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 Technology for Analysis on Various Environments that Interfered by Electromagnetic Field Leaked from Wireless Power Transmission Systems.

研究代表者

斎藤裕　株式会社パナソニック　システムネットワークス開発研究所

Yutaka Saito　Panasonic System Networks R&D Lab. Co., Ltd.

研究分担者

渡辺浩亘 †　宇野博之 †　油井辰憲 †　金崎善宏 †　立野吉英 †

高木健治 †　長山利裕 †　金子哲也 †　池田和彦 †

Hironobu Watanabe†　Hiroyuki Uno†　Tatsunori Yui†　Yoshihiro Kanasaki†　Yoshihide Tateno†

Kenji Takagi†　Toshihiro Nagayama†　Tetsuya Kaneko†　Kazuhiko Ikeda†

†株式会社パナソニック　システムネットワークス開発研究所

†Panasonic System Networks R&D Lab. Co., Ltd.

研究期間　平成 25 年度～平成 27 年度

概要

ワイヤレス電力伝送(WPT)システムから漏えいする電磁界の定量的な評価を実現するため、WPT システムから漏えいする電波を模擬する環境構築技術、漏えい電波を測定し、結果を分析する環境評価技術及び大規模シミュレーションを活用した漏えい電波の可視化技術の研究開発に取り組み、WPT システムをはじめとする各種電子機器等が密集して設置された環境において、漏えい電波の影響を解析する技術を確立した。

Abstract

To evaluate the electromagnetic field leaked from the WPT systems, we have developed technologies such as environment construction method for evaluating by using WPT leakage emulator, measurement method of the electromagnetic field leaked from WPT systems around residential buildings, and visualization techniques for analyzing the electromagnetic field distribution in large-scale model. In this paper, the leaked electromagnetic field of WPT systems are located in the residential house is investigated in both the measurement and simulation. The result shows that the simulated and measured characteristics are almost in agreement with each other.

１．まえがき

近年、新たな電波の利用方法として、ワイヤレス電力伝送（WPT: Wireless Power Transmission）技術が注目されており、100 W 程度の家電機器用から数 kW の電気自動車（EV）用まで、多種多様な方式の WPT システムに関する研究開発が進められている。

その一方で、WPT システムから漏えいする電波（電磁界）は、近接する電子機器の誤動作を引き起こすなど干渉及ぼす要因となることが懸念されている。

WPT システムが設置される環境は、住宅内に限らず屋外の駐車場を含む広い空間が想定されており、複数の WPT システムが同時に動作する場合や、異なる動作周波数の WPT システムが共存する場合のように、使用される条件は多種多様である。これらの WPT システムの利用環境と使用条件を考慮した上で、漏えい電磁界の基本波成分から高調波成分に及ぶ十 kHz～数 GHz の広い周波数帯において、電磁界強度の分布を評価・分析する技術はこれまで確立されていない。

そのため、本研究開発の前段となる研究開発（ワイヤレス電力伝送システム等における漏えい電波の影響評価技術に関する研究開発）では、標準的な住宅環境における WPT システムの漏えい電磁界を定量的に把握することを目標として、図 1 に示すとおり、戸建住宅に WPT システム等の漏えい電磁界を測定するための環境や EV 用 WPT システムの実験装置（図 1 (b)）を構築するとともに、3 次元空間における電磁界強度の分布の正確な測定を実現する空間放射統計システム（図 1 (c)）を開発し、WPT システムから漏えいする電磁界強度の分布を可視化（図 1 (d)）して、定量的に評価する技術を確立した。

これらの研究開発成果から、住宅構造、WPT システムの配置等の設置環境を想定した評価解析手法を実現する

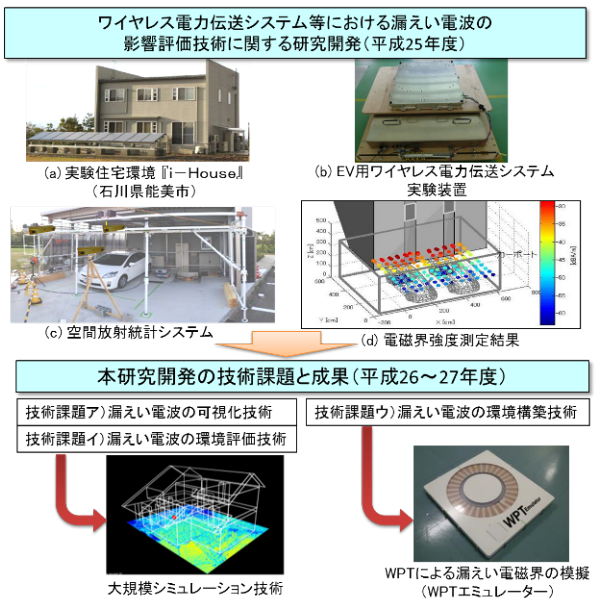
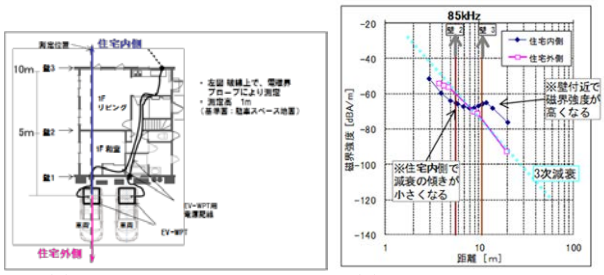


図１　研究開発概要



(a)磁界強度測定位置　　(b)磁界強度測定結果

図２　実験用戸建住宅に設置された
WPT システムの漏えい磁界の測定結果

ための新たなアプローチが必要となることが明らかとなった。具体的には、実験装置の設置コストが大きく、設置環境によって住宅構造の制約を伴うため、評価対象とするWPT システムの設置環境と使用条件が限定されるという課題があった。

そこで、本研究開発では、WPT システムから発生する漏えい電磁界を模擬する技術、漏えい電磁界を測定し、結果を分析する環境評価技術及び漏えい電磁界の発生源及び設置環境をモデル化して漏えい電磁界の状況を分析するシミュレーション技術を確立し、WPT 方式や設置条件に制約を受けない漏えい電磁界の評価を実現した。

以下の第２章以降では、これら３つの技術課題の概要及び成果について述べる。

２．研究内容及び成果

２．１．漏えい電波の環境構築技術

平成 25 年度に実施した研究開発において、WPT システムが設置された実験用戸建住宅の磁界強度を測定した結果の一例を図２に示す。図２に示すとおり、WPT システムの近傍の磁界強度が最も高く、住宅内側の壁付近で距離減衰の傾きが小さくなる特徴が観測された。この要因として、家庭内の電源配線に重畳する伝導性ノイズが考えられる。

そこで、本研究開発では、WPT エミュレーターと電源線エミュレーターを開発し、漏えい電磁界の特性をそれぞれ把握する。

２．１．１．WPT エミュレーター

様々なWPTシステムの漏えい電磁界を１次側コイルのみで簡易的に模擬する装置として、WPT エミュレーターを新たに開発した。WPT エミュレーターを漏えい電磁界の発生源として用いることにより、様々な設置環境における漏えい電磁界及び他の電子機器への与干渉について評価が可能となる。

なお、WPT エミュレーターを用いた漏えい電磁界の模擬方法の妥当性については、測定実験及び電磁界シミュレーションの両面で検証した。

WPT システムにおける漏えい電磁界の発生原理

１次側と２次側コイルの間で電力伝送を行う WPT システムの回路構成を図３に示す。この WPT システムから漏えいする電磁界が、図４に示す１次側コイルのみで構成したWPTエミュレーターによる電磁界と同等となる概念を説明する。

コイルに電流を流すことでその周囲に磁界が生じるが、図４のとおり、整合回路の調整によりインピーダンス整合されていると、１次側コイルの電流と電圧の位相差が 90° に近い状態、すなわち無効電力として電力損失はほぼ 0 となる。一方、図３に示す WPT システムの場合、２次側コイルと負荷からなる受電回路が１次側コイルに近接すると、電磁誘導の作用によって２次側コイルに誘導電流が流れる。このとき、２次側コイルでは、図５の電磁界シミュレーション結果で示すとおり、１次側コイルで生じる磁界を打ち消す磁界が生じる。また、１次側コイルの電流と電圧の位相差が変化するため、１次側－２次側コイル間で、有効電力としての電力伝送が行われる。

図３と図４の受電回路の有無で、磁界強度の分布を比較した結果、磁界強度の絶対値を正規化することで、同様の分布が得られることを、電磁界シミュレーションと測定実験にて確認した。図６は入力電力 1W の WPT エミュレーターと伝送電力３kW の WPT システムの磁界強度の測定値を比較した結果であるが、同図に示すとおり、WPT エミュレーター、3 kW WPT システムともに、距離の３乗に反比例して磁界強度が小さくなる。

なお、２次側コイルによって打ち消す磁界が生じない WPT エミュレーターでは、WPT システムと比較して少ない入力電力で同様の磁界強度を発生することが可能となる。

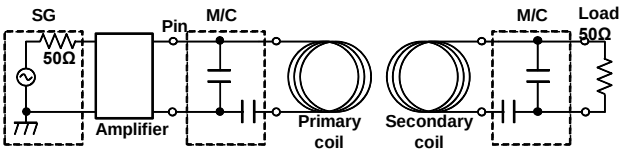


図３　１次側と２次側コイルで構成される WPT システム

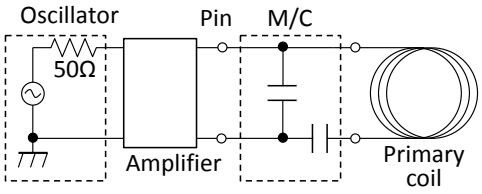


図４　WPT エミュレーターの回路

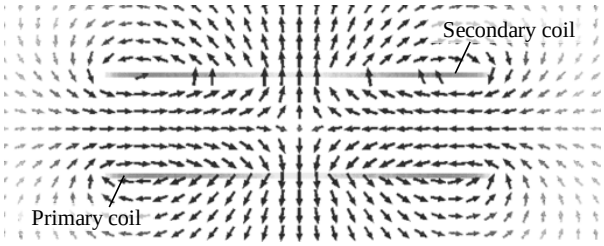


図５　WPT システムの漏えい磁界強度の分布の
シミュレーション結果

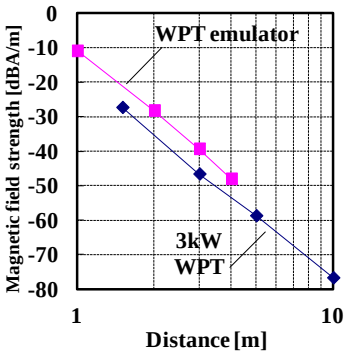


図６　磁界強度の測定結果

装置の構成及び特徴

図４に示すとおり、WPT エミュレーターは、発振器、アンプ、整合回路（M/C）、１次側コイルもしくは平面パッチアンテナによる放射素子、電源から構成され、幅 460 mm×奥行 365 mm×高さ 45 mm の可搬性を考慮した寸法となっている。整合回路定数は、コイルの入力インピーダンスが 50 Ω になるように設定する。出力する電磁界強度は、電波法施行規則第 46 条の２で定める許容値を上限として４段階で変更可能である。また、WPT エミュレーターの動作周波数は 40 kHz～5.3 GHz の範囲で設定が可能であり、動作周波数の設定変更の際は、発振器、アンプ、整合回路からなる回路ユニットと放射素子を交換する。

図７に WPT エミュレーターの外観と内部構成を示す。図７では、動作周波数 85 kHz と 87 MHz のときにスパイラルコイル、動作周波数 3.5 GHz のときに平面パッチアンテナをそれぞれ放射素子として用いている。

導体板が近接するときの漏えい電磁界

家電機器、EV 等に搭載される WPT システムの漏えい電磁界を正確に模擬するためには、コイル単体だけではなく、車体、筐体等の近接する導体の影響についても定量的に把握する必要がある。そこで、動作周波数 85 kHz の磁界結合型 WPT システムのコイルの近傍に導体板が配置される条件での磁界強度の分布を調査する。

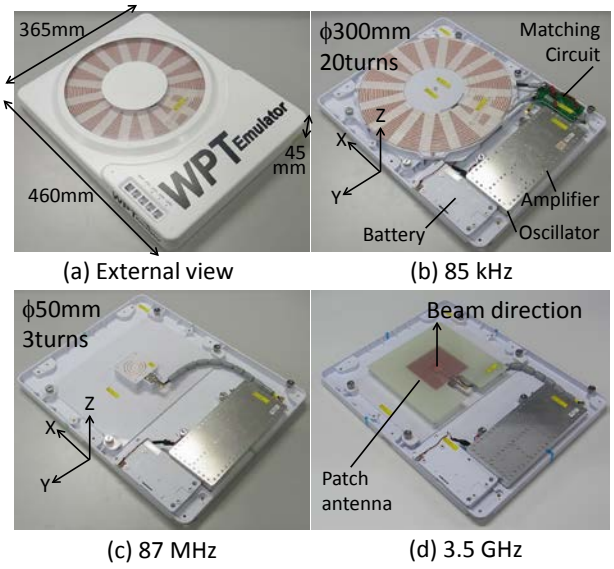
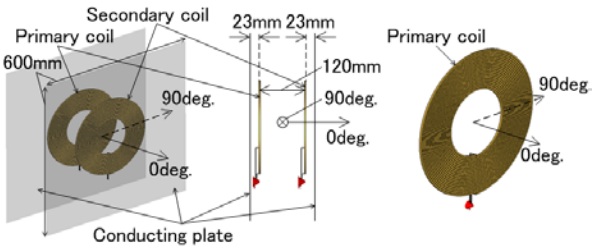
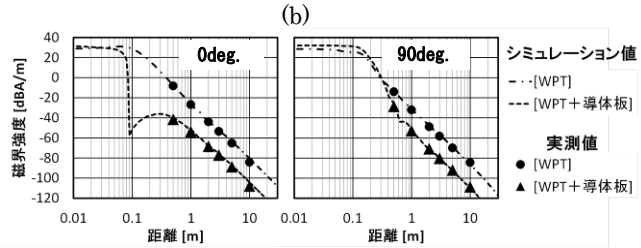


図７　家電機器用 WPT エミュレーターの装置構成



(a)　導体板とコイルの配置方法

(b)



(b)　磁界強度の分布の比較

図８　導体板近接時の影響

図８(a)のとおり、壁掛けテレビへの送電を想定し、600 mm 角の導体板をコイルから 23 mm の位置に設置した場合と導体板がない場合について、距離対磁界強度の特性を測定及びシミュレーションにより解析する。図８(b)のとおり、0 度方向と 90 度方向の距離対磁界強度の解析結果のシミュレーションによる値と実測による値を比較したところ、いずれも一致した特性が表れている。導体板の有無の条件で 2 m 以遠の磁界強度を比較すると、導体板有りの条件では導体板が無い条件に対して 0 度方向、90 度方向共に 24 dB の低下がみられる。すなわち導体板の遮蔽方向には依存せず一様に磁界強度が低下していることが確認された。

よって、磁界強度が低下している主な原因は、導体板の渦電流損による影響と考えられる。

EV 用 WPT システムの漏えい磁界模擬

EV 用 WPT エミュレーターは、家電用と比較して漏えい磁界が大きいため、1 次側コイル直径をφ600 mm へ拡大し、外形寸法を幅 807 mm×奥行 712 mm×高さ 50 mm とした。

EV 用 WPT エミュレーターの測定を 30 m オープンサイトで実施したときの実験風景を図９に示す。図９の測定実験では、車体の有無ではなく、オープンサイトの金属大地面が、漏えい電磁界に大きな影響を与えることが判明した。そこで、車体の影響を評価する方法として、図 10 に示す車体影響解析用シミュレーションモデルを用いることとした。図 10 の車体影響解析用シミュレーションモデルでは、測定実験と同様に基準面から 200 mm と 100 mm の高さにそれぞれ車体と WPT エミュレーターを配置する。解析条件は次の３通りとする。

① WPT エミュレーター単体でインピーダンス整合となる回路モデル
② WPT エミュレーター単体でインピーダンス整合となる回路と車体ありのモデル（不整合）
③ 車体ありでインピーダンス整合した回路モデル

図 11 に磁界強度の分布の解析結果を示す。車体端から 2 m 以上離れた距離の磁界強度は、車体前後方向（0 度方向）、車体左右方向（90 度）ともに、60 dB/decade の傾きで低下する。また、条件①と②間の 62.7 dB の差分のうち、条件②と③の差分に相当する 38.9 dB は不整合損失が要因と確認できる。残りの 23.8 dB は、近接する車体による渦電流損による影響と考えられる。

以上のことから、コイルに近接して車体や筐体が配置する場合の磁界強度は、絶対値は低下するものの一定距離離れた場所での減衰の傾きには影響を及ぼさないことが明らかとなった。

図９　30m オープンサイトにおける測定実験風景

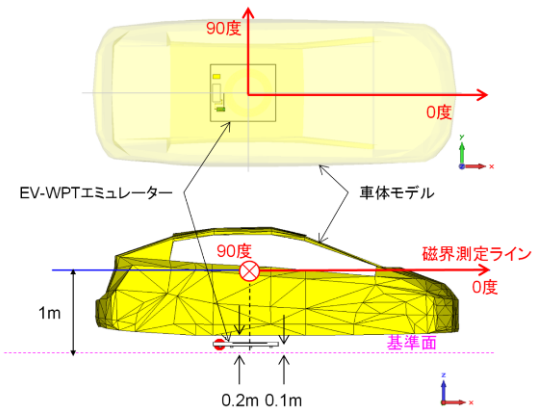


図 10　車体影響解析用シミュレーションモデル

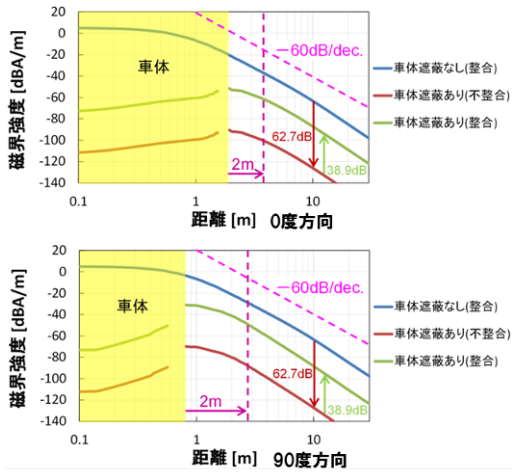


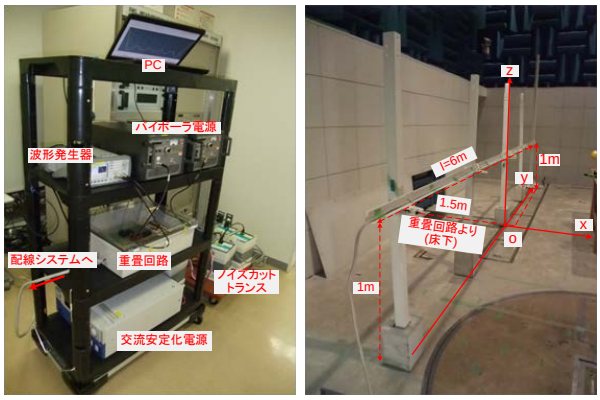
図 11　車体の有無による磁界強度の分布比較

2．1．2．電力線エミュレーター

WPT システムの電力線から放射される漏えい電磁界を模擬するための装置として、図 12 のとおり、電源回路、重畳回路、配線システムから構成される電力線エミュレーターを開発した。

電力線エミュレーターでは、重畳する雑音電流の周波数及び振幅値を設定することで、50 kHz～10 MHz までの漏えい磁界を模擬することが可能となる。電力線エミュレーターを電波暗室に設置し、85kHz の伝導性ノイズを重畳したときの電力線エミュレーターの配線周囲における磁界強度の測定値と理論値の比較結果を図 13 に示す。図 13 のグラフ横軸 x は、平行 2 線式電源配線の直交方向の距離を表す。理論値の距離減衰は、距離の 2 乗に反比例する特性（-40dB/decade）に対し、測定値の距離減衰は-20 dB/ decade と小さい。この測定値の傾向は、負荷電流を 89.7～11.3 dBμA の範囲で変更しても同様である。この要因を調査した結果、平行 2 線式電源配線の各線路に流れる高周波電流の大きさに差が生じると、理論値の減衰傾きよりも小さくなり、測定値とほぼ同様の特性となることを特定した。

また、本研究開発では、電源線エミュレーターを用いて 85 kHz～10 MHz の伝導性ノイズに起因する磁界強度の測定及び分析を完了した。



(a)重畳回路　　(b)配線システム

図 12　電力線エミュレーター

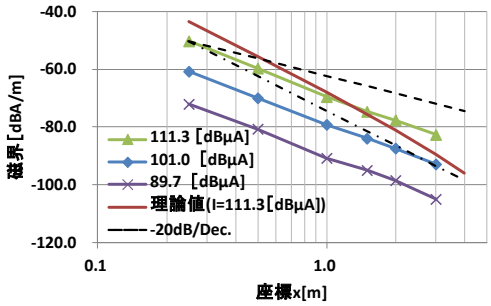


図 13　電力線エミュレーターの配線周囲の磁界強度
（伝導性ノイズ 85kHz 成分）

2．2．漏えい電波の環境評価技術

戸建住宅において、様々な WPT システムが発生する漏えい電磁界強度の分布を測定し、結果を分析する。

なお、測定に用いる漏えい電磁界の発生源として、WPT エミュレーターを用いる。

2．2．1．実験環境及び測定方法

漏えい電磁界の測定実験を行う環境として、図 14 に示す隣接した 2 棟の実験用戸建住宅を使用した。2 棟の実験用戸建住宅は、いずれも木造（一部鉄骨）2 階建て構造であり、各棟の延べ床面積は 176 ㎡、102 ㎡である。

実験用戸建住宅における測定実験の様子を図 15 に示す。漏えい電磁界の発生源となる WPT エミュレーターは、家電機器、EV 等の WPT システムの使用場所を想定し、屋外駐車スペースや住宅の内部に配置する。また、最大 3 台の WPT システムが同時動作する場合も考慮して配置条件を設定する。

電磁界強度の測定は、9 kHz～100 MHz の周波数帯において電磁界プローブ（Narda S.T.S 社製 SRM-3006）を使用して行い、実験用戸建住宅内と隣家の内部で電界強度と磁界強度をそれぞれ測定する（30MHz 未満では磁界強度、30MHz 以上は電界強度を測定する）。

図 14　実験用戸建住宅と隣接住宅（大阪府守口市）

（a）波源設置例　　（b）電界強度測定システム

図 15　実験用戸建住宅の測定実験風景

表 1　測定周波数一覧

周波数	対象 WPT システム		既存の無線システム
40kHz	家電機器(家庭・ｵﾌｨｽ機器)用	高調波	電波時計
85kHz	家電機器(家庭・ｵﾌｨｽ機器)用 EV 用	基本波	―
595kHz	―	高調波	中波ラジオ
6.78MHz	家電機器(ﾓﾊﾞｲﾙ機器)用	基本波	―
87MHz	―	高調波	FM ラジオ
815MHz			携帯電話
2.497GHz	マイクロ波帯電波方式	基本波	無線 LAN
3.5GHz	―	高調波	携帯電話
5.3GHz			無線 LAN

また、100 MHz～6 GHz の周波数帯においては、新たに開発したランダムフィールド法による電界強度測定システムを使用して電界強度を測定する。このランダムフィールド法とは、フェージングが発生する環境において、測定区間における累積確率分布に基づいて、電界強度の測定値を観測する方法である。

実験用戸建住宅環内の電磁界強度の測定結果は、2．3 節で述べる大規模シミュレーションの結果の妥当性を比較するために用いる。

2．2．2．無線機器への干渉影響評価

与干渉となる WPT システムの漏えい電磁界は、WPT エミュレーターが出力する電磁界強度を電波法で定める許容値に設定する。

また、評価対象とする被干渉機器は、表 1 に示す周波数帯が競合する既存の無線システムとする。

評価は、各機器のアンテナ端子の受信電力、スループット特性及び放送受信音について測定し、与干渉に伴う品質の劣化の有無及び干渉影響範囲を調べることで行う。

測定例として、図 16 に中波ラジオ受信機のアンテナ端子受信電力の測定結果を示す（本評価結果は、実験環境の所在地、機器及びアンテナの配置などの測定条件や対象機器固有の性能に依存する結果となることから一例として示す。）。図 16 の WPT エミュレーターの動作 周波数は、干渉波のみの特性を把握するため、放送波の周波数 666 kHz とは異なる 595 kHz に設定する。本実験に用いた中波ラジオ受信機では、受信電力が-108 dBm を超えるとノイズ音が観測されるため、アンテナ端子の受信電力の測定結果から、WPT システムとの離隔距離が 7m 以内の範囲でノイズ音が観測されると推測される。

このとき、WPT エミュレーターの動作周波数を 666kHz に設定し、離隔距離 7m 以内に中波ラジオのアンテナを設置した場合に、ノイズ音が観測され、アンテナ端子の受信電力の測定結果と一致する結果が得られた。

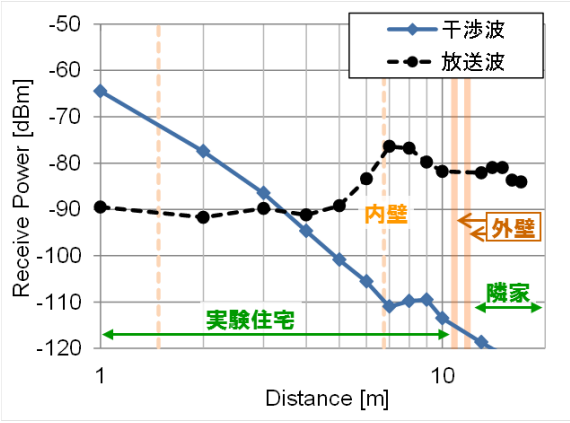


図 16 中波ラジオのアンテナ端子の受信電力（例）

したがって、WPT システムの干渉影響の定量的評価手法として有効であることが確認された。

2．3．漏えい電波の可視化技術

WPT システムの設置環境をモデル化し、WPT エミュレーターから発生する電磁界強度の分布をシミュレーションによって可視化する技術を開発する。

また、実際の設置環境における漏えい電磁界の測定結果とシミュレーションによる解析結果を比較することで、本技術の正確性について検証を行う。

加えて、WPT システムが隣接住宅や商業施設に設置される場合や、複数台が同時動作する場合等、様々な設置環境及び動作条件における解析を可能とするため、シミュレーションの計算精度向上と、並列計算機を活用した大規模化に関する技術を開発する。

2．3．1．解析手法

本研究開発では、WPT システムから漏えいする電磁界について、9 kHz～6 GHz の広い周波数範囲を対象とする。

なお、評価対象とする戸建住宅や商業施設は、解析サイズが各辺数 10m を超える大きさであり、シミュレーションの解析空間が大規模となることから、従来のスタンドアロン型計算機によるシミュレーションでは、膨大な解析時間を要する、収束解が得られない等の課題がある。そのため、本研究開発では、スーパーコンピュータ等の並列計算機環境で動作する大規模シミュレーションシステムを構築する。

シミュレーションによる解析手法を図 17 に示すとおり、周波数範囲に応じて 3 種類の解析手法を採用することにする。

- 周波数範囲 9 kHz～30 MHz においては、周波数ドメイン電磁界解析手法（有限要素法）を用いる。使用する計算機仕様は 6 台で構成する並列計算機システム（CPU: Xeon E5-2687Wv2 3.4GHz 2 コア、RAM: 128GB）とする。周波数ドメイン解析手法は、解析対象とする構造物の大きさが波長に比べて小さいモデルを解析する際に適している。
- 周波数範囲 30 MHz～1 GHz においては、トランジェント電磁界解析手法（FDTD 法：Finite Difference

図 17　周波数範囲と解析手法

Time Domain method）を用いる。使用する計算機仕様は、スーパーコンピュータ TSUBAME2.5 とする。トランジェント電磁界解析手法の計算規模は、波長に大きく依存する。特に数 100MHz 以上の高周波帯域において、10m を超える解析空間では、計算規模を表すメッシュ数が数 10 億を超えることから並列処理による演算の高速化が必要不可欠である。

- 周波数範囲 1GHz～6GHz においては、幾何光学的伝搬解析手法（Ray-Launching 法）を用いる。使用する計算機仕様は、スーパーコンピュータ TSUBAME2.5 とする。幾何光学的伝搬解析手法とは、電波を光線（Ray）とみなし、送受信点間の Ray の幾何光学的な軌跡を求めることにより送受信点間の伝搬特性を推定する手法である。この解析手法の計算規模は、放射する Ray の本数に依存する。また複数の Ray の軌跡計算において、TSUBAME2.5 のノード間並列化や GPGPU による並列化が高速化手段として有効である。

これらの解析手法及び計算機システムを使用し、WPT システムが設置されている戸建住宅の漏えい電磁界の計算を 12 時間以内に完了させることを目的とする。

２．３．２．実験用戸建住宅及び波源のモデル化

２．１．１で示した実験用戸建住宅のシミュレーションモデルを図 18 に示す。図 19 に示すような基礎内部の鉄筋や階層間の金属梁などの金属構造は、漏えい電磁界特性の解析結果に大きな影響を与えることが確認されているため、実物と同様にモデル化している。また、実験用戸建住宅モデルの壁面の位置や寸法、材質も実物と同等に設定する。実験用戸建住宅全体を含む解析空間のサイズは 32×21×8 m である。

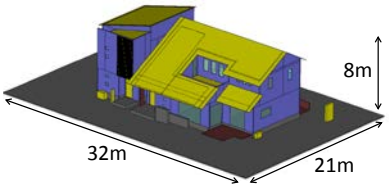
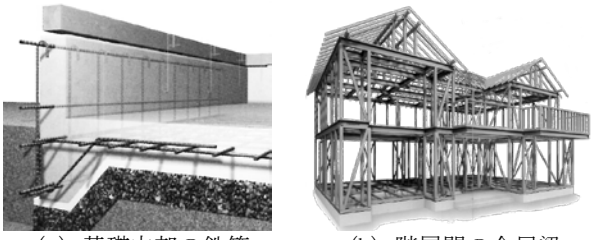


図 18　実験用戸建住宅のシミュレーションモデル



（a）基礎内部の鉄筋　　（b）階層間の金属梁

図 19　実験用戸建住宅の金属構造

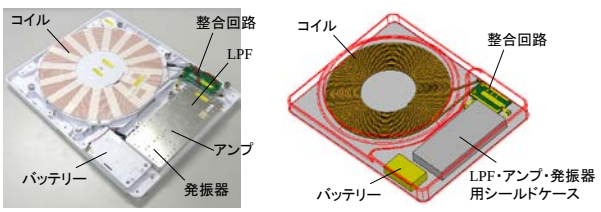


図 20　波源(85 kHz)のシミュレーションモデル

今回の実験用戸建住宅の測定では、WPT システムによる漏えい電磁界の発生源として WPT エミュレーターを使用していることから、図 20 に示すとおり、WPT エミュレーターの放射素子だけでなく、内部構造、外部筐体を波源としてモデル化している。この波源モデルを、図 18 の実験用戸建住宅モデル内に配置することにより、様々な設置環境及び動作条件において分析を可能とする。

２．３．３．実験用戸建住宅の漏えい電磁界特性

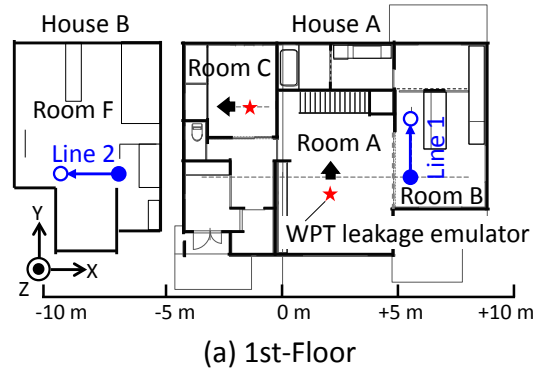
表 1 に示した周波数の中から各解析手法を代表する 85kHz、87 MHz 及び 3.5 GHz の 3 種類を選択し、漏えい電磁界の特性を解析する。解析手法及び計算機システムは、２．３．１で述べたように周波数に応じて適切な手法を用いて、複数の波源が同時動作する場合の漏えい電磁界の分布をシミュレーションによって算出する。

シミュレーションの条件を表 2 に、波源及び漏えい電磁界の観測区間の位置を図 21 に示す。

波源は、図 21 の Room A、Room C 及び Room D に 1 台ずつ配置する。波源の設置高は、それぞれ床面から 1 m とする。85 kHz と 87 MHz のスパイラルコイルは、開口面が地面と平行になるように配置し、3.5 GHz のパッチア

表２　シミュレーションの条件

周波数	85 kHz	87 MHz	3.5 GHz
解析手法	有限要素法	FDTD 法	Ray-Launching 法
計算機システム	６ノード並列計算機	スーパーコンピュータ TSUBAME2.5	
放射素子	スパイラルコイル φ300mm	スパイラルコイル φ50mm	パッチアンテナ
設置環境	木造（一部鉄骨）２階建て戸建住宅		
波源	３台 同時動作		



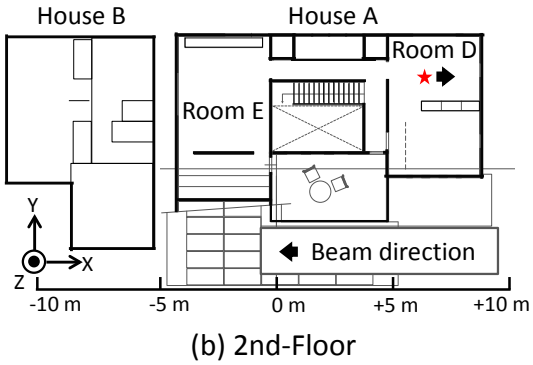


図 21　波源及び観測区間の位置

ンテナは、最大放射方向が図 21 に図示する矢印の向きとなるように配置する。漏えい電磁界の観測区間は、Room B の line1 と、隣家にあたる Room F の line 2 を選定する。観測区間の高さは、床面から 1 m とする。

図 22 に 3 波源同時動作時の 85 kHz の漏えい電磁界の強度に対する各波源間の位相差の影響を示す。85 kHz において各波源の入力電力は、1 W に設定している。測定では、各波源の位相を制御することが困難であるため、電磁界強度の最大値と平均値を測定した。シミュレーションでは、各波源間の位相差を 30°刻みで変化させ、計 144 通りの組合せについて解析した。観測区間は line 1 である。

図 22 より、3 波源が同時動作する場合は、各波源の位相に応じて磁界強度が変動している。観測区間 line 1 では、

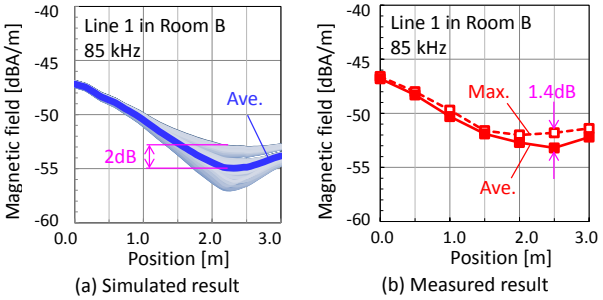


図 22　3 波源動作時の各波源間の位相差の影響

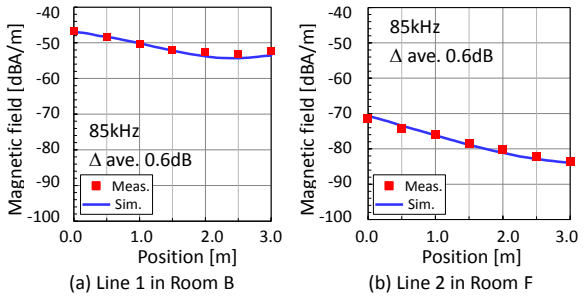


図 23　3 波源動作時の 85 kHz 漏えい磁界特性

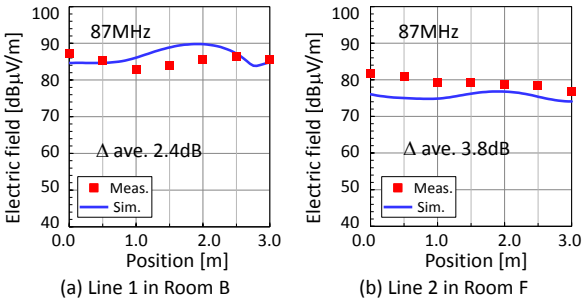


図 24　3 波源動作時の 87 MHz 漏えい電界特性

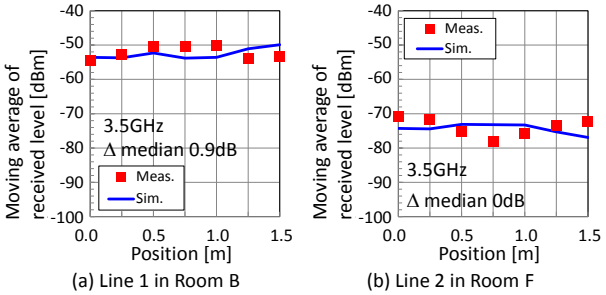


図 25　3 波源動作時の 3.5GHz 漏えい受信電力特性

Room A と Room D に配置した波源からの距離が同程度であることから、主にこの 2 波源の磁界が位相加算されることによって、図 22 に示すような変動が起きると考えられる。観測区間 line 1 における磁界強度の平均値と最大値の差分は、シミュレーションの場合 2 dB であるのに対して、測定では、1.4 dB でありほぼ同等の傾向といえる。

これ以降の図 23 から図 25 に示すシミュレーション結果は、全て各波源の位相差を 0° に設定した条件とする。

- 図 23 に 3 波源同時動作時の 85 kHz の漏えい磁界強度の測定結果とシミュレーション結果の比較を示す。観測区間 line 1 及び line 2 の測定とシミュレーションの区間平均差分は、0.6dB であり、傾向が一致していることがわかる。
- 図 24 に 3 波源同時動作時の 87 MHz の漏えい電界強度の測定結果とシミュレーション結果の比較を示す。各波源の入力電力は 10 mW である。観測区間 line 1 及び line 2 の測定とシミュレーションの区間平均差分は、それぞれ 2.4 dB、3.8 dB である。
- 図 25 に 3 波源同時動作時の 3.5 GHz の漏えい受信電力の測定結果とシミュレーション結果の比較を示す。受信電力値には、伝搬損失と、観測区間に配置した受信アンテナの指向性利得が反映されており、それぞれの観測点の値は、前後 175 mm 区間の中央値を示している。各波源の入力電力は 10 mW である。観測区間 line 1 及び line 2 の測定とシミュレーションの中央値差分は、それぞれ 0.9 dB と 0dB である。

以上のとおり、85 kHz、87 MHz 及び 3.5 GHz における測定結果とシミュレーション結果の差分は、5 dB 以内となり、精度良く一致することが確認された。

2．3．4．商業施設モデルの漏えい電磁界の特性

解析空間を拡大した商業施設モデルにおけるシミュレーションの事例を示す。

図 26 に示す商業施設モデルでは、店舗建物内のイートインスペースにて、10 台の WPT システムが同時動作することを想定しており、解析空間のサイズは 40×40×10m である。この商業施設モデルにおける 10 波源同時動作時の 595 kHz の漏えい磁界強度の分布を可視化した結果を図 27 に示す。

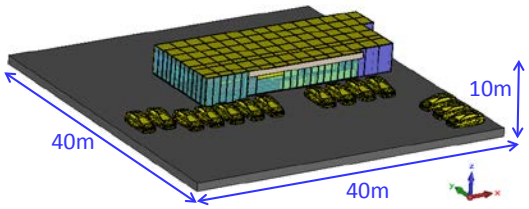


図 26　商業施設のシミュレーションモデル

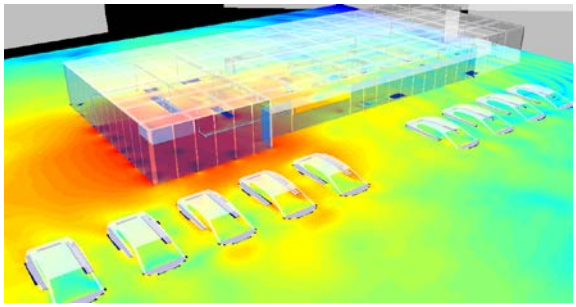


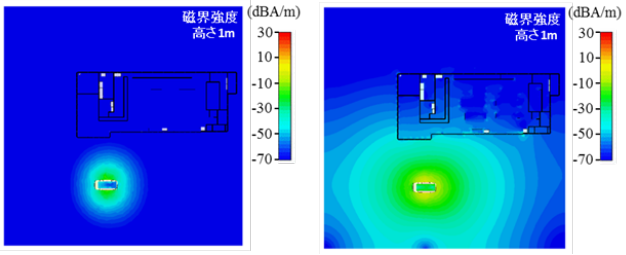
図 27　商業施設モデルの磁界強度分布（595kHz）

このように、本研究開発で構築した大規模シミュレーションシステムを活用することにより、WPT の設置環境や動作条件等、様々な場面における漏えい電磁界を可視化することが可能になる。
しかし、商業施設モデルのように解析空間が拡大すると、それに伴い計算時間も増加する。そこで、商業施設モデルの解析空間をさらに拡大した場合に、計算時間の目標値 12 時間以内を達成できるシミュレーションの条件を調査した。表 3 に商業施設モデルの解析空間上限サイズを示す。並列計算機システムを使用する周波数ドメイン電磁界解析手法（9 kHz～30 MHz）では、メモリ使用量が計算機の上限となる 128 GB の制約を満たす必要がある。TSUBAME2.5 を使用するトランジェント電磁界解析手法（30 MHz～1 GHz）では、周波数が高くなるにしたがってメッシュ数が増大し、計算時間が増加していることが確認できる。TSUBAME2.5 を使用する幾何光学的電磁界解析手法（1 GHz～6 GHz）では、受信点数が増加するにしたがい、メモリ使用量及び計算時間が増大する傾向となる。メモリ仕様量の上限は、計算機仕様により 60 GB/node となっている。

また、将来の実用化が期待されている走行中ワイヤレス給電のユースケースを想定し、商業施設モデルの前面道路に、給電コイルが 900 mm 間隔で埋設したモデルを作成してシミュレーションを実施した。図 25 に走行中ワイヤレス給電モデルにおける漏えい磁界強度の分布を示す。走行中ワイヤレス給電モデルの解析空間は 40×40×10m としている。図 28(a)に示すとおり、給電コイルと受電コイルの位置ズレが 0 mm の条件では、漏えい磁界の影響範囲は小さいが、図 28(b)のように位置ズレが最大となる 450mm の条件では、漏えい磁界の影響範囲が大きく広がっていることが分かる。このように本研究開発で構築した大規模シミュレーションシステムを活用することによって、測定環境の構築が困難な条件でも漏えい電磁界の把握、解析が可能となる。

表 3　商業施設モデルの計算時間と解析空間上限

周波数	解析空間の大きさ	メモリ使用量	計算時間
85 kHz	120×120×10 m	118 GB	11.5 h
595 kHz	120×120×10 m	110 GB	4.5 h
6.78 MHz	120×120×10 m	110 GB	7.5 h
87 MHz	300×300×10 m	－	3.5 h (80 ノード)
815 MHz	40×40×10 m	－	11.4 h (80 ノード)
2.497 GHz	40×40×10 m	42.6 GHz	6.1 h (50 ノード)
3.5 GHz	40×40×10 m	17.7 GHz	3.3 h (50 ノード)
5.3 GHz	40×40×10 m	5.8 GHz	1.8 h (50 ノード)



(a)コイル位置ズレ 0 mm　(b)コイル位置ズレ 450 mm

図 28　走行中ワイヤレス給電の磁界強度分布（85kHz）

３．今後の研究成果の展開

３．１．国際標準化及び国内法制化への貢献

WPT システムについては、国際無線障害特別委員会（CISPR）の B 小委員会（SC-B）において、タスクフォース（TF-WPT）が設置されており、EV 用 WPT の試験方法や許容値に関する議論が活発化している。

そのため、本研究開発において得られた測定法・データ等を提供するなど、次のとおり国際標準化に寄与した。

- EV 用 WPT のデータ測定のための国内合同検討チームへ参加し、合計２回のデータ測定実験の実験計画立案、測定実験の実施、報告書作成を担当した。
- 2015 年 4 月に東京で開催された SC-B の中間会合と、2015 年 9 月の CISPR ストレーザ会合において日本から提出する寄書の作成に必要な WPT の測定データを提供した。

また、前述の EV 用 WPT の測定実験において検証された測定方法については、平成 28 年 3 月 15 日に公布・施行された総務省告示に反映されている。

３．２．実用化に向けた取組

本研究開発で得られた WPT システムの漏えい電磁界を模擬する技術と、大規模シミュレーションによる解析技術に関する成果は、WPT システムの機器設計、機器の試験、設置施工の効率化及び品質の向上に活用できる。

今後は、本研究開発成果の実用化及び普及拡大に向けて、研究開発や展示会への出展等による訴求の取組を継続する予定である。

応用開発の段階においては、従来の戸建住宅内外の解析に加え、EV の車室内のモデル化と電磁界解析について研究開発を行い、平成 28 年度を目途として、大規模シミュレーションの解析精度と演算性能向上を目指す。

また、実用化段階に向けた目標として、WPT システムを製造する事業者向けの設計評価支援サービスとして本研究開発の成果を展開していくものとする。

さらに、図 29 に示すとおり、展示会等への出展を通じて、技術ニーズの発掘にも積極的に取り組む。

４．むすび

WPT システムから漏えいする電磁界を模擬する技術として、家電機器・EV WPT エミュレーターを新たに開発し、WPT システムが機器に搭載されるときの近接導体影響まで考慮して漏えい電磁界の分布の模擬が可能となることを実証した。

WPT システムの漏えい電磁界の分布を解析する大規模シミュレーション技術の研究開発において、WPT システムから発生する漏えい電磁界の基本波、高調波成分の波源をそれぞれモデル化したシミュレーションシステムを構

図 29 MWE2015 への出展風景（平成 27 年 11 月）

築した。

さらに、実験用戸建住宅モデルによるシミュレーション結果と測定結果の比較検証により、漏えい電磁界強度の分布について、平均差分 5dB 以内の解析精度が達成されていることを確認した。また、商業施設モデルを用いた評価では、解析空間の大きさ 40×40×10 m を上限として、12 時間以内にシミュレーションが完了することを立証した。

今後、WPT システムの普及に伴い、漏えい電磁界の評価解析技術の重要性は一層増していくと考えられる。本研究開発成果の実用化に向けた取組を加速化し、電波環境の保全、通信機器と電力伝送システムとの周波数共同利用の促進に寄与していく。

【査読付き口頭発表論文】

[1] K. Takagi, T. Yui, M Anada, T. Izumi, H. Uno, H. Watanabe, Y. Saito, “Analysis of Electromagnetic Fields Leaked from Wireless Power Transfer System in Case-study House”、IEEE Wireless Power Transfer Conference 2015（平成 27 年 5 月 14 日）

[2] Y. Kanasaki, T. Yui, H. Uno, K. Ikeda, Y. Saito, “Analysis of Electromagnetic Field Leaked from Wireless Power Transfer Systems by Using Leakage Emulator” 、 IEEE Wireless Power Transfer Conference 2015（平成 27 年 5 月 14 日）

[3] Y. Kanasaki, T. Yui, K. Takagi, M. Anada, H. Uno, H. Watanabe, Y. Saito、”Analysis of Electromagnetic Field Leaked from Several Wireless Power Transfer Systems in Large-Scale Model”、IEEE Wireless Power Transfer Conference 2016（平成 28 年 5 月 5 日）

【口頭発表】

[1] 油井辰憲、金崎善宏、宮西克也、泉貴志、宇野博之、金子哲也、斎藤裕、“実験住宅内における kHz 帯及び MHz 帯 WPT システムの漏えい電磁界分布の測定と解析”、電子情報通信学会 2015 年総合大会（平成 27 年 3 月 10 日）

[2] 穴田雅之、高木健治、福田博之、宇野博之、渡辺浩亘、斎藤裕、“Ray-Launching 法によるマイクロ波帯 WPT 漏えい電磁界特性の解析”、電子情報通信学会 2015 年総合大会（平成 27 年 3 月 10 日）

[3] 宇野博之、“ハイパワーWPT の環境電磁界に関する評価・解析技術”、日本能率協会 テクノフロンティア 2016 磁気応用シンポジウム（平成 28 年 4 月 20 日）

【誌上発表リスト】

[1] 宇野博之、福田博之、穴田雅之、油井辰憲、渡辺浩亘、斎藤裕、“スパコン活用大規模電波伝搬／電磁界シミュレーション”、パナソニック技報 2015 年 11 月号 Vol.61 No.2（平成 27 年 11 月 16 日）

【申請特許リスト】

[1] 金崎善宏・宮西克也・池田和彦・金子哲也・斎藤裕・加藤一郎、電磁波模擬装置、日本、平成 26 年 3 月 17 日

[2] 金谷浩幸・菅田真紀・渡辺浩亘・立野吉英・油井辰憲、電磁界可視化装置及び電磁界可視化方法、日本、平成 28 年 3 月 29 日

[3] 小坂裕史・金崎善宏・立野吉英・谷口真一・長山利裕・油井辰憲・渡辺浩亘、電磁界模擬装置及び電磁界模擬方法、日本、平成 28 年 3 月 30 日