

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

# アンテナで発生する相互変調ひずみの測定環境に 関する調査研究

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

久我宣裕

所属機関・職名

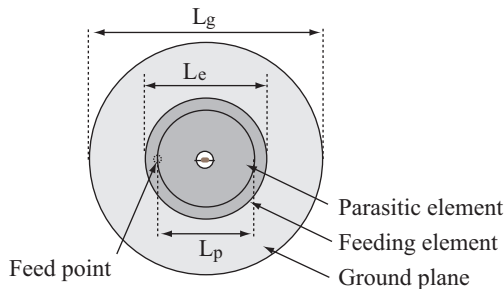
横浜国立大学大学院・准教授

# 1. 調査研究の概要

調査研究テーマ	アンテナで発生する相互変調ひずみの測定環境に関する調査研究	
助成期間	平成 20年 4月 ~ 平成 23年 3月	
報告者 (助成対象者)	久我宣裕	印
勤務先	機関名	横浜国立大学
	住所	神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5
	TEL	
	E-mail	
助成金額		
本報告書作成日	平成 23年 4月 28日	

## 調査研究概要

アンテナの相互変調ひずみ(Passive Intermodulation:PIM)を測定するには、測定環境の性能に関する定量的評価が不可欠である。本調査研究では、まず上記の目的に対してPIM源を内蔵したアンテナを標準アンテナとして利用することを検討した。具体的例としては、PIM源となるダイオードを無給電素子に内蔵したパッチアンテナである。この構成では無給電素子の設置角調整により50dB以上のPIM発生量可変が実現可能であり、かつ入力電力に対するPIMリニアリティ（ログスケール）を確保できることを示した。また上記標準アンテナを用いて汎用小形電波暗箱（600mm×600mm×1200mm）の特性を実際に評価し、現状では-55dBm～-75dBm（2GHz帯、43dBm×2波励振）の範囲の3次PIM測定が可能であることを確認した。また電波暗箱等において構造上除去できない電気接点で発生するPIMについても調査研究を実施した。タッピングに対するPIM応答を時間・周波数の各領域における考察を行い、それらが約3種類のパターンに分類できることを確認した。これ以外にも、PIM特性に関する電磁界シミュレーションを実施し、計算速度の短縮法などの提案を行った。



## 2. 調査研究の詳細

### 2.1 課題名: アンテナで発生する相互変調ひずみの測定環境に関する調査研究

### 2.2 調査研究の背景

一般にアンテナは入力特性や指向性など線形的な特性評価指標で評価できるが、印加電力に依存する非線形現象であるPIM特性は、実際の運用電力で評価する必要がある。一方、PIMが問題となるのは移動体通信基地局用アレーアンテナなどの大型アンテナであるため、暗室など測定設備の小形化は非常に重要である。この際、小形化された測定環境の実力を定量的に評価するための手法が不可欠であるが、具体的な手法は確立されていない。また測定に使用する電波吸収体についても垂直入射減衰30dB以上というIEC勧告が存在するものの、アンテナに対する要求仕様、すなわち測定対象とするPIMレベルとの関係は明確でない。このような問題点に対する一つの解法として、PIM測定に関して標準器に相当するようなアンテナを実現し、さらにこれを利用して必要性能と測定環境寸法の関連を定量評価していくことが現実的であると考えられる。

### 2.3 調査研究の目的:

本調査研究の目的は、PIM測定に関して標準器に相当するようなアンテナを実現することである。すなわち、アンテナへの入力電力と発生するPIMが完全に相関づけられているアンテナの実現であり、要求仕様に応じた特性評価が可能となるように、発生するPIMレベルを簡易な方法で制御するための具体的な原理および構造を考案することにある。また実現されたアンテナを用いて、被測定暗箱の性能評価が可能となることを、電波暗箱など実際の小形測定環境を用いて実証することである。さらに実際の電波暗箱を構成する際に不可欠な機械的開閉機構が、実際のPIM測定に対して与える影響を考察し、その原理的考察モデルを考案することにある。

### 2.4 調査研究の意義:

放射系デバイスであるアンテナで発生するPIMに関する研究例は少ない。これはアンテナが様々な高周波受動素子を含むシステムであり、PIMに関する解析対象としては非常に複雑なためである。さらにアンテナのPIM測定は測定環境に対して非常に敏感であるため、観測されたPIMがアンテナによるものか、外的要因によるものかを判別しづらいという問題もある。上記に対して本調査研究は、安定した測定環境を実現するための技術という観点での意義を有する。本調査研究で開発するアンテナはPIM特性が既知である。これを基準アンテナとして利用することで、異なる測定環境(暗室)の特性比較を可能にし、その限界性能や測定値の確からしさを容易に定量化できる。また一方では、暗箱の容積低減による性能劣化量や採用する電波吸収体やシールドボックスの構造などを定量的に評価できるようにもなる。すなわち、レベル可変ノイズソースを内蔵したアンテナの開発という点が新しく、本調査研究の第1の意義と言える。

なおアンテナ用小形PIM測定環境の実現に関する研究は、製品開発の効率化と低コスト化と言う点でも大きな意義を有する。アンテナ製品に関するPIM特性測定は全数検査が基本であり、そのような観点での対費用効果は極めて大きいと考えられる。

## 2.5 調査研究の方法:

一般的基地局用アレーアンテナは、水平面内で指向性を有するセクタ形アンテナと、全方位型の指向性を有するオムニ形アンテナが利用されることが多いが、本調査研究では前者のセクタ形アンテナを想定した検討を実施する。そのため、セクタアンテナの構成素子として用いられることが多い無給電素子付きパッチアンテナを基本モデルとして採用する。また基礎検討と言う観点から、アレーでは無く、単素子での検討を実施する。

具体的には、一体の無給電素子付きパッチアンテナ上で安定したPIMを発生させるための手法、およびそのレベルを制御する方法に関する検討を行う。本検討では、まず上記目的に適したPIM発生源の選定を行う。PIM源単体としては可能な限り高いPIMを安定して発生させる必要があるが、ここではアンテナの構造上生ずるPIMの影響を避けるため、同軸管を用いた非接触PIM測定法等を積極的に活用する。またこれと併せて、PIM特性を電磁界シミュレーションにより得るための検討も実施する。

次にアンテナ電磁界シミュレーション手法より得られるアンテナ上の電流分布や密度等の知見を十分に活用し、アンテナへのPIM源実装法に関する検討を行う。この際、発生するPIMのレベルを簡易に制御できるような手法を考案する必要がある。また入力電力に対して（ログスケールで）線形になるような構成にする必要もある。なおPIM源がない場合のアンテナのPIM特性を把握し、かつ可能な限りアンテナ自身が低PIMとなるような工夫も行う必要がある。

以上の様にPIM源内蔵アンテナを実現した後、電波暗箱など実際の小形測定環境を用いて提案アンテナの有効性を実証する。アンテナが原理上発生するPIMレベルと、アンテナを介して実際に観測されるPIMレベルを比較することで、測定環境の実力を評価できる。さらにこれを用いて、アンテナと電波吸収体性能との関係や構造上存在する機械的電気接点等の影響を評価していけば、電波暗箱の小型化や測定感度の改善等が可能になると考えられる。

## 2.6 調査研究の特色

本調査研究の特色は下記のとおりである。

(1) PIM特性評価用の小型電波暗室特性を取り扱う。電波暗室は指向性などの評価に適するように設計される。これに対し本調査研究は、PIM特性の測定に主眼を置く点に特徴があり、特に測定装置の小型化を志向する点で、過去に例がない。

### (2) PIM源内蔵アンテナの開発

暗室の特性評価に際し、特性既知のアンテナが利用できると都合がよい。本調査研究は、印加電力と発生PIMレベルの相関が既知となるようなアンテナを開発する点に特徴がある。現状の商用アンテナは構成が複雑であり、納入先事業者の仕様により評価可能な周波数帯も異なるため、統一した評価指標を策定しづらい。申請者はこれまでの研究成果より、電流密度と材料のPIM特性について、定量的関係を取得できる技術を有する。これを利用し、所望のPIM特性を実現するアンテナを実現する。

### (3) シールドボックスで発生するPIM特性測定に関する基礎検討

コストや作業性などの実用面を考慮した場合、シールドボックスから金属接触（電気接点）を完全に排除することはできない。このような電気接点で発生するPIMは従来タッピング（打診）により単なるPIM変動として扱われてきた。これに対し本調査研究では、周波数領域と時間領域の両面からPIM応答を分析することで、発生要因に応じた対処法を考案しようとする点でも特徴がある。このような検討は電波吸収体を用いないアンテナPIM特性測定装置の実現にもつながる。すなわち申請者らが既に提案している定材波を利用したPIM測定法、すなわちアンテナの非接触測定の基礎となると考えられる。

### 3. 年度ごとの調査研究内容

初年度分 平成 20.4～平成 21.3

アンテナで発生する相互変調ひずみの測定環境評価技術に必要となる標準アンテナ、すなわち既知のPIMを発生するアンテナ（標準PIMアンテナ）の基本構成について検討した。そのために、アンテナ特性に加え、PIM特性が評価できる数値シミュレーション手法の実現を目指した検討を実施した。具体的にはアンテナを含む任意形状デバイスに関するPIM特性シミュレーションを可能にするために、電流型非線形項を含むFDTDプログラムを作成した。この際、非線形方程式の係数決定法や計算速度の短縮法などを新たに考案した。これによる結果を報告者が過去に提案している定在波同軸管を用いたPIM測定法により評価し、導体線など単純形状の材料を用いて得られた非線形係数を用いて、板状導体のPIM特性をシミュレーションすることが可能であることを確認した。

一方で、標準PIMアンテナの構成についての検討を2GHz帯において進めた。具体的には、パッチアンテナをベースとして、PIM源とする材料の選定や装荷方法に関する検討を実施し、43dBm×2toneで励振した場合に最大-70dBm程度のPIM発生を目標とした。メッキや電気接点等、各種方法を検討したが、結果としてアンテナ内で安定したPIMを発生させるためには、ダイオードの利用が適していることを確認した。またダイオードを無給電素子の中央に装荷した場合、無給電素子の回転によりPIM発生量を連続的に制御できることを確認した。

平成 21.4～平成 22.3

前年度に引き続き、PIM源付きパッチアンテナに関する検討を実施した。ここではアンテナに内蔵したダイオードからのPIM発生量について制御可能範囲を確認したが、その結果、無給電素子の設置角により実験でも50dB以上の変動範囲が得られることを確認した。また発生するPIMが高電力励振時に飽和特性を示すことと言う問題を確認し、その解決法について検討した。その結果、E面電流に対しダイオードを80°以上の角度で設置することで上記問題が解決されることを確認した。またこのようなPIM特性について数値解析を実施し、この現象を電磁界解析による電流計算とダイオード方程式からシミュレーションできることを示した。

また上記アンテナを用いて、薄型電波吸収体が内張された卓上小型電波暗箱（既設）の性能評価実験を実施した。無給電素子の角度を変更させたときのPIM観測量を計測することでPIM特性の評価可能範囲を決定できることは確認できたが、使用した暗箱の機械的構造や電波吸収体性能不足に起因する不安定性が課題として残された。

最終年度分 平成 22.4～平成 23.3

まず前年度までに開発したアンテナに対して、必要最小限となる電波暗箱寸法を入力特性の観点から検討した。その結果、将来的に数素子のアレーアンテナに関する検討も可能な寸法の汎用シールドボックス（600mm×600mm×1200mm）を新たに導入した。内張する電波吸収体としては、理想的にはIEC標準で推奨される垂直入射減衰30dB以上の電波吸収体の使用が望ましい。しかし実用的な小型測定環境を実現するためには非常に厳しい要求仕様であることから、一般的な平面型吸収体（垂直入射減衰が20dB程度）をシールドボックス内に全面設置した場合について、前述のPIM源付きパッチアンテナを用いた評価を実施した。その結果、現状では-55dBm～-75dBmの範囲の3次PIM測定が可能であることを確認した。

なお上記シールドボックスでは蓋の開閉が必須であり、この部分の電気接点で発生するPIMをいかに低減するかが重要である。そのための基礎検討として、頻繁な着脱を伴う電気接点で発生するPIMについて、時間特性と周波数特性の両面から考察を行った。その結果、タッピングなどの外部衝撃に対して発生するPIMが数種類のパターンに分類できることを確認した。

超小型PIM測定環境の実現および評価手法を確立するためには、さらに低いレベルのPIM測定や電波吸収体の減衰特性とPIM特性の関係に関する検討が必要であり、これらが今後の課題となった。

## 4. 調査研究成果の説明

### 得られた成果に対する自己評価

本調査研究では電波暗箱など小形PIM測定環境の性能評価を実施するための手段とそれに必要となる基準アンテナを実現し、これを用いた汎用電波暗箱の性能評価を実施した。開発された技術は、アンテナで発生するPIMを極限まで抑制するのではなく、レベル制御可能で、かつ安定したPIMを生成するアンテナを利用すると言う点で従来技術にはない特徴を有する。この点が評価され、本成果は電子情報通信学会の正論文として掲載された。他の周波数帯に関する調査については企業の協力を得て別途検討を進め、その一部は電子情報通信学会の正論文として掲載される予定である。このような技術に関する具体的研究例は本調査研究は世界で初めてである。本技術は、既に異なる測定サイトの性能比較などに直接利用できるが、将来的には小形PIM測定環境の性能評価技術の標準化や、それらの性能認定などの業務に対して貢献できると考えられる。

なお現状では単一素子に関する技術であり、将来的な目標であるアレーアンテナのPIM測定に対する貢献度が明確化できていない。この課題を克服するには産業界との協力が必要であり、これが今後の課題となる。アレーアンテナとしての実用性や、単一アンテナによる評価結果との相関性等が取得できれば、極めて実用的な測定環境性能の評価手段となる。また他方で、単素子レベルでも、電波吸収体や電気接点に対する必要性能という観点から検討を進めることは可能であり、さらに低レベルのPIM測定が可能な電波暗箱の実現につながる。以上のように、今後も測定評価手段の改善と、測定環境の高性能化を両輪とした研究開発を進めていきたい。

### 主な成果リスト

1. 石橋大二郎, 久我宣裕, 「導体で発生する 3 次相互変調ひずみの FDTD 解析」, 信学技法 vol.108, no.EMC-J-144, pp.31-36, 2008
2. 石橋大二郎, 久我宣裕, 「FDTD 法を用いた受動回路の相互変調ひずみにおける線形抵抗の影響評価」, 信学ソ大 C-5-8, 2008
3. D. Ishibashi, N.Kuga, “Analysis of 3rd-order passive intermodulation generated from metallic materials,” Asia Pacific Microwave Conference 2008, A3-47, 4-pages, Dec. 2008
4. 石橋大二郎, 久我宣裕, 「带状導体で発生する相互変調ひずみのFDTD解析」, 信学総大, C-5-2, 2009
5. K.Irie, N.Kuga, “A patch antenna with level-controllable PIM source,” Proc. of International Symposium on Antennas and Propagation, FD4, no.1372, pp.1059-1062, 2009
6. 入江, 久我, “PIM源付き無給電素子を装荷したパッチアンテナの特性,” 信学通ソ大, B-1-118, 2009年9月
7. 入江, 久我, “PIMソースを内蔵したパッチアンテナの構成法,” 信学技法, AP2009-132, pp.79-84, 2009年11月
8. 入江, 久我, “パッチアンテナに装荷されたダイオードから発生する相互変調ひずみの電力飽和特性,” 信学総大, B-1-65, 2010年3月
9. 入江, 久我「ダイオードを相互変調ひずみ源として内蔵したパッチアンテナ」, 信学論B, vol.J93-B, no.9, pp.1170-1176, 2010年9月
10. 久我, 入江, “PIM源付きパッチアンテナを用いた小型電波暗箱の性能評価,” 信学総大, B-1-227, 2010年3月
11. 石橋, 富菜, 久我, “タッピングされた同軸コネクタのPIM特性変化に関する研究,” 信学総大, C-5-4, 2010年3月