



不要電波の高分解能測定及び解析技術に関する研究

渡邊， 航

(Degree)

博士（科学技術イノベーション）

(Date of Degree)

2023-03-25

(Date of Publication)

2024-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8681号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100482429>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博 士 論 文

不要電波の高分解能測定及び解析技術 に関する研究

令和 5 年 1 月

神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科

渡邊 航

目次

1	緒論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究の概要と本論文の構成	4
2	不要電波の高分解能測定技術	7
2.1	はじめに	7
2.2	不要電波の広帯域測定技術	7
2.3	不要電波の狭帯域測定技術	10
2.4	不要電波測定における測定感度	13
2.5	まとめ	15
3	無線通信システムにおける電磁干渉解析技術	17
3.1	はじめに	17
3.2	無線通信システムにおける電磁干渉課題	17
3.3	実機とシミュレーションによる無線通信品質評価	19
3.4	無線通信シミュレーションによる無線通信品質評価	23
3.5	まとめ	27
4	無線通信機器における電磁干渉評価	28
4.1	はじめに	28
4.2	IC チップから発生する不要電波による電磁干渉評価	28
4.3	電子機器間における電磁干渉評価	37
4.4	電磁機器内部における電磁干渉評価	43
4.5	まとめ	52

5 無線通信機器への電磁干渉抑制技術	54
5.1 はじめに	54
5.2 磁性材料と評価 IC チップ	54
5.3 IC チップパッケージングにおける電磁干渉抑制技術	57
5.4 磁性膜による電磁波抑制効果	60
5.5 まとめ	64
6 サイドチャネル攻撃への脅威分析および対策支援	65
6.1 はじめに	65
6.2 事業化への背景	65
6.3 イノベーションアイディア	73
6.4 事業戦略について	83
6.5 まとめ	86
7 結論	88
謝辞	92
参考文献	93
発表論文一覧	98
本研究に関する発表論文	98
学術論文	98
国際会議	98
国内会議	101
受賞	101
その他の発表論文	102
国際会議	102
図一覧	104
表一覧	107

第 1 章

緒論

1.1 研究背景

現在, 情報通信技術 (ICT) の発展によりあらゆる情報がデジタルデータとして扱われている。そして, IoT (Internet of Things) の普及に伴い, 様々なモノがインターネットを介してデジタルデータをやり取りしているため, 身の回りのデジタルデータの流通量は急激に増加している。2019 年にシスコシステムズ合同会社がとりまとめた「Cisco Visual Networking Index」によると, 2022 年には全世界のひと月あたりのデジタルデータの流通量が, 2017 年の約 3 倍となる 400 エクサバイトに達すると予測されている[1]。こうした高度情報化社会において, 急増するデジタルデータの ICT による利活用が期待されている。ICT によるデジタルデータの利活用とは図 1-1 のように, 現実世界とサイバー空間を横断した仕組みである[2]。IoT 機器等の電子機器によって, 画像や音声, 気温といった様々な現実世界の情報はデジタルデータとして収集し, インターネットを通じてサイバー空間に送信される。送信された膨大なデジタルデータはビッグデータとしてデータサーバーに蓄積され, 機械学習等のデータ処理技術によって分析される。そしてこの分析結果を, 現実世界の電子機器やサービスにインターネットを介して還元する。このように現実世界とサイバー空間を融合させ, 様々な知識や情報を共有し, 分野横断的に連携することで新たな価値創造につなげる社会は Society5.0 と定義され, 理想的な未来社会として期待されている[3]。現在, Society5.0 の実現に向けた電子機器やサービスが徐々に社会実装されている。

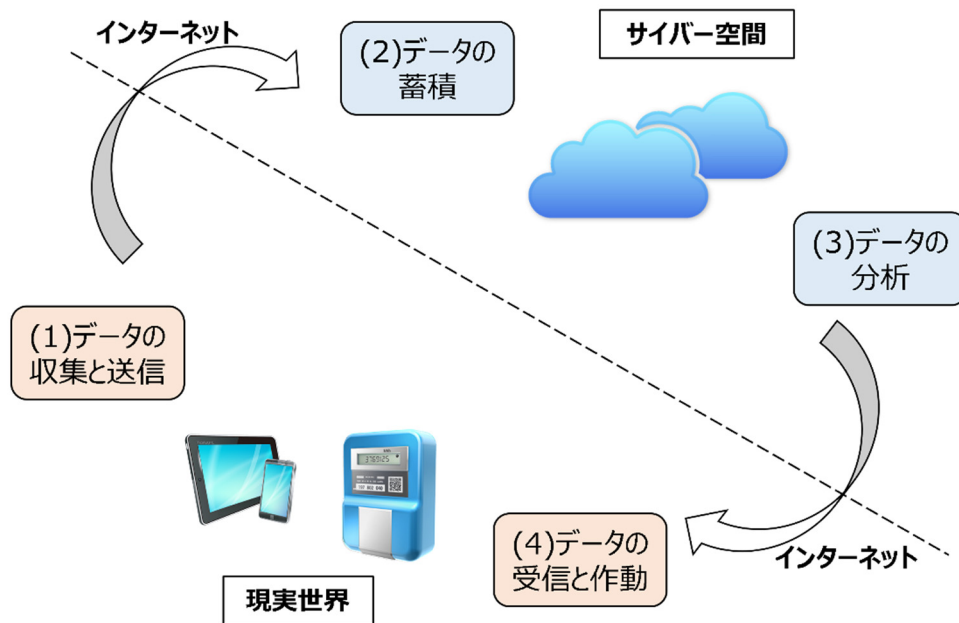


図 1-1 情報通信技術（ICT）によるデジタルデータの利活用の仕組み

デジタルデータの利活用によって新たな価値を生み出す **Society5.0** においては、デジタルデータやそれを扱う電子機器や通信システムの高い信頼性が求められる。例えば、2022 年 7 月 2 日に発生した KDDI 社の 60 時間に及ぶ通信障害では、個人のインターネット通信だけでなく、物流など最大 26 万社に影響がおよび、デジタルデータを活用できないことで甚大な被害が発生した[4]。このように、現代社会においてはデジタルデータが非常に高い価値を持ち、デジタルデータが活用される電子機器やサービスをいつでも安心して利用できる環境が不可欠である。

電子機器やそれらを利用したサービスの信頼性を脅かす要因の 1 つに、不要電波が挙げられる。不要電波とは電子機器の動作に応じて空間中に放射される電磁波のことである。現在の高度情報化社会では、多くの電子機器が利用され無線通信によって情報をやり取りしているため、電磁波は常に我々の身の回りに存在する。電磁波は、無線通信信号としても有効活用される一方で、時には意図せず発生する不要電波として電子機器の動作に悪影響を及ぼす恐れがある。電磁波による電子機器やそれらを利用したサービスへの影響は主に電磁環境両立性（EMC）と呼ばれる分野において研究開発がおこなわれており、電磁干渉や混信、人体防護を評価するエミッション評価や電磁波照射評価やサージ試験等をおこなうイミュニティ評価などが知られている。近年では、EMC に加えてセキュリティの分野においても不要電波の影響が報

告されており、高度情報化社会における不要電波への対策の重要性が増加している。

筆者はこれまで、約 6 年間、EMC 分野における電磁干渉 (EMI) 問題を対象に、不要電波の測定および解析、そして対策に関する研究に取り組んでいる。近年、不要電波による EMI 問題は複雑化しており、高度な測定技術が求められる。例えば、デジタル回路を基に製造される IC (Integrated circuit) チップからは、その動作周波数に応じて高調波などの不要電波が発生する。回路の動作周波数が高速化するに応じて、その高調波は広帯域に及び電磁干渉の影響の拡大が懸念される。その中でも筆者が特に対象としている EMI 問題は、LTE (Long-term evolution) や 5G (5th generation) といったセルラー系の無線通信と不要電波の電磁干渉である。IoT 時代における電子機器は小型化の要求に伴い機器内部において高密度実装が行われている。そのため、機器内部において制御基板や電源装置などから生じる不要電波が通信装置に影響を及ぼし無線通信性能が劣化する恐れがある。通常、電磁干渉問題への対策として、EMC 規格が定められており、不要電波の電力強度が許容値内に抑えられていることが確認されている。しかし、こうした EMC 規格では 3 m や 10 m といった電子機器の遠方において不要電波が測定されており、様々な電子機器が密接して使用される現代の電磁環境と一致しない。また、その許容値もセルラー系無線通信を対象としたものではないため、EMC 規格を満たしていたとしても、不要電波により無線通信品質が劣化している恐れがある。こうした問題によって、セルラー系の無線通信を活用した電子機器の信頼性が劣化する恐れがあるため、不要電波による電磁干渉問題に対する評価と対策が必要である。そこで本稿では、セルラー系無線通信に着目した不要電波の影響を評価し、対策する技術について論じる。

1.2 研究の概要と本論文の構成

本論文では、第 2 章、第 3 章、第 5 章において不要電波問題の解決に向けて確立した基盤技術を示す。そして、それらの基盤技術を電磁干渉問題に応用した評価について第 4 章において示し、電磁セキュリティ問題に対しての応用とその事業化について第 6 章において論ずる。としての研究内容は、第 2 章から第 6 章の 5 つの章から構成される。以下に、それぞれの章における基盤技術と応用技術の内容について示す。

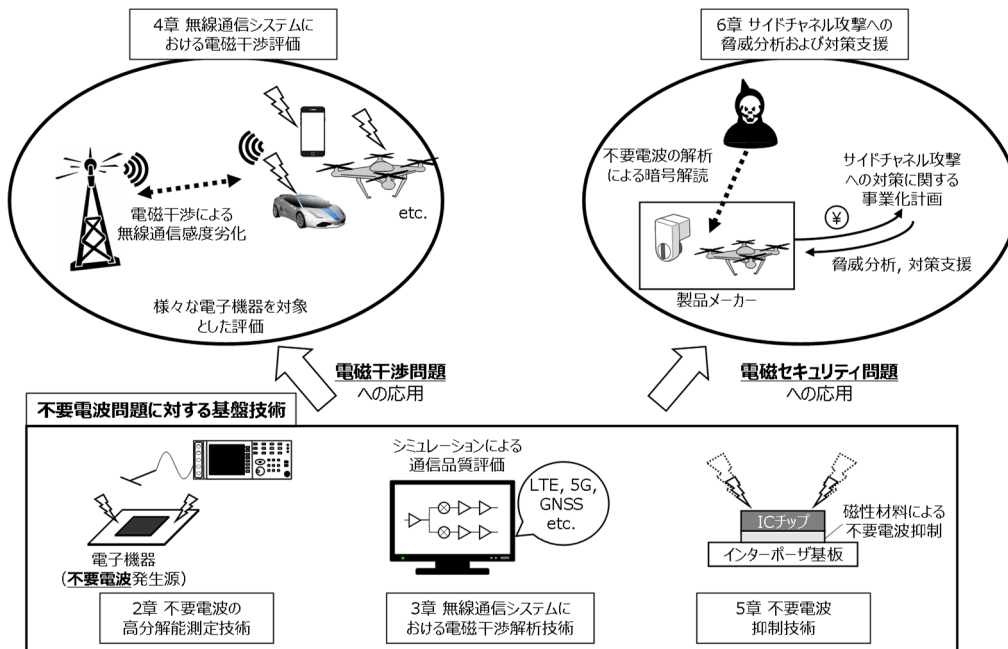


図 1-2 本論文における不要電波問題に対する基盤技術とそれらの応用

第 2 章で述べる不要電波の高分解能測定技術では、セルラー系の無線通信に影響を及ぼしうる不要電波を測定することを目的としている。セルラー系無線通信は低電力で規格化されるため、微弱な不要電波であっても検波できる測定技術が必要とされる。また、対象とする周波数帯域はセルラー系無線通信において利用される 700 MHz から 6 GHz までとした。第 3 章では、無線通信の通信感度評価技術を活用し、不要電波と無線通信信号の電磁干渉を解析する技術について示す。不要電波強度の評価だけでなく、無線通信品質の劣化度合いを解析することで、不要電波による無線通信への電磁干渉の影響を推測することができる。本稿では、無線通信システムシミュレーション

(以下、無線通信シミュレーション)を活用した効率的な無線通信品質評価環境を構築した。第4章では、第2章と第3章において示した不要電波の高分解能測定技術と無線通信品質の評価技術を活用し、実製品における不要電波と無線通信の電磁干渉を評価することで、不要電波問題の重要性と提案技術の有効性を示す。本稿では、半導体集積回路チップ(ICチップ)における電磁干渉、電子機器間の電磁干渉、電子機器内部の電磁干渉について評価した。第5章では、不要電波と無線通信信号の電磁干渉を抑制する小型かつ軽量の不要電波抑制技術について述べる。磁性材料を薄膜状に形成し、ICチップパッケージング内に実装する不要電波抑制技術を提案し、その抑制効果を評価した。また、第6章では提案技術を活用したイノベーションアイデア、サイドチャネル攻撃への脅威分析と対策支援の事業化についてまとめ、事業の優位性と継続可能性を示す。

第 2 章

不要電波の高分解能測定技術

2.1 はじめに

半導体 IC チップの動作に応じて発生する不要電波は，チップ動作の高速化や大電力化等によって広帯域に及んでいる．不要電波が無線通信に利用される帯域に及び，無線通信信号と干渉することで通信品質の劣化を引き起こす恐れがある．特に，LTE や 5G 等のセルラー系無線通信は低電力でも動作するように規格されており，微弱な不要電波であったとしても電磁干渉による通信障害が発生する恐れがある．そのため，不要電波による無線通信との電磁干渉を評価するためには，微弱な不要電波を検知する測定技術が必要である．

本章では，無線通信との電磁干渉を引き起こす不要電波を測定するための高分解能測定技術について述べる．セルラー系無線通信との電磁干渉に着目するため，測定する不要電波の周波数範囲は 700 MHz から 6 GHz までとする[6]．2.2 節において対象とする全周波数帯域の不要電波を測定する，不要電波の広帯域測定技術を示す．また，2.3 節において各無線通信チャネル帯域における不要電波を測定する，不要電波の狭帯域測定技術を示す．そして，2.4 節において，本章で示す高分解能測定技術の測定感度について述べる．

2.2 不要電波の広帯域測定系

LTE や 5G に利用される周波数帯域に及ぶ不要電波を観測するため，不要電波の測定周波数範囲を 700 MHz から 6 GHz とした．本節において示す広帯域測定系では，対象周波数範囲における不要電波を一度に測定し，不要電波が強く観測される帯域を特定する．これによって，広帯域で運用されるセルラー系無線通信に対して影響を及ぼしうる不要電波が発生している帯域を検出することができる．

不要電波の広帯域測定における測定環境を図 2-1 に示す。測定対象 (DUT) から発生する不要電波を、広帯域において高い利得を持つアンテナにより取得し、測定器により不要電波を観測する。ここで測定器は、不要電波の周波数特性を把握するためにスペクトラム・アナライザを使用した。また、測定系には検波感度を向上させるためにステップアッテネータ (ATT) と低雑音増幅器 (LNA) を使用している。ステップアッテネータは、低周波の不要電波や外部環境の無線通信信号といった測定対象ではない電力強度の強い成分が存在した場合に、スペクトラム・アナライザのダイナミックレンジを超える信号が混入することを防ぐ役割を持つ。本稿で使用する LNA は 10 MHz から 6 GHz までの広い周波数帯域において 45 dB の高い利得を持ち、雑音指数が 1.2 dB である。なお、DUT、測定アンテナ、ステップアッテネータ、LNA は、電波暗室の内部に配置し、LTE や Wi-Fi などの無線通信や測定器から発生するスイッチングノイズといった環境ノイズが測定に影響を及ぼさないようにしている。

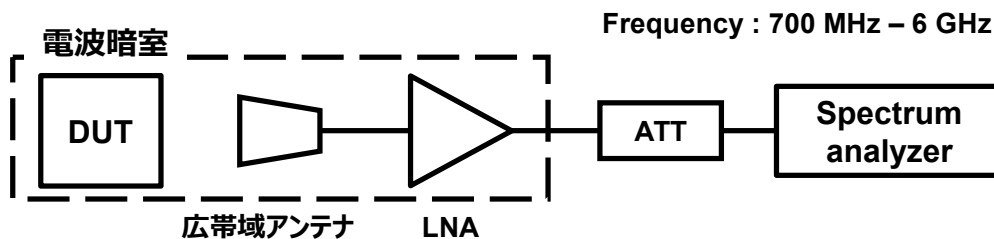


図 2-1 不要電波の広帯域評価系 (LNA: 低雑音増幅器, ATT: アッテネータ)

本稿における不要電波の広帯域測定では、測定アンテナとして長六角形折り返しアンテナ[7]と磁界プローブを使用した。長六角形折り返しアンテナは、東北学院大学の石上教授により開発されたアンテナで、図 2-2 に示すような長六角形の金属板を折り返した形状で、350 MHz から 40 GHz までの広帯域において高い利得を持つ。本稿では DUT 全体から発生する不要電波を評価する際に、この長六角形折り返しアンテナを使用した。また、局所的に観測される不要電波を評価する際に、磁界プローブを使用した。

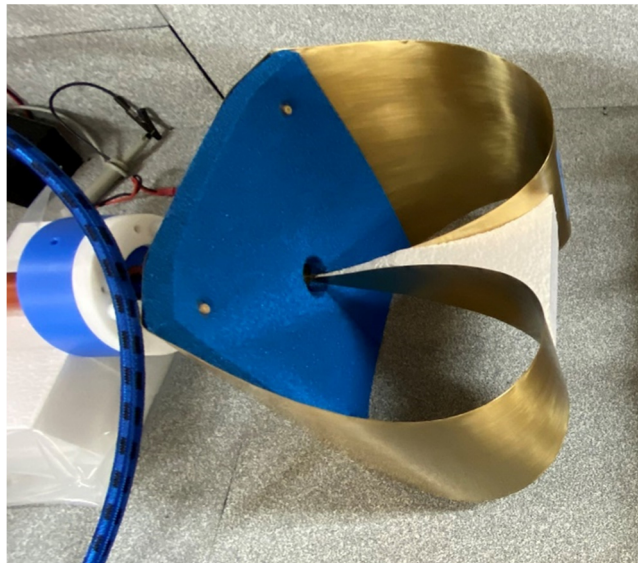


図 2-2 長六角形折り返しアンテナの外形

本節において示した不要電波の広帯域測定系により, 700 MHz から 6 GHz までの無線通信に使用される周波数帯域全体における不要電波の周波数特性を確認する. DUT から発生する不要電波の電力強度を電波暗室内の基準ノイズレベルと比較することで, 無線通信との電磁干渉評価をおこなう周波数帯域を選定する.

2.3 不要電波の狭帯域測定

本稿で対象としているセルラー系無線通信では、割り当てられている周波数帯域は広帯域に及ぶが、実際に個々の通信に使用される周波数帯域は 5 MHz から 100 MHz の狭帯域である[6]。不要電波と無線通信の電磁干渉を評価するために、無線通信に使用される狭帯域での不要電波測定が必要である。本稿では測定帯域幅を、700 MHz から 6 GHz までの周波数帯域における LTE や 5G の基本的な帯域幅である 5 MHz とした。

不要電波の狭帯域測定系を図 2-3 に示す。狭帯域測定においては対象周波数範囲ではない不要電波の影響を抑えるために、帯域制限フィルタを使用する。この帯域制限フィルタは対象とする周波数に応じて、ローパスフィルタ、ハイパスフィルタ、バンドパスフィルタ、ノッチフィルタを使い分ける。なお、帯域制限フィルタによって強い電力強度の不要電波成分の影響を抑えているためアッテネータは使用しない。2.2 節において示した広帯域測定系と同様に、DUT、測定アンテナ、帯域制限フィルタ、LNA は外部電磁環境の影響を抑えるために電波暗室内部に配置する。また、不要電波の狭帯域測定ではセルラー系無線通信に利用されるアンテナと類似するダイポールアンテナを測定アンテナとして使用する。本稿で使用するダイポールアンテナは合計 13 本であり、700 MHz から 6 GHz までの無線通信に利用される帯域に対応している。ダイポールアンテナの帯域幅は 80 MHz から 400 MHz であるので、測定アンテナによって特定の周波数における不要電波を取得することができる。

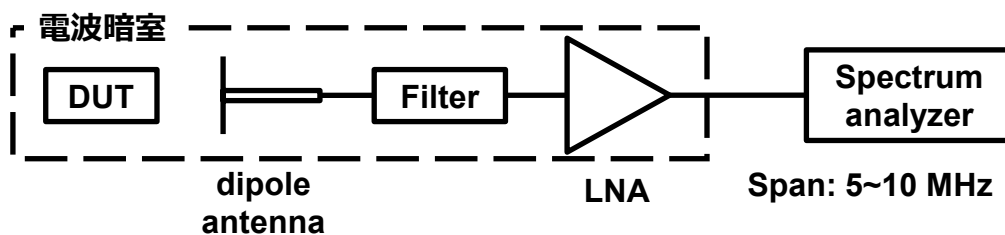


図 2-3 不要電波の狭帯域測定系 (LNA: 低雑音増幅器)

この不要電波の狭帯域測定系は、微弱な電磁波を検知可能な高分解能測定系であり、熱雑音と同等の不要電波を測定することができる。以下に、高分解能測定系を実現する手法について述べる。

一般的に、測定系の測定感度を向上させるためには、図 2-4 のように対象でない信号成分を減衰させることや、対象の信号成分を増幅させることがおこなわれる。ここで本稿における対象でない信号成分とは、外部環境ノイズ、増幅器によるノイズ、スペクトラム・アナライザによるノイズを指す。対象でない信号成分の影響を抑制する手法について述べる。まず、外部環境ノイズについては図 2-1、図 2-3 に示したように、測定系の一部を電波暗室内に配置することで影響を抑えている。つぎにスペクトラム・アナライザによるノイズについては、本稿において使用したスペクトラム・アナライザのノイズレベルは約-165 dBm/Hz であった。そこで、アンテナにより取得した不要電波がスペクトラム・アナライザに入力される際に、スペクトラム・アナライザによるノイズが影響しないように増幅器によって不要電波成分を増幅した。使用した増幅器は、増幅器によるノイズの影響を抑えるために雑音指数が 1.2 dB と低く、45 dB の高い利得を持つ LNA である。雑音指数とは、増幅器より発生するノイズの大きさを示しており、増幅器の利得が 0 dB であると仮定した場合において、-174 dBm/Hz の熱雑音が増幅器に入力された際の出力電力強度との差分で求められる[8]。本稿において使用した LNA から発生するノイズレベル、つまり入力換算ノイズ (P_m)、は式 2.1 のように示される。ここから、LNA の入力換算ノイズは約-179 dBm/Hz であることがわかる。この値は、熱雑音に対して十分低く、セルラー通信との干渉を引き起こしうる微弱な不要電波の測定に適する。さらに、LNA の利得が 45 dB であることから、ダイポールアンテナによって取得された信号成分は、LNA によってスペクトラム・アナライザによるノイズレベルよりも十分大きいレベルに増幅されることがわかる。以上のように測定対象でない信号成分の影響を抑えながら、測定対象の成分を増幅させることで高い感度の不要電波測定系を構築した。

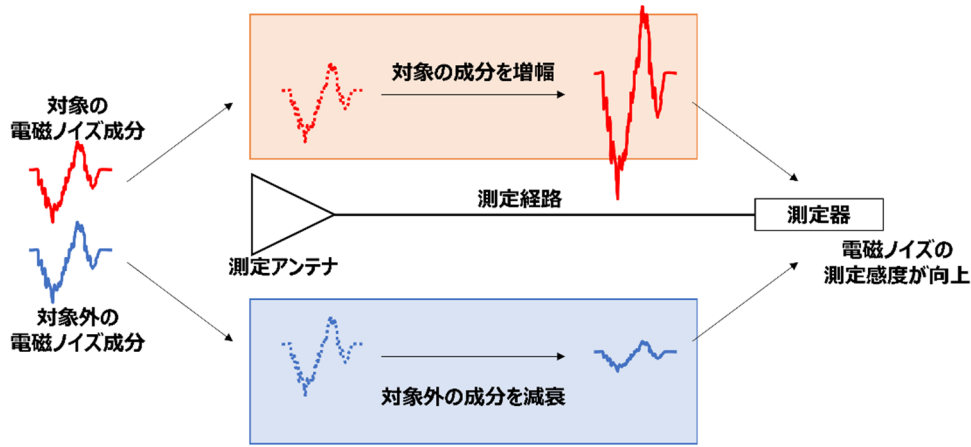


図 2-4 不要電波の測定感度向上手法

$$P_{in} = 10 \log \left(10^{(-174+NF)/10} - 10^{-174/10} \right) \quad (2.1)$$

本稿において、不要電波とセルラー系無線通信との電磁干渉について評価をおこなうため、通信端末に混入する不要電波の電力強度を把握することが重要である。LTE や 5G では通信感度を評価する際に、受信アンテナの出力端における受信電力強度を基準とする[6]。そこで本稿においても、通信端末の受信アンテナ出力端における不要電波の電力強度 (P_{noise}) を算出した。スペクトラム・アナライザで測定した不要電波の電力強度を P_{noise} に補正する手法について述べる。

はじめに、狭帯域測定系におけるケーブル等による経路損失と LNA の利得を図 2-5 のように定義する。これらの値は各周波数帯域において測定する。まず、 $Loss_1$ はケーブルと帯域制限フィルタを信号発生器とスペクトラム・アナライザに接続し、信号発生器から生成する Continuous wave (CW) 信号の減衰値を測定している。そして、測定系全体の利得を同様の手法で測定し、 $Loss_1$ を加算することで、Gain と $Loss_2$ の合計値である x を算出している。つづいて、アンテナ出力端における電力強度を P_{noise} 、スペクトラム・アナライザにおいて観測される電力強度を P_{SA} 、背景雑音レベルを P_{floor} と定義する。 P_{SA} から P_{noise} への補正式を式 2.2 に示す。補正においては、背景雑音レベルを引くことで不要電波そのものの電力強度を算出している。微弱な不要電波を測定する場合、LNA より前段部分の経路損失によって、取得した不要電波が背景雑音に埋もれる恐れがある。一方で、LNA の後段においては LNA に

よって測定対象の不要電波が増幅されているため、経路損失の影響が小さい。そのため、LNA の前段と後段で測定系による電力変化を区別している。

$$P_{noise} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{P_{SA} - x}{10}} - 10^{\frac{P_{floor} - x}{10}} \right) - Loss_1 \quad (2.2)$$

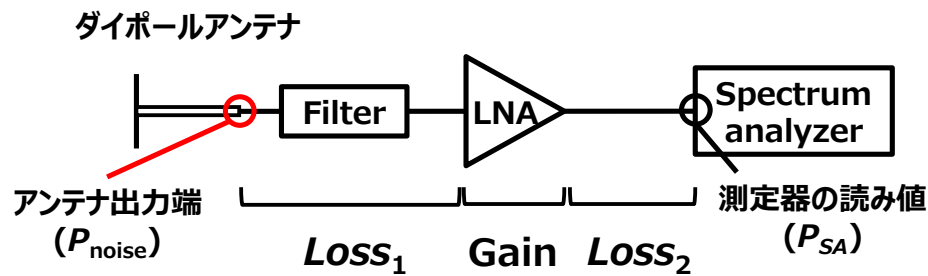


図 2-5 不要電波のアンテナ出力端における電力強度の算出方法

2.4 不要電波測定における測定感度

本節では、2.3 節において示した不要電波の狭帯域測定系の測定感度を検証する。信号発生器とアッテネータを狭帯域測定系におけるダイポールアンテナに取り込まれる不要電波と見立て、狭帯域測定系の精度を確認した（図 2-6）。なお、本稿において使用した信号発生器の出力下限値が -120 dBm であったためステップアッテネータを用いて入力信号を減衰させている。本稿では 840 MHz 帯域における値を示す。

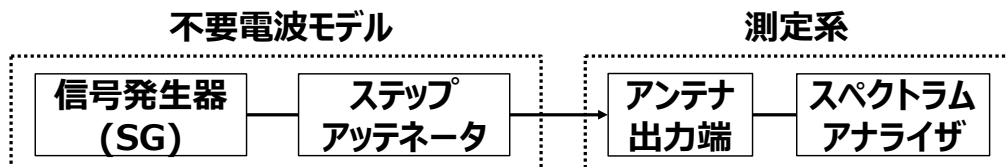


図 2-6 不要電波測定系における測定感度の検証方法

まず、不要電波の検出下限値について検証する。信号発生器とアッテネータで構成される不要電波モデルの出力レベルを変化させ、シグナルアナライザでの応答を確認した。図 2-7 の横軸は不要電波モデルの出力レベルであり、縦軸はシグナルアナライザの測定値である。信号の出力レベルが大きい場合

は線形に測定できているのに対し、出力レベルが -165 dBm/Hz 以下の場合は非線形となっている。これは背景雑音に対して測定信号のレベルが十分に大きくないことが原因であり、約 -185 dBm/Hz 以下では測定信号が背景雑音に埋もれてしまい正しく観測できていないことがわかる。本研究では測定値の校正により背景雑音を差し引いて不要電波の電力を算出するため、測定器における線形・非線形に関わらず測定信号を検知することが重要である。そこで、背景雑音に対して 1 dB 以上高く測定できる範囲を測定可能範囲としたところ、不要電波の検出下限値は -177 dBm/Hz であった。

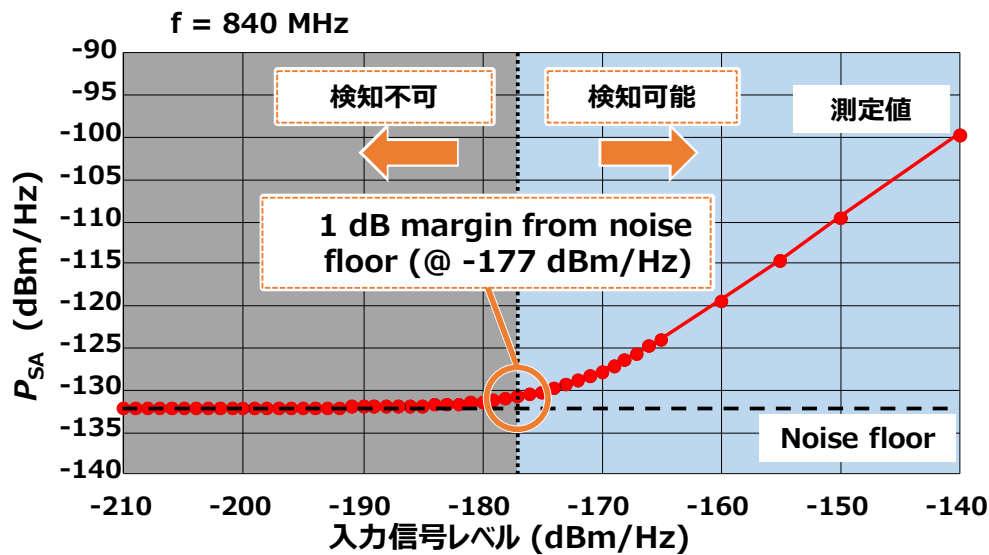


図 2-7 スペクトラム・アナライザ入力端における不要電波測定の下限值

次に、測定値校正方法の精度について検証する。図 2-6 に示す環境で測定した値を式 (2.2) によって背景雑音を差し引いたアンテナ端電力に補正した。ここでアンテナ端とはステップアッテネータの出力端を指すこととする。横軸を信号源レベル、縦軸を校正後のアンテナ端電力とした測定結果を図 2-8 に示す。測定値を校正した結果、本測定系の検出下限値である -177 dBm/Hz までは、校正することで信号源レベルと等しい値を算出できた。また、 -178 dBm/Hz から -190 dBm/Hz までは補正することで信号源と近い値にはなるものの、信号源とのずれが大きくなった。また、 -190 dBm/Hz 以下の範囲では測定値が背景雑音と等しく算出不能であった。

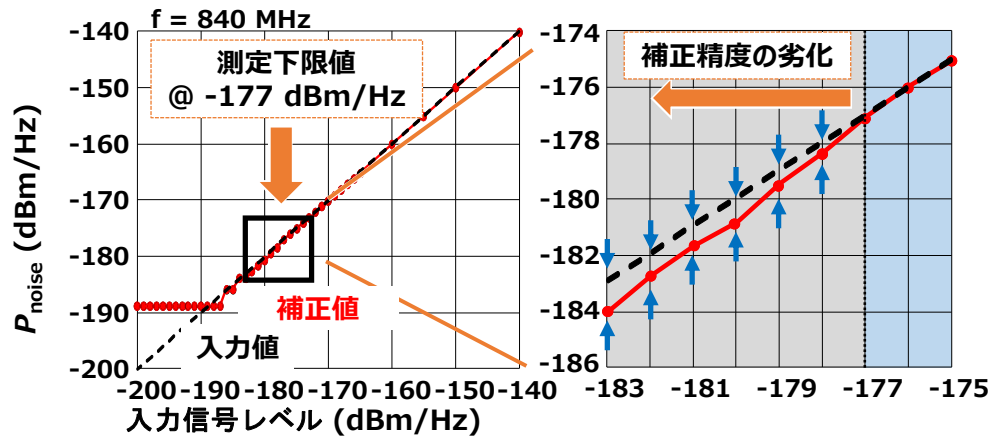


図 2-8 不要電波強度の補正式 (2.2) を用いた際の不要電波の測定下限値

以上の検証により，本研究における狭帯域測定系の測定下限値は-177 dBm/Hzであり，微弱な信号を検出できることが示された．本研究では狭帯域測定によって不要電波の帯域内波形を，2秒間のデジタルデータとして記録した．これによって不要電波の特性を時間や場所に依存せずに解析することができる．

2.6 まとめ

本章では，不要電波の高分解能測定技術について述べた．本研究において構築した不要電波測定系は広帯域測定と狭帯域測定からなる．広帯域測定では，セルラー系の無線通信に使用される 700 MHz から 6 GHz の広帯域において不要電波特性を一度に測定し，無線通信との干渉が懸念される特徴的な周波数帯域を選定する．選定した周波数帯域において狭帯域測定をおこない，無線通信のチャンネル帯域幅における不要電波の電力強度を測定する．狭帯域測定では，低電力においても規格されるセルラー系無線通信に影響を及ぼしうる微弱な不要電波を観測するために高分解能測定系を構築した．高分解能な測定を実現するために，入力換算ノイズがおよそ-179 dBm/Hz で利得 45 dB の増幅器を活用し，スペクトラム・アナライザの入力電力範囲を超えないように適宜帯域制限フィルタを用いることで，-177 dBm/Hz まで測定できる環境を構築した．この測定下限値は，セルラー系無線通信の感度劣化が発生しうる不要電波強度よりも低く，安定した測定を可能としている．また，時間領域の変化を含んだデジタルデータとして記録することで，電波暗室等の特殊な設備を必要とする不要電波の測定・解析の効率化を実現した．

第 3 章

無線通信システムにおける 電磁干渉解析技術

3.1 はじめに

本章では，セルラー系無線通信を対象とした無線通信品質評価環境について述べる．無線通信品質評価環境に，2 章において述べた不要電波の高分解能測定系により記録した不要電波データを取り込むことで，電磁干渉による影響の推測が可能である．3.2 節において，無線通信品質評価による電磁干渉評価の必要性について述べる．3.3 節において，実機を活用した無線通信品質の評価系を示す．3.4 節において，シミュレーションによる評価系を示し，実機との評価精度を比較する．

3.2 無線通信システムにおける電磁干渉課題

現在移動通信では 6 GHz 以下の Sub-6 GHz 帯域を利用しており，5G ではさらに周波数利用帯域が拡大される見込みである[9]．そのため不要電波干渉評価もそれぞれの周波数帯域で行う必要がある．また，LTE などの移動通信は低電力でも運用されており，動作を保証する最小受信電力は-100 dBm/5 MHz と規格で定められている（Band 1，帯域 5 MHz，QPSK (quadrature phase shift keying) 変調方式）（表 3-1）．この規格は搬送波とノイズの比である CNR (carrier to noise ratio) が 3 dB と定義されており，LTE 受信機器は-170 dBm/Hz 以下の搬送波であっても問題なく動作していることになる．この低電力で運用される移動通信に対する干渉評価を行うため，不要電波の測定も-170 dBm/Hz 以下の微弱な信号を検知する必要がある．

表 3-1 LTE 通信における最小受信感度の規格値[10]

Channel bandwidth							
E-UTRA Band	1.4 MHz (dBm)	3 MHz (dBm)	5 MHz (dBm)	10 MHz (dBm)	15 MHz (dBm)	20 MHz (dBm)	Duplex Mode
1	-	-	-100	-97	-95.2	-94	FDD
2	-104.2	-100.2	-98	-95	-93.2	-92	FDD
...	...	...	...	...	...	...	...

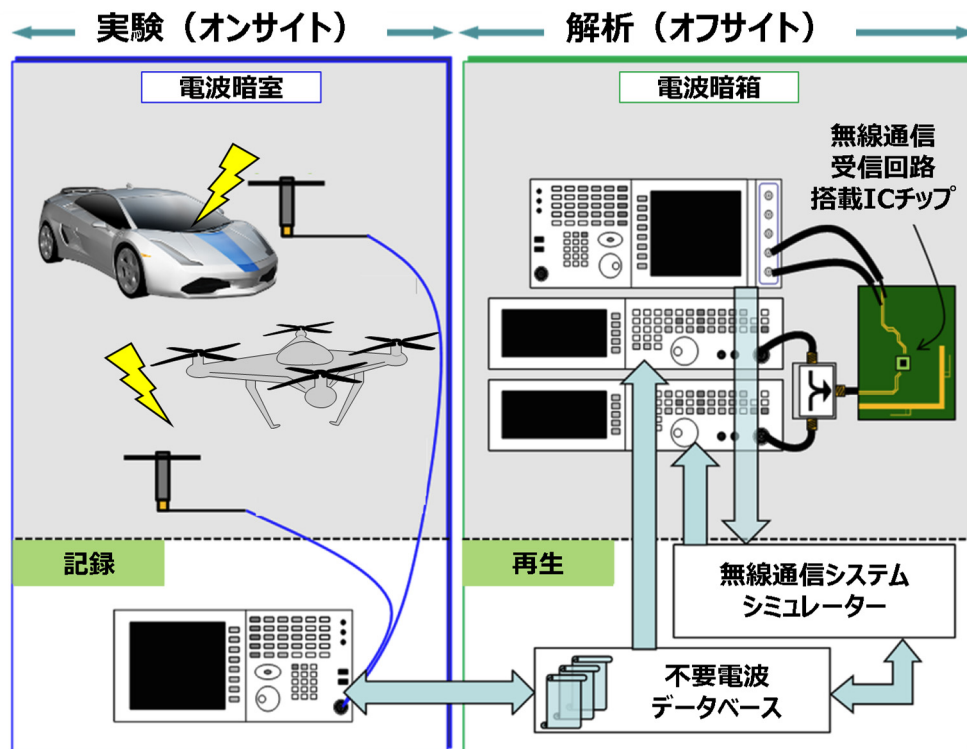


図 3-1 実測とシミュレーションによる効率的な無線通信品質の評価環境

本研究では、Sub-6 GHz 帯域における不要電波の高分解能測定技術と通信システムシミュレータによる不要電波干渉評価技術を確立し、電子機器近傍において発生する不要電波の移動通信への干渉評価を行った。移動通信の評価対象として現在最も普及している LTE 通信を取り上げ、基地局から受信機へ通信を行う際の受信感度を評価している。シミュレーションでの評価を行うことで、各周波数帯域に応じた評価チップを製造する必要がなくなり時間と費用の大幅な削減につながっている。さらに不要電波の録音再生技術によって不要電波の測定環境と移動通信品質の評価環境を切り分けることができ、通信品質の評価や対策技術の評価毎に不要電波発生源となる装置を用意する必要がなくなっている（図 3-1）。このことにより、効率的な不要電波干渉評価及び対策技術の評価を実現した。

3.3 実機とシミュレーションによる無線通信品質評価

本節では、電子機器から発生する不要電波による LTE 通信への影響を、実機を用いて評価する環境について述べる。本稿では、実際の無線通信において基地局から端末に送信されるダウンリンク信号は、取得する場所は時間によって電力強度が変化する。そこで、実機の無線通信品質を評価する際は、受信感度に大きく影響する RF (Radio frequency) フロントエンドを実機で製造し、基地局からのダウンリンク信号と RF フロントエンドの取得データを解析する環境をシミュレーションで再現した。こうした実機とシミュレーションを連動させて動作する環境を HILS (hardware in the loop simulation) 環境と呼ぶ。

先行研究において、LTE 級 RF フロントエンドを実装した IC チップと無線通信システムシミュレータを用いた HILS 手法による LTE 通信品質評価系を構築している[11, 12]。この評価系を図 3-2 に示す。まず、ソフトウェア上で 3rd generation partnership project (3GPP) による規格に沿った LTE 受信通信データを生成する[6]。この受信信号は中心周波数やチャネル帯域幅、変調方式等は任意に設定可能である。この受信信号データを信号発生器に格納後、実信号として出力する。信号発生器から出力された LTE 受信信号は同軸ケーブルを介して RF フロントエンドを実装した IC チップに入力される。RF フロントエンドは図 3-3 のようなダイレクトコンバージョン方式の構成を

しており、携帯端末等の実製品と同等の特性を持つ。ベースバンド信号にダウンコンバートされた、IQ 信号の出力は、同軸ケーブルを介してスペクトラム・アナライザに入力され、AD (analog to digital) 変換された後に、デジタルデータとして通信システムシミュレータに取り込まれスループットが解析される。

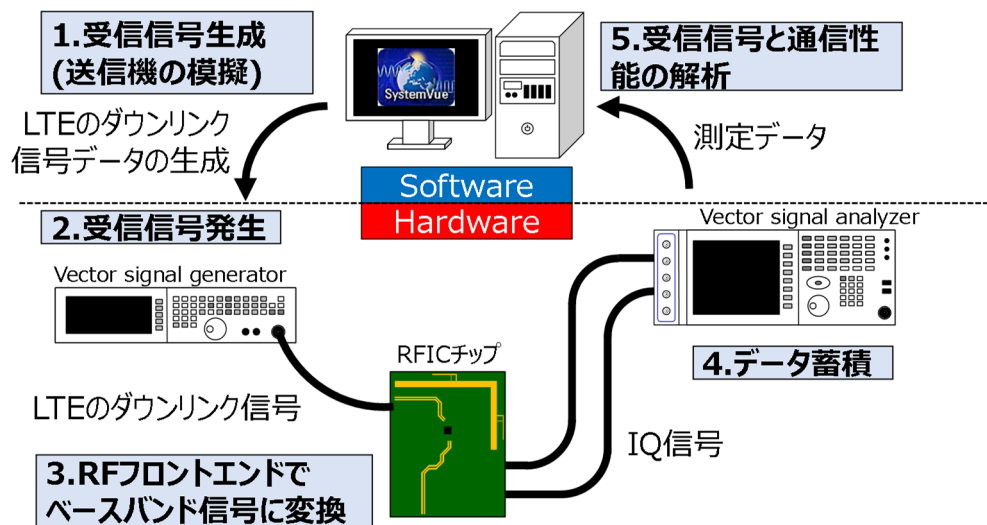


図 3-2 HILS 手法による LTE 通信品質評価系

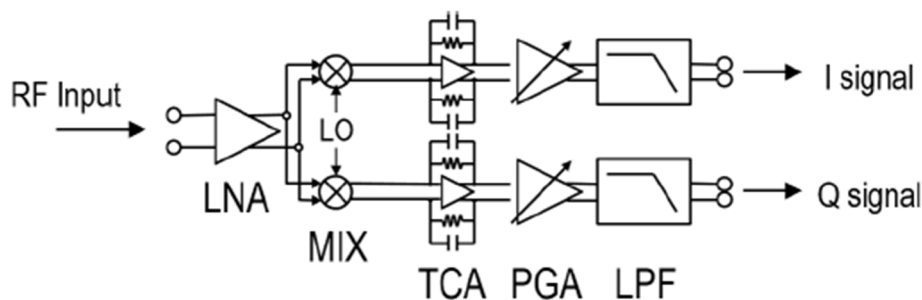


図 3-3 RF フロントエンドチップの回路構成図 (MIX: mixer, TCA: Trans conductance amplifier, PGA: Programmable gain amplifier, LPF: Low pass filter, LO: Local oscillator)

この評価系を用いて不要電波と LTE 通信の電磁干渉評価を行った。表 3-2 に本稿における LTE の通信方式を示す。2 章において述べた不要電波の狭帯域測定系を用いて、不要電波の電力強度を測定し 2 秒間の IQ 信号データとし

て記録した不要電波データを LTE 受信信号に重畳する．これによって，無線通信端末の通信アンテナにおける不要電波と無線通信信号の電磁干渉を再現する．不要電波データは信号発生器を用いて出力し，ディバイダーを用いて LTE 受信信号と重畳させる．なお，ディバイダーの 3 dB の挿入損失を考慮して LTE 受信信号と不要電波データの出力レベルを調整する．図 3-4 に不要電波を重畳していない場合の通信品質と，重畳させた場合の通信品質を示す．なお，使用した不要電波データについては 4 章にて述べる．横軸は基地局から送信されたダウンリンク信号の，端末のアンテナ出力端における電力強度を示しており，縦軸は受信端末におけるスループットを示している．3GPP の規格では LTE 通信における受信感度として，スループットが 95 %以上を満たす最小の受信電力強度によって定められる最小受信感度を使用している．そこで，本稿においてもこの最小受信感度を用いて通信品質評価を行った．不要電波を重畳していない場合の最小受信感度は-103 dBm/5 MHz となり，3GPP の規格値を満たす結果となっている[10]．

表 3-2 HILS 環境における LTE 通信方式

中心周波数	2.12 GHz (Band 1)
キャリア帯域幅	5 MHz
変調方式	QPSK
信号フレーム数	200

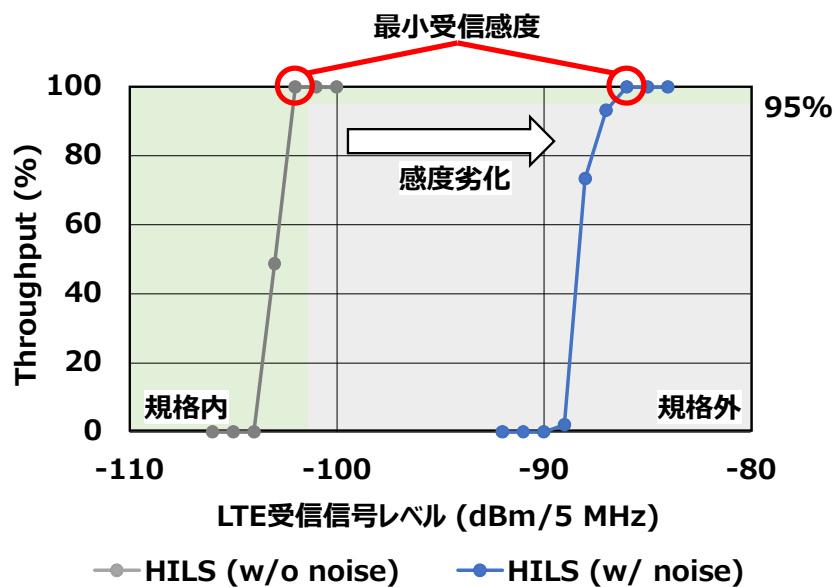


図 3-4 HILS 環境における不要電波と LTE 通信信号の電磁干渉評価結果

こうした実機を用いた評価環境は、実際の無線通信品質を評価できるものの、評価可能な通信方式は実機性能に依存している。先行研究において使用している RF フロントエンドは Band1 とよばれる 2.1 GHz 帯の無線通信にのみ対応しており、本稿における HILS 環境による不要電波と無線通信の干渉評価は 2.1 GHz に限定される。様々な周波数帯域やチャネル帯域幅において不要電波と無線通信の干渉を評価するためには、実機による評価条件の制約が課題となる。

この無線通信システムシミュレータ上での評価系は HILS 手法における評価環境を基に構築されており、評価チップに搭載されている RF フロントエンドの構造を再現している (図 3-6)。実機における RF フロントエンドは低雑音増幅器 (LNA)、直交復調器 (Mixer)、電流電圧変換器 (TCA)、利得可変増幅器 (PGA)、低域通過型フィルタ (LPF) で構成されている。一方、通信システムシミュレータ

上の RF フロントエンドは LNA, Mixer と 2 段の増幅器(AMP)で構成される. 実機における TCA 及び PGA の役割は信号の増幅であるため, 単純な AMP で代用しシミュレーションの計算を簡易化している. また, LPF の役割は帯域外の信号を減衰することであるが, シミュレーション上におけるサンプリングレートは帯域内に制限されており帯域外の信号を減衰する必要がないため省略している. なお, それぞれのモデルの利得や NF, 歪み特性などのパラメータは実機の値に基づいている. シミュレーション評価環境での RF フロントエンドも HILS 環境同様に, ダイレクトコンバージョン方式で運用されておりベースバンドの IQ 信号として出力される.

<Simulator>

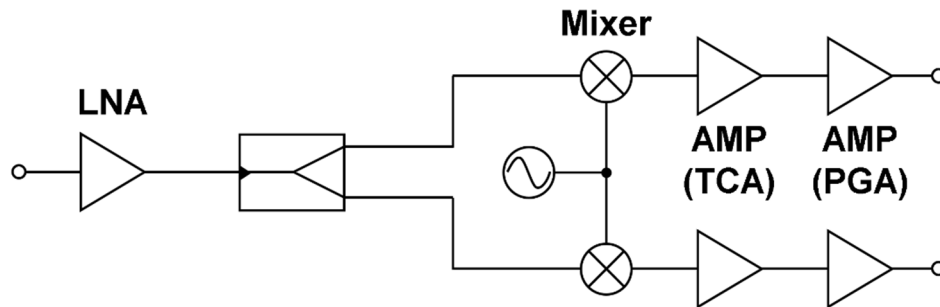


図 3-6 シミュレーション環境における RF フロントエンドモデルの回路構成図

次に, この評価系の運用手法について説明する (図 3-7. HILS 環境同様に 3GPP の規格沿った LTE 受信信号が生成され, 通信システムシミュレータ内に取り込まれた不要電波の録音データと重畳される. この際, それぞれの信号の周波数と電力レベルが発振回路モデルによって設定される. その後, 重畳された 2 つの信号は背景ノイズが加えられた後に RF フロントエンドに入力される. なお, RF フロントエンドからの IQ 出力は本来の実機での信号処理であればベースバンド信号のまま解析が行われるが, 通信システムシミュレータにおける受信機モデルは RF 信号として解析を行うので, RF 信号にアップコンバートされた後に受信機モデルに入力される. 最後に, 受信機モデルによって一定時間内におけるデータ処理能力である Throughput (%) が移動通信性能として解析される. 3GPP における規格では, このスループットが 95 % 以上を満たす最小受信電力を受信感度の指標としており, Band 1 (5 MHz 帯域, QPSK 変調方式) における最小受信電力は -100 dBm/5 MHz と定められている [10]. この最小受信電力はそれぞれの周波数帯域において定められており, 5 MHz 帯域の QPSK 変調方式で

は-97 から-100 dBm/5 MHz である。また多くの Band において最小受信電力は -100 dBm/5 MHz とされているため、本研究では全ての周波数帯域で-100 dBm/5 MHz を基準規格値とし、不要電波干渉の評価を行った。図 3-8 に不要電波の干渉による RF フロントエンドの出力波形変化を示す。青の波形は不要電波を重畳していない場合で、LTE 受信信号レベルは-75 dBm/5 MHz である。中心周波数は 840 MHz であり、この時のスループットは 100%であった。それに対し、赤の波形は不要電波を重畳した場合であり、LTE 受信信号が不要電波によって埋もれてしまっていることが確認できる。この際のスループットは 88%であり、無線通信が劣化していることが確認できた。

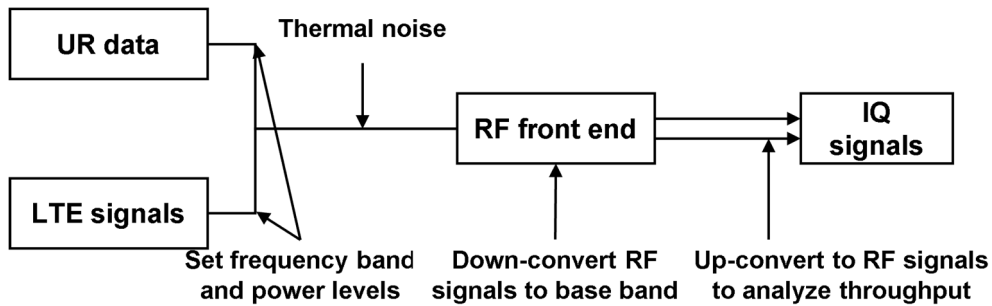


図 3-7 無線通信システムシミュレーションによる LTE 通信品質評価の流れ

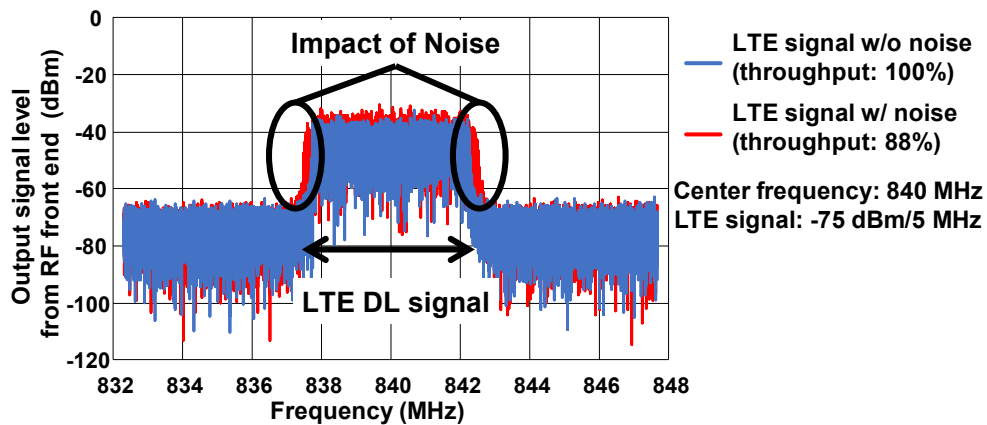


図 3-8 不要電波を重畳した場合の RF フロントエンドモデルの出力波形

本研究において構築したシミュレーション環境とこれまでの HILS 手法による実機を用いた評価環境系の整合性について確認した。不要電波を重畳せずに LTE 受信感度を測定した場合と、不要電波を重畳させ LTE 受信信号との干渉の度合いを測定した場合で HILS 手法とシミュレーションによる測定結果の比較

を行った (図 3-9). 不要電波を重畳させない場合, LTE 受信感度を示す最小受信電力 (スループット 95%以上) はどちらの評価方法においても -103 dBm/5 MHz であった. また, ある不要電波の録音データを重畳した場合の最小受信感度も -86 dBm/5 MHz で等しいことが確認できた. スループットのグラフもほぼ一致していることから, 本研究において構築した無線通信システムシミュレータによる LTE 受信感度評価環境が信頼性の高い評価環境であるといえる.

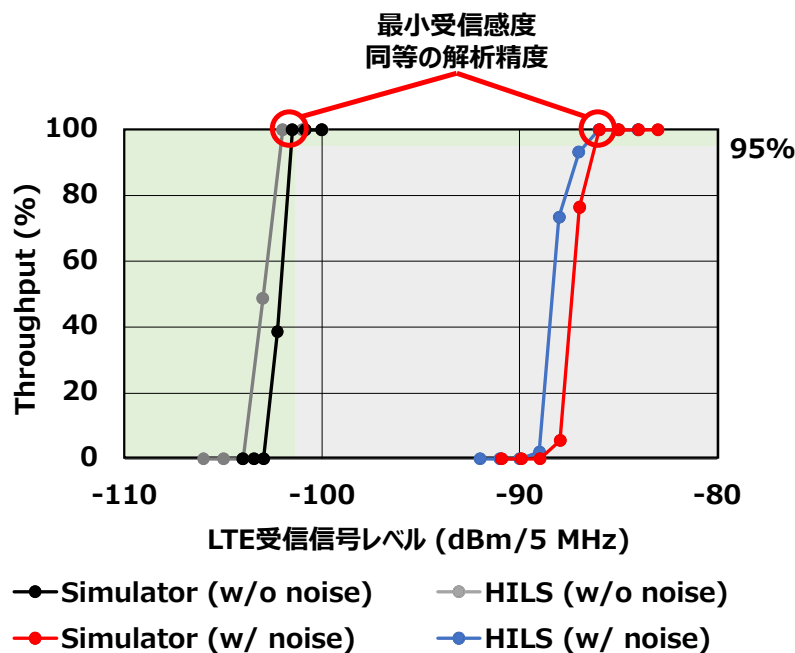


図 3-9 HILS 環境とシミュレーション環境における不要電波と LTE 通信信号の電磁干渉評価結果の比較

本シミュレーション環境は, 通信方式や使用周波数帯域の変更や, 異なる無線通信システムへの応用が可能である. 既に, LTE 通信を対象とした評価環境を応用し 5G 通信に対応したシミュレーション評価環境を構築している. この 5G 通信用のシミュレーション評価環境では, 5G の規格に応じて変調方式や通信チャネル帯域幅の拡張が可能である. さらに, 本シミュレーション環境を全地球測位衛星システム (GNSS) へも展開しており, GPS (Global positioning system) と不要電波の電磁干渉性を解析するシミュレーション環境を構築している. 様々な無線通信システムが利用されている現代において, このように他の無線通信方式への展開が可能なシミュレーション環境は, 複雑な電磁環境における不要電波問題の評価および対策に有効である.

3.5 まとめ

本章では，不要電波とセルラー系無線通信信号の電磁干渉を評価するための無線通信品質評価環境を示した．実機を活用した HILS 環境と無線通信の受信回路をシミュレーション上で再現した評価環境を構築し，それぞれの環境における LTE 通信の最小受信感度を評価したところ，双方の結果は等しく実機同等のシミュレーション評価環境であることが確認できた．

不要電波と無線通信との電磁干渉解析において，空間で観測される不要電波特性を測定するだけでなく，電磁干渉の影響を受けた場合の無線通信品質の応答評価を実現したことで，実環境に近い電磁干渉の解析を可能としている．さらに，このシミュレーションを活用した通信品質評価系では，通常，電波暗室といった専用の設備を必要とする評価を，不要電波のデジタルデータ化とシミュレーションによる解析によって，評価環境に依らない効率的な電磁干渉評価を実現している．これによって，不要電波対策効果の評価などにも活用することができる．

第 4 章

無線通信機器における 電磁干渉評価

4.1 はじめに

本章では、不要電波と無線通信の電磁干渉評価について述べる。はじめに、4.2 節において、半導体 IC チップを搭載した評価基板から発生する不要電波と無線通信の電磁干渉を評価し、評価系の有効性を確認する。つぎに、複数の半導体 IC チップ搭載モジュールが実装された実製品における電磁干渉評価をおこなう。本稿において対象とする電磁干渉は、不要電波の発生源となる電子機器と電磁干渉を受ける無線通信機器が別であった場合の相互干渉と、同一であった場合の自己干渉を評価する。相互干渉では、自動車への無線給電装置から発生する不要電波と、その近傍に配置される無線通信端末との電磁干渉を評価する。また、自己干渉においては、無線通信によって制御される産業用ドローンを対象とした電磁干渉評価をおこなう。相互干渉の評価結果を 4.3 節に、自己干渉の評価結果を 4.4 節に示す。

4.2 IC チップから発生する不要電波による電磁干渉 評価

本節では、半導体 IC チップを搭載した評価基板から発生する不要電波の評価と、その不要電波による無線通信品質への影響を評価する。本稿では、ガリウムナイトライド (GaN) 素子を搭載した電源モジュールを評価対象とした。GaN 素子は従来のシリコン素子と比較して物質特性が優れており、電

源モジュールの高性能化や小型化が期待されている[13–16]。しかし、GaN 素子を用いた電源モジュールからは、シリコン素子を用いた場合よりも広帯域にノイズが発生することが知られており、空間に伝搬する恐れがある[17–19]。さらに、動作周波数の高速化や動作電力の増加によって、より強い不要電波が広帯域に及び、無線通信と干渉する恐れがある。そこで、GaN 素子を搭載した電源モジュールを評価対象とし、IC チップから発生する不要電波による電磁干渉を評価した。なお、2 種類の GaN 素子搭載電源モジュールを用意し、電磁干渉の一般性についても確認した。

本稿で使用した 2 種類の GaN 素子を搭載した電源モジュール(以下、GaN モジュール A、GaN モジュール B) の仕様を表 4-1 に示す。また、どちらの評価基板もハーフブリッジ方式による同期整流型で絶縁方式の電源モジュールであり、図 4-1 に示すような構成をしている。電源モジュールは機能的に GaN 素子を含む出力段回路部と、GaN 素子を駆動する制御回路部に区分される。制御回路部はどちらの評価基板もシリコン素子を使用している。評価基板の駆動には、出力段電力を供給する出力段電源、制御回路を駆動する回路用電源、電源モジュールのスイッチング周波数を定める矩形波信号発生器といった外部入力装置を使用する。回路用電源からは評価基板の仕様に順じて 12 V の電圧を供給しており、出力段電源と矩形波信号発生器の設定は、評価目的に応じて設定した。本稿における評価では、基準とする動作条件を表のように、出力段電圧を 12 V、矩形波周波数を 100 kHz、矩形波のデューティ比を 50 % と定めた。こうした条件において動作している電源モジュールから観測される不要電波を測定し、出力段回路部と制御回路部から発生する不要電波を特定した。そして、それぞれの電源モジュールから発生する不要電波と無線通信との電磁干渉を評価した。

表 4-1 GaN 素子搭載電源モジュール特性諸表

	GaN モジュール A	GaN モジュール B
回路方式	ハーフブリッジ方式	
絶縁/非絶縁	絶縁	
最大出力電圧	650 V	450 V
最大出力電流	60 A	35 A
最大動作周波数	10 MHz	3 MHz

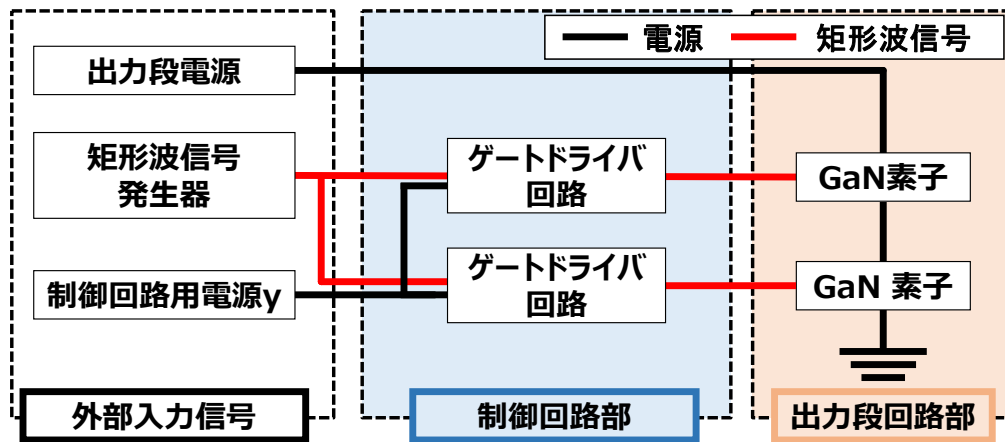


図 4-1 GaN 素子搭載電源モジュールの構成

本稿における、不要電波の測定位置の概略図を図 4-2 と図 4-3 に示す。使用した測定アンテナは磁界プローブであり、2 章において示した評価系によって不要電波を測定した。

GaN モジュール A は、出力段回路部と制御回路部が別の基板に実装されており、それぞれの基板が重ねられている。そのため、不要電波の発生源を特定する際に、測定位置を変更することによる不要電波の空間的な分離が困難である。そこで、回路の動作状態を変えることにより不要電波の発生源を特定した。具体的には、出力段電圧を変更することで電源モジュールの動作状態を変更し、不要電波の発生源を特定した。出力段電圧を 12 V とした際の不要電波は出力段回路部と制御回路部の双方を発生源とする成分が含まれており、出力段電圧を 0 V とした際の不要電波は制御回路部を発生源とする成分のみである。これらの不要電波を比較することで GaN モジュールにおける不要電波発生源を特定した。GaN モジュール B では、出力段回路部と制御回路部が同一基板の裏面と表面に実装されている。そこで、回路の動作状態の変更に加えて、磁界プローブの位置を出力段回路直上と制御回路直上に変更させることで、不要電波の発生源を特定した。

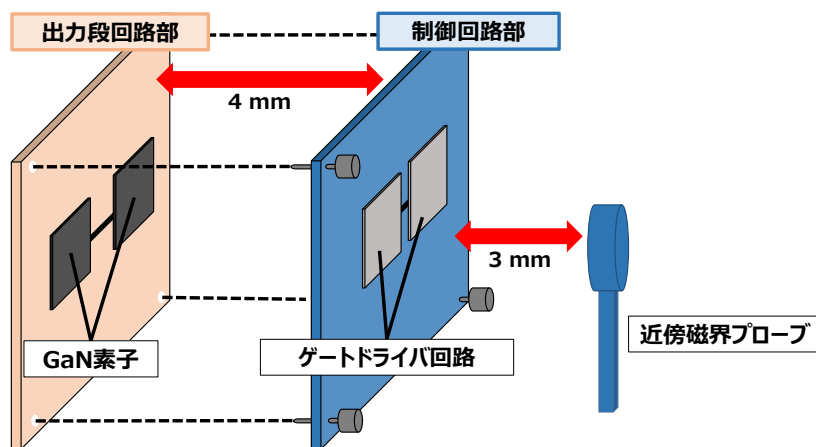


図 4-2 GaN モジュール A における不要電波の測定位置

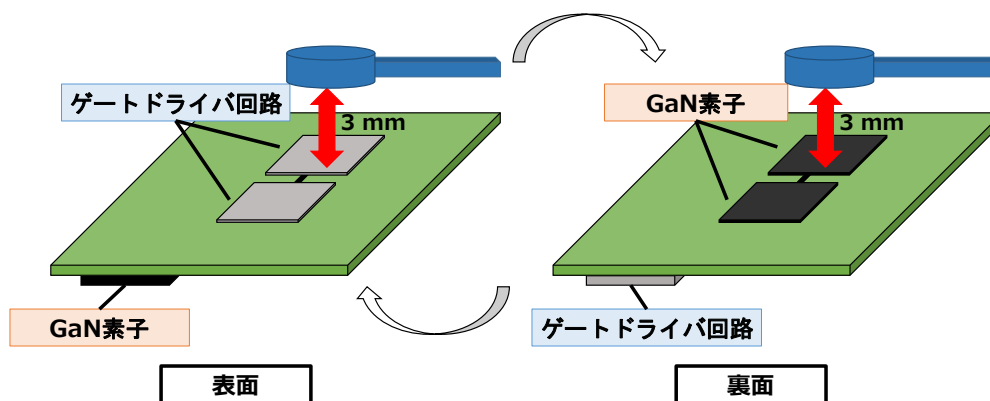


図 4-3 GaN モジュール B における不要電波の測定位置

GaN モジュール A, B に対する広帯域の不要電波評価結果を図 4-4 と図 4-5 に示す。それぞれの結果において、出力段電圧を 12 V として出力段回路部と制御回路部の不要電波が含まれている波形を青線で示し、出力段電圧を 0 V として制御回路部の不要電波波形を赤線で示す。それぞれの不要電波特性に差分が見られる周波数帯域が、出力段回路部から発生する不要電波の影響が大きいことを示す。これらの評価結果から、出力段回路部と制御回路部から発生する不要電波が全く異なる周波数特性であることが確認できた。出力段回路から発生する不要電波は、動作周波数 100 kHz の高調波成分であり、周波数が高くなるにつれて電力強度が低下し約 2 GHz 付近で背景ノイズに埋もれている。これは、少なくとも 20,000 次の高調波が観測されていることを示す。一方で、制御回路から発生する不要電波は、動作周波数に依存せず観測されている。特に GaN モジュール A では、550 MHz 帯の 4 本のスプリアス

成分を基本波とし、その高調波成分が 6 GHz までの広帯域において観測されている。この不要電波の発生要因としては、制御回路部に実装されている低電圧誤動作防止装置であると推測される。また、制御回路部から発生する不要電波成分は図 4-6 のように個体差が観測されており、無線通信との干渉が起こりうる周波数帯域も変化する恐れがある。

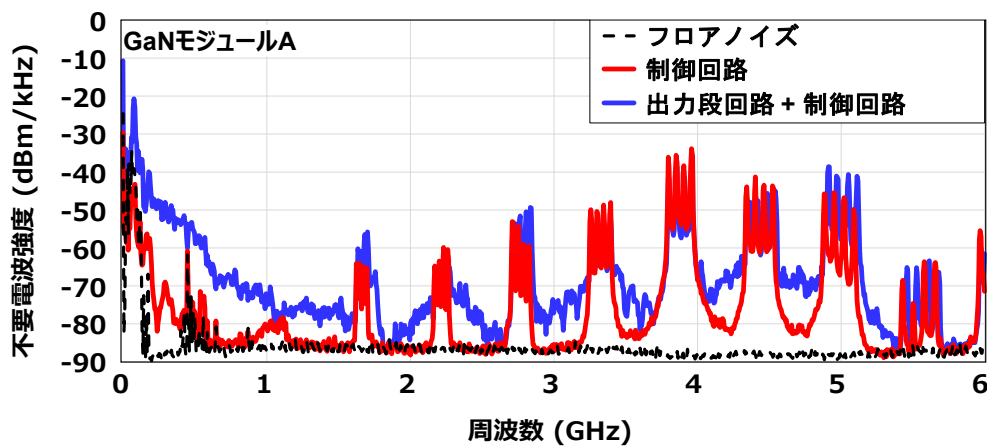


図 4-4 GaN モジュール A における不要電波特性

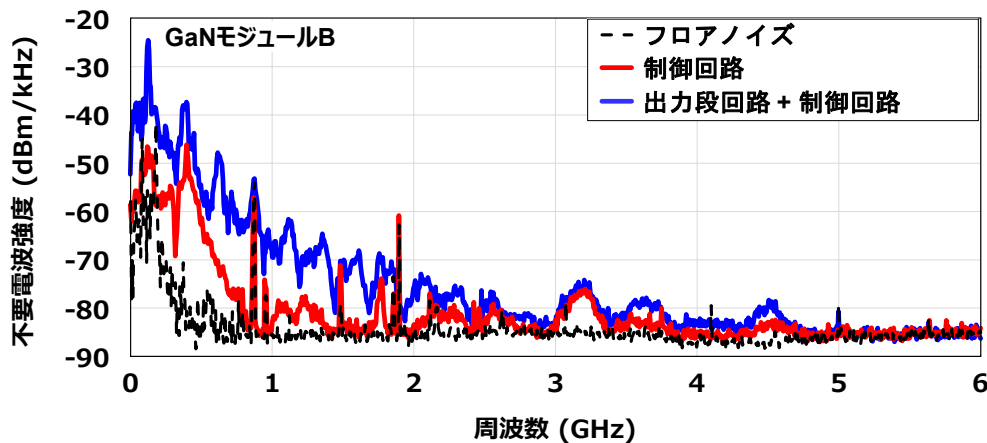


図 4-5 GaN モジュール B における不要電波特性

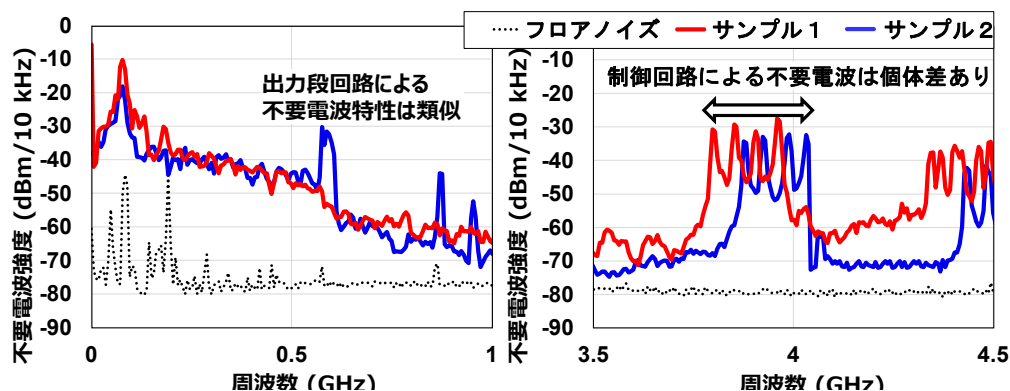


図 4-6 GaN モジュール A の制御回路部から発生する不要電波の個体差

つづいて、電源モジュールの動作状態による不要電波の変化を確認した。電源モジュールは搭載される機器によって様々な条件で動作される。そのため、電源モジュールの動作状態による不要電波特性の変化を理解することで、電源モジュールにおける電磁干渉発生メカニズムを解明することができる。本稿では、電源モジュールの動作周波数を変化させた際の不要電波特性を評価した。図 4-7 と図 4-8 にそれぞれの評価基板において、動作周波数を 100 kHz と 1 MHz とした場合の広帯域不要電波特性を示す。動作周波数の変化によって、出力段回路部から発生する不要電波の電力強度が約 20 dB 増加していることが確認できる。また、その際のより詳細な不要電波成分を確認したところ、電源モジュールから発生する不要電波成分は図 4-9 のように動作周波数に応じて変化している。一方で制御回路部から発生する不要電波特性は、電源モジュールの動作状態に依存しないことが確認できた。こうした特性はどちらの電源モジュールにおいても観測されており、GaN 素子を用いた電源モジュールの一般的な特性であるといえる。

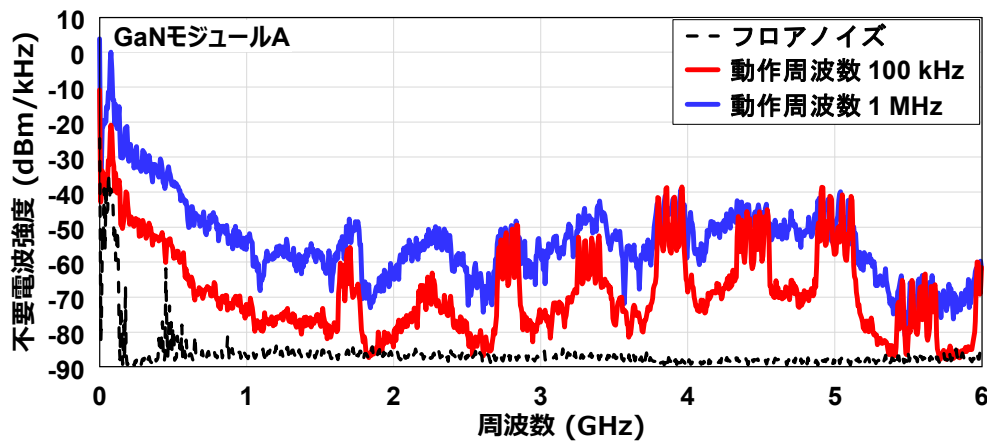


図 4-7 GaN モジュール A における動作周波数による不要電波特性の変化

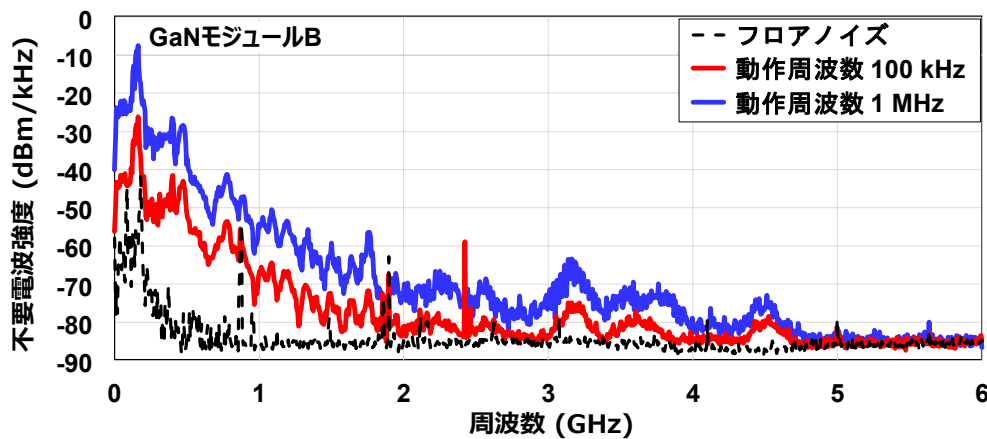


図 4-8 GaN モジュール B における動作周波数による不要電波特性の変化

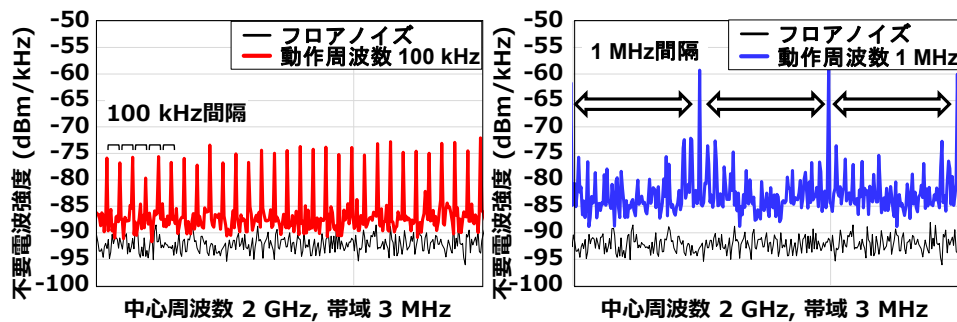


図 4-9 電源モジュールの動作周波数によるスプリアスの変化

電源モジュールから発生する不要電波による無線通信品質への影響を、3章における LTE 通信品質評価系を用いて評価した。本稿では、GaN モジュール A において出力段回路部の不要電波が支配的に観測される 800 MHz 帯と制御回路部の不要電波が支配的に観測される 4.5 GHz 帯に着目した。基本の動作条件としているスイッチング周波数が 100 kHz の場合において、5 MHz のチャネル帯域幅における不要電波の電力強度はそれぞれ -168 dBm/Hz, -153 dBm/Hz であった。この値を元に LTE 通信品質を評価したところ、図 4-10 のように最小受信電力が不要電波によって、それぞれ約 3 dB, 16 dB 劣化しうることが確認できた。また、動作周波数を 1 MHz とした場合の不要電波の帯域内電力は、それぞれ、-148 dBm/Hz と -152 dBm/Hz であり、図 4-11 に示すように LTE の最小受信感度が約 20 dB, 17 dB 劣化しうることが確認できた。

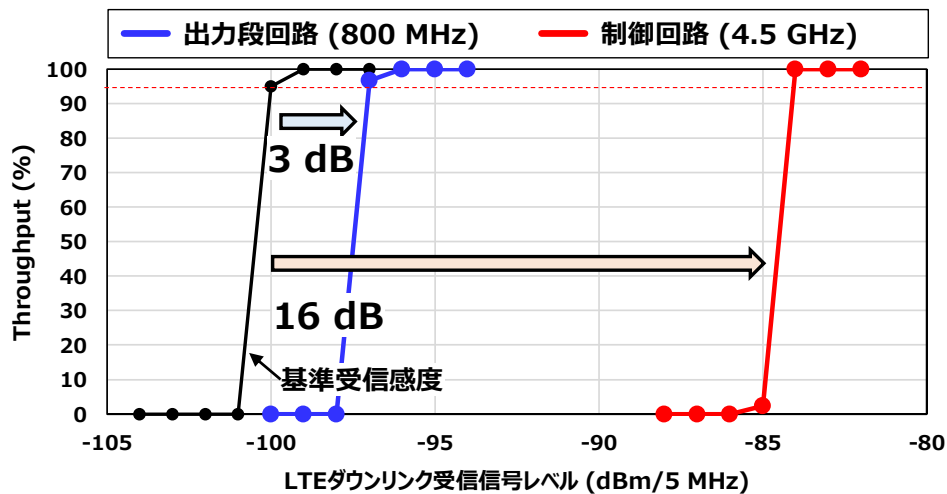


図 4-10 電源モジュールから発生する不要電波による LTE 通信への干渉性評価

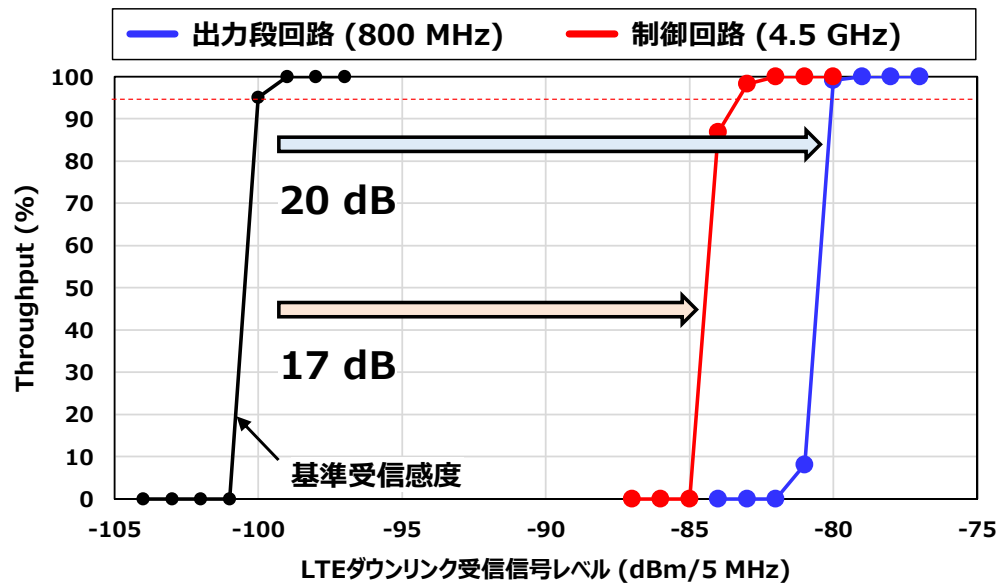


図 4-11 電源モジュールの動作周波数による通信干渉性の変化

以上のように、電源モジュールを対象に IC チップから発生する不要電波と LTE 通信の電磁干渉を評価した。電源モジュールから発生する不要電波は広帯域に及び、無線通信機器が近接配置された場合は電磁干渉を引き起こすことが確認できた。電源モジュールから発生する不要電波の特性は、発生源によって異なる。出力段回路部から発生する不要電波は電源モジュールの動作周波数が高速になることでより広帯域に影響が及ぶ。また、制御回路部から発生する不要電波は電源モジュールの動作条件に依らず常に発生しており、常に無線通信に影響を及ぼす恐れがある。電源モジュールは全ての電子機器に搭載される部品であり、無線通信品質の高い信頼性が求められる機器においては、こうした不要電波評価と電磁干渉対策が重要である。IC チップごとの不要電波を測定し無線通信との干渉性を評価することで、2 章及び 3 章で述べた本稿の電磁干渉評価系の妥当性を確認した。以降の節において、製品レベルでの電磁干渉評価について述べる。

4.3 電子機器間における電磁干渉評価

本節では，不要電波の発生源と不要電波の影響を受ける被干渉物が異なる場合の電磁干渉評価について述べる．電子機器間の電磁干渉評価における評価対象として，図 4-12 のような GaN 素子を搭載した電気自動車への無線電力伝送（WPT）システムを用意した[20]．この WPT システムは送電ユニットと送電コイル，受電コイルから構成されており，表 4-2 に示すように動作周波数 87.5 kHz のインバータ回路を搭載しており，最大の出力電力は約 7 kW である．また，本稿において対象とした WPT システムは EMC 試験によって不要電波の電力強度が CISPR 11 (class A, group 2) [21]で定められる許容値を満たしていることが確認されている．しかし，1.1 節でも述べたように，EMC 試験では 10 m の遠方において不要電波が測定されており，セルラー系無線通信との電磁干渉を対象としたものではないため，装置近傍においては LTE 等の無線通信品質が劣化している恐れがある．そこで本稿において，機器近傍における LTE 通信との電磁干渉性を評価した．



図 4-12 電気自動車（EV）用無線電力（WPT）伝送システム

表 4-2 WPT システム諸表

Power	3 phase 200 V
Frequency	87.5 kHz
Switching module	GaN
Resonance method	Tx: series-parallel Rx: parallel-series
Output voltage	DC 350 V
Output power	Up to 7 kW
Tx – Rx distance	100 – 150 mm

本稿では，電気自動車への無線給電中に発生する不要電波と無線通信との電磁干渉を評価した．まず，WPT システムにおける不要電波発生源を特定した．大型電波暗室のターンテーブル上に，電気自動車，送電ユニット，送電コイル，受電コイルを配置し，3 m の距離から不要電波の電力強度の角度依存性を確認した．WPT システムにおいて，本稿で対象とする 700 MHz から 6 GHz までの不要電波は図 4-13 のように主に送電ユニットから発生していることが確認できた．コイル間の送電部においては，送電ユニットにより整流された 85 kHz 帯の信号が送電されているため，対象とする周波数帯域においては不要電波が観測されない．そのため，送電ユニットに着目して不要電波と無線通信の電磁干渉を評価した．

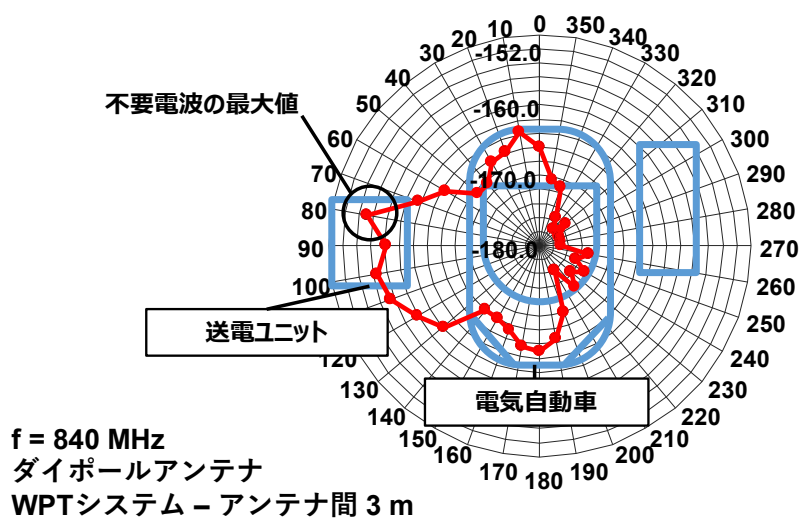


図 4-13 WPT システムから発生する不要電波の角度依存性

送電ユニットは金属筐体であるが、前面パネル部に開口部が存在する（図 4-14）。局所性の高い磁界プローブを用いて、送電ユニットにおける不要電波特性を確認したところ、この開口部から最も強く不要電波が漏洩していた。そこで、本稿では、フロントパネルの開口部において不要電波を測定した。まず、2 章で述べた不要電波の広帯域測定系により、対象とする 6 GHz までの周波数帯域における不要電波特性を測定した。使用した測定アンテナはホーンアンテナであり、送電ユニットの開口部から 40 cm の距離に配置している。WPT システムの送電ユニットから発生する不要電波は図 4-15 のように 6 GHz においても背景ノイズよりも高く観測されている。特に 1 GHz 以下の帯域では、背景ノイズよりも約 20 dB 高い不要電波が観測されており、無線通信との干渉が懸念される。本稿では、不要電波が強く観測されており、セルラー系無線通信にも利用される、800 MHz 帯、1700 MHz 帯、4200 MHz 帯に着目し、不要電波の狭帯域測定と無線通信システムシミュレーションによる電磁干渉評価をおこなった。

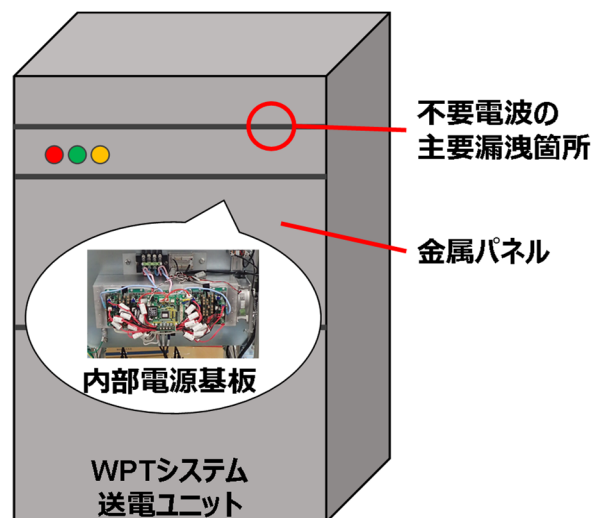


図 4-14 WPT システムにおける送電ユニットの概略図

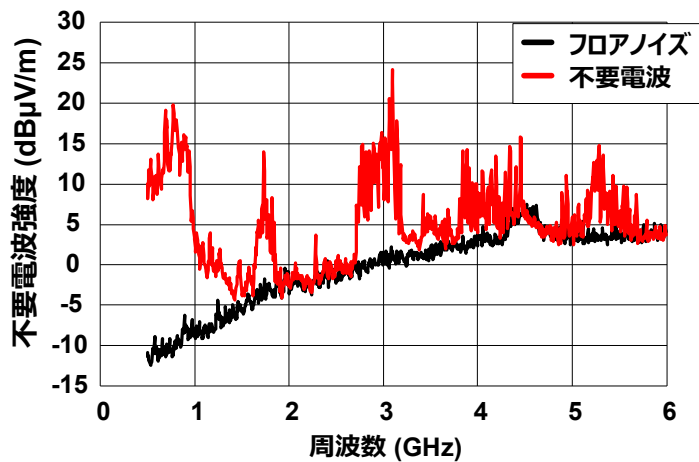


図 4-15 送電ユニットから発生する広帯域の不要電波特性

まず、不要電波の狭帯域測定では、ダイポールアンテナを用いて各帯域における不要電波の電力強度を測定した。なお、ダイポールアンテナと送電ユニットの開口部の距離を 10 cm から 4 m まで変化させることで、WPT システムから発生する不要電波の影響範囲を確認している。図 4-16 に各帯域における不要電波の 5 MHz 帯域内電力の距離依存性を示す。送電ユニット近傍では、全ての帯域において不要電波の電力強度が -160 dBm/Hz 以上となった。また、800 MHz 帯と 1700 MHz 帯においては 4 m 離れた位置においても背景ノイズより強い不要電波が観測されている。

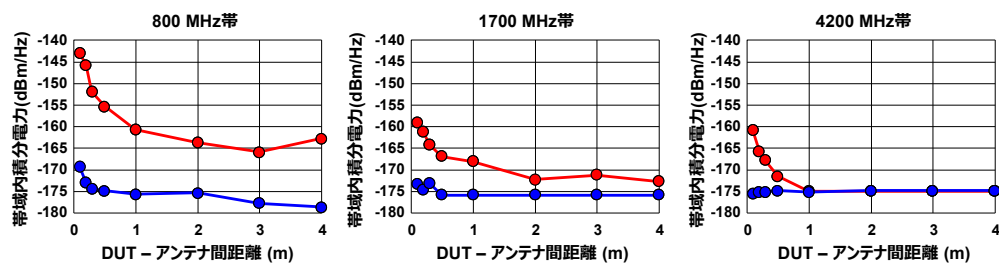


図 4-16 送電ユニットから発生する不要電波の距離依存性（800 MHz 帯，1700 MHz 帯，4200 MHz 帯）

つづいて、各測定点における 2 秒間の不要電波データを記録し、無線通信品質を評価した。各帯域における、送電ユニットとダイポールアンテナ間の距離による LTE 通信の最小受信感度の変化を図 4-17 に示す。評価対象である WPT システムの動作周波数は 87.5 kHz であるものの、機器近傍において

は 1700 MHz 帯や 4200 MHz 帯においても LTE 通信性能を劣化させる不要電波が発生していることが確認できた。また、800 MHz 帯においては、10 cm の距離において LTE 通信性能が 25 dB 以上劣化し、4 m の距離においても影響を及ぼす恐れがあることが、シミュレーション評価によって示された。

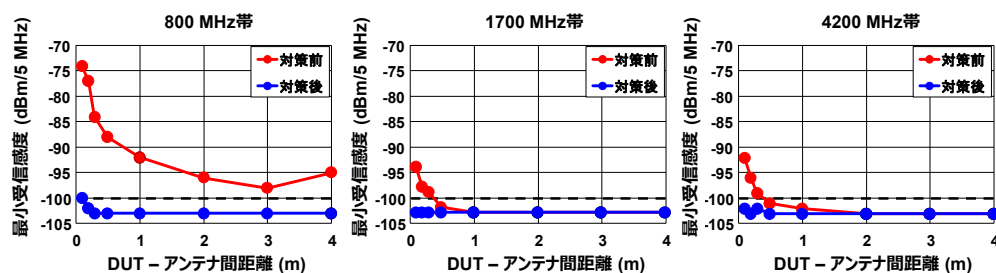


図 4-17 送電ユニットから発生する不要電波による LTE 通信への干渉性評価 (800 MHz 帯, 1700 MHz 帯, 4200 MHz 帯)

EMC 試験によって認証されている製品だとしても、機器近傍において無線通信を利用する場合の信頼性は保証されていない。そのため、こうした電子機器間の電磁干渉を評価し、適切に対策することが重要である。評価対象とした送電ユニット内部の不要電波特性を、局所性の高い磁界プローブを用いて確認したところ、不要電波の発生源は GaN 素子を搭載したインバータ回路であった。不要電波特性も 4.2 節で述べた電源モジュールの不要電波特性と類似しており、電源モジュールはこうした電磁干渉問題について対策が求められる。実際に、パンチングメタル等の金属シールドやノイズ抑制シート、フェライトコイルといった不要電波抑制技術を使用することで、不要電波を抑制できることを確認している (図 4-18)。

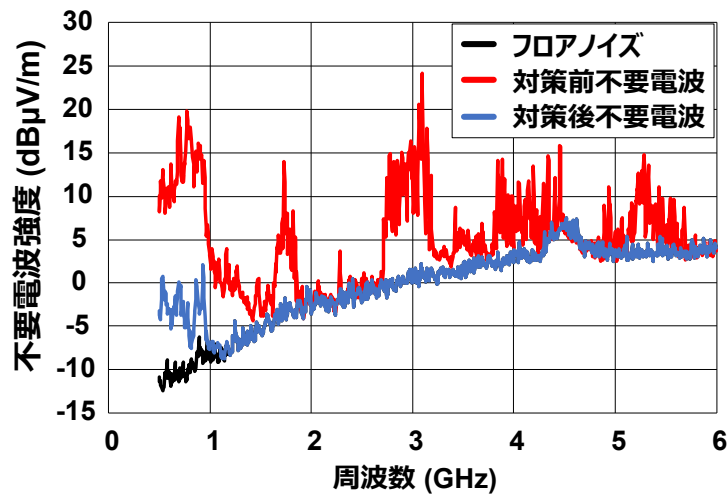


図 4-18 パンチングメタルとノイズ抑制シートによる不要電波抑制

4.4 電磁機器内部における電磁干渉評価

本節では、不要電波の発生源と不要電波の影響を受ける被干渉物が同一の場合における電磁干渉評価について述べる。単一の電子機器内部において発生する電磁干渉（自己干渉）評価において産業用ドローンを対象とした。現在、ドローンを活用し、産業、経済、社会に変革をもたらす「空の産業革命」の実現は産業分野の幅広い用途で期待されている[22]。産業用ドローンの操縦者の目視内における、操縦飛行（レベル 1）や自動飛行（レベル 2）については、映像撮影や測量・点検、農薬散布等の分野で既に一般利用が開始されている。また、無人地帯での目視外飛行（レベル 3）や有人地帯（第 3 者上空）での目視外飛行（レベル 4）についても制度化が行われており、過疎地域や離島におけるドローン配送サービスが実現している[23]。レベル 4 の実現により、都市部での宅配や医療品輸送、災害対応や警備等の幅広い分野で産業用ドローンの活用が期待される。有人地帯上空における機体トラブルは重大な事故につながる恐れがあるため、安全性の確保が必須である。

一般的なドローンは 2.4 GHz 帯の無線信号を用いたリモートコントローラ（以下、RC 送信機）によって機体が制御されるが、無線信号の伝搬距離によりドローンの運航範囲は数 km 程度に制限されてしまう。広範囲の運用が求められる物流や災害対応等の分野では、ドローンの制御に LTE や 5G 等のセルラー系無線通信システムが活用される予定である[24]。現在、携帯電話の上空利用制度として、800 MHz 帯、900 MHz 帯、1.7 GHz 帯、2 GHz 帯で LTE 通信信号を、地表から高度 150 m 以内のドローンが運航可能な範囲において利用することが認可されており、上空での LTE 利用サービスが通信事業者から提供されている[25-27]。都市部の人口密集地帯上空の飛行や多数機同時運航において安全性を確保するためには、産業用ドローンの運航管理を担う無線通信に高い信頼性が求められる。

ドローンの機体内部には様々な電子機器が、稠密に実装されており、半導体 IC チップからは動作に応じてスイッチングノイズ等の不要電波が広帯域に発生する。こうした不要電波がドローンの無線通信アンテナに混入することで、通信品質の劣化を引き起こす恐れがある（図 4-19）。特に LTE 等のセルラー系無線通信は低電力における動作についても規格化されており、セルラー系通信端末を搭載した電子機器が電磁干渉試験要件を満たしていたとしても、不要電波による電磁干渉問題が発生する恐れがある。産業用ドローン

における無線通信性能の劣化は、転送速度の劣化による運航エリアの縮小や運航管理の障害、サービス品質の低下といったの重大な問題につながる恐れがある。ドローンの安全性と信頼性を保証し、安定して産業用ドローンを活用するために、機体内部の不要電波による無線通信への電磁対策及び評価が必要である。

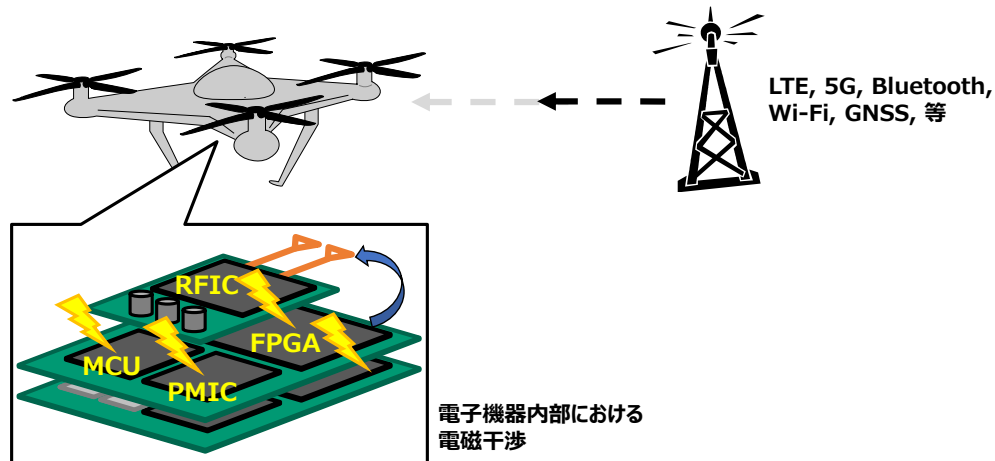


図 4-19 産業用ドローン機体内部における電磁干渉問題の概要図

以下に評価対象としたドローンの電気系構成を示す。国内外において販売、利用されている産業用ドローンを実験対象とした。大きさが $25\text{ cm} \times 25\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ で、重量が約 1400 g の機体で、測量や映像撮影といった分野で活用されている（図 4-20）。本機体は主に、電源回路、制御回路、無線通信モジュール、各種センサ、プロペラ、モータ等の基本的な構成要素が実装されている。本機体は 2.4 GHz 帯の無線通信を介して RC 送信機によって制御され、LTE 通信機能は搭載していないが、LTE 通信によって制御された場合を想定して不要電波による影響を評価した。

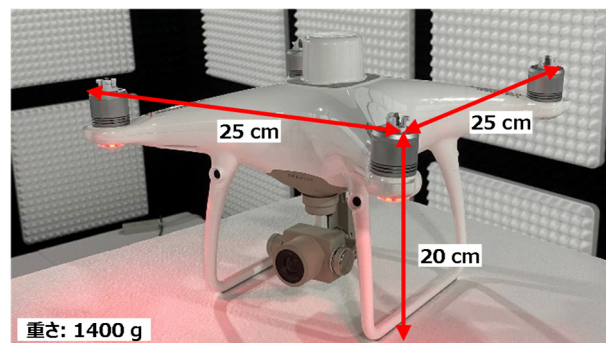


図 4-20 被評価ドローン

こうした被評価ドローンから発生する不要電波を第2章に示す不要電波の測定系を用いて測定し、第3章に示すシミュレーション評価系を活用してLTE通信との干渉性を評価した。本稿では、測定の安定化のためモータ動作をおこなわず、安全のためプロペラは取り外した状態で不要電波を測定した。また、常時、機体とRC送信機は接続している。なお、モータの動作周波数はセルラー系無線通信に対して十分に低く、モータによる不要電波はLTE通信に利用される帯域に及ばないと考えられる。初期評価として、モータ動作による不要電波が約90 kHzの高調波成分として観測される事を確認している(図4-21)。この図4-21に示す不要電波波形は機体から50 cmに配置した広帯域アンテナによって取得したドローン近傍の不要電波波形である。この高調波成分は100 MHz以下の周波数帯域でのみ観測されており、セルラー系の無線通信に影響しない。

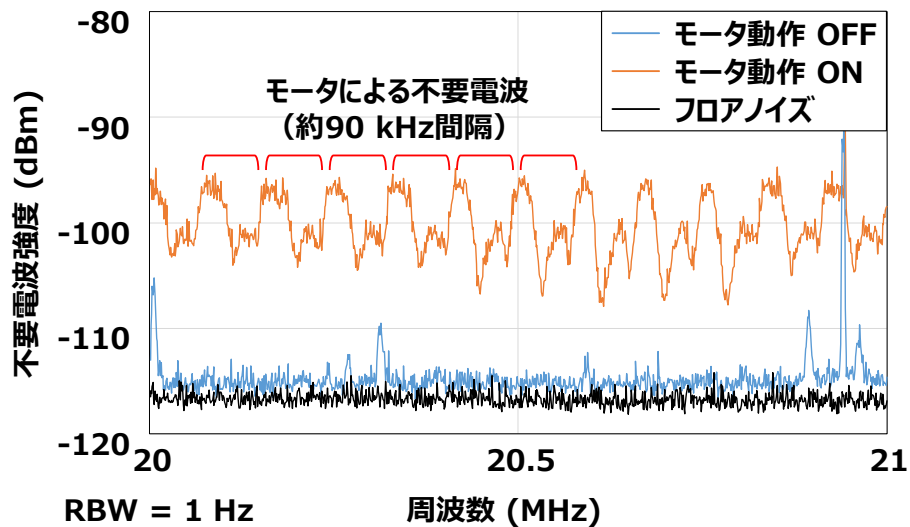


図 4-21 モータ動作による不要電波特性

はじめに、セルラー系無線通信に利用される700 MHzから6 GHzまでの帯域における不要電波を、2.2節に示す測定系によって測定した。使用したアンテナは広帯域で高い利得を持つ長六角形折返しアンテナで、アンテナの最大指向方向に機体中心とアンテナ開口面の距離が50 cmとなるように配置した(図4-22)。評価機体は広帯域50 cmの測定距離において600 MHz以下の周波数は測定距離が $\lambda/2\pi$ 以下の放射近傍界となるが、本研究の対象周波数範囲では放射遠方界に相当する。図4-23に示す広帯域測定による測定結果の

黒線は電波暗室内の環境ノイズを示しており，被評価ドローンには電源が供給されていない．また，2.4 GHz 帯における機体と RC 送信機との接続信号を減衰させるために帯域除去フィルタを使用している．グラフ中の青線は被評価ドローンの起動状態における不要電波を示しており，ドローンから発生する不要電波がセルラー系無線通信に利用される 700 MHz から 6 GHz までの帯域に及んでいることがわかる．特に LTE 通信の上空利用に割当てられている 2 GHz までの帯域において，不要電波が強く観測されており電磁干渉を引き起こす可能性がある．

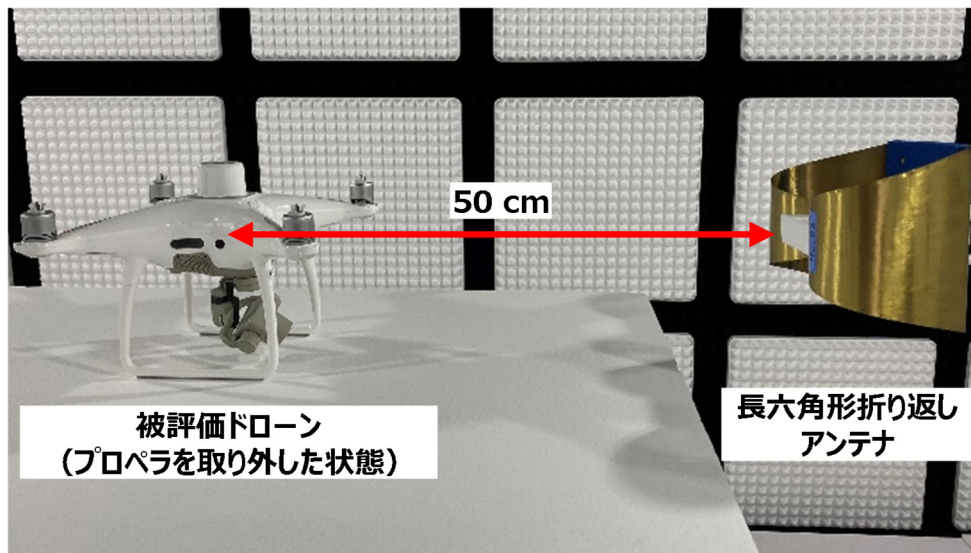


図 4-22 長六角形折り返しアンテナによる不要電波測定環境

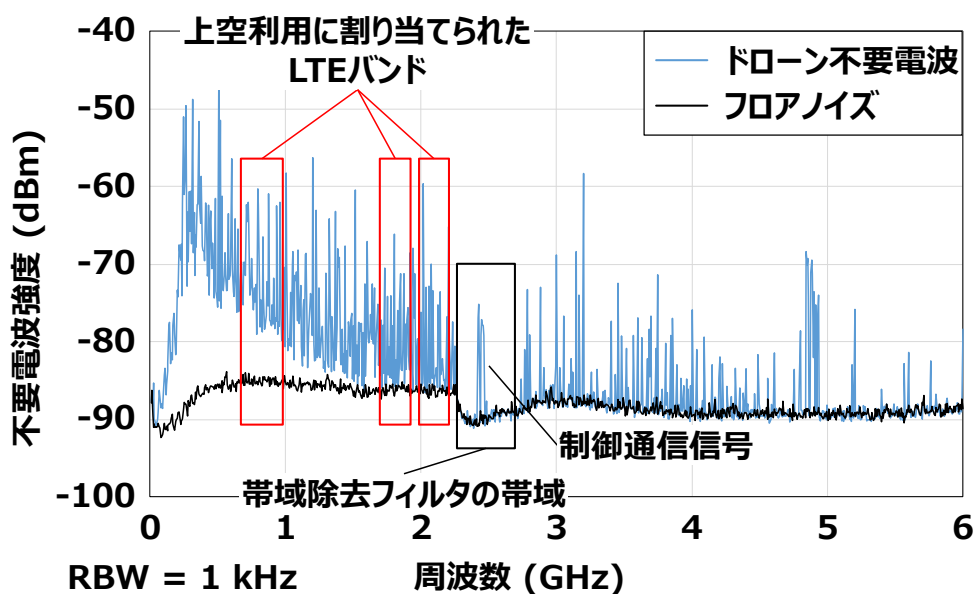


図 4-23 長六角形折り返しアンテナによるドローン機体における不要電波の周波数特性

つぎに、被評価ドローンの不要電波発生源解析について述べる。産業用ドローン内部においては電子機器が稠密に実装されており、複数の不要電波源が存在する。4.2 節、4.3 節において、電源モジュールの DC-DC コンバータと制御モジュールのデジタル回路から不要電波が発生すること、さらに、それぞれの不要電波の周波数特性が異なることを示した。この被評価ドローンについても同様の傾向があることを確認するため、図 4-24 の位置に実装されている電源回路と制御回路の近傍における不要電波を、局所性の高い近傍磁界プローブによって図 4-25 のように測定した。

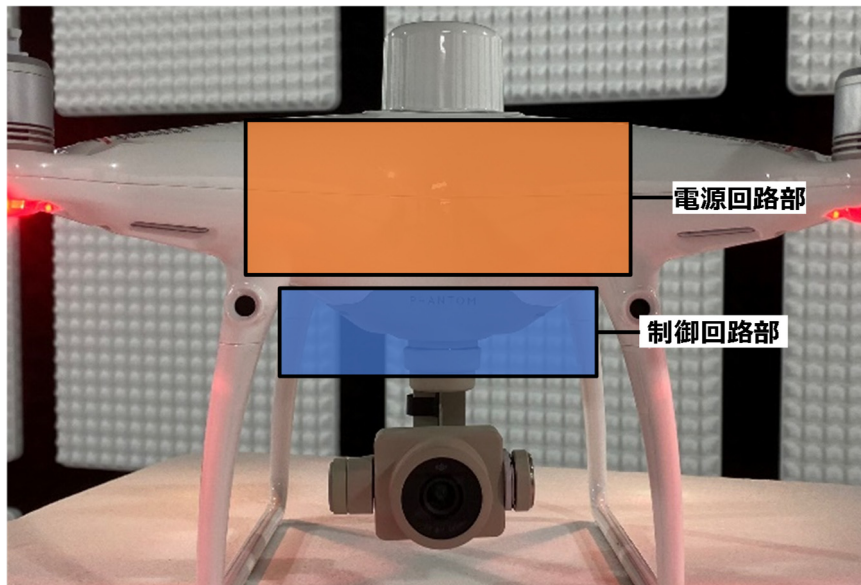


図 4-24 被評価ドローンにおける電源モジュール及び制御モジュールの実装箇所

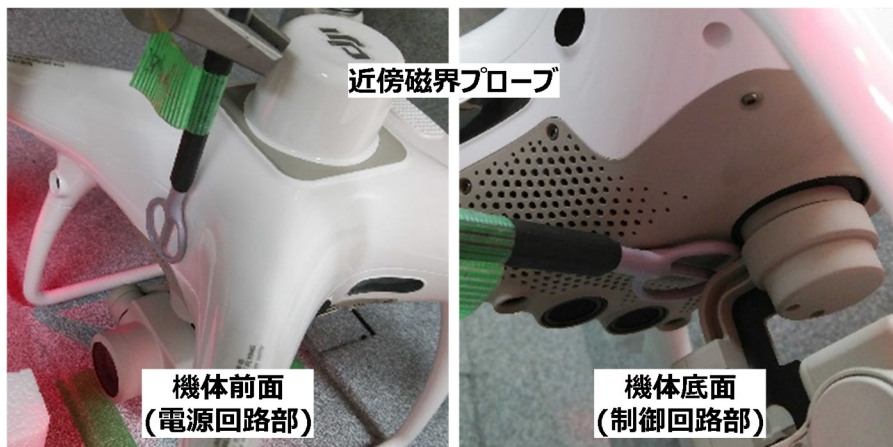


図 4-25 磁界プローブによる局所的な不要電波測定

電源回路と制御回路近傍における不要電波の周波数特性を図 4-26 に示す。それぞれのモジュールが近接しているため、双方の波形には複数の不要電波成分が含まれているものの、周波数特性は全く異なることがわかる。電源回路付近では 1 GHz 以下の帯域で強く不要電波が観測されている。一方で制御回路付近では 1 GHz 以上の帯域においても不要電波が観測されており広帯域に及んでいる。日本国内において LTE 通信の上空利用に割当てられている帯域のうち、800 MHz 帯では電波の回析効果によって障害物を回避できること

から、主要な利用周波数帯域として考えられている。一方で、図 4-23 に示した通り、不要電波が強く観測されている帯域でもあり、不要電波による無線通信干渉が発生する恐れがある。これらの視点から、産業用ドローンの内部における電磁干渉評価では特にこの 800 MHz 帯域に着目して不要電波測定及び LTE 通信との干渉性を解析するものとした。この帯域で電源回路と制御回路から発生する不要電波が重畳して観測されている。これは 4.2 節における電源回路の不要電波評価と同様の特性で、ドローン内部では稠密に電子機器が実装されることによって不要電波が複雑に伝搬していることを示している。

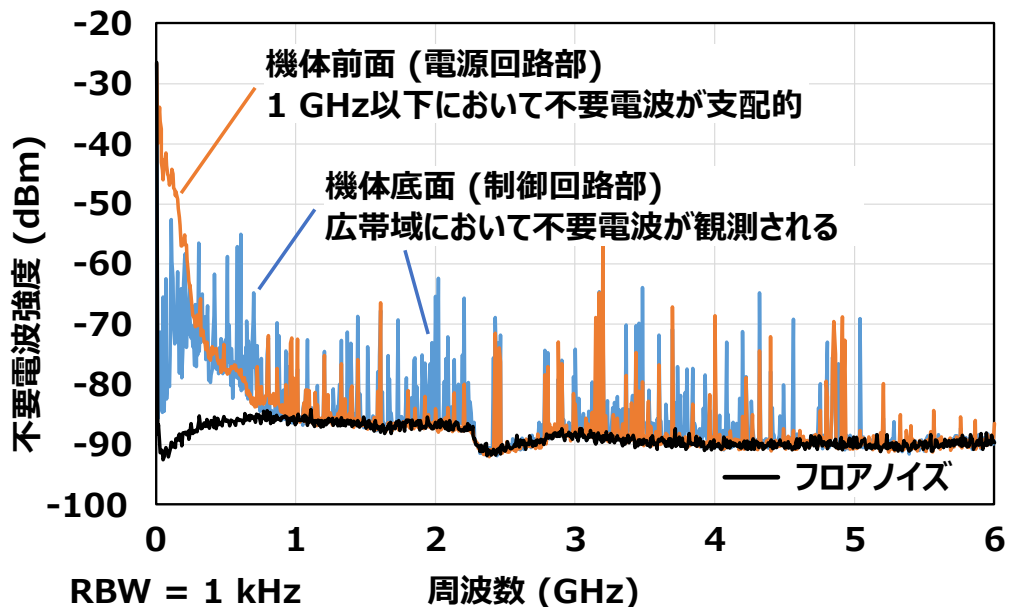


図 4-26 磁界プローブによるモジュール毎の不要電波の周波数特性

2.3 節に示す不要電波の狭帯域測定を用いた 800 MHz 帯における不要電波特性を図 4-27 に示す。不要電波の広帯域測定と同様にアンテナを機体から水平 50 cm の位置に配置した。図 4-27 のグラフ中、黒線は電波暗室内の環境ノイズを示している。また、橙線は電波暗室を開放した状態の環境ノイズを示しており、測定環境において観測される LTE 通信信号が含まれている (なお、被評価ドローンは起動しておらず、ドローンから発生する不要電波は含まない)。800 MHz 帯において日本国内の移動通信信号は、KDDI 社にバンド 18、NTT ドコモ社にバンド 19 が割当てられており、そのダウンリンク信号が観測されている。青線は電波暗室内におけるドローン機体近傍の不要電波を示

しており、LTE 通信のバンド 18, 19 のダウンリンク帯域に不要電波が観測される。バンド 18 とバンド 19 における通信チャネル帯域内の電力強度を計測したところ、 -147 dBm/Hz と -146 dBm/Hz の不要電波が観測された。そして、これらの不要電波データを記録し、3.4 節に示す無線通信シミュレーションによって LTE 通信の品質を評価したところ、図 4-28 のように、最小受信感度が規格値から約 22 dB 劣化する恐れがあることを見出した。自由空間上の伝搬損失計算[25]によると、電力の伝搬損失は距離の 2 乗に比例することから、LTE 通信の基地局アンテナと産業用ドローンが見通しの良い自由空間に存在した場合、ドローンの不要電波によって接続可能な LTE 通信の距離が 10 分の 1 以下に縮小する恐れがあることを示している。実環境においても不要電波によってセルラー系無線通信性能が劣化することが予測されるため、こうした電磁干渉への対策が求められる。また、同一の測定箇所での LTE 通信における 1.7 GHz 帯（バンド 3）における不要電波の通信チャネル帯域内電力強度の測定とシミュレーションによる LTE 通信との干渉評価により、 -168 dBm/Hz の不要電波によって最小受信電力が 3 dB 劣化し、不要電波による電磁干渉が広い周波数帯域で発生する恐れがあることを見出した。

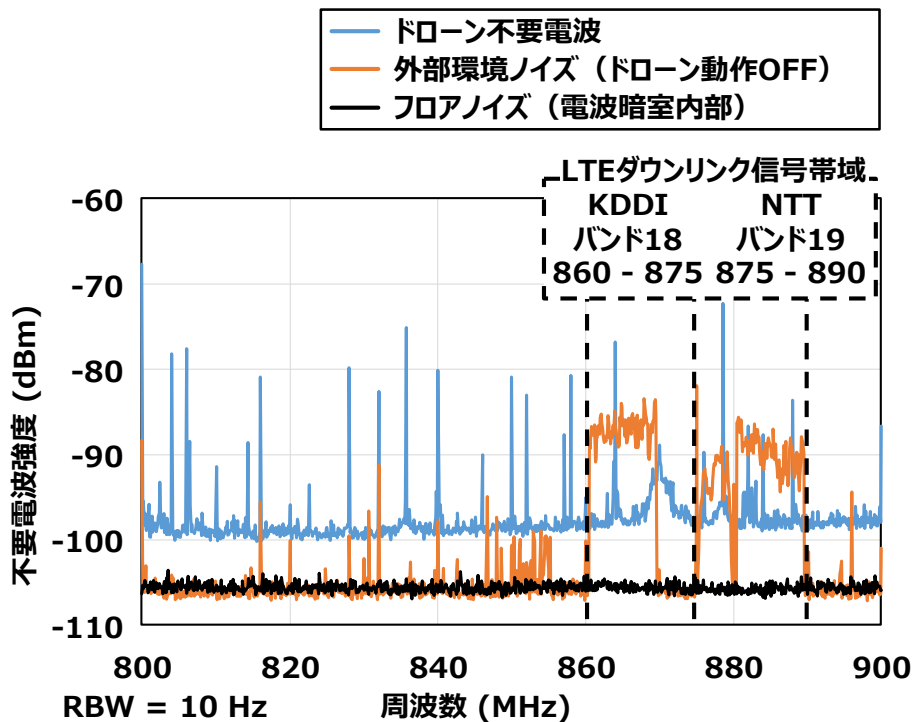


図 4-27 長六角形折り返しアンテナによる 800 MHz 帯におけるセルラー系無線信号と不要電波

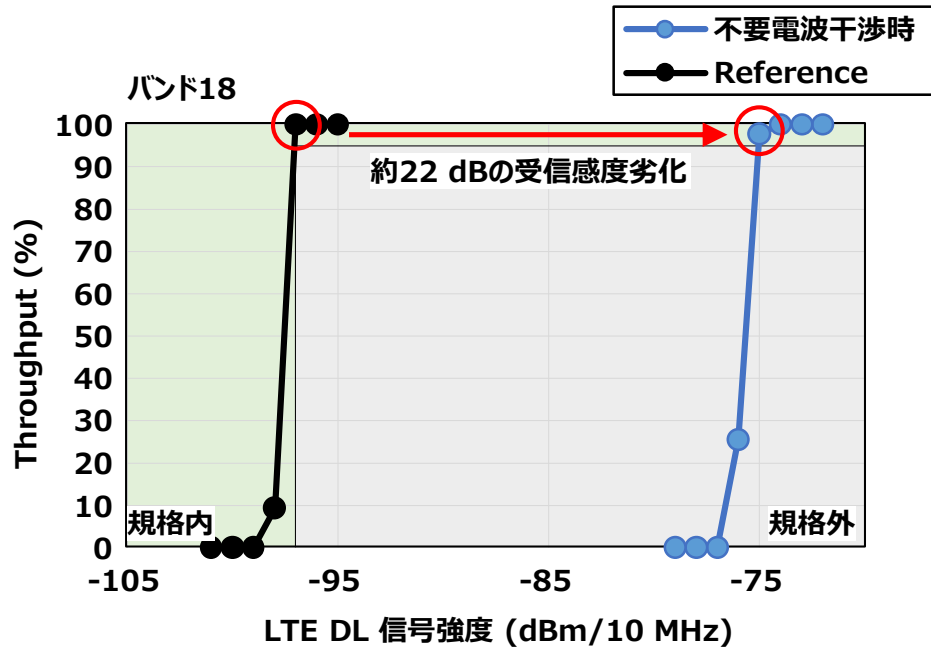


図 4-28 不要電波による LTE 通信への干渉性

以上のように，一般に販売され使用されている産業用ドローンを対象に，機体近傍の不要電波と LTE 通信信号との電磁干渉評価をおこなった．上空利用が進められている帯域において電磁干渉を評価したところ，特に 800 MHz 帯域において強く不要電波が観測されており，LTE 通信品質が大きく劣化することがわかった．こうした不要電波による電磁干渉問題は産業用ドローンにおける一般的な課題であるといえる．

ドローンの有人地帯上空における自律飛行において，機体の制御はセルラー系無線通信を介しておこなわれる予定である．セルラー系無線通信の通信品質劣化は産業用ドローンの運航範囲の縮小や運航管理の障害といった重大な事故につながる恐れがあるため，無線通信品質の高い信頼性が求められる．そのため不要電波による電磁干渉問題への対策によって，産業用ドローンを安心して運用できる環境が求められる．

4.5 まとめ

本章では、第 2 章と第 3 章において示した、不要電波の高分解能測定系と無線通信品質評価系を活用した、電子機器における電磁干渉評価について述べた。評価対象とした電子機器は半導体 IC チップから実製品まで様々で、電子機器間における電磁干渉と電子機器内部における電磁干渉の双方について評価をおこなった。実製品の電磁干渉評価では、電気自動車への無線給電システムや産業用ドローンを対象とし、機器近傍において LTE 通信の受信感度が劣化する恐れがあることを見出した。特に産業用ドローンにおいては、機体内部から発生する不要電波によって、機体の運航を制御する無線通信の受信感度が 20 dB 以上劣化しうることがわかった。これは、上空における電波伝搬が自由空間に相当すると仮定すると、ドローンの運航可能範囲が 10 分の 1 になることを示しており、広範囲において運用される産業用ドローンにおいて甚大な被害となる恐れがある。また、内部基板の不要電波評価によって、無線通信との電磁干渉を引き起こす不要電波発生源として、主に、電源回路と制御回路が挙げられることを見出した。それぞれから発生する不要電波は異なる特性を示しており、無線通信に使用する周波数帯域に応じて不要電波抑制技術の導入や機器内部の機構設計による対策が求められる。こうした特徴は電気自動車用無線給電装置においても確認できており、電子機器における一般的な課題である。

第 5 章

無線通信機器への 電磁干渉抑制技術

5.1 はじめに

本章では，無線通信機器における，小型かつ軽量の電磁干渉抑制技術を示す．小型かつ軽量であることが求められる無線通信機器においては，占有体積が小さく軽量の電磁干渉抑制技術が求められる．そこで本稿では，磁性材料を活用した，半導体 IC チップのパッケージングレベルの小型かつ軽量の電磁干渉抑制技術を開発し，不要電波の低減効果と電磁干渉抑制効果を評価した．5.2 節に使用した磁性材料と評価に使用した半導体 IC チップの構成について述べる．5.3 節では，磁性材料を薄膜状に形成した磁性膜を IC チップパッケージングに実装する方法について述べ，その効果を 5.4 節において示す．

5.2 磁性材料と評価 IC チップ

磁性体はノイズを熱に変換する性質を持ち，不要電波低減材料としても利用される．本研究では磁性体を薄膜状にすることで，電子機器の小型化に対応した不要電波低減手法の確立を目的とする．不要電波低減材としての特性は強磁性共鳴損失で表され，それは複素透磁率の虚部と各周波数を掛け合わせることで計算される．また，酸化物磁性材料であるフェライトを含んだ磁性膜の強磁性共鳴損失を利用した不要電波低減の効果は先行研究において確認されている[26]．

本研究では様々なサンプルの中から無線通信帯域において高い強磁性共鳴損失を持つ 3 種類の磁性材料を選定した[27–29]. Z 型六方晶フェライト, Y 型六方晶フェライト, スピネルフェライトである (表 5-1). 実測された 3 種類の磁性膜の複素透磁率の実部(μ_r')と虚部(μ_r'')を図 5-1, 図 5-2 に示す. 複素透磁率の虚部に角周波数を掛け合わせた強磁性共鳴損失を図 5-3 に示す. 強磁性共鳴損失は不要電波低減材としての周波数特性を表しており, グラフの山のピークの周波数において, 不要電波低減効果が特にみられると考えられる. 磁性膜のサンプルは Z 型六方晶フェライトを 2 つ, Y 型六方晶フェライトを 3 つ, スピネルフェライトを 2 つ用意した.

表 5-1 磁性材料のサンプル名と組成式

サンプル名	組成式
Z 型フェライト	$\text{Ba}_3\text{Co}_{1.25}\text{Zn}_{0.75}\text{--Fe}_{24}\text{O}_{41}$
Y 型フェライト	$\text{Ba}_2\text{Zn}_2\text{--Fe}_{12}\text{O}_{22}$
スピネルフェライト	$\text{NiCuZn--Fe}_2\text{O}_4$

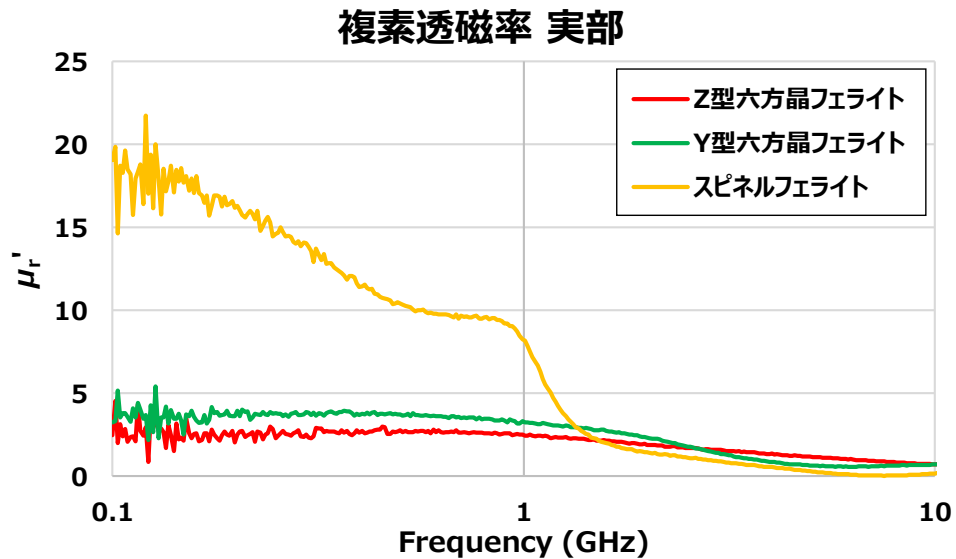


図 5-1 磁性材料の複素透磁率 (実部) の周波数特性

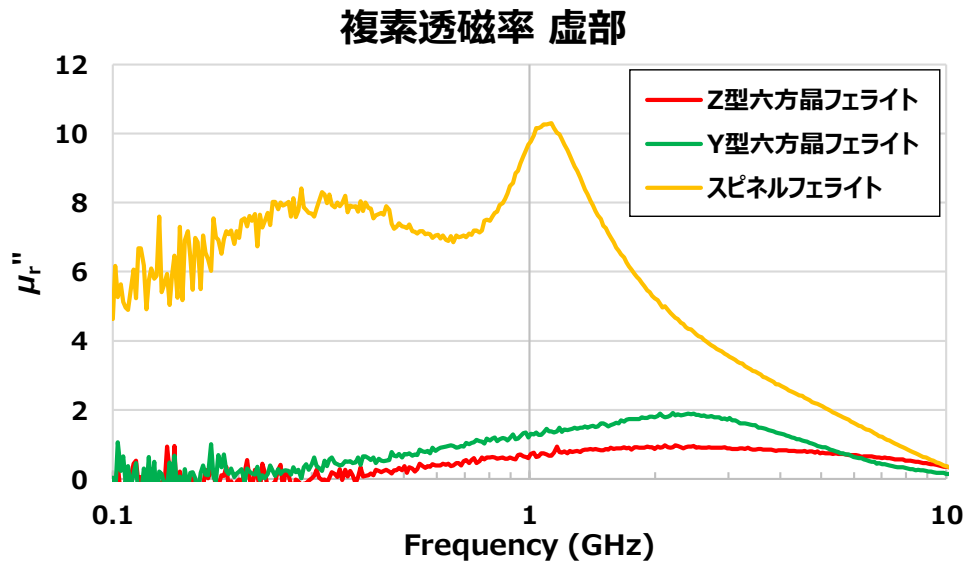


図 5-2 磁性材料の複素透磁率（実部）の周波数特性

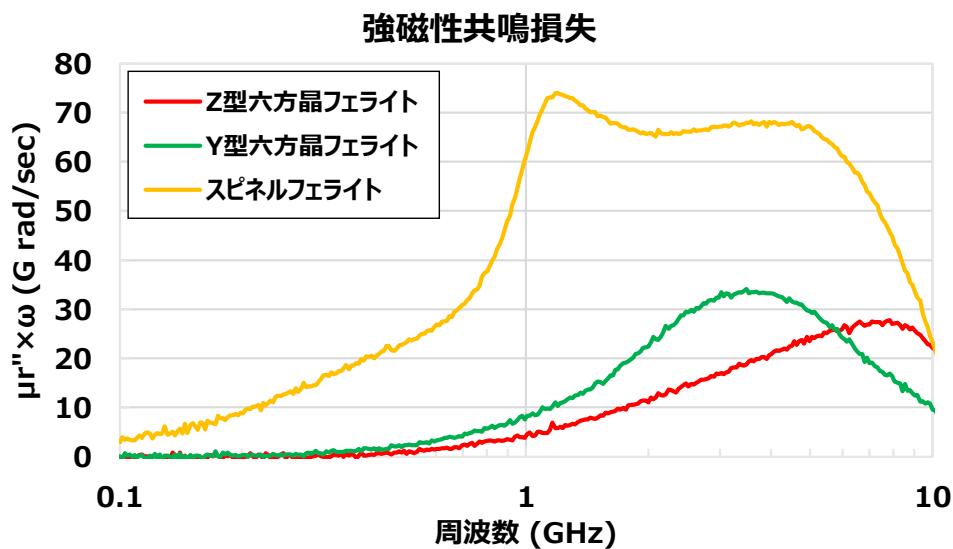


図 5-3 磁性材料の強磁性共鳴損失の周波数特性

本稿では、不要電波発生源として、65 nm-CMOS 技術により設計された評価チップを用意した。この評価チップにはノイズ発生回路 SBNS (Standard-cell based noise source) を搭載している。SBNS は 32 bit のシフトレジスタをループ接続した回路を 512 列並べた構造になっており、クロック信号に同期したデジタル回路の一般的な動作をする (図 5-4)。発生するノイズ

の強度及び周波数成分はシフトレジスタ内をループするデータセットと動作列数を設定することで調整可能である．本実験ではシフトレジスタの動作列数を 512 列とした．

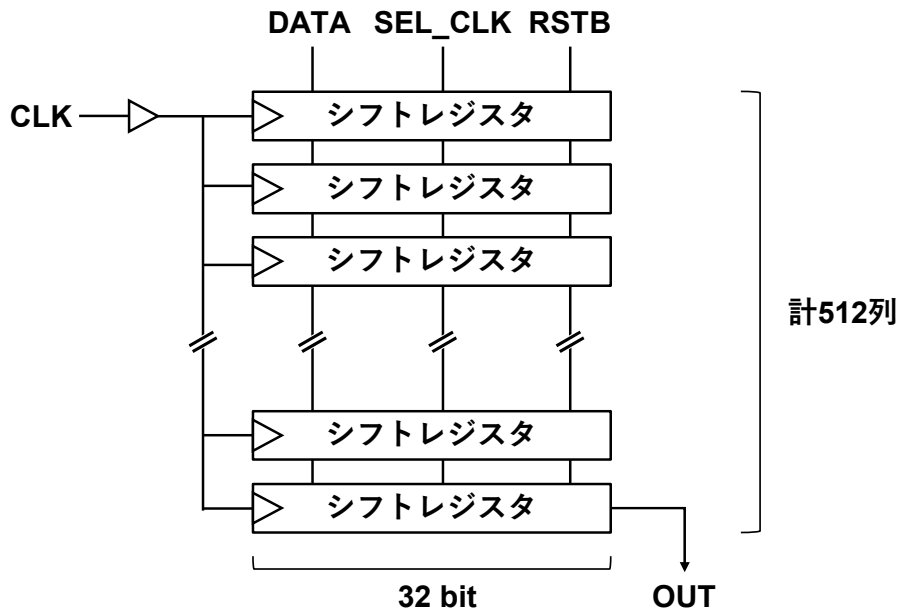


図 5-4 評価 IC チップの回路構成図

IC チップパッケージングレベルでの不要電波抑制技術として，フェライトを含む磁性薄膜を用いた対策手法を用いた．フェライトは酸化物磁性膜であり複素透磁率の虚数部(μ_r'')の値に応じて不要電波を熱に変換する不要電波抑制材料である．これまでの研究においてフェライトを含んだ磁性膜の強磁性共鳴損失を利用した不要電波の抑制効果が確認されている．

5.3 IC チップパッケージングにおける電磁干渉抑制技術

評価 IC チップは FC-BGA (Flip chip – ball grid allay) パッケージングで基板に実装されている。FC-BGA は構造上 IC チップとインタポーザ基板の間に隙間ができる。本来はアンダーフィルにより隙間が埋められているが、本研究ではこの隙間に磁性膜を実装することで不要電波の抑制効果を期待している (図 5-5)。この方法では IC チップの実装体積は変わらないため、デバイスの小型化に対応した不要電波抑制手法であるといえる。

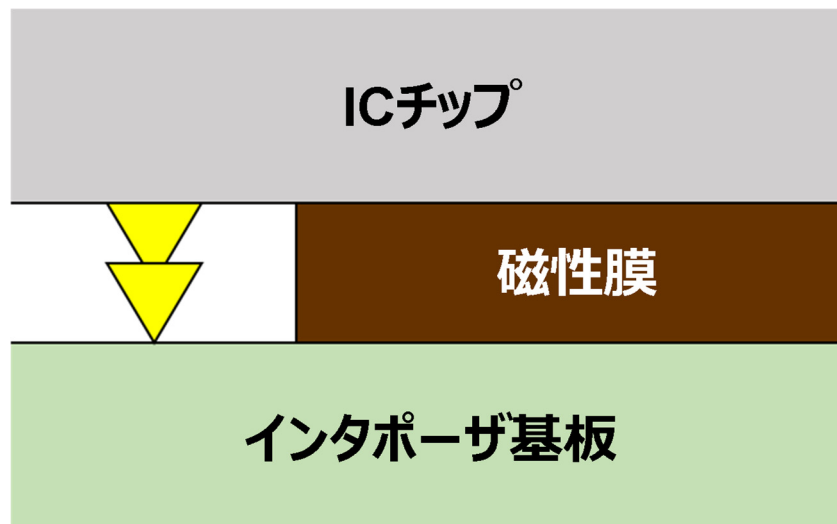


図 5-5 IC チップパッケージングへの磁性薄膜の実装概要図

磁性膜を隙間に合わせて $50 - 80 \mu\text{m}$ の厚さで形成した。2 パターンの方法で磁性膜の実装を行い、六方晶フェライトにおいては磁性膜を基板につけてから実装しており (図 5-6)、スピネルフェライトでは磁性膜を IC チップにつけてから実装した (図 5-7)。また、低減効果を確認するため、磁性膜を実装していないサンプル基板を 2 つ用意した。

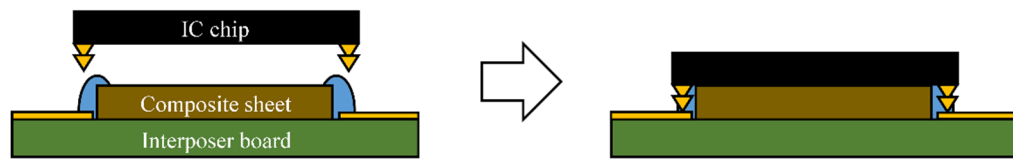


図 5-6 インタポーザ基板への磁性材料塗布による磁性膜の実装手法

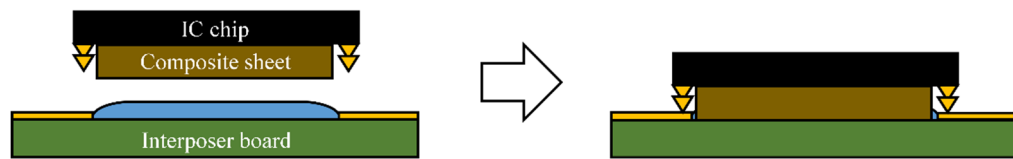


図 5-7 IC チップへの磁性膜の実装手法

5.4 磁性膜による電磁波抑制効果

本節では磁性膜を用いた IC チップパッケージングレベルの不要電波抑制技術の評価について述べる．不要電波測定は基板による評価を行うため，電波暗室ではなく電波暗箱に基板を設置して行った．また，IC チップからの不要電波のみを測定するためにアンテナは指向性の高い磁界プローブ②を用いており，IC チップとの距離は約 1 mm である（図 5-8）．

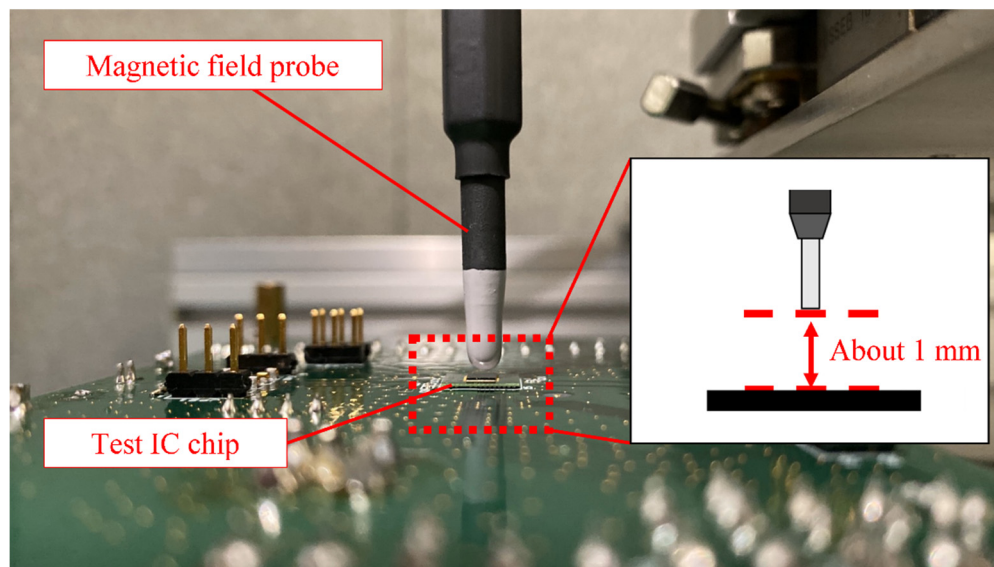


図 5-8 磁界プローブによる IC チップ直上の不要電波測定

まず初めに回路の動作周波数を 100 MHz とし，広帯域測定を行ったところ動作周波数の高調波が 6 GHz まで確認できた（図 5-9）．なお，スイッチングノイズはクロック信号の立ち上がり立ち下がりで発生するため，動作周波数の 2 倍の 200 MHz 間隔の成分が大きく観測される．また，評価は複数基板で行っているが，電力を平均化して結果を表示している．

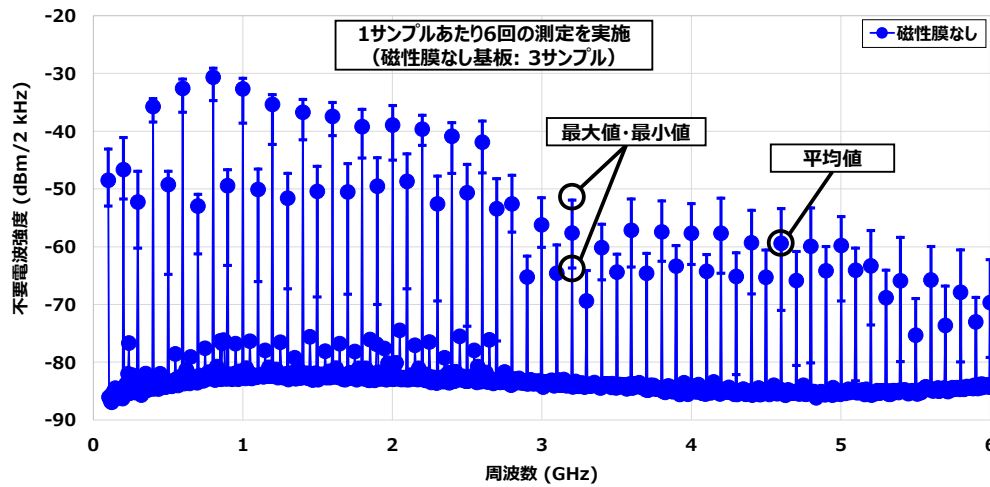


図 5-9 評価 IC チップから発生する不要電波の広帯域特性

同様の測定によって磁性膜による不要電波の抑制効果を確認した。図 5-10 に磁性膜による不要電波の抑制効果の周波数特性を示す。全ての磁性膜で最も不要電波強度の低減効果が見られた周波数帯域は 4 GHz であった。各磁性膜の低減効果をそれぞれ確認すると、Z 型六方晶フェライトは 6 GHz までの帯域において他と比べて効果は小さく、Y 型六方晶フェライトは 4・5 GHz 付近で効果が大きいことが確認できた。スピネルフェライトは 1・4 GHz 付近において、他の磁性膜より大きい効果がみられている。これらの特性は図 5-3 に示す強磁性共鳴損失の周波数特性と近いものであり、実測による低減効果と材料特性の類似性を確認することができた。

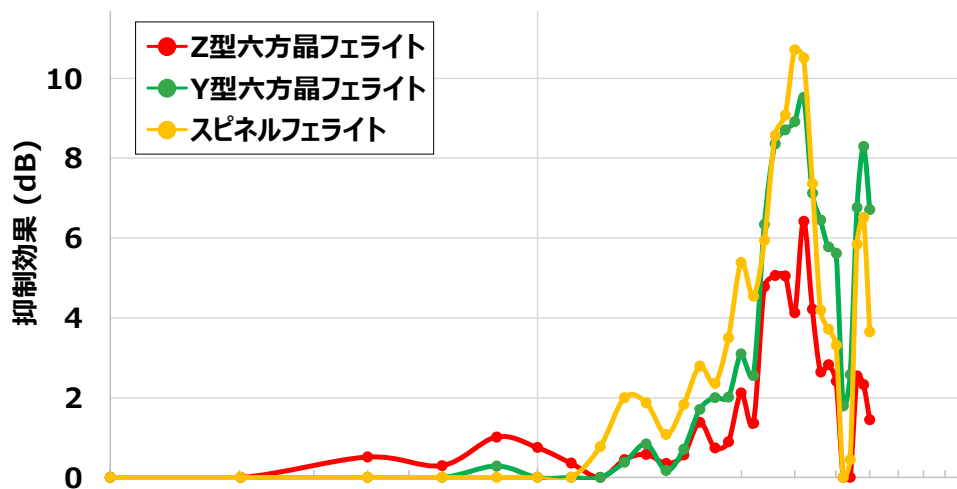


図 5-10 磁性膜による不要電波の抑制効果

つづいて、4 GHz における不要電波の帯域内電力強度を測定し、磁性膜による LTE 通信への効果を確認した。磁性膜による不要電波強度の変化を図 5-11 に示す。グラフ中の丸が不要電波強度の平均値を示し、横棒が最大値と最小値を表している。不要電波強度の低減効果を IC チップのみとそれぞれの磁性膜の平均との差とすると、4 GHz 帯域における低減効果は、Z 型六方晶フェライトにおいては約 3 dB、Y 型六方晶フェライトにおいては約 6 dB、スピネルフェライトにおいては約 9 dB であった。これらの結果より、4 GHz 帯域において不要電波強度の低減効果が最もみられたのはスピネルフェライトであることがわかる。

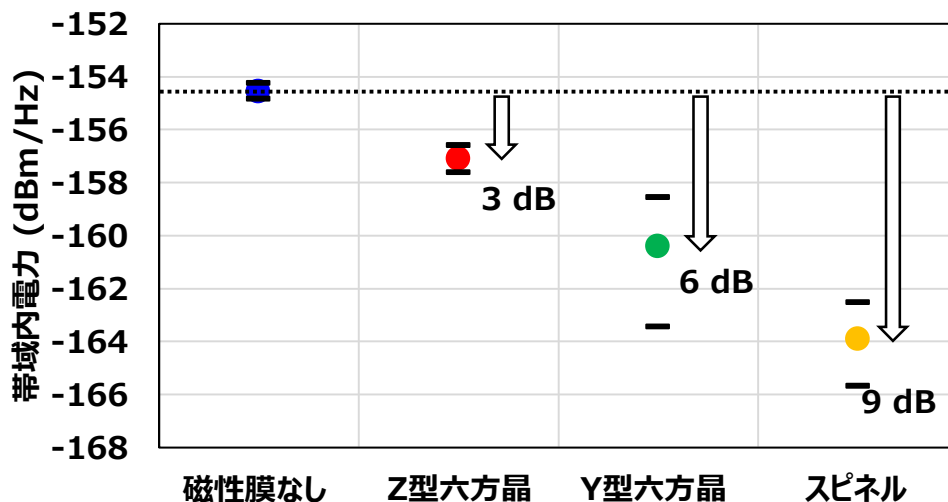


図 5-11 磁性膜による不要電波強度の抑制効果 (4 GHz 帯)

つぎに、無線通信システムシミュレータによる LTE 通信の最小受信感度に対する磁性膜の効果を図 5-12 に示す。それぞれのデータプロットにおける横棒がサンプルそれぞれの受信感度の最大値と最小値、丸が平均値を表す。磁性膜を実装していないものと各磁性膜の最小受信感度の平均との差分により、磁性膜による不要電波干渉の抑制効果を評価する。LTE 通信における最小受信感度の向上効果は、Z 型六方晶フェライトにおいては約 5 dB、Y 型六方晶フェライトにおいては約 12 dB、スピネルフェライトにおいては約 13 dB であった。5G 通信における最小受信感度の向上効果は、Z 型六方晶フェライトにおいては約 2 dB、Y 型六方晶フェライトにおいては約 4 dB、スピネルフェライトにおいては約 6 dB であった。これらの結果より LTE, 5 G と

もに 4 GHz 帯域にて最小受信感度の向上効果が最も見られたのはスピネルフェライトであった。

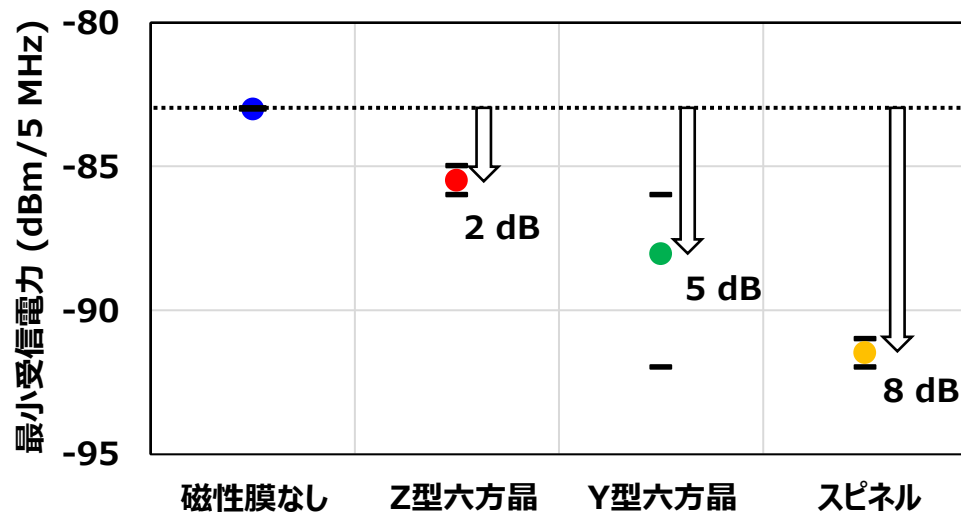


図 5-12 磁性膜による LTE 通信感度の向上効果 (4 GHz 帯)

以上のように, IC チップパッケージングに実装された磁性膜によって不要電波が抑制され, 不要電波と無線通信の電磁干渉が抑制されることを見出した。

5.5 まとめ

本章では、磁性材料を薄膜状に形成した磁性膜を FC-BGA パッケージングにおける IC チップとインタポーザ基板の間に実装することで、電子機器から発生する不要電波を抑制する手法を示した。IC チップ実装時に生じるわずかな隙間に磁性材料を実装するため、余分な占有体積を必要としない不要電波抑制技術である。セルラー通信において使用される周波数帯域において、抑制効果が期待される材質を使用したところ、4 GHz において 10 dB 以上の電磁干渉抑制効果が確認され、磁性膜による小型かつ軽量の対策手法は有効であることを見出した。磁性材料は材質特性によって、不要電波の抑制効果量や対象となる周波数帯域が異なる。電子機器において使用する無線通信帯域に応じて、適切な材料を使用することで不要電波と無線通信信号の電磁干渉問題を抑制することが可能である。

第 6 章

サイドチャネル攻撃への 脅威分析および対策支援

6.1 はじめに

本章では、これまでに示した電磁波の測定・解析・抑制技術を活用した事業について事業分析をおこなう。現在は市場が顕在化していない電子機器のハードウェアセキュリティ分野に関する技術課題を、本稿で示した電磁波の高分解能測定技術と電磁波の抑制技術により解決する「サイドチャネル攻撃への脅威分析および対策支援」事業について検討する。6.2 節にて事業化の背景を述べ、サイドチャネル攻撃の脅威と対策の必要性について述べる。6.3 節において、イノベーションアイデアとして対象顧客と提供するソリューションを示す。6.4 節において、事業戦略として事業の優位性と継続可能性を分析する。

6.2 事業化の背景

電子機器やサービスをいつでも安心して利用し続けるために必要な要素のひとつである「セキュリティ」は、デジタルデータの「機密性」、「完全性」、「可用性」（表 6-1）を確保することで情報漏洩やデータの改ざん、システムの障害といった重大な事故を防ぐ技術である。デジタルデータのセキュリティに対する脅威としてサイバー攻撃が挙げられる。ここで、サイバー攻撃とは、インターネットやデジタル機器を使用して、個人や組織を対象に機密情報や金銭の窃取、さらにはシステムの機能停止等を目的とした攻撃である（図

6-1). 2019 年の世界経済フォーラムによる調査では、サイバー攻撃は、今後 10 年の間、世界で大規模な損害をもたらす恐れのある事象として位置付けており、実際の攻撃事例も増加している[30]. 情報通信研究機構の大規模サイバー攻撃観測網によると、2021 年に観測されたサイバー攻撃関連の通信数は 3 年前に対して 2.4 倍に増加（図 6-2）しており、サイバー攻撃が身近な脅威であることがわかる[31]. IoT によって様々なモノがインターネットを介してつながっているため、あらゆる電子機器においてサイバー攻撃への対策が必要である.

表 6-1 デジタルデータのセキュリティを確保するための 3 つの要素

機密性 (Confidentiality)	許可された者だけがデータにアクセスできる状態
完全性 (Integrity)	保有するデータが正確であり完全である状態
可用性 (Availability)	必要な時にいつでもデータにアクセスできる状態

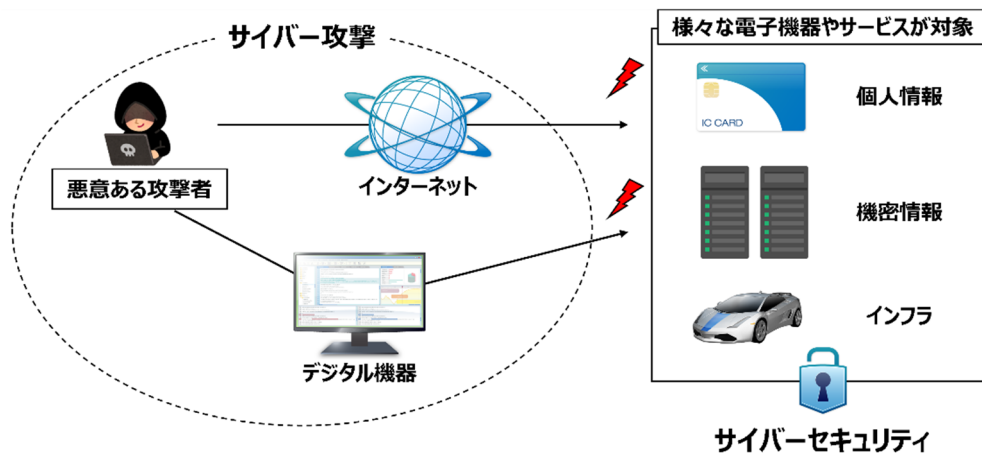


図 6-1 デジタルデータのセキュリティを脅かすサイバー攻撃の概要

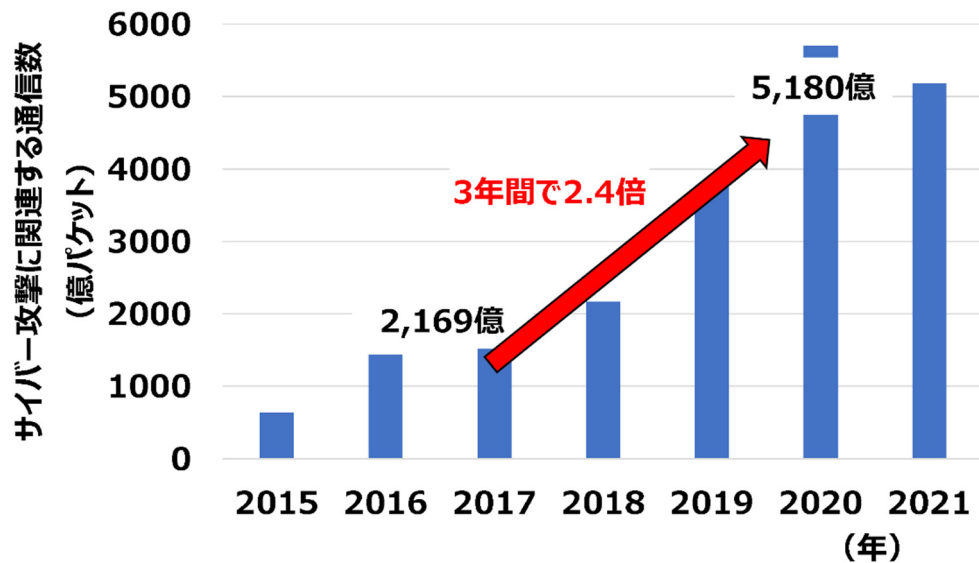


図 6-2 サイバー攻撃関連の通信数の年次推移（情報通信研究機構による大規模サイバー攻撃観測網「NICTER」による調査）

現在、攻撃事例が報告されているサイバー攻撃への対策のひとつに、暗号技術によるデジタルデータの暗号化が挙げられる。暗号化とは任意の人が解読できる元々のデータ（平文）を解読できない形式（暗号文）に変換することで、その反対に暗号文を平文に戻すことを復号とよぶ（図 6-3）。暗号化や復号をおこなう際に使用するデータを鍵とよび、鍵を持つ者のみがデータにアクセスできる。現在の高度情報化社会において、暗号技術はあらゆる電子機器に使用されており、電子機器内部のデジタルデータは暗号化によってセキュリティが確保された状態で、インターネットを介して他の電子機器との送受信がおこなわれている。これによって機密情報の漏洩や他人へのなりすまし、データの改ざんといったセキュリティ上の多くの問題を未然に防いでいる [32]。

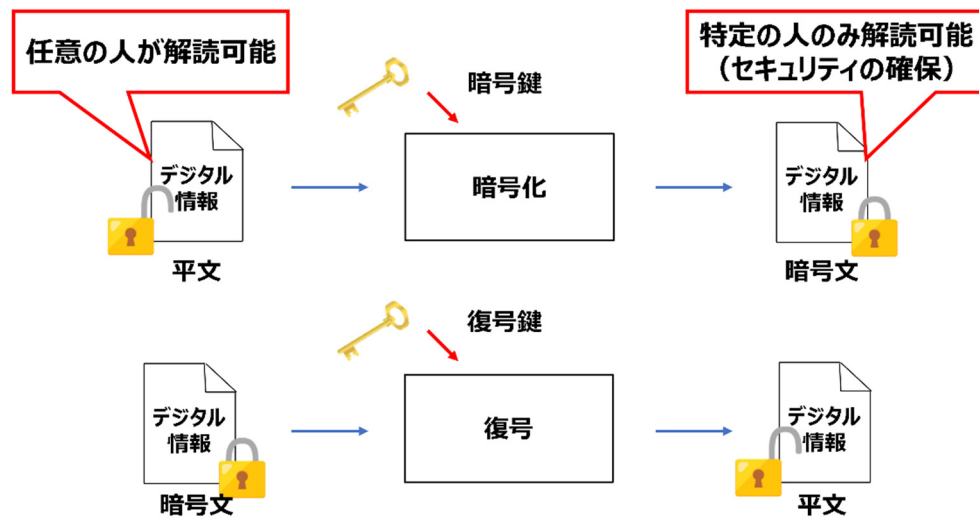


図 6-3 暗号技術によるデジタルデータのセキュリティ確保の仕組み

暗号技術では秘密情報の鍵によって平文を暗号文に変換しているが、鍵の全数探索による総当たり攻撃や、暗号化の規則性を解析することにより、鍵を特定し暗号文を解読することができる。こうした数学的な攻撃による暗号解読を防ぐために、複雑で高度なアルゴリズムを用いた暗号技術が発明されてきた。そして、多くの研究者によってアルゴリズムの堅牢性が確認されたのちに、暗号アルゴリズムの標準化がおこなわれる。かつて米国において標準暗号とされていた DES (Data Encryption Standard) [33]は、1977 年に暗号の仕様が公表され広く使用されていたが、鍵の長さが短いことが脆弱性として挙げられていた。そして実際に解読が成功した事例[34, 35]が報告されたことで、DES の脆弱性が現実的になり、2002 年に、より高度な暗号アルゴリズムを用いた AES (Advanced Encryption Standard) [36]に置き換えられた。その他にも様々な暗号アルゴリズムが発明され、安全性が厳しく評価された後に、標準化や安全な暗号リストの公開がおこなわれている。

現在、安全とされてる暗号アルゴリズムは、暗号解読をおこなう攻撃者が平文と暗号文の組み合わせを取得したとしても鍵を特定できないほど、堅牢なアルゴリズムである。通常、攻撃者が取得できる情報は暗号文のみであり、暗号の解読はより困難であると考えられている。高度情報化社会におけるデジタルデータは、こうした高度なアルゴリズムを用いた暗号技術によってセキュリティが確保されている。

数学的に安全性が確保された暗号アルゴリズムだとしても、実際に暗号モジュールとして IC チップに実装された状態では、サイバー攻撃により暗号を解読される恐れがある。この暗号回路を実装した IC チップやプリント基板等のハードウェアに着目して暗号を解読するサイバー攻撃を、ハードウェア攻撃とよぶ。数学的な攻撃（ソフトウェア攻撃）だけでなく、このようなハードウェア攻撃も、デジタルデータのセキュリティを確保する暗号技術の脅威となる（図 6-4）。

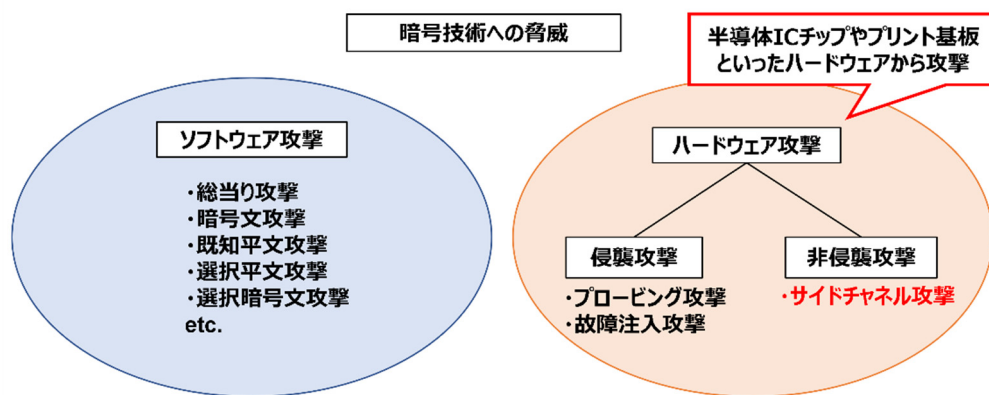


図 6-4 暗号回路を実装したハードウェアへの脅威

ハードウェア攻撃は図 6-4 のように、IC チップの切削や溶解により内部へ侵入し、IC チップ内の回路動作に影響を及ぼす侵襲攻撃と、IC チップやその中に実装されている回路動作に影響を及ぼさずに攻撃をおこなう非侵襲攻撃に分類される。特に、痕跡が残らない非侵襲攻撃は、IC チップの動作や外観の変化を伴う侵襲攻撃と比べて、攻撃の検知が困難であり脅威として認識されている[37]。

ハードウェア攻撃の代表例としてサイドチャネル攻撃が挙げられる。サイドチャネル攻撃は IC チップの動作に応じて発生する動作情報から鍵を解読する非侵襲攻撃である。暗号モジュールを実装した IC チップは、暗号処理動作に応じて本来の入出力経路とは異なる経路（サイドチャネル）から電磁波、消費電力、処理時間等の意図しない動作情報が漏洩してしまう。こうした意図しない動作情報をサイドチャネル情報とよび、サイドチャネル情報を利用して暗号回路の内部遷移を予測することで鍵の解読が可能である[38,39]（図 6-5）。

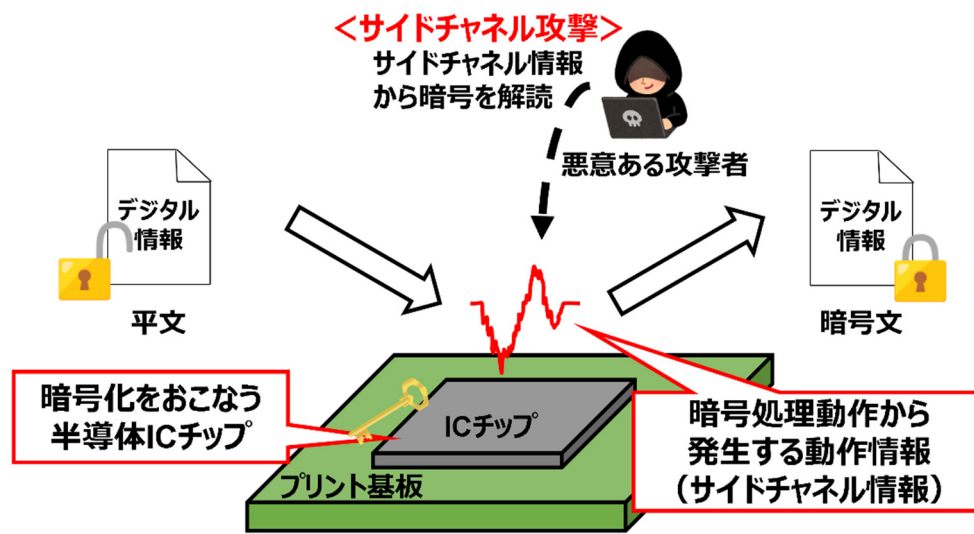


図 6-5 サイドチャネル攻撃のイメージ

サイドチャネル攻撃が最初に報告されたのは 1990 年代であるが、近年、その脅威は格段に高くなっている。この要因として、半導体回路技術や情報通信技術の発展による、サイドチャネル情報の取得に使用する測定器の高性能化や、サイドチャネル攻撃を学習した人工知能の登場が挙げられる。実際の電子機器への攻撃事例も報告されており、2011 年 6 月にはオランダの研究者によって、欧州で約 1700 万枚発行されている交通 IC カード「オイスターカード」をサイドチャネル攻撃によって複製できることがロンドンの地下鉄で実証されている。また、2021 年には Google の 2 段階認証で利用される「Titan セキュリティキー」へのサイドチャネル攻撃が成功し、秘密鍵の解読による情報漏洩の可能性が報告されている。さらに、KU Leuven 大学の研究者によって、外部からのサイドチャネル攻撃を用いたハッキングによって、自動車のキーレスエントリーシステムを複製し、自動車を盗難できることが報告されている。他にもサイドチャネル攻撃によって実製品の暗号が解読された事例が報告されており、サイドチャネル攻撃の脅威は身近なものであるといえる。

しかし、サイドチャネル攻撃の脅威は、ソフトウェアによるサイバー攻撃と比べてあまり認知されておらず、十分な対策がなされていない。この要因としては、単なる認知不足だけでなく、具体的な脅威の把握ができていないことや、対策が容易でないことが挙げられる。サイバー攻撃への具体的な脅威を把握するためには、実際に電子機器やサービスに対して攻撃をおこなうことで耐性を評価する脅威分析が有効である。サイドチャネル攻撃において

も同様であるが、サイドチャネル攻撃への脅威分析は高度な専門技術を必要とするため困難である。また、サイドチャネル攻撃への対策についても、暗号モジュールの脆弱性を把握したうえで、適切な対策手法を選択する必要がある高い専門性が求められる。

また、サイバー攻撃の手法は常には進化しており、新たな攻撃手法の発見とそれに対する対策手法の考案が繰り返されている。そのため、ISO27001やFIPS140-3といったサイバーセキュリティに関する規格が定められているものの、電子機器やサービスを安全に運用するためには、これらの規格を満たすだけでなく継続的に対策のアップデートがおこなわれている。攻撃手法の進化はサイドチャネル攻撃においても同様である。例えば、小型のサイドチャネル攻撃装置を対象の電子機器近傍に配置することで、攻撃者は遠隔にしながらサイドチャネル攻撃をおこなう、リモートサイドチャネル攻撃の可能性が報告されている[40–42]。この攻撃手法が実施された場合、ドローンや自動車のような、運行中に人手による解析が困難な電子機器だとしても、事前に小型の攻撃装置を取り付けておくことで、暗号が解読される恐れがある。サイドチャネル攻撃への脅威分析と対策は、こうした攻撃手法の進化に対しても対応する必要がある、高度な専門技術に加えて継続的な研究開発が求められる。

以上のように、現代の高度情報化社会では、高度なアルゴリズムを用いた暗号技術によって、デジタルデータのセキュリティを確保している。しかし、サイドチャネル攻撃によって暗号が解読される恐れがあり、価値の高いデジタルデータにとって大きな脅威となっている。サイドチャネル攻撃への対策には、サイドチャネル攻撃の脅威の大きさとそれに対する電子機器の脆弱性を把握することが必要であるが、そのためには高度な知見と技術が求められる。さらに、常に進化するサイドチャネル攻撃の攻撃手法に対応するためには継続的な研究開発が必要である。そのため、サイドチャネル攻撃への対策は、十分な技術を持たない電子機器メーカーやサービス事業者には困難である。そこで、サイドチャネル攻撃への脅威分析と対策支援をおこなうことで、電子機器やサービスのセキュリティ性能を向上させる事業を提案する。高いセキュリティ性能を持つ電子機器やサービスを普及させることで、デジタルデータが利活用される高度情報化社会において、ユーザーがいつでも安心して電子機器やサービスを利用できる環境づくりに貢献する（図 6-6）。

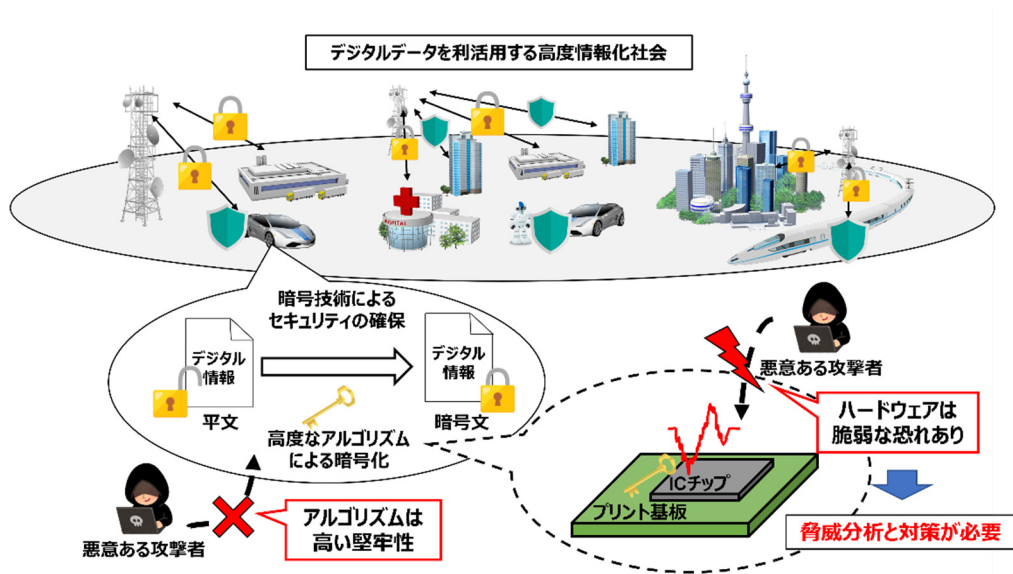


図 6-6 高度情報化社会におけるサイドチャネル攻撃の脅威と対策の必要性

6.3 イノベーションアイデア

サイドチャネル攻撃への脅威分析と対策支援をおこなう本事業の対象顧客は、電子機器を製造するメーカーと、それらを用いるサービス事業者とする。その中でも、特に本事業が求められる分野を検討した。サイドチャネル攻撃は暗号処理中の IC チップから発生する動作情報を利用して暗号を解読する攻撃手法であり、暗号技術が実装されている電子機器が攻撃対象である。現在のデジタルデータ主導である高度情報化社会において、暗号技術はほとんど全ての電子機器に実装されているため、あらゆる電子機器がサイドチャネル攻撃の対象となる。しかし、現段階ではサイドチャネル攻撃が十分に認知されておらず、市場が顕在化していない。そこで、特に高いセキュリティ性能が求められ、サイドチャネル攻撃が脅威となりうる電子機器の分野を検討する。

対象顧客の分野を検討するために、様々な電子機器を図 6-7 のように分類した。横軸をユーザー視点でのセキュリティ性能の重要性、縦軸を電子機器への物理的なアクセスのしやすさとする。ユーザー視点でのセキュリティ性能の重要性では、ユーザーが電子機器やそれらを用いたサービスを選択する際に、セキュリティ性能が主要な要素であるかという視点で分類した。例えば、冷蔵庫やエアコン、テレビ等の家電製品は、その使用状況から攻撃者が生活者の様子を読み取ることができる。こうした情報は空き巣に利用される恐れがあるため、家電製品はセキュリティ対策が重要な電子機器である。しかし、ユーザーが家電製品を購入する際に、大きく価値を感じる要素は機能や価格であり、セキュリティ性能は最優先事項ではないと考えられる。現状ではハードウェアセキュリティの必要性が広く普及していないため、家電製品メーカーはサイドチャネル攻撃への対策に消極的であると考えられる。また、縦軸の電子機器への物理的なアクセスのしやすさでは、サイドチャネル攻撃をおこなう攻撃者が攻撃対象の電子機器が使用されている場所に到達することが困難かという視点で分類した。データサーバーのように、厳重に管理されていて物理的なアクセスが困難な電子機器は、サイドチャネル攻撃が大きな脅威になりづらいと考えられており、こうした電子機器を製造するメーカーやそれらを用いるサービス事業者はサイドチャネル攻撃への対策に消極的だと推測する。

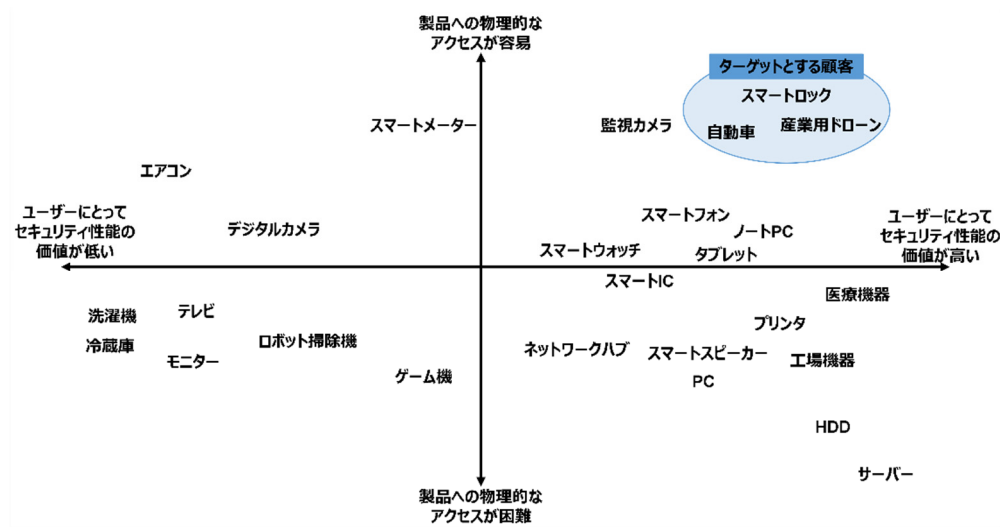


図 6-7 サイドチャネル攻撃への対策を必要とする電子機器やサービスのセグメント

これらの視点から、特に高いセキュリティ性能を必要とし、サイドチャネル攻撃が脅威となりうる電子機器の分野として、スマートロックや産業用ドローン、自動車を選択し、本事業の導入時期における主要な対象顧客の分野とした。以降にそれぞれの分野におけるサイドチャネル攻撃への対策の必要性について述べる。

第一に、スマートロックにおけるサイドチャネル攻撃への対策の必要性について述べる。スマートロックはオートロック機能や遠隔からの施錠・解錠機能など、利便性とセキュリティ性を向上させる製品として数多くの企業や一般消費者に使用されており、Grand Vies Research, Inc.の調査レポートによると、スマートロックの世界市場規模は2030年までに81億3000万USドルに達すると予測されている[43]。現在、急速に普及しているスマートロックは、オフィスや住宅への不法侵入を防ぐために、高いセキュリティ性能が求められる。スマートロックにおけるセキュリティ対策のひとつとして、デジタルデータの暗号化がおこなわれている。鍵の施錠・解錠をおこなう際に、スマートフォンとのBluetooth接続やWi-Fi通信によるインターネット接続を介してやり取りされるデジタルデータを暗号化することでセキュリティ性能を確保している。しかし、サイドチャネル攻撃による暗号解読によって、鍵の施錠・解錠に用いられるデジタルデータが漏洩し、攻撃者がオフィスや住宅に侵入できる恐れがある。そのため、スマートロックはサイドチャネル攻撃への対策が必要な電子機器である。

第二に、産業用ドローンにおけるサイドチャネル攻撃への対策の必要性について述べる。現在、産業用ドローンは空撮や農薬散布、インフラ点検等に活用されており、作業の高度化や効率化に活用されている。日本国内では、産業用ドローンの「有人地帯上空における目視外飛行」（レベル4 飛行）が2022 年度中に制度化される予定であり、物流や警備、災害救助といった様々な分野での活用が期待されている[44]。有人地帯を飛行する産業用ドローンの墜落や運送物の落下は、人や財産に被害を与える重大な事故に直結するためセキュリティの確保が必要である。また、インフラ点検や警備、行政関連の用途で用いられる産業用ドローンでは、ドローンが取得した映像や位置情報等のデジタルデータに対して非常に高い機密性が求められる。そのため、飛行時以外においても高いセキュリティ性能が求められている。実際に、2021 年末にはセキュアなドローンとして、内部データが暗号化された産業用国産ドローンが発売されており、2022 年の1 月から6 月において約500 台の機体が販売されている[45-47]。ドローンの制御は、機体と操縦者の間での無線通信接続によっておこなわれており、暗号化されたデジタルデータが用いられる。また、ドローンが取得した映像や位置情報等のデジタルデータも同様に暗号化された状態でやり取りがおこなわれている。このように、産業用ドローンが扱う大量のデータには暗号技術が用いられているため、サイドチャネル攻撃の脅威の対象である。サイドチャネル攻撃を用いた暗号解読によって、機密情報の漏洩や改ざんがおこなわれる恐れがあり、対策が必要である。また、リモートサイドチャネル攻撃によって、飛行中の機体においてもサイドチャネル攻撃が脅威となる。悪意ある攻撃者によって制御通信がハッキングされた場合、故意に墜落や運送物の落下等の事故が引き起こされる恐れがあるため、サイドチャネル攻撃への対策が必要である。このように産業用ドローンにおけるセキュリティの需要は大きく、サイドチャネル攻撃への対策が必要であると予測できる。

最後に、自動車におけるサイドチャネル攻撃への対策の必要性について述べる。現在の自動車はあらゆる部品が電子化されており、アクセルやブレーキ等の車両制御もデジタルデータによって制御されている。その中でも、無線通信による遠隔操作が可能な製品も販売されており、今後導入が期待される自動運転技術では移動通信を介した制御も検討されている。自動車の電子化は、利便性や安全性が向上する一方で、サイバー攻撃のリスクも懸念され、実際に、ハッキングによる自動車の遠隔制御が可能であるという研究報告がされている。こうしたサイバー攻撃は人や財産に被害を与える恐れがあるため、自動車業界においてサイバー攻撃への対策は重要な課題となっている。

サイバー攻撃への対策のひとつとして暗号技術が利用されており、外部通信だけでなく車内ネットワークにおいてもデジタルデータを暗号化することが義務化されている。産業用ドローンへのサイドチャネル攻撃と同様に、リモートサイドチャネル攻撃によって悪意ある攻撃者によって自動車の制御が支配される恐れがあるため、自動車においてもサイドチャネル攻撃への対策が必要である。

こうした分析に基づき、サイドチャネル攻撃への脅威分析と対策支援をおこなう本事業の対象顧客の分野を、スマートロック、産業用ドローン、自動車とした。加えて、現在、社会実装に向けて研究開発がおこなわれている空飛ぶクルマも、産業用ドローンや自動車における技術的背景が類似しており、顧客となりうると考える。スマートロック市場と産業用ドローン市場は比較的新しく、外注による対策や外部からセキュリティ専門家の雇用がおこなわれていることから、自社のみでセキュリティ対策をおこなう体制が整備されていないと予測される。また、自動車の部品製造や性能評価に携わるためには会社の信用や実績が必要である。したがって、スマートロックと産業用ドローンを直近の対象顧客とし、実績と信用を獲得したのちに自動車へ事業を展開する。

つぎに、本事業が対象としている、電子機器メーカーとサービス事業者を、サイドチャネル攻撃への認知度によって分類することで、対象顧客を明確にした。本稿では、顧客のサイドチャネル攻撃への認知度（以下、単に認知度）を、表 6-2 に示すように 4 つの度合に分類した。認知度 1 は、サイドチャネル攻撃を聞いたことがない、もしくは理解していない顧客を指す。認知度 1 の顧客は、サイドチャネル攻撃を、対策を検討すべき脅威として認識していない。また、サイドチャネル攻撃への脅威分析や対策をおこなうための評価設備や技術を持つ人材を所有していない。認知度 2 は、サイドチャネル攻撃の存在を把握しているものの、評価設備や人材を所有しておらず脅威を認知していない顧客である。認知度 2 の顧客は、サイドチャネル攻撃が身近な脅威になりつつあることを認識しているが、脅威分析をおこなう手段を持たないため、自社の電子機器やサービスに対して対策が必要なのか判断ができていない。認知度 3 は、サイドチャネル攻撃とその脅威を認知しているが、効果的な対策手法がわからない顧客である。認知度 3 の顧客は、類似製品に対してサイドチャネル攻撃による被害が発生することや、自社で評価設備や人材を所有しており脅威分析をおこなうことで、サイドチャネル攻撃への対策を必要としている。しかし、効果的に対策する技術がないため、未対策の

状態で電子機器やサービスを提供している。そして、認知度 4 は、サイドチャネル攻撃への脅威分析と効果的な対策を、自社内で実施することができる顧客である。本事業では、サイドチャネル攻撃を認知していない顧客と脅威分析や対策に関する技術を持たない認知度 1 から 3 の顧客を対象とし、脅威分析と対策支援をおこなう。

表 6-2 サイドチャネル攻撃への認知度による顧客の分類

	サイドチャネル攻撃に関して保有する知識・技術		
	攻撃の存在を認知	脅威分析技術の保有	対策技術の保有
認知度 1	×	×	×
認知度 2	×	×	○
認知度 3	×	○	○
認知度 4	○	○	○

認知度 1 および 2 の顧客は、電子機器やサービスに対するサイドチャネル攻撃への脅威分析ができず、対策の必要性がわからない。そこで、サイドチャネル攻撃への脅威分析をおこない、評価対象の脆弱性や想定される脅威をまとめた脅威レポートを提供する。これによって、顧客はサイドチャネル攻撃への脅威が明確になり、対策の必要性を判断ができる（図 6-8）。

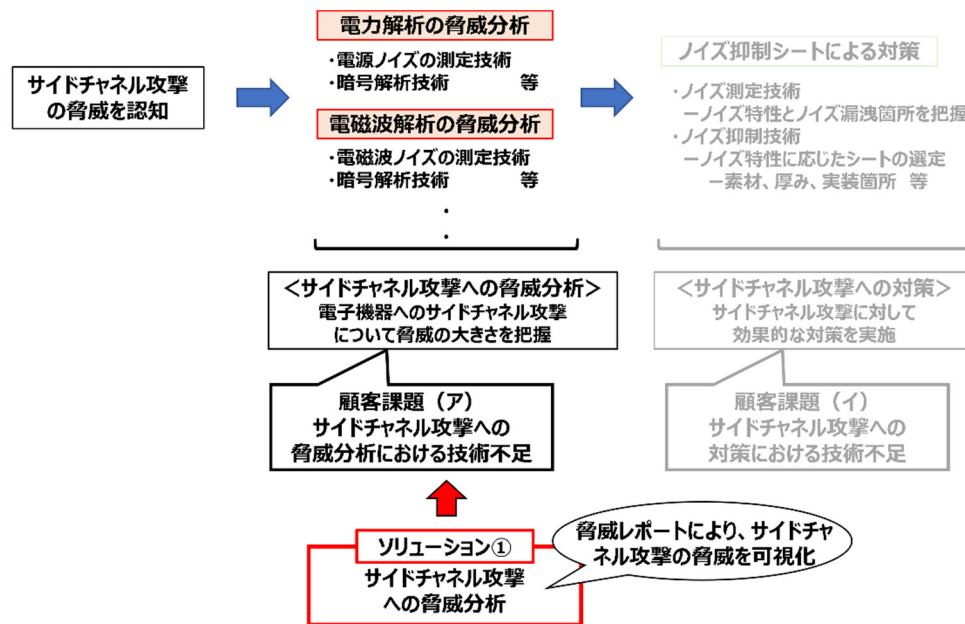


図 6-8 ソリューション①「サイドチャネル攻撃への脅威分析」と解決する顧客課題

サイドチャネル攻撃への脅威分析は、電子機器やサービスが目標とするセキュリティ性能値を明確にすることにも貢献する。サイバー攻撃に対する完全な対策は存在せず、高度なアルゴリズムによる堅牢な暗号だとしても、長い年月をかけてソフトウェアによる攻撃を続ければ、いずれ解読が可能である。サイドチャネル攻撃においても同様で、完全な対策は不可能であるため、目標とするセキュリティ性能値を定量的に定め、対処すべき脅威の大きさを明確にする必要がある。サイドチャネル攻撃の脅威の大きさは、「攻撃者の技術力」、「機材の性能」、「攻撃にかける時間」といった 3 つの要素に依存している（図 6-9）。例えば、廉価で性能の低い機材ではサイドチャネル攻撃による暗号解読が不可能であったとしても、微弱な信号や広い周波数範囲の信号を解析することができる性能の高い機材を使用すると、暗号解読が可能になることがある。本事業の脅威分析によってサイドチャネル攻撃の脅威の大きさを定量的に示すことで、顧客のセキュリティ性能値の目標設定における判断材料とすることができる。

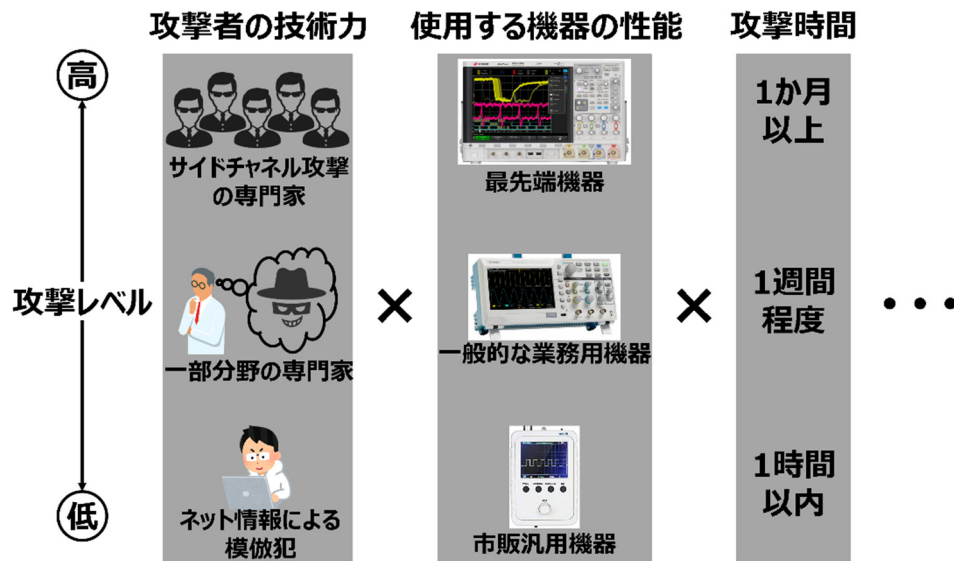


図 6-9 サイドチャネル攻撃に関する攻撃レベルの要素

サイドチャネル攻撃は解析対象とするサイドチャネル情報によって様々な攻撃手法が存在する。現在、報告されている攻撃手法の中でも特に、電力解析と電磁波解析では実製品へのサイドチャネル攻撃にも利用されており、活発に研究報告がされている。音響解析とフォトエミッション解析については、電力解析や電磁波解析と比較して研究報告数が少なく、実製品への攻撃事例も確認できない。そこで、本事業では電力解析と電磁波解析に着目して脅威分析をおこなうこととした。

サイドチャネル攻撃への脅威分析では、実際にサイドチャネル攻撃による暗号解読をおこなうことで、サイドチャネル攻撃への耐性を評価する。サイドチャネル攻撃への耐性評価は各評価項目に対して、それぞれの攻撃手法について脅威の大きさを分析する。耐性評価の結果は専門性の高いデータであるため、顧客に対しては脅威の大きさが理解できる形式の脅威レポートとして提供する。図 6-10 に本事業において提供する脅威レポートの一例を示す。脅威レポートは、評価結果の概要（図 6-10 左）と詳細（図 6-10 右）で構成し、評価対象のサイドチャネル攻撃に対する脆弱性を明確にする。詳細結果では、測定器の性能や解析時間といった、攻撃にかかる労力を具体的に記載し、脅威の度合いを具体化させる。このように、脅威分析に関する技術不足によりサイドチャネル攻撃への対策の必要性がわからない顧客に対して、脅威分析をおこない脅威レポートを提供する。高い専門性が求められるサイド

チャネル攻撃への脅威分析を、様々な攻撃手法に対して実施するため、顧客にとって価値の高いソリューションである。

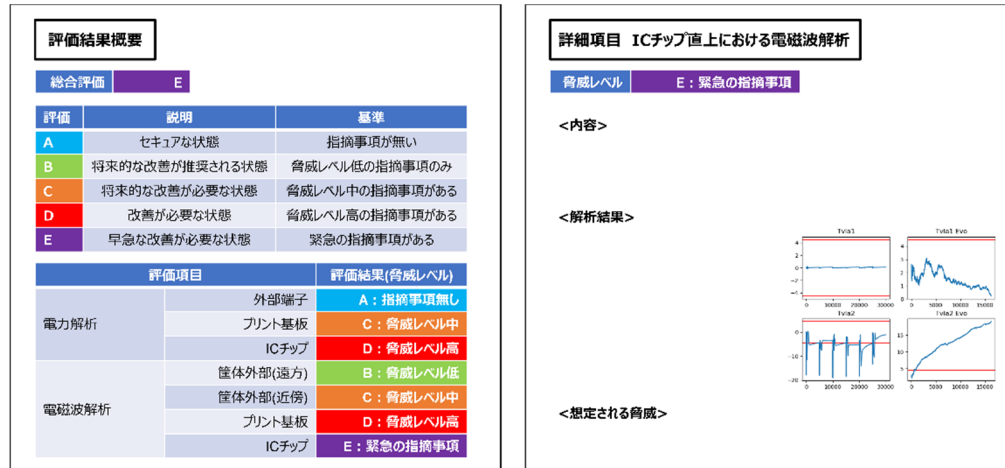


図 6-10 本事業のソリューション①「サイドチャネル攻撃への脅威分析」において提供する脅威レポートの例

さらに、サイドチャネル攻撃への対策支援をおこなう（図 6-11）。対策支援ではノイズ抑制シートを用いた対策について、顧客製品に対して適切なノイズ抑制シートを選定し有効な実装箇所を提示する。ノイズ抑制シートは軽量かつ省スペースなノイズ対策手法として知られており、小型化や軽量化が求められる製品に適している。本事業において対象としている産業ドローンや、既に販売されており筐体の変更が困難な製品に対する対策として有効である。

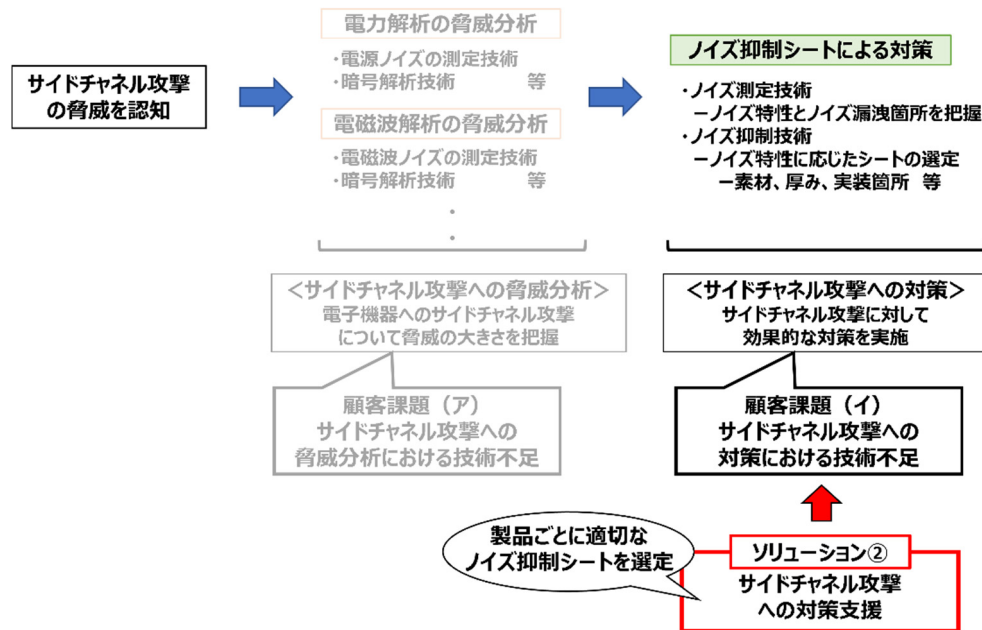


図 6-11 ソリューション②「サイドチャネル攻撃への対策支援」と解決する顧客課題

ノイズ抑制シートによるサイドチャネル攻撃の対策は、暗号解読の原因となるサイドチャネル情報の漏洩箇所とその特性の把握が重要である（図 6-12）。サイドチャネル情報である電源ノイズや電磁ノイズの発生源は IC チップ内の暗号回路であるが、IC チップやプリント基板の電気配線や空間を伝搬するため様々な箇所でこれらのノイズが観測される。そこで、製品において特にサイドチャネル情報が漏洩している箇所とその周波数特性や強度を把握することで、効果的にサイドチャネル攻撃の対策ができる。本事業においては、ソリューション①における耐性評価で得た結果に基づいて、サイドチャネル情報の漏洩箇所と周波数やノイズ強度といった特性を特定する。

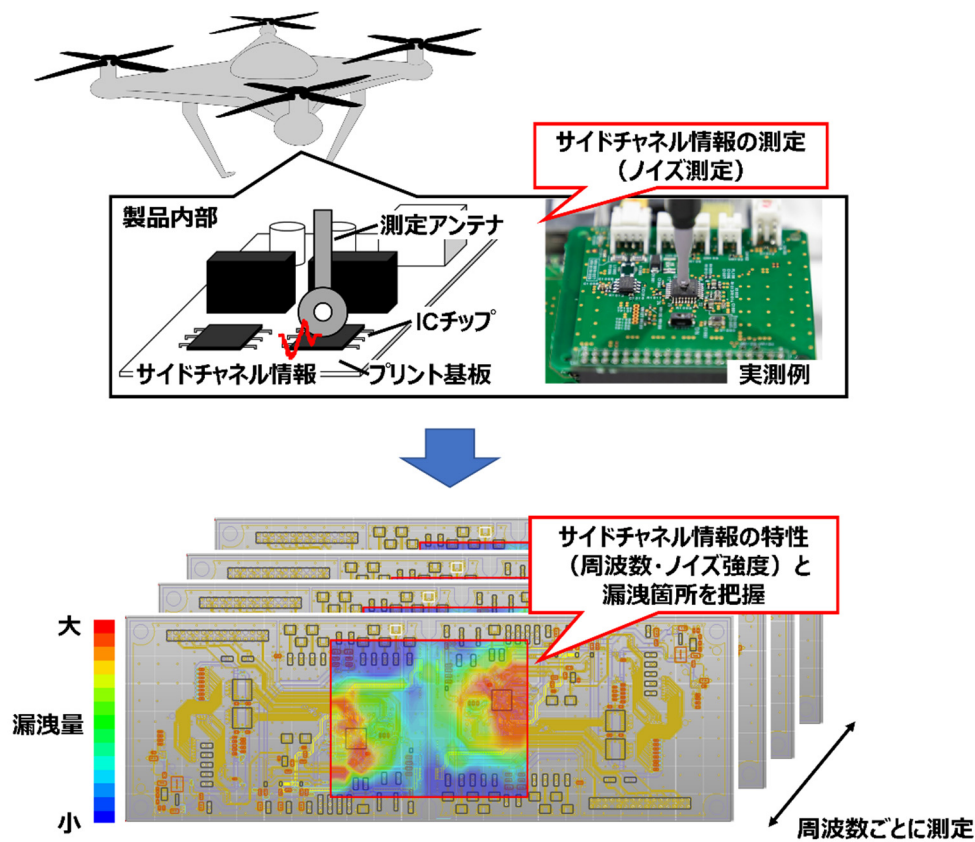


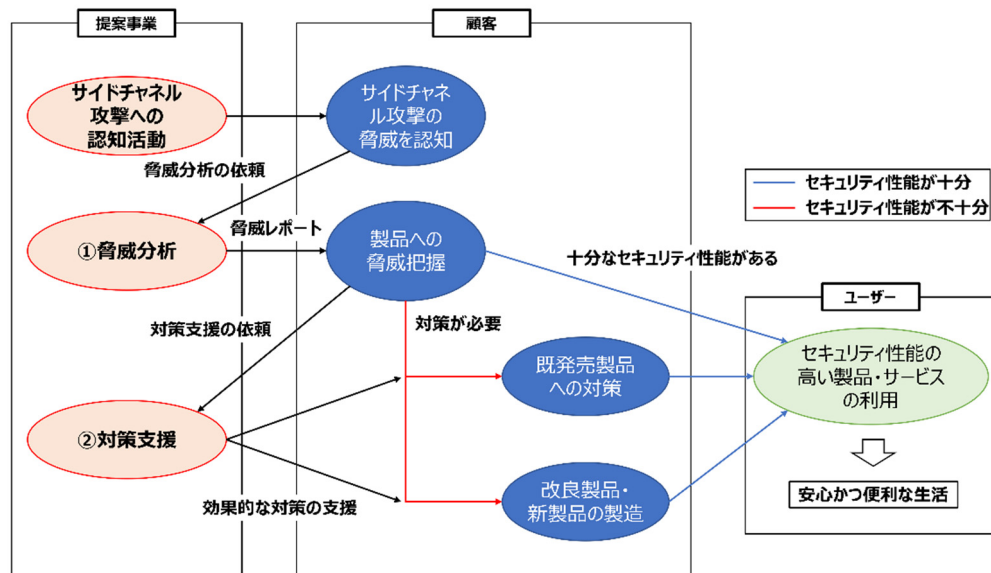
図 6-12 ノイズ抑制シートによる効果的な対策のためのサイドチャネル攻撃への耐性評価の例

つぎに、顧客製品に適したノイズ抑制シートを選定し販売する。ノイズ抑制シートは材質によって効果を持つ周波数範囲やノイズ抑制量が異なり、様々な種類が存在する。漏洩するサイドチャネル情報の特性と合わないノイズ抑制シートを選択した場合、ノイズ抑制シートの実装による効果が期待できない。そのため、適切なシートを選定する必要がある。

このように、サイドチャネル攻撃に対して適切な対策手法を選択するためには、脅威分析に必要な高い専門的な技術に加えて、最適な対策技術を選択し実装する技術が必要である。本事業では、技術不足により効果的なサイドチャネル攻撃への対策ができない認知度 1 から 3 の顧客に対して、サイドチャネル攻撃への対策支援をおこなうソリューションを提供する。

6.4 事業戦略について

本事業では、サイドチャネル攻撃への脅威分析と対策支援により、電子機器を製造するメーカーやそれらを活用したサービス事業者のセキュリティ性能の向上を支援する。本事業のビジネスモデルを図 6-13 に示す。事業の主な活動として、6.3 節において述べた 2 点のソリューションに加えて、サイドチャネル攻撃に関する顧客への認知活動が挙げられる。それぞれの活動内容と、顧客との関係について述べる。



現在、サイドチャネル攻撃による重大な社会問題は多数発生しておらず、6.3 節で挙げた顧客課題はまだ顕在化していない。その原因として、潜在的に存在するサイドチャネル攻撃の脅威の認知不足が挙げられる。つまり、対象顧客としている電子機器メーカーやサービス事業者の多くが、サイドチャネル攻撃の存在を認知していない認知度 1 の顧客である。そのため本事業においては、サイドチャネル攻撃の脅威を顧客に認知させるための認知活動が重要である。この認知活動として、対象顧客やユーザーに対して製品への暗号解読のデモをおこない、サイドチャネル攻撃への脅威を認知させることや、展示会や研究会への参加をおこなう。以下に、事業開始時の主要な対象顧客

分野としているスマートロックと産業用ドローンの市場について、サイドチャネル攻撃への対策が特に必要とされる具体的なシナリオから認知活動をおこなう対象を示す。

はじめに、スマートロック市場において、特にサイドチャネル攻撃への対策が求められる具体的なシナリオを検討する。6.3節でも述べたように、現在、スマートロックは急速に普及しており、オフィスや住宅のセキュリティ向上に貢献している。その中でも、Photosynth 社による Akerun やビットキー社による bitlock といったスマートロックを利用したサービスは、鍵の施錠・解錠をおこなうハードウェアと、ユーザー管理や入退室のログ記録等の機能を提供するソフトウェアによって構成されている。月額費用の形態であるため、ユーザーはセキュリティ性能の確保を含めた継続的なサポートを求める。スマートロックは、ビジネス用途でも使用されており、企業のオフィスのセキュリティ性能確保を担うため、サイドチャネル攻撃への対策をおこなう強い動機となりうる。また、レンタル形態ということは Photosynth 社とビットキー社がハードウェアを管理しているため、ハードウェアのみを販売する会社と比べて、既に販売されユーザーの手元にある製品への対策が容易である。そのため、本事業が提供する脅威分析と対策支援の価値が高く、認知活動をおこなう際の有効な顧客であると考えられる。

つづいて、ユーザーへ認知活動において有効な対象として、公共施設の管理をおこなう地方自治体を挙げる。現在、自治体が管理する公共施設では、管理人が施設に常駐し、物理的な鍵を利用者に手渡しする仕組みが一般的である。しかし、毎回の窓口対応が負担であることや、管理者が不在の時間に施設を利用できないといった問題が生じている。こうした問題を解決するために、自治体ではスマートロックの導入が進められている[48]。また、公共施設へのスマートロック導入は平常時における利便性向上だけでなく、緊急時における活用も期待されている。体育館や公民館といった公共施設は避難所としても活用されており、災害発生時には迅速な対応が求められている。スマートロックによる一元管理をおこなうことで、緊急時に迅速かつ確実に開放することができるため、地方自治体へのスマートロック導入は今後も拡大すると考えられる。そこで、スマートロックのユーザーとなる地方自治体に対してサイドチャネル攻撃による強い脅威を認知させることで、スマートロックのメーカーやサービス事業者がサイドチャネル攻撃への対策の必要性に迫られると考える。

つぎに、産業用ドローン市場に対する、認知活動の有効なシナリオを検討する。3.1 節において述べたように、現在、日本国内では産業用ドローンの有人地帯における目視外飛行（レベル 4 飛行）の制度化が進められている。レベル 4 飛行の実現によって、物流や警備分野における産業用ドローンの利用が期待されている。こうした有人地帯上空を飛行する用途や、点検や行政関連の用途では非常に高い信頼性とセキュリティ性能が求められている。また、これらの分野における産業ドローンの活用は、ほとんどが実証段階であり、常に新しい機体や運行管理システムが開発されている。特に ACSL 社の SOTEN は日本初のセキュアな国産ドローンとして販売されており、高いセキュリティ性能を大きな特徴としている。SOTEN におけるセキュリティ性能の確保にはデジタルデータの暗号化が活用されているが、サイドチャネル攻撃の脅威に対しては対策されていない。そのため、サイドチャネル攻撃による強い脅威を認知させることで、その対策に迫られると考える。このように、特に高いセキュリティ性能が求められる物流、警備、点検、行政関連の用途で利用される産業用ドローンの機体メーカーやユーザーに対して、サイドチャネル攻撃の脅威と対策の必要性を認知させることが有効であると考え

る。さらに、事業のビジネスモデルを明確にし、外部環境分析と内部環境分析をおこなった。外部環境分析と内部環境分析に基づき、本事業に適した事業戦略を考察する。デジタルデータのセキュリティ性能を脅かすサイドチャネル攻撃への脅威分析と対策支援をおこなう事業は価値が高く、希少性が高い。特に、日本国内においては、セキュリティ関連の事業に地域性による利点が存在することから、こうした強みがより大きくなると考えられる。さらに、本事業が対象とするスマートロックや産業用ドローン、自動車は日本国内においても数多く生産されておりため、大きな事業機会となる。しかし、サイドチャネル攻撃への認知度は低く、顧客課題として顕在化していないため、十分な認知活動が求められる。また、常に進化するサイドチャネル攻撃の攻撃手法に対して評価技術を獲得するために、継続的な研究開発が必須である。

6.5 まとめ

近年、情報通信技術の発達によって、デジタルデータの価値が急増している。デジタルデータをいつでも安心して利用し続けるためには、デジタルデータの「安全性」、「完全性」「可用性」を保証するセキュリティの確保が必要である。特にデジタルデータを秘匿化しセキュリティを確保する暗号技術は、高度なアルゴリズムによる堅牢性から、様々な電子機器に用いられている。しかし、暗号回路を実装した IC チップからは暗号処理動作に応じてサイドチャネル情報とよばれる動作情報が漏洩している。このサイドチャネル情報を解析することで、暗号解読をおこなうサイドチャネル攻撃の脅威が増している。高度なアルゴリズムを用いた暗号技術だとしても、サイドチャネル攻撃によってセキュリティを突破できる恐れがあるため、対策が必要である。そこで、電子機器のセキュリティ性能を向上させるために、電子機器メーカーやサービス事業者に対してサイドチャネル攻撃への脅威分析と対策支援をおこなう事業を提案した。

本事業について、事業、技術、知財、財務に関する戦略を分析し事業の競争優位と継続の可能性について考察した。

事業戦略分析では、高度情報化社会において高い価値を持つデジタルデータのセキュリティを確保する本事業は、ユーザーに対して安心で安全な電子機器やサービスを提供しようとする顧客にとって価値が高く、情報通信技術の発展に伴い事業機会が増加していることがわかった。また、海外の競争相手の脅威を抑えるために、本事業の対象顧客を日本国内に限定することが有効な戦略であることを見出した。しかし、サイドチャネル攻撃の強い脅威を認知していない顧客が多いため、認知活動をおこなうことが重要である。

以上の考察によって、本事業は電子機器メーカーやサービス事業者が認知していない課題に対してソリューションを提供し、価値の高いデジタルデータのセキュリティ性能を向上させるため、顧客にとって価値の高い事業であることがわかった。特に、対象顧客となる分野の市場は今後も成長することが期待されており、本事業への需要も拡大することが期待される。しかし、現状では課題が顕在化していないため、サイドチャネル攻撃の強い脅威を認識させることが重要である。また、事業を継続するためには、攻撃の精緻化に対応した技術の向上が必要であり、継続的な研究開発が重要である。

第7章

結論

現代の高度情報化社会では、様々な電子機器がインターネットに接続し、情報をやり取りしている。こうした情報は非常に価値が高く、高い安全性・信頼性・セキュリティが求められる。こうした要素を満たすことで、価値の高い情報を扱う電子機器を、いつでも安心して利用することができる。また、無線通信による電子機器のインターネットへの接続数が増加しており、無線通信の信頼性も高く求められる。しかし、電磁干渉によって無線通信品質の劣化を引き起こしうる不要電波が、電子機器の発展によって広帯域に及んでいる。また、こうした電子機器が密接して配置されることで、さらに電磁干渉が起りやすい環境となっている。特に、セルラー系の無線通信は低電力においても動作するように規格されているため、電磁干渉の影響を受けやすいと考えられる。本稿では、電磁波の高分解能測定技術と解析技術、抑制技術によって、不要電波と無線通信の干渉性を解析し、無線通信システムの安全性・信頼性の保証に寄与する研究開発に取り組んだ。また、この技術を活用した事業化について検討し、事業の優位性及び継続可能性を分析した。

第1章では、デジタルデータや無線通信システムの安全性・信頼性・セキュリティが求められる背景について説明し、これらの脅威として不要電波が存在することを示した。現代社会は、デジタルデータや無線通信システムに大きく依存しており、これらを安心して利用することが必須である。無線通信システムの安全性や信頼性への脅威の一つである電磁干渉は EMC 規格に基づいて評価・対策がおこなわれている。しかし、一般的に用いられている EMC 規格は、現代社会の電子機器や無線通信システムの利用環境と乖離しており、電磁干渉問題を保証するには不十分であることを課題として述べた。

第2章では、広帯域における不要電波の高分解能測定技術について述べた。セルラー系無線通信において使用される 6 GHz までの不要電波を一度に観測

する広帯域測定系と、無線通信のチャネル帯域幅における不要電波強度を測定しデータとして記録する狭帯域測定系を構築した。狭帯域測定においては、低電力においても規格されるセルラー系無線通信との電磁干渉を引き起こしうる微弱な不要電波を測定するために、 -177 dBm/Hz まで検知可能な高分解能測定系を構築した。

第 3 章では、無線通信品質評価による電磁干渉解析技術について述べた。不要電波の電力強度を測定するだけでなく、不要電波への無線通信の応答を解析することが、より正確な電磁干渉評価につながることを見出した。また、実機を用いた HILS 環境と同じ精度のシミュレーション環境を構築し、効率的かつ多面的に応用可能な電磁干渉解析を実現している。

第 4 章では、第 2 章と第 3 章において示した測定および解析手法を活用した実製品への電磁干渉評価について述べた。IC チップレベルの電磁干渉評価から、電子機器間、電子機器内部の電磁干渉評価をおこない、本提案技術の有意性を示した。また、EMC 規格を満たし販売されている製品に対しても電磁干渉評価をおこない、現状の EMC 規格は無線通信との電磁干渉問題を評価する上では不十分であることを示した。特に、今後産業利用が期待されるドローンは、不要電波による無線通信品質の劣化によって運航範囲が 10 分の 1 に縮小する恐れがあることを見出した。

第 5 章では、こうした不要電波による電磁干渉問題への対策手法として、磁性材料を活用した手法について述べた。IC チップパッケージングにおいて薄膜状に形成した磁性材料を実装することで、IC チップから発生する不要電波が約 10 dB 抑制できることを示した。

第 6 章では、これまでに述べた技術的特徴を活かした事業計画として、サイドチャネル攻撃への脅威分析と対策支援の事業化について分析した。顧客課題と提供するソリューションを見出し、事業戦略を分析したところ、サイドチャネル攻撃への脅威が強く普及していない現段階においては、サイドチャネル攻撃への認知活動が重要である。また、事業戦略として、国内に限定した事業により優位性を得ることを見出した。

以上の研究成果により、現代のセルラー系無線通信機器における様々な電磁干渉問題を見出した。本研究で取り組んだ手法は無線通信機能を有する全ての電子機器に対応しており、通信方式や周波数といった評価条件を比較的用意に展開できると考える。こうした評価結果に基づき、無線通信システムを対象とした不要電波の許容値を定めることで、電子機器の安全性・信頼性の向上に寄与することができる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多くの方々に御指導，御協力いただきましたことに心より感謝申し上げます。

本研究の機会を与えて頂き，終始適切な御助言を賜りました神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科・永田真教授に深く感謝致します。

本研究に関し，熱心に御指導いただきました神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科・田中聡客員教授に深く感謝致します。

本研究を進めるにあたり，終始熱心な御指導を賜りました神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科・福家信洋准教授，三木拓司准教授に心より感謝致します。

本研究に関し，適切な御指導，御助言を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科・三浦典之教授，沖殿貴朗氏に深く感謝致します。

本研究は総務省電波利用料制度による電波資源拡大のための研究開発の研究課題「不要電波の広帯域化に対応した電波環境改善技術の研究開発」により実施されました。本研究において使用した磁性膜について非常に有益な議論や，御指導，御助言を頂きました，東北大学未来科学技術共同センター・山口正洋教授，宮澤安範氏，東北学院大学・石上忍教授，アルティメイトテクノロジー株式会社・中村篤氏，大坂英樹氏他，関係者各位に深く感謝致します。また，本研究に使用した **SystemVue** について多大なる御助言，御指導を頂きました，**Keysight Technology** 合同会社・勝又祥子氏に深く感謝致します。

本研究室での日々の生活を快適に過ごせるよう，事務・会計処理など細やかな配慮をしていただきました。田中路氏，山崎美喜氏に感謝致します。

日頃よりお世話になり，様々な観点からご意見をいただきました神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科・門田和樹氏，園田大樹氏に深く感謝致します。並びに，本研究室，科学技術イノベーション研究科の皆様ならびに関係者の方々に感謝致します。

最後に，私をここまで育ててくださいました両親に心よりの感謝を致します。

参考文献

- [1] Cisco Visual Networking Index (VNI): 予測とトレンド, 2017~2022 年
ホワイトペーパー
- [2] 総務省, 令和 2 年版情報通信白書 ICT 白書 5G が促すデジタル変革と新
たな日常の構築, 2020 年 8 月.
- [3] 内閣府, 第 5 期科学技術基本計画にて定義 ([https://www8.cao.go.jp/cstp/
kihonkeikaku/5honbun.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf))
- [4] 日本経済新聞朝刊, 1 面, 2022 年 7 月 5 日
- [5] 情報処理推進機構(IPA), “コンシューマデバイスの信頼性確保に向けた
取組み ～開発方法論の国際標準化に向けて～,” Sep. 2013. ([https://w
ww.ipa.go.jp/files/000034692.pdf](https://www.ipa.go.jp/files/000034692.pdf))
- [6] 3rd Generation Partnership Project, “5G NR User Equipment radi
o transmission and reception Part 1 Range 1 Standalone,” TS 38.
101-1 version 15.5.0 Release 15
- [7] 小林亨, 石崎利弥, 石上忍, 川又憲, 張間勝茂, 禰真悟, “広帯域長六角
形折返しアンテナの試作と特性測定(1),” 電子情報通信学会技術報告
EMCJ2020-29, pp.25-30, Oct. 2020.
- [8] MICRONIX, “ノイズレベルとノイズフィギュア NF の関係,” 技術資
料. ([https://micronix-jp.com/file-download/technical/pdf/MAP3012Tec
hnicalReport1j.pdf](https://micronix-jp.com/file-download/technical/pdf/MAP3012TechnicalReport1j.pdf)) 2022 年 10 月 16 日参照
- [9] 総務省, “我が国の携帯電話用周波数の割り当てについて,” Oct. 2021.
(https://www.soumu.go.jp/main_content/000774493.pdf)
- [10] 3rd Generation Partnership Project, “LTE; Evolved Universal Terr
estrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio trans
mission and reception”, TS 36.101 version 8.4.0 Release 8.
- [11] N. Azuma, T. Makita, S. Ueyama, M. Nagata, S. Takahashiz, M.
Murakamiy, K. Horiy S. Tanaka and M. Yamaguchi, “In-system
diagnosis of RF ICs for tolerance against on-chip in-band interferers,”
Proc. IEEE Int’l Test Conf., pp. 12.3.1-12.3.9, Sep. 2013.

-
- [12] S. Muroga, Y. Shimada, Y. Endo, S. Tanaka, M. Yamaguchi, M. Murakami, K. Hori, N. Azuma, M. Nagata, S. Takahashi, "In-Band Spurious Attenuation in LTE-Class RFIC Chip using a Soft Magnetic Thin Film," Proc. 2013 IEEE 9th International Workshop on Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo), #SS-5, pp. 47-52, Dec. 2013.
- [13] H. Li et al., "Design of a 10 kW GaN-based high power density three-phase inverter," 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Milwaukee, WI, 2016, pp. 1-8, doi: 10.1109/ECCE.2016.7855019.
- [14] J. Millán, P. Godignon, X. Perpiñà, A. Pérez-Tomás and J. Rebollo, "A Survey of Wide Bandgap Power Semiconductor Devices," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 5, pp. 2155-2163, May 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2268900.
- [15] R. S. Pengelly et al., "A Review of GaN on SiC High Electron-Mobility Power Transistors and MMICs," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 60, no. 6, pp. 1764-1783, June 2012, doi: 10.1109/TMTT.2012.2187535.
- [16] J. M. Martínez-heredia et al., "Development of GaN Technology-Based DC/DC Converter for Hybrid UAV," in IEEE Access, vol. 8, pp. 88014-88025, 2020.
- [17] B. Liu et al., "Impacts of high frequency, high di/dt, dv/dt environment on sensing quality of GaN based converters and their mitigation," in CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, vol. 3, no. 4, pp. 301-312, Dec. 2018.
- [18] Y. Zhang, S. Wang and Y. Chu, "Analysis and Comparison of the Radiated Electromagnetic Interference Generated by Power Converters With Si MOSFETs and GaN HEMTs," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 8, pp. 8050-8062, Aug. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2020.2972342.
- [19] T. Ibuchi and T. Funaki, "A comparative study on conducted noise characteristics of SiC and GaN power transistor," 2016 International Symposium on EMC EUROPE, Wroclaw, 2016, pp. 193-198, doi: 10.1109/EMCEurope.2016.7739169.
- [20] Okiyoneda Y, Mochizuki M, Yamamoto K, and Watanabe H, "High

- Power Wireless Power Transfer System Using GaN Devices,” in Proceedings of the IEICE EMC Sapporo 2019/IEEE APEMC 2019, #MonPM2C.6, pp. 38-41, 2019.
- [21] IEC, CISPR 11, “6.2 Edition, 2019: Industrial, scientific and medical equipment - Radio-frequency disturbance characteristics - Limits and methods of measurement,” Jan. 2019.
- [22] 内閣官房小型無人機等対策推進室, “空の産業革命に向けたロードマップ 2021,” 第 16 回小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会, https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/kanminkyougi_dai16/siryou4.pdf, Jun. 2021.
- [23] 内閣官房, 国土交通省, “ドローンを活用した荷物等配送に関するガイドライン ver.3.0,” Mar. 2022.
- [24] H. C. Nguyen, R. Amorim, J. Wigard, I. Z. Kovács, T. B. Sørensen, P. E. Mogensen, "How to Ensure Reliable Connectivity for Aerial Vehicles Over Cellular Networks," in IEEE Access, vol.6, pp.12304-12317, Feb. 2018. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2808998
- [25] 電子情報通信学会, アンテナ工学ハンドブック, オーム 社, 2008.
- [26] 増田則夫, 小野裕司, 近藤幸一, “フェライト薄膜による QFP の電磁ノイズ抑制,” 信学技報, vol. 108, no. 367, EMCJ2008-89, pp. 19-24, Dec. 2008.
- [27] M. Yamaguchi, S. Tanaka, Y. Endo, S. Muroga and M. Nagata, “On-chip integrated magnetic thin-film solution to countermeasure digital noise on RF IC,” APEMC2015J, May. 2015.
- [28] M. Yamaguchi, Y. Endo, P. Fan, J. Ma, S. Tanaka, Y. Miyazawa, M. Nagata, “An alysis of patterned magnetic thin-film noise suppressor for RF IC chip,” Proc. 11th Int.Workshop IEEE Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo), pp. 45-49, Jul. 2017.
- [29] M. Nagata, S. Shimazaki, N. Azuma, S. Takahashi, M. Murakami, K. Hori, S. Tanaka, M. Yamaguchi, “Measurement – Based Diagnosis of Wireless Communication Performance in the Presence of In-Band Interferers in RF ICs,” Proc. 2013 IEEE 9th International Workshop on Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo), pp. 37-41, Dec. 2013.
- [30] The World Economic Forum, “The Global Risks Report 2019.” Jan.

2019. (https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2019.pdf)
- [31] 情報通信研究機構, “NICTER 観測レポート 2021” (https://www.nict.go.jp/cyber/report/NICTER_report_2021.pdf)
- [32] 崎山一男, 菅原健, 李陽, “暗号ハードウェアのセキュリティ,” コロナ社, 2019.
- [33] “Data encryption standard (des),” 1999. (<http://csrc.nist.gov/publications/ps/ps46-3/ps46-3.pdf>).
- [34] M. Matsui, “Linear cryptanalysis method for des cipher,” *Advances in Cryptology -EUROCRYPT '93, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 765, pp. 386-397, Springer Berlin Heidelberg, 1994.
- [35] “DES crack,,” 1998. (http://w2.eff.org/Privacy/Crypto/Cryptomisc/DESCracker/HTML/19980716_eff_descrackerpressrel.html).
- [36] J. Daemen, V. Rijmen, “Aes algorithm specification,” 2001. (<http://csrc.nist.gov/archive/aes/rijndael/wsdindex.html>).
- [37] 鈴木雅貴, 菅原健, 鈴木大輔, “サイドチャネル攻撃に対する安全性評価の研究動向と EMV カード固有の留意点,” 2015.
- [38] Kocher, Paul C., Joshua Jaffe and Benjamin Jun. “Differential Power Analysis.” *CRYPTO* (1999).
- [39] S. Mangard et al., “Power Analysis Attacks,” Springer Science +Business Media. 2007.
- [40] Florian Tramèr, Dan Boneh, and Kenneth G. Paterson, “Remote Side-Channel Attacks on Anonymous Transactions,” 29th USENIX security symposium (USENIX security 20), pp. 2739-2756, 2020.
- [41] Schellenberg, Falk, et al. “Remote inter-chip power analysis side-channel attacks at board-level.” 2018 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD), 2018.
- [42] Zhao Mark., G. Edward Suh. “FPGA-based remote power side-channel attacks.” 2018 IEEE Symposium on Security and Privacy (S&P), 2018.
- [43] Grand Vies Research, Inc., “スマートロックの市場規模, シェア, 動向分析レポート 2022 年~2030 年,” Jul. 2022.
- [44] 空の産業革命に向けたロードマップ 2021 (https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/kanminkyougi_dai16/siryou4.pdf)
- [45] 株式会社 ACSL web ページ参照, (<https://product.acsl.co.jp/product/po>)

st-369/)

- [46] 日経産業新聞, “高セキュリティな国産ドローン,” 2021 年 12 月 23 日, 16 ページ
- [47] 株式会社 ACSL, 2022 年 12 月期 第 2 四半期決算説明資料, 2022.08.15
- [48] 神戸市, 記者発表, ICT を活用した中学校体育館の夜間開放～親しみやすい学校づくりに向けて～, 2022 年 8 月 31 日

発表論文一覧

本研究に関する発表論文

学術論文

- [1] K. Watanabe, Y. Sugimoto, S. Tanaka, N. Miura, M. Nagata, Y. Miyazawa, and M. Yamaguchi, "Evaluation of Undesired Radio Waves below -170 dBm/Hz from Semiconductor Switching Devices for Impact on Wireless Communication," IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications, vol. 1, issue. 3, pp.72-76, Sep. 2019.
- [2] K. Watanabe, M. Komatsu, M. Aoi, R. Sakai, S. Tanaka, and M. Nagata, "Analysis of Electromagnetic Noise from Switching Power Modules using Wide Band Gap Semiconductors," in IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications (LEMCPA), Sep. 2022.
- [3] 渡邊航, 酒井陵多, 青井舞, 小松美早紀, 田中聡, 永田真, “産業用ドローンの近傍における放射電磁ノイズの広帯域評価と移動通信干渉の解析,” 電子情報通信学会論文誌 B, 早期公開, Oct. 2022.

国際会議

- [4] K. Watanabe, Y. Sugimoto, N. Miura, M. Nagata, S. Tanaka, Y. Miyazawa, and M. Yamaguchi, "Interference of Undesired Radio Waves Near Inverter Power Devices on Mobile Communications," Proceedings of the IEICE EMC Sapporo 2019/IEEE AP EMC 2019, #MonPM2C.4, pp. 36, Jun. 2019. (Sapporo)

-
- [5] K. Watanabe, Y. Sugimoto, N. Miura, M. Nagata, S. Tanaka, Y. Miyazawa, and M. Yamaguchi, "Impacts of Undesired Radio Waves on Mobile Communications Nearby Inverter Power Devices," in Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity (EMC+SIPI 2019), Abstract reviewed paper, Wednesday poster, Jul. 2019. (New Orleans)
 - [6] M. Nagata, K. Watanabe, Y. Sugimoto, N. Miura, S. Tanaka, Y. Miyazawa, and M. Yamaguchi, "Evaluation of Near-Field Undesired Radio Waves from Semiconductor Switching Circuits," in Proceedings of the 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2019), #O_Th_B_2_1, pp. 866-869, Sep. 2019. (Barcelona)
 - [7] K. Watanabe, K. Jike, S. Tanaka, N. Miura, M. Nagata, A. Takahashi, Y. Miyazawa, and M. Yamaguchi, "Magnetic Composite Sheets in IC Chip Packaging for Suppression of Undesired Noise Emission to Wireless Communication Channels," in Proceedings of the 12th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo 2019), #1570581071, pp. 1-3, Oct. 2019. (Haining)
 - [8] M. Aoi, K. Watanabe, M. Komatsu, S. Tanaka, N. Miura, M. Nagata, Y. Miyazawa, and M. Yamaguchi, "Magnetic Materials for Radio Frequency Noise Suppression in Flipped IC Chip Packaging," in Proceedings of the 2020 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity (EMC+SIPI 2020), Abstract reviewed paper, W1-WE-PM-B, Aug. 2020. (Virtual conference)
 - [9] M. Komatsu, K. Watanabe, M. Aoi, S. Tanaka, N. Miura, and M. Nagata, "Evaluation of Undesired Radio Waves by Switching Power Circuits using GaN Transistors," in Proceedings of the 2020 IEEE International Symposium on Electromagnetic

Compatibility, Signal & Power Integrity (EMC+SIPI 2020), Abstract reviewed paper, W2-WE-PM-C, Aug. 2020. (Virtual conference)

- [10] M. Nagata, K. Watanabe, N. Miura, S. Tanaka, Y. Miyazawa, and M. Yamaguchi, "Impacts of Near-Field Undesired Radio Waves from Semiconductor Switching Circuits on Wireless Communications," in Proceedings of the 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2020), #OD08-1, pp. 1, Sep. 2020. (Virtual conference)
- [11] K. Watanabe, M. Aoi, M. Komatsu, S. Tanaka, and M. Nagata, "Measurements of Electromagnetic Emission nearby a Compact Drone," in Proceedings of the 2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), pp. 1-4, Sep. 2021. (Bali)
- [12] K. Watanabe, M. Aoi, M. Komatsu, S. Tanaka, and M. Nagata, "Measurements of Electromagnetic Emission Inside Industrial Unmanned Aerial Vehicles," in Proceedings of the 13th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo 2021), pp. 25-28, Mar. 2022. (online)
- [13] K. Watanabe, R. Sakai, M. Aoi, M. Komatsu, S. Tanaka, and M. Nagata, "Evaluation of Emission Noise from PCBs Inside an Industrial Unmanned Aerial Vehicle," in Proceedings of the 2022 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), FR-AM2-SS07-04, #1570784699, pp. 1, Sep, 2022.
- [14] K. Watanabe, R. Sakai, S. Tanaka, and M. Nagata, "ELECTR OMAGNETIC INTERFERENCE OF EMISSION NOISE ON MOBILE COMMUNICATIONS INSIDE INDUSTRIAL UNMANNED AERIAL VEHICLES," The 13th edition of Internation

al Workshop of Electromagnetic Compatibility (CEM 2022), Sep. 2022. (Suceava)

国内会議

- [15] 渡邊航, 地家幸祐, 田中聡, 三浦典之, 永田真, 高橋昭博, 宮澤安範, 山口正洋, "IC チップパッケージング内における磁性膜による不要電波抑制技術及び無線通信品質の向上," 電子情報通信学会技術報告, vol. 119, no. 241, EMCJ2019-67, pp. 175-178, 2019.10.25. (宮城)
- [16] 渡邊航, 地家幸祐, 田中聡, 三浦典之, 永田真, 高橋昭博, 宮澤安範, 山口正洋, "IC チップパッケージング内における磁性膜による不要電波抑制技術及び無線通信品質の向上," 電子情報通信学会技術報告, vol. 119, no. 241, EMCJ2019-67, pp. 175-178, 2019.10.25. (宮城)

受賞

- [17] IEEE 12th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC compo 2019), Best Student Paper Award, IEEE Electromagnetic Compatibility (EMC) Society, 2019.
- [18] 神戸大学 令和元年度, 神戸大学学生優秀学術表彰
- [19] Student Award, IEEE EMC Society Japan Joint/Sendai Chapters, 2020.
- [20] 13th International Workshop of Electromagnetic Compatibility (CEM2022), The best oral communication for junior participant, 2022.

その他の発表論文

国際会議

- [21] M. Yamaguchi, M. Sato, A. Takahashi, Y. Miyazawa, S. Tanaka, K. Jike, K. Watanabe, N. Miura, M. Nagata, "Magnetic Powder Composite Noise Suppressor for Flip Chip Mounted High Speed IC Chip," Proceedings of the IEICE EMC Sapporo 2019/IEEE APEMC 2019, #MonPM2C.6, pp. 38-41, Jun. 2019. (Sapporo)
- [22] M. Yamaguchi, A. Takahashi, Y. Miyazawa, K. Watanabe, K. Jike, S. Tanaka, N. Miura, and M. Nagata, "Sintered Ferrite Thin Plate Noise Suppressor Mounted on IC Chip Interposer (Invited)," in Proceedings of the 12th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo 2019), #1570581121, pp. 1-3, Oct. 2019. (Haining)
- [23] M. Yamaguchi, Y. Miyazawa, K. Watanabe, K. Jike, S. Tanaka, N. Miura, and M. Nagata, "Ferromagnetic Noise Suppressor to be Implemented in an IC Chip Package," in Proceedings of the 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2020), #OD08-2, pp. 1, Sep. 2020. (Virtual conference)
- [24] K. Watanabe, T. Wadatsumi, K. Monta, M. Aoi, M. Komatsu, R. Sakai, S. Tanaka, T. Miki, and M. Nagata, "Near Field Measurements of Sub-Millimeter-Wave Noise Emission from Digital Integrated Circuits," in Proceedings of the 13th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo 2021), pp. 45-47, Mar. 2022. (online)

図一覧

図 1-1. 情報通信技術 (ICT) によるデジタルデータの利活用の仕組み.....	2
図 1-2 本論文における不要電波問題に対する基盤技術とそれらの応用.....	4
図 2-1. 不要電波の広帯域評価系.....	8
図 2-2. 長六角形折り返しアンテナの外形	9
図 2-3. 不要電波の狭帯域測定系.....	10
図 2-4. 不要電波の測定感度向上手法.....	12
図 2-5. 不要電波のアンテナ出力端における電力強度の算出方法	13
図 2-6. 不要電波測定系における測定感度の検証方法	13
図 2-7. スペクトラム・アナライザ入力端における不要電波測定の下限值 ..	14
図 2-8. 不要電波強度の補正式 (2.2) を用いた際の不要電波の測定下限値 ..	15
図 3-1. 実測とシミュレーションによる効率的な無線通信品質の評価環境 ..	18
図 3-2. HILS 手法による LTE 通信品質評価系	20
図 3-3. RF フロントエンドチップの回路構成図.....	20
図 3-4. HILS 環境における不要電波と LTE 通信信号の電磁干渉評価結果 ..	21
図 3-5. 無線通信システムシミュレータによる LTE 受信感度評価環境	23
図 3-6. シミュレーション環境における RF フロントエンドモデルの回路構成 図.....	24
図 3-7. 無線通信システムシミュレーションによる LTE 通信品質評価の流れ ..	25
図 3-8. 不要電波を重畳した場合の RF フロントエンドモデルの出力波形 ..	25
図 3-9. HILS 環境とシミュレーション環境における不要電波と LTE 通信信号 の電磁干渉評価結果の比較.....	26
図 4-1. GaN 素子搭載電源モジュールの構成	30
図 4-2. GaN モジュール A における不要電波の測定位置	31
図 4-3. GaN モジュール B における不要電波の測定位置	31
図 4-4. GaN モジュール A における不要電波特性	32
図 4-5. GaN モジュール B における不要電波特性	32
図 4-6. GaN モジュール A の制御回路部から発生する不要電波の個体差	33
図 4-7. GaN モジュール A における動作周波数による不要電波特性の変化 ..	34

図 4-8. GaN モジュール B における動作周波数による不要電波特性の変化	34
図 4-9. 電源モジュールの動作周波数によるスプリアスの変化	34
図 4-10. 電源モジュールから発生する不要電波による LTE 通信への干渉性評価	35
図 4-11. 電源モジュールの動作周波数による通信干渉性の変化	36
図 4-12. 電気自動車 (EV) 用無線電力 (WPT) 伝送システム	37
図 4-13. WPT システムから発生する不要電波の角度依存性	38
図 4-14. WPT システムにおける送電ユニットの概略図	39
図 4-15. 送電ユニットから発生する広帯域の不要電波特性	40
図 4-16. 送電ユニットから発生する不要電波の距離依存性 (800 MHz 帯, 1700 MHz 帯, 4200 MHz 帯)	40
図 4-17. 送電ユニットから発生する不要電波による LTE 通信への干渉性評価 (800 MHz 帯, 1700 MHz 帯, 4200 MHz 帯)	41
図 4-18. パンチングメタルとノイズ抑制シートによる不要電波抑制	42
図 4-19. 産業用ドローン機体内部における電磁干渉問題の概要図	44
図 4-20. 被評価ドローン	44
図 4-21. モータ動作による不要電波特性	45
図 4-22. 長六角形折り返しアンテナによる不要電波測定環境	46
図 4-23. 長六角形折り返しアンテナによるドローン機体における不要電波の周波数特性	47
図 4-24. 被評価ドローンにおける電源モジュール及び制御モジュールの実装箇所	48
図 4-25. 磁界プローブによる局所的な不要電波測定	48
図 4-26. 磁界プローブによるモジュール毎の不要電波の周波数特性	49
図 4-27. 長六角形折り返しアンテナによる 800 MHz 帯におけるセルラー系無線信号と不要電波	50
図 4-28. 不要電波による LTE 通信への干渉性	51
図 5-1. 磁性材料の複素透磁率 (実部) の周波数特性	55
図 5-2. 磁性材料の複素透磁率 (虚部) の周波数特性	56
図 5-3. 磁性材料の強磁性共鳴損失の周波数特性	56
図 5-4. 評価 IC チップの回路構成図	57
図 5-5. IC チップパッケージングへの磁性薄膜の実装概要図	58
図 5-6. インタポーザ基板への磁性材料塗布による磁性膜の実装手法	59
図 5-7. IC チップへの磁性膜の実装手法	59

図 5-8. 磁界プローブによる IC チップ直上の不要電波測定	60
図 5-9. 評価 IC チップから発生する不要電波の広帯域特性	61
図 5-10. 磁性膜による不要電波の抑制効果.....	61
図 5-11. 磁性膜による不要電波強度の抑制効果（4 GHz 帯）	62
図 5-12. 磁性膜による LTE 通信感度の向上効果（4 GHz 帯）	63
図 6-1. デジタルデータのセキュリティを脅かすサイバー攻撃の概要	66
図 6-2. サイバー攻撃関連の通信数の年次推移（情報通信研究機構による大規模サイバー攻撃観測網「NICTER」による調査）	67
図 6-3. 暗号技術によるデジタルデータのセキュリティ確保の仕組み	68
図 6-4. 暗号回路を実装したハードウェアへの脅威	69
図 6-5. サイドチャネル攻撃のイメージ	70
図 6-6. 高度情報化社会におけるサイドチャネル攻撃の脅威と対策の必要性	72
図 6-7. サイドチャネル攻撃への対策を必要とする電子機器やサービスのセグメント	74
図 6-8. ソリューション①「サイドチャネル攻撃への脅威分析」と解決する顧客課題	78
図 6-9. サイドチャネル攻撃に関する攻撃レベルの要素.....	79
図 6-10. 本事業のソリューション①「サイドチャネル攻撃への脅威分析」において提供する脅威レポートの例	80
図 6-11. ソリューション②「サイドチャネル攻撃への対策支援」と解決する顧客課題	81
図 6-12. ノイズ抑制シートによる効果的な対策のためのサイドチャネル攻撃への耐性評価の例	82
図 6-13. サイドチャネル攻撃への脅威分析と対策支援のビジネスモデル....	83

表一覧

表 3-1. LTE 通信における最小受信感度の規格値[10]	18
表 3-2. HILS 環境における LTE 通信方式	21
表 4-1. GaN 素子搭載電源モジュール特性諸表.....	29
表 4-2. WPT システム諸表	38
表 5-1. 磁性材料のサンプル名と組成式.....	55
表 6-1. デジタルデータのセキュリティを確保するための 3 つの要素	66
表 6-3. サイドチャネル攻撃への認知度による顧客の分類	77

神戸大学博士論文「不要電波の高分解能測定及び解析技術に関する研究」全107頁

提出日 2023年1月25日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリ **Kernel** にて掲載される場合、掲載登録日（公開日）はリポジトリの該当ページ上に掲載されます。

©渡邊 航

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。