

## 論文の内容の要旨

氏名：小 林 一 彦

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：次世代移動通信端末向け受信評価用電波暗箱の基礎研究

移動無線通信において、特に2000年以降急速に需要が拡大し、発展してきた携帯電話に代表されるセルラー通信は、音声中心の時代からスマートフォン、タブレット等に見られるデータ通信が中心となる時代へと変遷していく中、通信速度の高速化を目的に、約5年を周期に、新しい通信方式が採用されてきた。それに伴い高速通信を行う一手段として通信帯域の広帯域化が進められた。その広帯域を得るための一例として、既存の通信バンドを組合せて、所望の帯域を確保するCA(Carrier Aggregation)技術が採用されたシステムが実用化されている。2020年の東京オリンピック開催に合わせて商用サービスが開始される5Gシステムでは、IoT(Internet of Things)等の実現を意識して10 Gbpsを超える通信速度を目指し、新たな無線通信周波数として、6 GHz以下の周波数帯およびミリ波帯(準ミリ波帯も含む)の利用が検討され、将来に向けた広帯域移動通信の本格的な運用を目指している。このような移動通信の変革から次世代移動通信端末は、既存の端末に比べ、ミリ波帯の対応も含め、更なるマルチバンド化が進められる。このため次世代移動通信端末の評価では、LTE(Long Term Evolution)までの通信方式に見られる単一の周波数で行える評価と異なり、アンテナおよび高周波回路の周波数特性も含めた電波を発した広帯域な評価を行うことが重要である。この評価を行うには、既存の無線システムへの干渉を避けるために、閉空間で広帯域な評価環境である電波暗室内での評価が一般的と考える。しかし、コスト、利便性の観点から電波暗室に代わる評価環境のニーズが、今後、高まると予測する。その低コストで利便性が高い評価環境として移動可能な電波暗箱が考えられるが、移動通信端末の評価環境として適用できるかは明確でないのが現状である。

本研究では、上記の背景から、電波暗室に代わる広帯域な閉空間評価環境を低コストで利便性が高く、更に移動可能な電波暗箱に求め、まずは次世代移動通信端末の受信評価環境の構築を目指し、基礎検討として実現の可能性を示すことを目的に研究を行った。電波暗箱の外形寸法は、電波暗室の1/10に相当する2.0 m×1.5 m×1.5 m以内を目標として、現状の移動無線通信システムの動向と電波吸収体の特性から検討周波数を700 MHzから3 GHzとした。まず一般に使用されている既存の電波暗箱の電磁界解析を行い、自由空間の電界分布特性との比較から現状の問題点を明らかにした。次に受信評価を行うための電波暗箱の性能に関しては、マイクロ波通信システムシミュレータにより求め、既存の電波暗箱の特性と必要となる性能を基に、特性改善を図った電波暗箱構造を提案し、その最良寸法を電磁界解析シミュレーションから求めた。更に、今後の実用化を目指し、アンテナの広帯域化、小型化そして特性改善の可能性を示した。また、評価時において、移動通信端末を提案した電波暗箱内に設置した場合、その設置位置による評価結果への影響を検討して、実用的な電波暗箱構造の提案を新たに行った。本論文は、以上の成果をまとめたものであり、序論から結論まで8章の構成である。以下各章の概要を説明する。

第1章は、序論として本研究の背景、目的そして論文構成について述べた。背景で、セルラー通信の技術動向から現状の課題を明らかにして本研究の必要性を示し、目的で、本研究の目指すところとして、電波暗箱内に受信評価が行える環境の構築と目標とする電波暗箱サイズを明確にした。また、電波暗箱内で主に用いる電波吸収体は、多くの電波暗室および電波暗箱で用いられ、更に特性面からピラミッド型電波吸収体を適用した。最後に論文構成について触れ、次章に繋げた。

第2章は、第3章以降で、各構造の電波暗箱特性を有限要素法による電磁界解析シミュレーションから求めるために、電波暗箱内に用いるウレタンフォームを基に、カーボンを浸透させたピラミッド型電波吸収体の材料定数である複素比誘電率を、市販の電波吸収体を使用して実験から求めた。実験で求めた周波数以外の複素比誘電率に関しては、分散性媒質のDebye型緩和式を適用して導出した。その妥当性は、試作した電波暗箱内の電界強度分布を実験で求め、その実験結果とシミュレーション結果とを比較することで確認した。これより本シミュレーション結果が電波暗箱の電磁界解析に有効であることを示した。

第3章は、第2章で求めた複素比誘電率を用いて、電磁界解析シミュレーションから現状一般に使用されている既存の電波暗箱内の電界分布と自由空間の電界分布を比較することで、既存の電波暗箱の問題点を明らかにした。電波暗箱内の電界分布は、伝搬にしたがって自由空間と比べ大きな減衰が発生している。また、電波吸収体からの反射波の影響が少ない領域が狭く、明らかに自由空間の電界分布と異なった結果を得た。更に、その特性は、周波数依存が高い。このため既存の電波暗箱は、例えばDL(Down Link)-CAに対応した広帯域な周波数範囲で、移動通信端末の受信評価を行う環境として適していないことを示した。

第4章は、閉空間評価環境として電波暗箱が、次世代移動通信端末の受信評価に適用可能となるために必要となる性能を求めた。一般に電波暗箱の性能は、その性能指標の一つであるQZ(Quiet Zone)で表現される。本論文では、移動通信端末の受信特性に影響を与えない直接波に対する反射波の振幅比以下の領域をQZ、その振幅比をQZレベルと定義した。このQZレベルと受信特性であるBER(Bit Error Rate)特性との関係をマイクロ波通信システムシミュレータにより、その関係を明らかにすることで、次世代移動通信端末の受信評価に適用できる電波暗箱の性能を示した。その結果からQZレベルを-30 dB以下を本論文の目標値とした。尚、BERを求める際には、無線通信の基本的な変調方式であるQPSK(Quadrature Phase Shift Keying)を用いた。

第5章は、前章で求めたQZレベル-30 dB以下を実現する電波暗箱構造を、第2章で問題点を明らかにした既存の電波暗箱特性を参考に提案した。その構造は、波源であるアンテナに、指向性の鋭いホーンアンテナを用い、電波暗箱の側面からの反射波を抑え、対面の電波吸収体からの反射波を主とする構造である。また、波源をホーンアンテナにすることで、平面波に近づけている。この目標性能を満足し、小型化を意識した電波暗箱の最良寸法を求めるために、各寸法をパラメータにシミュレーションを行った。その結果、電波暗箱の全領域ではないが、タブレットサイズまでの評価が可能なQZレベル-30 dB以下の評価可能領域が得られ、提案する電波暗箱の有効性を示した。

第6章は、提案した電波暗箱の広帯域化、小型化および特性改善の可能性に関して示している。広帯域化は、評価周波数の最低周波数で反射係数が-40 dB程度以下のピラミッド型電波吸収体を適用し、送信アンテナには、ダブルリッジホーンアンテナを用いることで広帯域化が可能である。小型化については、700 MHzで特性改善を行った電波暗箱において、反射係数特性の違う2種類のピラミッド型電波吸収体を適切に配置することで、体積で54.1%の削減を実現し、小型化の可能性を示した。また、特性改善については、波源に対する入射角度の絶対値を35度以下になるようにピラミッド型電波吸収体を傾けることで、特性改善が可能であることを示した。

第7章は、スマートフォン、タブレットなどの移動通信端末を実際に電波暗箱内に設置して評価した場合の問題点を明らかにして、特性改善のため第5章の電波暗箱構造から新たな構造の提案を行った。また、評価時の注意点として、移動通信端末の適切な設置位置について示した。

第8章は、結論として、上記の内容をまとめ、本研究の成果について示した。更に、実用化に向けた今後の検討項目についても明らかにした。

以上のように、本論文では、基礎検討として、次世代移動通信端末の受信評価が行える自由空間と同等で、広帯域な評価環境を移動可能な電波暗箱に求め、評価に耐えうる電波暗箱構造を提案し、電磁界解析シミュレーションにより、その可能性を示した。更に、今後の実用化を目指して、アンテナの広帯域化の対応方法、小型化および特性改善の可能性を示した。また、実際に、移動通信端末を提案した電波暗箱内に設置した場合の問題点を明らかにして、特性改善のため、新たな電波暗箱構造の提案を行い、実用化に近づけたことが、本研究の成果である。