

財団法人テレコムエンジニアリングセンター
公益的調査研究助成

成果報告書

調査研究テーマ

モノポールアンテナの置換測定法の研究開発

助成期間

平成 20年 4月 ~ 平成 23年 3月

提出期日

平成 23年 4月

研究代表者氏名

石居 正典

所属機関・職名

(独)産業技術総合研究所 ・ 研究員

1. 調査研究の概要

調査研究テーマ	モノポールアンテナの置換測定法の研究開発		
助成期間	平成 20年 4月 ~ 平成 23年 3月		
報告者 (助成対象者)	石居 正典	印	
勤務先	機関名	独立行政法人 産業技術総合研究所	
	住所	〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1 産業技術総合研究所 つくば中央第3事業所 電磁界標準研究室	
	TEL		
	E-mail		
助成金額			
本報告書作成日	平成 23年 4月 25日		
調査研究概要	 <p>オープンサイトにおけるモノポールアンテナの測定風景</p> <p>環境電磁工学(EMC)の分野では、30MHz 以下の低周波帯域の磁界測定にはループアンテナが使用されるが、一方の電界測定にはモノポールアンテナが使用される。その際、使用されるモノポールアンテナのアンテナ係数が必須である。本調査研究では、低周波用モノポールアンテナのアンテナ係数測定においてはこれまでに例が無かったモノポールアンテナ用近傍界3 アンテナ法と近傍界置換測定法を提案し、シミュレーションと実験により提案手法の妥当性を検証した。</p> <p>また、モノポールアンテナのアンテナ係数の測定手法では、これまでに規格による標準化もされている容量置換法が最も一般的である。そこで、3 アンテナ法(または置換測定法)と容量置換法の両測定手法を、同一のモノポールアンテナのアンテナ係数測定に適用し、得られたアンテナ係数の比較・検討まで行った。その結果、容量置換法は規格にも取り上げられている一般的な手法であるが、非常に簡略化した手法であるため、概算の推定値を知るには適しているが、精密測定としては原理的に様々な問題点を有していることを確認した。今後は、提案した3 アンテナ法と置換測定法が、標準規格化への1つの参考になることを期待し、取り組んで行く予定である。</p>		

2. 調査研究の詳細

2.1 課題名:

モノポールアンテナの置換測定法の研究開発

2.2 調査研究の背景

近年、30MHz以下の低周波帯域の利用に注目が集まっており、その利用機器が増えつつある。この周波数帯域では通常は磁界測定が主であるが、最近では利用の増加とともに、電界強度を測定してこの周波数帯域を利用する機器を評価したいというニーズも増加している。このため、国内のアンテナ測定事業者に対しては、評価のためのモノポールアンテナのアンテナ係数を高精度な測定技術によって測定するサービスが求められている。

これまで、モノポールアンテナのアンテナ係数測定法としては、米国の国立標準技術研究所である National Institute of Standards and Technology (NIST)による送信モノポールアンテナを使用するオープンサイト上での標準電界法や、英国の国立標準技術研究所である National Physical Laboratory (NPL)による G-TEM セルの中での標準電界法などがある。この他、アンテナエレメントとグランドプレーン間と等価的な静電容量を持つコンデンサを通し、回路測定のみからアンテナ係数を推定する容量置換法と呼ばれる手法もある。これらの手法では、「耐久性に乏しい」、「被測定アンテナの長さに制限がある」、「電磁波を実際に送受信しないために種々の動作仮定が含まれている」などの問題点がある。同時に熟練した技術や大掛かりで高価な専用測定装置が必要である。さらにこれらの測定法は絶対測定法であるため、そのシステムの品質維持と測定値の妥当性の検証が常に必要となる。このため、これらに代わる測定手法の開発が求められている。

2.3 調査研究の目的:

当該研究者は、これまでベクトルネットワークアナライザを使用した高精度なモノポールアンテナの測定が可能である3アンテナ法の開発に着手して来た。さらに本助成金により、標準アンテナを参照アンテナとする測定法である置換測定法の開発にも着手し、簡易で高精度なアンテナ係数の測定手法の研究開発を行う。該当周波数帯域では、電磁波の波長が10m以上にもなる超長波長帯であるため、必然的に近傍界での測定になる。またアンテナは共振型ではない。エレメント長には詳細な規定が無いため、送・受信アンテナのエレメント長が異なる場合がある。そこで、ダイポールアンテナなどで用いられる通常の置換測定法では不十分であり、補正項などが必要となることが予想できる。このため、独自の定式化を行い、近距離での測定が可能でモノポールアンテナの置換測定法の確立を目的とする。提案するモノポールアンテナの置換測定法が確立されれば、高精度ながら比較的簡単なアンテナ測定が可能となる。また、全天候型の測定ができる5面電波暗室での測定の可能性もあるため、電磁波測定技術の向上につながり、電波利用の発展にも寄与できる。

2.4 調査研究の意義:

近年、電磁波の利用技術が進歩する中、電磁調理器として注目されているIH調理器、鉄道の乗車券や電子マネーとしての利用が進んでいるRF-IDタグ、家庭用のコンセントを利用したPLC通信などを代表するよう、30MHz以下の低周波帯域の利用に注目が集まっている。また同時にこれらの機器からの電界強度を測定評価したいというニーズも増加しており、そのためには使用するモノポールアンテナのアンテナ係数が必須である。そこでアンテナ測定事業者からは、電界測定に使用する種々のモノポールアンテナに対して、比較的簡単で高精度なアンテナ係数の測定が可能である測定手法の確立が求められている。

本調査研究開発が完了し、置換測定法によるモノポールアンテナのアンテナ係数の測定システムが完成すれば、上記の社会的ニーズに対応することが可能である。またアンテナユーザーは、海外の測定事業者や国立標準研究所にアンテナ係数の測定依頼をする必要がなく、国内のアンテナ測定事業者に対して測定依頼を行うことが可能になる。このとき、容量置換法などとは異なり、実際に電磁波を照射・伝搬させる測定方法による高精度な測定依頼を行うことができる。さらに国内のアンテナ測定事業者もトレーサビリティの確保が容易に行える測定事業が早急に開始可能となる。また、従来ダイポールアンテナの測定に使用するオープンサイトに対する大規模な改造などが不要で、ほぼ従来の設備を利用した比較的容易な測定サービスの開始が可能であると期待できる。さらには置換測定であるため、5面電波暗室を利用することで天候に左右されない測定手法の確立も期待でき、野外測定の多いアンテナ測定においては大きなメリットとなる。

2.5 調査研究の方法:

<アンテナの感度不足への測定システムの対応>

本助成金を受ける時点では、モノポールアンテナ用近傍界3アンテナ法の検討中であった。しかしながら、これは主に、約1 MHz以上の周波数に関しての検討であった。一方、さらなる低周波数領域であるkHzオーダーにおいては、アンテナの感度が極端に低下するため、アンテナ間の電磁波の伝搬量の測定が困難である。そこで平成20年度においては、このkHzオーダーのアンテナ間の電磁波の伝搬量の感度不足を解決する測定システムの構築に努めた。具体的にはハイパワーアンプを用いたが、そのためには測定システムの中での安全対策も重要となる。そこで本助成金により、送信モノポールアンテナからの放射電界強度のモニタリング用の簡易電界強度センサと一部のマイクロ波部品を取得して計画を進めた。

<微小モノポールアンテナ用近傍界置換測定法の定式化と検証>

アンテナの感度不足が改良されると、kHzオーダーから30 MHzまでのアンテナ間の伝搬特性の測定が可能になるため、本格的に数kHzから30 MHzの全帯域での置換測定法の本格的な開発に着手した。30 MHz以下の周波数帯では波長が10 m以上であるため、超近傍での測定になる。そこで通常のダイポールアンテナ等の置換測定法の定式はそのまま適用できないことが容易に予測できる。そこで、ここではモノポールアンテナの置換測定に特化した定式化を行い、シミュレーションもしくは実験による検証を行った。また同時に本助成金により、得られた成果の対外発表も行った。

<既存の測定手法との比較・検討>

前述の置換測定法の定式化と測定システムが完成すると、提案する方式との既存の測定方法との間でのバリデーションのチェックが必要となる。そこで、規格書でも標準化もされている容量置換法との間での比較・検証を行った。また同時に得られた成果の対外発表も行い、今後は得られた成果が標準規格化への1つの参考になることも期待する。

なお、以上の調査研究の研究体制は、本助成金の申込者の1人体制であった。

2.6 調査研究の特色

これまでに提案されてきたモノポールアンテナのアンテナ係数測定法では、「大規模で高価な設備や施設が必要である」、「アンテナ測定に対する影響を極力排除した周囲環境が必要である」、「被測定アンテナの大きさなどに制限がある」、「アンテナの動作を簡易的に仮定してしまう」など、様々な問題点を抱えていた。

一方、本助成金にて研究開発に着手した置換測定法は、あらかじめ3アンテナ法にて測定された標準モノポールアンテナを参照アンテナとした相対測定法である。そのため、アンテナ測定の周囲測定環境などにあまり依存せず、また実際に電磁波を伝搬して測定できる手法である。この置換測定を実施することが出来れば、従来のダイポールアンテナの測定に使用するオープンサイトをそのまま共用した安価な測定が可能である。また、5面電波暗室内でモノポールアンテナの測定をする可能性もあり、これは野外測定が多いアンテナ測定が天候に左右されることの無いという大きなメリットとなる。

30 MHz以下の周波数帯域では波長が10 m以上もあるため、モノポールアンテナは共振型のアンテナではない。そこでアンテナエレメントの長さがアンテナによって異なる場合が多い。また同時に超近傍での測定になるため、従来の置換測定法は適用できないという問題点もある。そこで我々は、これまでループアンテナの測定手法の開発を行ってきた経験を踏まえ、独自の補正係数を導入し、モノポールアンテナ測定に特化した置換測定法を新たに研究開発・提案した。

具体的には、この超近傍界に対応したモノポールアンテナ用置換法の定式化、測定システムの構築、5面電波暗室での測定の検証を行い、3アンテナ法と同等のアンテナ係数が得られることを確認した。また、3アンテナ法と規格にて標準化されている容量置換法との比較検討までを行い、これまで使用されている容量置換法の問題点を指摘した。

3. 年度ごとの調査研究内容

初年度分 平成 20.4～平成 21.3

本研究の目標である低周波帯域における電界強度測定用モノポールアンテナの置換測定法の研究開発では、まず基準モノポールアンテナに対し、低周波数帯域でも有効な絶対測定法(3 アンテナ測定法など)を完成させる必要がある。またこの周波数帯域では、波長に対するアンテナエレメント長が極端に短いため、特に 1MHz 以下においては、アンテナの感度が極端に低下してしまい、近距離でもアンテナ間の電磁波の伝搬量(S21)の測定が非常に困難になる。そこで、測定システムの考案、構築、それらの検討が必要である。

そこで、上記の検討課題を踏まえ、平成 20 年度においては下記の①と②の検討を行った。①まず kHz オーダから 30 MHz の超長波領域でも有効な、モノポールアンテナ用近傍界 3 アンテナ測定法の定式化を行い完成させた。この手法は、通常の 3 アンテナ測定法の定式とは異なり、超近傍界測定においても遠方界の値であるモノポールアンテナのアンテナ係数を得られるように改良してある。有効性の検証は、モーメント法を用いた計算機シミュレーションにより行った。②一方、実際の測定を実現するには、特に 9 kHz から約 1 MHz の周波数帯におけるアンテナ間の電磁波の伝搬量(S21)の感度不足を解決した測定システムの構築が必要である。そこで、100 W のハイパワーアンプを用いたシステムを構築し、検証測定を電波暗室内にて行った。このシステムでは送信アンテナの下段にハイパワーアンプを使用するが、該当周波数帯域におけるモノポールアンテナの反射係数は全反射に近く、これがアンプや測定器の故障原因となる。そこで、ハイパワー対応方向性結合器、パワーセンサとパワーメータ、ハイパワー対応減衰器などを随所に用いて、送信アンテナへの入力電力と反射電力の測定モニタリングシステムを組み込むことでシステム回路内の安全対策を施した。また、電界強度センサにより送信モノポールアンテナからの放射電界強度のモニタリングも行い、放射電界強度に対しても安全対策を施したシステムを構築した。なお、当初予定していた感度向上のための送信アンテナの改造は、上記システムにて感度が得られたため必要としなかった。なお、本助成金によって、電界強度センサ、測定ケーブル、アダプタなどの一部マイクロ波部品を取得し、上記システムを構築することができた。さらに、研究体制としては本助成金の助成対象者の 1 人体制であった。

平成 21.4～平成 22.3

前年度は、モノポールアンテナ間の電磁波の伝搬量(S21)の感度不足を改善する実験システムを構築し、このシステムによりこの感度不足の解決を図った。この結果を踏まえ、平成 21 年度においては下記の①と②の検討を行った。①まず昨年度中に提案及び定式化した 3 アンテナ法に対して、実験による検証を行った。これまで提案した方法は、シミュレーションによりその有効性の確認ができていたが、今回は電界強度測定用モノポールアンテナに対して実際に測定を実施し、提案した測定法の実験による有効性も確認した。②次に、本研究の最終目標でもある、超長波領域において有効なモノポールアンテナ用近傍界置換測定法の定式化を行い完成させた。この新たに提案及び定式化された置換測定法は、ダイポールアンテナ等に良く見られる通常の置換測定法の定式とは異なり、30 MHz 以下で波長が 10 m 以上もある超近傍界測定においても遠方界の値であるモノポールアンテナのアンテナ係数を得られるように改良されたものである。この有効性の検証は、今年度はモーメント法を用いた計算機シミュレーションにより行った。なお、本年度は本助成金によって新たに、モノポールアンテナ、マイクロ波測定ケーブル、マイクロ波部品などを取得して上記の実験や検証を実施することができた。また、本年度は調査研究の 2 年目であったため、これまで得られた研究成果を、本助成金によって国際会議にて発表する機会も得ることができた。さらに、研究体制としては本助成金の助成対象者の 1 人体制で実施した。

最終年度分 平成 22.4～平成 23.3

3 年目である平成 22 年度には、上記の平成 20～21 年度の検討結果を踏まえて、まず、前年度提案したモノポールアンテナの近傍界置換測定法の実験による検証を行い、提案した相対測定法の実用的な有効性を実験によって確認した。また一方、モノポールアンテナのアンテナ係数の測定法には、実際には電磁波をアンテナに照射せずにアンテナエレメントとグランドプレーン間と等価容量を模擬したコンデンサを用い、アンテナの付属回路内の測定結果のみから簡易的にモノポールアンテナのアンテナ係数を求める容量置換法と呼ばれる測定手法がある。この測定手法は、本調査研究でこれまで提案及び検討してきた 3 アンテナ法や置換測定法とは全く系統の異なる測定法である。そこで、実際に同じ被測定アンテナに対して、3 アンテナ法と容量置換法の両方を実施した。得られたアンテナ係数の比較を実施することは、互いの手法のベリフィケーションとしても意義がある検討である。結果としては、容量置換法は規格にも取り上げられている手法であるが、非常に簡略化した手法であるため、高精度な測定には原理的に様々な問題点を有していることを確認した。なお、本助成金の申込者の 1 人体制で研究を実施した。また、これまでの成果を踏まえ、助成期間終了後も更なる改良や検討を行って行く予定である。

4. 調査研究成果の説明

得られた成果に対する自己評価

これまで、低周波帯のモノポールアンテナのアンテナ係数を測定する際、標準電界法や容量置換法を用いる手法は一般的であったが、3 アンテナ法や置換測定法に対する検討例は無かった。EMC の分野でモノポールアンテナが用いられる周波数帯域は 30 MHz 以下の低周波帯であるため、3 アンテナ法と置換測定法を実施するに当たり、近傍界測定に適応可能な定式化から実施する必要があった。今回、初めてこれら両手法の定式化及びシミュレーションと実験による妥当性の検討を行い、一定の学術的貢献ができたと思う。また、得られた成果は、野外オープンサイトがあれば、直ぐにでも実際のモノポールアンテナの校正(較正)業務の実用化も可能であり、テレコムエンジニアリングセンターやその他校正(較正)事業者のアンテナ校正(較正)業務にも貢献できたと考えている。

一方、モノポールアンテナの測定手法としては、容量置換法が一般的である。しかしながらこの手法は、実際に電磁界をアンテナに照射してアンテナ係数を得るのではなく、モノポールアンテナの回路BOXにアンテナエレメントに代わるコンデンサを接続して、この回路の特性からアンテナ係数を推定する手法であるため、標準化による規格化までなされているが、本調査研究の実施者本人も含め、その測定結果の精度や信憑性に疑問を持つ人も少なくなかった。本調査研究では、3 アンテナ法と容量置換法を、実際に実験とシミュレーションにより比較・検討する事で、容量置換法は非常に簡略化した手法であるため、高精度な測定では原理的に様々な問題点を有していることを確認した。この事から、提案した低周波帯のモノポールアンテナ用3 アンテナ法と置換測定法の標準化への第一歩の貢献ができたと考えている。なお、提案したモノポールアンテナ用3 アンテナ法と置換測定法の標準化、及び、現行の容量置換法の改良は今後期待するところであり、今後も検討を継続して行く予定である。

なお、本研究内容の今後の発展であるが、提案したモノポールアンテナ用3 アンテナ法と置換測定法の不確かさ算出の指針は必須であると考えている。また、有限地板を有するモノポールアンテナ校正についても見当して行く予定である。

主な成果リスト

1. 石居正典, “HF 帯測定用アンテナの校正,” NICT EMC-net 第4回EMIアンテナ校正研究会, 2008.8.6.
2. 石居正典, 島田洋蔵, “低周波領域における微小モノポールアンテナの近傍界3 アンテナ法,” 電子情報通信学会, 信学総大, B-4-35, 2009.3.
3. M. Ishii and Y. Shimada, “A Near field 3-Antenna Method for Short Monopole Antennas in Low Frequency Bands,” 2009 IEEE International Symposium on EMC, vol. 2 (Wednesday), pp324-327, Aug. 2009.
4. 石居正典, 島田洋蔵, 小見山耕司, “30 MHz 以下における微小モノポールアンテナの近傍界3 アンテナ法の開発,” (独)産業技術総合研究所 計量標準総合センター2009 年度成果発表会, 2010.1.
5. 石居正典, 島田洋蔵, “低周波領域における微小モノポールアンテナの近傍界置換法,” 電子情報通信学会, 信学総大, B-4-34 2010.3.
6. M. Ishii and Y. Shimada, “Measurement of Electrically Short Monopole Antenna by 3-Antenna Method,” CPEM2010 Symposium Digest, pp704-705, Jun. 2010.
7. M. Ishii and Y. Shimada, “Reference Antenna Method for Non-resonant Electrically Short Monopole Antennas,” 2010 IEEE International Symposium on EMC, vol. 1, No.1, pp56-61, Jul. 2010.
8. 石居正典, 黒川悟, “モノポールアンテナ校正における近傍界3 アンテナ法と容量置換法の比較,” 電子情報通信学会, 信学ソ大, B-4-17, 2010.9.
9. 石居正典, “低周波領域における微小モノポールアンテナの近傍界置換法測定,” (独)産業技術総合研究所 計量標準総合センター2010 年度成果発表会, 2011.1.
10. M. Ishii, S. Kurokawa, and Y. Shimada, “A Comparison between Three-Antenna Method and Equivalent Capacitance Substitution Method for Calibrating Electrically Short Monopole Antenna,” 2011 IEEE International Symposium on EMC, Jul. 2010. <投稿・採録済み>