2.5 を用いた並列計算方法

戸建て実験住宅におけるシミュレーション条件

図 3 及び図 4 に実験住宅モデルを示す。また、図 4 に示すように、住宅周辺の建物からの反射等により住宅内の漏えい電磁界電界特性が影響を受けるため、150m 四方の構造物もモデル化した。WPT システムの設置位置(送信位置)は実験住宅内の一階リビングとし、伝送距離が数 m 程度のマイクロ波帯を利用するシステムを想定して図 5 に示す放射パターンを有する指向性アンテナを用いる。受信機器には被干渉機器として 3.5GHz 帯は携帯電話端末、5.3GHz 帯は無線 LAN ルータを想定し、図 6 に示す放射パターンを有するアンテナを用いる。測定結果とシミュレーション結果の比較は、見通し内外を含む 4 箇所について、漏えい電磁界の受信電力の中央値を比較することで行う。また計算条件は反射回数 10、透過回数 10、回折回数 2、放射離散角度 1 度とする。

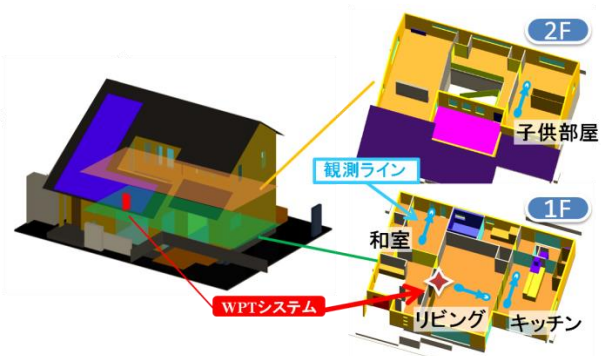


図 3 実験住宅モデル

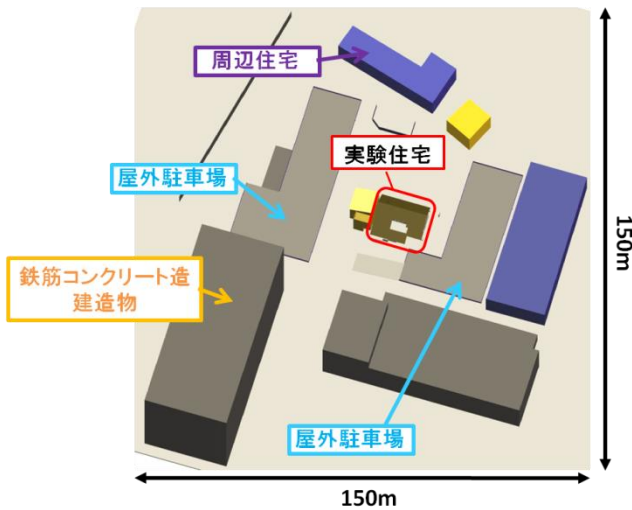
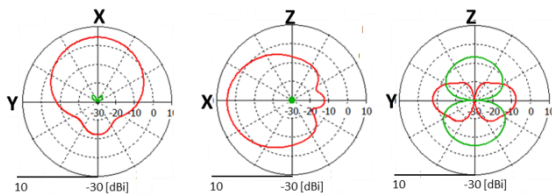


図 4 実験住宅周辺の構造物

(a) 3.5GHz帯



(b) 5.3GHz帯

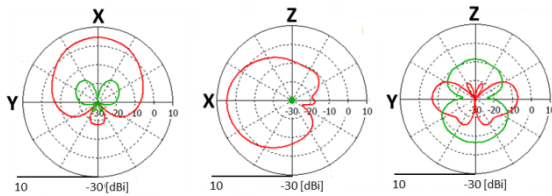
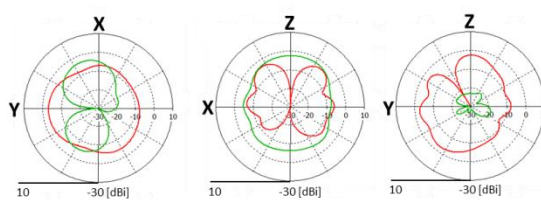


図 5 WPT システムの放射パターン

(c) 3.5GHz帯 (携帯電話端末)



(d) 5.3GHz帯 (無線LANルータ)

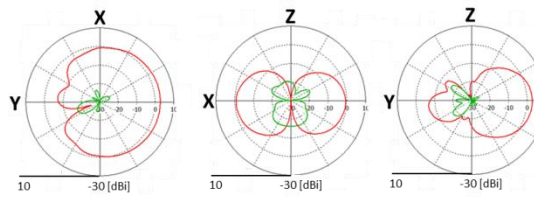


図 6 受信機器の放射パターン

シミュレーション結果と測定結果の比較検証

3.5GHz 帯及び 5.3GHz 帯について、二階子供部屋における測定結果とシミュレーション結果の 30cm 区間毎の中央値を比較した結果を図 7 に示す。図 7 中の Sim.model(a)は、参考文献[3]に基づいて電気定数を実験住宅内の各壁面に適用した結果であり、Sim.model(b)は外壁の電気定数を変更した結果である。Sim.model(a)は、一部区間で測定結果との差が大きく、測定結果と差異があることがわかる。

【考察】

Sim.model(a)における差分要因として、住宅内の部材のうち、外壁を経由して到来する伝搬路に着目する。外壁経由の伝搬路は図 8 に示すように屋内における外壁反射波と屋外からの外壁透過波が到来することをシミュレーション結果より解析した。外壁は内部に断熱材や内壁側の石膏ボード等の複数材質によって構成され、構造が複雑である。従って、外壁の電気定数が測定環境と異なり、透過時または反射時の減衰量の差異が差分要因と推測した。

そこで外壁の電気定数を測定環境と同等に調整するため、実験住宅の屋外において WPT システムからの漏えい電波を測定し、そのパスロスから外壁における透過波の減衰量を推定した。表 1 は外壁透過波の減衰量から推定した電気定数の変更前後を比較したものである。電気定数変更後の Sim.model(b)は透過時の減衰量が電気定数変更前に対し約 5dB 低下し、同様に反射時の減衰量は電気定数変更前に対し約 8dB 低下することがわかる。

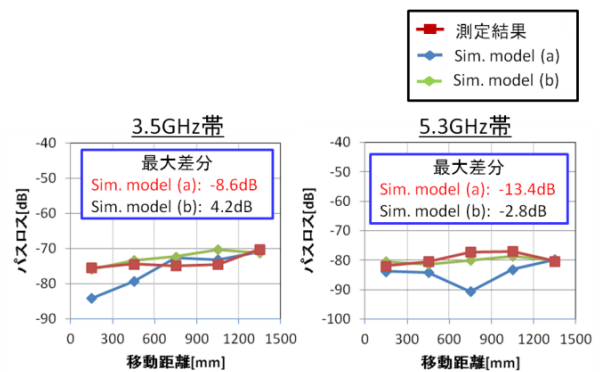


図 7 二階子供部屋における測定結果とシミュレーション結果の比較

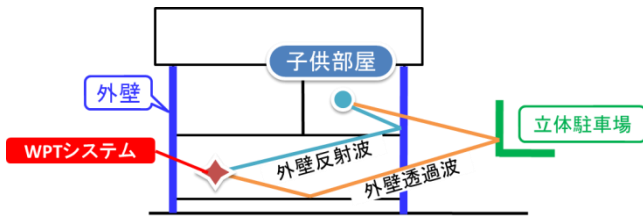


図 8 着目した二階子供部屋に到来する伝搬路

表 1 外壁の電気定数変更前後の比較

外壁の電気定数	比誘電率	導電率 [S/m]	反射時の減衰量	透過時の減衰量
Sim.model(a)	2.8	5×10^{-2}	9.4dB	12.2dB
Sim.model(b)	10.9	1×10^{-2}	1.5dB	7.5dB

【結果】

前記考察と同様に実験住宅内の各壁面(内壁, ドア, 窓等)について電気定数を変更した結果を図 9 及び図 10 に示す. 図 9 に示す 3.5GHz 帯及び図 10 に示す 5.3GHz 帯の共に測定結果とシミュレーション結果の差分が±5dB 以内となることを確認できる. 以上より, 壁面の電気定数を適切に設定することで測定結果とほぼ一致するシミュレーション環境を構築した.

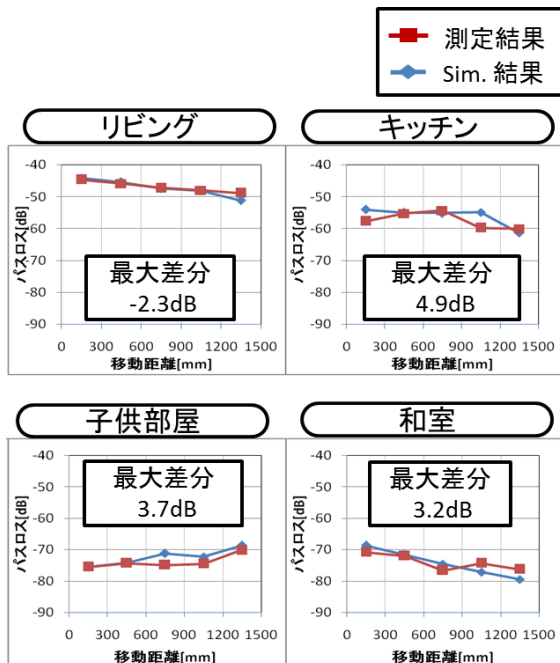


図 9 各測定箇所における測定結果とシミュレーション結果の比較 (3.5GHz 帯)

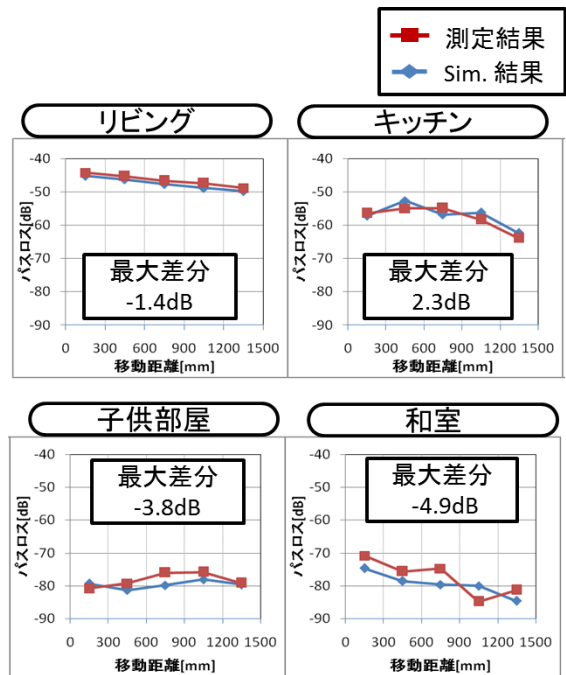


図 10 各測定箇所における測定結果とシミュレーション結果の比較 (5.3GHz 帯)

計算速度向上効果検証

前節で述べたように, 本シミュレーションではスーパーコンピュータ TSUBAME 2.5 について複数の計算ノードを用いた並列計算が可能である. 並列計算による計算速度の向上効果を検証するため, 表 2 に示す計測条件に従って計算時間を計測した. 表 3 は計算時間の計測結果であり, 図 11 は計算ノード数に対する計算速度向上度を示したものである. なお, 計算速度向上度は 1 計算ノード時の計算時間に対する計算時間の短縮割合を示し, 下記の式より計算する.

$$\text{計算速度向上度} = \frac{\text{計算ノード数 1 の計算時間}}{\text{計算ノード数 n の計算時間}} \quad (\text{式 1})$$

表 3 に示すように, 複数計算ノードを用いた並列計算により約 20 倍の計算速度向上効果が得られ, 1 時間以内に住宅モデルの漏えい電磁界解析が可能となった. 一方, 図 11 が示すように, 計算ノード数 30 以上において計算速度向上度が飽和することがわかった.

【考察】

所定以上の計算ノード数において計算速度向上度が飽和する要因として, 計算ノード毎の計算量に偏りがあることが考えられる. 前節で述べたように本シミュレーションの並列計算は方向毎に分割した放射 Ray を各

計算ノードに配分する方法を採用している。例えば、特定の方向に遮蔽物となる壁面が多い場合は、該当方向に配分された計算ノードの計算量が増加し、計算ノード間で計算量に偏りが生じることが考えられる。このような場合、特定の計算ノードの計算量がボトルネックとなり、計算ノード数を増加した場合においても所望の計算速度向上効果を得られない。

計算ノード間の計算量の偏りを改善する方法として、各計算ノードに配分した放射 Ray を定期的に再配分する方法が考えられる。改善案では、放射 Ray の再配分の際に、計算ノード間に放射 Ray に関する情報のデータ転送が発生するが、TSUBAME 2.5 の計算ノード間は表 2 中に示すように最大 80Gbps の高速通信が可能な Infiniband を用いて接続されているため、全体の計算時間に対するデータ転送時間の占める割合は少ないと考えられ、計算ノード間の計算量偏りの解消により計算速度の向上が期待できる。

表 2 計算時間の計測条件

項目	値
CPU	Intel Xeon X5670 2.93GHz, 6cores x 2slot, with Hyper Threading
搭載メモリ	54 GByte
計算ノード間接続	QDR Infiniband x2 (80Gbps)
計算ノードあたりの MPI プロセス数	1 プロセス
計算ノードあたりの マルチスレッド数	24 スレッド
最大使用メモリ	48 GByte
計算ノード数	1~100 ノード
周波数帯	1) 3.5GHz 帯, 2) 5.3GHz 帯
MPI バージョン	1.1

表 3 計算時間の計測結果

周波数帯	計算時間	
	ノード数 1	ノード数 30
3.5GHz 帯	21.36 hour	0.97 hour
5.3GHz 帯	11.54 hour	0.68 hour

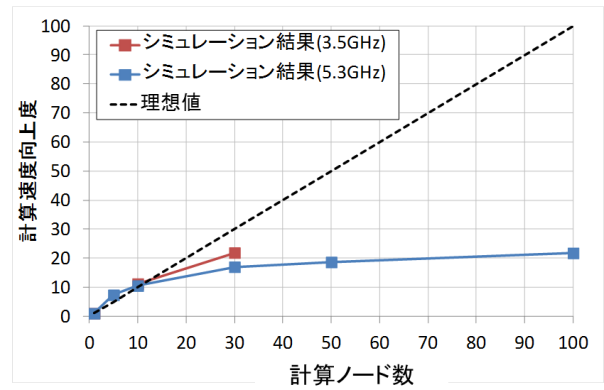


図 11 計算ノードに対する計算速度向上度

まとめ

Ray Launching 法シミュレーションにより戸建て実験住宅内の WPT 漏えい電磁界特性を解析し、住宅内部材のうち壁面の電気定数を適切に設定することで測定結果とシミュレーション結果の差分が $\pm 5\text{dB}$ 以内となり、シミュレーションの妥当性を示した。

また、TSUBAME 2.5を用い、Ray Launching 法における放射 Ray 毎の軌跡計算を複数の計算ノード間で並列計算を行うことにより、実験住宅内の WPT システム漏えい電磁界特性解析を 1 時間以内で計算が可能なシミュレーションシステムを構築した。

今後は、戸建て実験住宅以外の住宅モデルにおける検証を通してのシミュレーション精度の向上と、大型店舗等の大規模モデル解析に向けて計算ノード間の計算量の偏り解消による計算速度改善に取り組む。

なお、本研究は総務省平成 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」の一部である。

参考文献

- [1] 篠原 真毅, 電気学会論文誌B, Vol.J96-B, No.9, pp.881-893, “無線電力伝送の送電距離に対する理論と技術”
- [2] 高木 他, 信学技報, AP2003-159, RCS2003-165, “FDTD 法と Ray-Launching 法による携帯機アンテナの実効利得評価”
- [3] 近藤孝亮 他, 信学技報, EMCJ2005-109 (2005-11), “室内における建築材料電気特性モデルベース測定法の測定条件についての実験的検討”