

令和5年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：総合通信基盤局電波部電波環境課

評価年月：令和5年8月

1 政策（研究開発名称）

不要電波の高分解能計測・解析技術を活用したノイズ抑制技術の研究開発

2 研究開発の概要等

（1）研究開発の概要

- ・実施期間
令和元年度～令和4年度（4か年）
- ・実施主体
大学、民間企業
- ・総事業費
1,278百万円

令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度	総額
326百万円	339百万円	317百万円	297百万円	1,279百万円

予算要求段階では総額10億円超となるか未定だったため、事前事業評価は未実施。

・概要

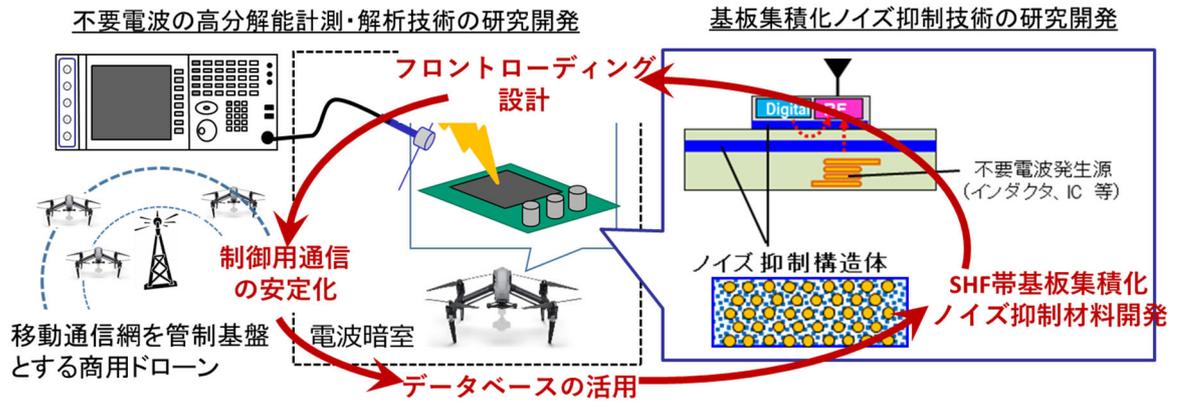
実装が高密度化した無線設備等においても従来と同等の受信感度を確保するため、不要電波の発生を予防する基板集積化ノイズ抑制技術、及び無線設備等における不要電波の高分解能計測・解析技術を確立した。

1. 不要電波の高分解能計測・解析技術の研究開発

無線設備等における不要電波の発生と内部干渉を計測するためのプローブ技術を開発した。また、不要電波のプローブ技術と機能連携した、不要電波の高分解能（量子化・デジタル化した際の観測信号の分解能）計測による広帯域データをリアルタイム解析する手法、及び着目する無線通信に干渉する帯域の不要電波を検知して高分解能データを収集する手法を開発した。さらに、高分解能データと通信シミュレーションを統合し、着目する無線通信への干渉及び通信性能への影響を評価する技術を開発した。

2. 基板集積化ノイズ抑制技術の研究開発

高い透磁率を有し、基板内蔵化のための熱プレスプロセスに対応可能な薄い磁性体を開発し、基板内のノイズ発生源近傍に集積化させることで不要電波の発生を予防する技術を開発した。



技術の種類	技術の概要
不要電波の高分解能計測・解析技術	<p>(a) 不要電波のプロープ技術の研究開発 ドローン等の動作状態における不要電波の発生を広い周波数範囲で計測し、低ノイズフロアで評価するためのプロープ技術及び記録技術を開発した。さらに、不要電波の記録データを用いた無線設備等の内部干渉と対策効果について試験環境及び実験評価手法を開発した。</p> <p>(b) 不要電波の高度解析技術の研究開発 ドローン等の動作状態の変化に対応した不要電波の追従性や、着目する無線通信に干渉する不要電波を抽出し、不要電波の発生と内部干渉を解析した。不要電波の記録データを解析する手法及び不要電波の記録データと通信シミュレーションの統合により着目する無線通信への干渉及び通信性能への影響を評価する技術を開発した。</p>
基板集積化ノイズ抑制技術	<p>高い透磁率を有し、かつ基板内蔵化のための熱プレスプロセスに対応可能な薄い磁性体を基板内のノイズの発生源近傍に集積させ、不要電波を低減する技術を確立した。アとの連携により、高分解能測定の結果をノイズ抑制設計へフィードバックし高性能化を図った。</p>

・スケジュール

	令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度
不要電波の高分解能計測・解析技術	不要電波の高分解能計測技術の基本検討及び設計	不要電波の高分解能計測技術のプロープ技術開発（静止状態）	不要電波の高分解能計測技術のプロープ技術開発（動作状態）	
	不要電波の高度解析技術の基本検討及び設計	解析試験環境構築	干渉解析	統合試験
基板集積化ノイズ抑制技術	広帯域ノイズ抑制材料一次試作と課題抽出	広帯域ノイズ抑制材料二次試作と材料系統込み	構造設計	
	評価系基礎検討	評価系一次試作	評価系二次試作	統合試験

(2) 達成目標

1. 不要電波の高分解能計測・解析技術の研究開発

(a) 不要電波のプロープ技術

- 不要電波を 700 MHz～30GHz の帯域内において 6 GHz 以上の広い周波数範囲で不要電波を記録する広帯域計測技術
- 無線設備等が干渉しやすい周波数帯域における特徴的な不要電波を低ノイズフロア（-170dBm/Hz 以下）で記録する高分解能計測技術

- ・ドローン等の機器における不要電波の対策効果を評価する試験環境

(b) 不要電波の高度解析技術の研究開発

- ・(a)と連携して、ドローン等の機器の動作状態における機器内部・機器外部の不要電波を計測し、10 秒以上の連続した動作状態の変化に対応した不要電波の追従性を解析する技術
- ・(a)と連携して、広帯域計測データ及び高分解能計測データから、着目する無線通信に干渉する不要電波を抽出し、700 MHz～30 GHz の帯域内における複数の無線通信（無線方式と無線帯域の組み合わせ）について通信シミュレーションと統合して無線通信性能指標への影響を解析する技術
- ・2 と連携して、ノイズ抑制技術により不要電波を対策する設計環境の構築技術

上記の技術を確立し、小型化・高周波駆動化・高密度実装化の進む無線設備等における不要電波の高度解析技術を実現する。また、例えば、(a) と (b) を連携して得られた不要電波の計測データ等の研究成果を公開するなど、広く成果展開することを目指す。

2. 基板集積化ノイズ抑制技術の研究開発

- (a) 広帯域基板集積化ノイズ抑制構造体用材料の開発技術
- (b) 広帯域基板集積化ノイズ抑制構造体の設計技術
- (c) 伝送線路とノイズ抑制体を一体化した試料の実装評価のためのノイズ抑制構造体評価技術

上記の技術の確立や 1 との連携を通じて、基板内のノイズ発生源近傍に集積化可能な磁性体とその設計技術および評価技術を開発し、既存のノイズ抑制シートと比べて不要電波の抑制効果を 10 dB 以上改善する。

○関連する主要な政策

V. 情報通信（ICT 政策） 政策 13 「電波利用料財源による電波監視等の実施」

○政府の基本方針（閣議決定等）、上位計画・全体計画等

名称（年月日）	記載内容（抜粋）
電波政策 2020 懇談会報告書（平成 28 年 7 月）	第 3 章 制度見直しの方向性 （2）電波利用共益事務の在り方 ②次期における電波利用料の使途 （オ）電波資源拡大のための研究開発、周波数ひっ迫対策のための技術試験事務 （中略） e) 電磁環境・測定分野： 安心・安全な電磁環境の維持に向けたワイヤレス電力伝送（WPT）システム等の機器から発せられる漏えい電波の解析・低減技術、近年の測定器や無線設備の多様化に対応し様々な機器から発射される電波が技術基準に適合していることを確認するために必要な測定技術の開発及び試験を実施する。

(3) 目標の達成状況

本研究開発では周波数範囲 700MHz～30GHz を対象として、ノイズ抑制体の材料物性からドローンの機体要件に至る広範なテーマの技術開発を実施機関の密接な連携により推進し、目標どおり達成することができた。

1. 不要電波の高分解能計測・解析技術の研究開発

(a) 不要電波のプロープ技術

不要電波を 700 MHz～30GHz の周波数範囲において 6 GHz 以上の周波数帯域で記録する広帯域計測技術及び無線設備等が干渉しやすい周波数帯域における特徴的な不要電波を低ノイズフロア（-170dBm/Hz 以下）で記録する高分解能計測技術を構築・実証した。

(b) 不要電波の高度解析技術

産業用ドローン等の機器の動作状態（10 秒以上）における機器内部・機器外部の不要電波計測データを収集することにより、産業用ドローン等に搭載する電子モジュールの動作と放射電磁ノイズの関連付け、あるいは放射電磁ノイズの記録データと無線通信システムへの干渉解析データの関連付け等の不要電波解析法を構築・実証した。また、ドローンにおける不要電波対策の技術要件をまとめ、ドローン産業界に提示した。また、ノイズ抑制技術をドローン機体に応用する不要電波対策の設計法及び試験方法を構築した。

2. 基板集積化ノイズ抑制技術

(a) 広帯域基板集積化ノイズ抑制構造体用材料の開発技術

700 MHz～30 GHz 帯における不要電波の抑制効果を改善するため、広帯域で高い透磁率を有し、かつ基板内蔵化のための熱プレスプロセスに対応可能な磁性体を開発し、既存材料より優れた伝送減衰率を有することを実証した。

(b) 広帯域基板集積化ノイズ抑制構造体の設計技術

基板内蔵プロセスに適合するようなプロセスの最適化により、熱プレスプロセスに対応可能で簡便に実装できる設計技術として、仮形成した薄いシートを積層樹脂基板製造プロセスに導入する技術を構築し、ノイズ抑制構造体（低ノイズ基板）を開発した。2(a)による材料を用いたノイズ抑制構造体を、既存のノイズ抑制シートと比較し、不要電波のチャンネルパワーを 10dB 以上低減する効果を実証した。

(c) ノイズ抑制構造体の評価技術

磁性体および誘電体の複素比透磁率と複素比誘電率を 700 MHz～30 GHz の周波数範囲で計測可能な評価技術を開発し、実証した。また、プリント基板に実装されたノイズ抑制構造体の基礎評価技術として、伝送線路とノイズ抑制体を一体化した実装基礎評価技術を開発し、検証した。

総合試験として、基板集積化ノイズ抑制技術の研究により開発した材料を、基板に実装して IC チップに組み込み、1 で開発したプロープ技術により材料による不要電波の相違を 30GHz までデータベースに組込めることを実証し、高度な設計技術の基盤データとして活用できることを実証した。

技術の種類	目標の達成状況
<p>1. 不要電波の高分解能計測・解析技術</p>	<p>(a) 不要電波のプロープ技術</p> <p>700 MHz～30GHz の帯域内において 6 GHz 以上の広い周波数範囲で不要電波を記録する広帯域計測技術を開発するため、広帯域計測技術((a)-1)及び無線設備等が干渉しやすい周波数帯域における特徴的な不要電波を記録する高分解能計測技術((a)-2)を開発し、本項目の目標を達成した。</p> <p>(a)-1 広帯域計測技術（アンテナの開発）</p> <p>1950 年代に電気通信大学の岡村らによって発表された菱形折返しアンテナの原型（260 MHz から 700 MHz まで対応可能）を参考に、マイクロ波まで拡張するため、主要部の寸法を2分の1に小型化、アンテナエレメントの形状を修正するとともに、給電点の構造を改良しバランを不要とした（図1）。なお、本アンテナは製品化された。</p> <div data-bbox="762 719 991 965" data-label="Image"> </div> <p>図1 長六角形折返しアンテナ（FLHA）</p> <p>(a)-2 不要電波の高分解能計測技術</p> <p>産業用ドローンの放射電磁ノイズに対応するため、移動通信システムにおいて利用される 700MHz から 6 GHz までの周波数帯域における放射電磁ノイズを高分解能に測定可能な測定系(図2)を構築した。周囲の無線通信や測定器が発生するノイズの影響を抑制するため、被評価ドローンとアンテナ、帯域除去フィルタ、低雑音増幅器などの高周波測定機器を電波暗室内に配置した。本測定系に対する入力電力応答評価実験により、測定下限値が-170dBm/Hz 以下であることを確認した。</p> <div data-bbox="667 1413 1123 1675" data-label="Diagram"> </div> <p>図2 放射電磁ノイズ測定系</p> <p>(b) 不要電波の高度解析技術</p> <p>(a)と連携し、産業用ドローン等の機器の動作状態（10 秒以上）における機器内部・機器外部の不要電波を計測・収集することにより、産業用ドローン等に搭載する電子モジュールの動作と放射電磁ノイズの変化に対応した不要電波の追従性を解析する技術、及び広帯域計測データ・高分解能計測データから、着目する無線通信に干渉す</p>

る不要電波を抽出し、700MHz～30GHz の帯域内における複数の無線通信（無線方式と無線帯域の組み合わせ）について通信シミュレーションと統合して無線通信性能指標への影響を解析する技術を開発した（(b)-1）。また、ドローン機体への不要電波対策の設計法及び試験方法（(b)-2）を構築した。これをもとに、ドローンにおける特徴的な不要電波データや、不要電波対策の技術要件をまとめるとともに、更にこれらをドローン産業界に提示するなど社会実装に向けた取組み（(b)-3）を行った。これらにより目標をより高度に達成した。

(b)-1 不要電波の高度解析技術

無線通信システムシミュレーションを用いた無線通信品質の解析環境を図3に示す。放射電磁ノイズの実測記録データに基づき LTE 通信品質を解析することで、電波暗室等の試験施設は不要となるほか、シミュレーションでは周波数や変調方式等を任意に設定可能して、放射電磁ノイズ及び無線通信干渉について効率的に解析可能となった。

具体的には、シミュレーションにより生成した LTE 通信の信号を、ドローン機体の近傍で実測記録した2秒間（最大10秒間）の放射電磁ノイズデータと重畳し、高周波フロントエンドの動作モデルに入力することで、受信機におけるデータスループットを解析した。このRFフロントエンドのモデルパラメータは実機に基づいており、実機と同等の性能評価が可能である。

また、放射電磁ノイズの広帯域及び高分解能な計測データを収集するとともに、独立成分分析を実装することにより、着目する無線通信に干渉する不要電波を抽出し、700MHz～30GHz の帯域内における複数の無線通信（無線方式と無線帯域の組み合わせ）について通信シミュレーションと統合して無線通信性能指標への影響を解析する技術を構築・実証した。これにより本項目の目標を達成した。

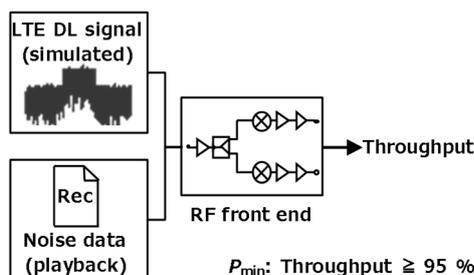


図3 不要電波を解析するシミュレーション環境

(b)-2 ドローン本体及び無線端末に応用する不要電波対策の設計法及び試験方法

ドローンなどの機器の無線通信性能確保のため、ドローンの本体と無線モジュールの不要電波抑制（低ノイズ化）設計を行い、評価を行った。ドローンは電源、モータなどの制御回路、カメラからの映像伝送回路、無線通信回路、そしてこれを統合制御するマイコン回路などからなる。ドローンの不要輻射と近傍電磁界を評価し、またドローン電装品の回路モジュール間の伝搬ノイズを計測したところ、ノイズが通信

へ影響するのは不要輻射が(a)アンテナに直接飛び込む経路、(b)無線モジュールに伝導する経路、(c)無線端末内の自家中毒の3つがあることが分かった(表1)。そこで(a)と(b)の低減を目的とし、ドローン本体の低ノイズ化及び(c)の無線端末のノイズの低減を図った。なお、無線通信の不要輻射の影響する指標については、通信帯域でのノイズの積分値に相当する通信帯域でのノイズのチャンネルパワーを評価指標とした。

(b)-2-1 ドローン本体の低ノイズ化

ドローン本体のノイズ低減のため、ドローンを構成する部位ごとの低ノイズ化を目指し、2種類の対策を設計し(表1)、検証した。結果は6つの無線バンド(Band1, Band3, Band8, Band18, L1, L2)全てでノイズ低減の効果があつた(図4)。また、角度平均値を全バンドで比較した結果、低ノイズ化対策を行った機体(表1の対策②)は対策前のリファレンス機体に対して垂直偏波で9.9dB、水平偏波では8.9dBの低減効果があつた。

表1 要素毎の
主要な不要電波抑制設計

部位	対策前	対策①	対策②
回路	水晶発振器	水晶発振器、CMF追加、バスコン等	+映像リドライバ削除
基板	2~4層	多層化(GND強化)、シールドキャップ等	←
ケーブル	束線+ノイズフィルム	シールド線	+基板間GND接続
筐体	メッキなし	←	メッキあり
設計例			

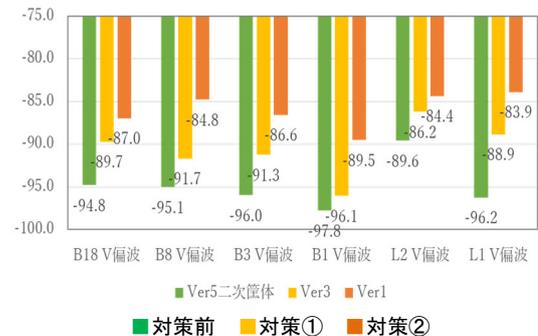


図4 通信バンド毎のドローンの低ノイズ化

(b)-2-2 無線端末の低ノイズ化

リファレンス機の無線端末では通信帯域に高調波ノイズを発生していたことから、これらを抑制するためFPGA、DDRをプレートや、ガスケット、基板により電磁的影響を遮蔽したほか、DCDCコンバータを金属により遮断し、評価した。結果、アンテナ端でのノイズは7dB以上低減した。更に無線端末に内蔵しているLTEモジュールの接地構造を片辺接地から両辺接地に変更し、通信性能を評価した(図5)。これにより、無線端末の感度について、端末がアンテナの15cm横にある場合も-100dBm/10MHz以下となった。これはアンテナが無い場合と同程度であり、ノイズの低減効果があつた。

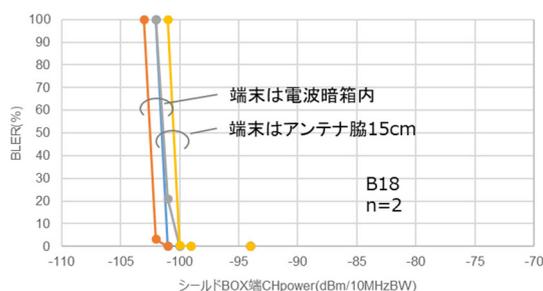


図5 無線端末の通信性能評価

(b)-3 ドローンの社会実装に向けた取組

ドローン機体に搭載された LTE 通信の無線性能評価、及び品質改善によるフィールドでの効果検証を実施するとともに、品質改善のアプローチをまとめた映像及び文書を作成し、当該取組を通じて再認識したモバイル通信の無線性能の品質確保の重要性を広く認知させた。

(b)-3-1 ドローン機体の LTE 通信の無線性能評価

国内外の市販機体、開発機体を含めた複数の LTE 通信機能を搭載したドローンを対象に、電波法で上空利用が認められた LTE の 3 周波数帯における総合放射電力 (TRP : Total Radiated Power)、全方向感度 (TIS : Total Isotropic Sensitivity) の測定を行い、LTE 通信エリア設計に基づく携帯電話の無線性能の受入基準への適合性を評価した。

図 6 の受入基準に対する機体の TRP/TIS の測定結果が示す通り、1.7GHz 帯 (Band3)、2GHz 帯 (LTE Band1) では多くの機体が基準を満足したが、800MHz 帯 (Band18) では、ほぼ全ての機体が基準未達の結果となった。これは、カメラや DCDC コンバータといったドローン搭載機器の不要電波ノイズ特性が低周波数帯で顕著である点とも符合し、不要電波対策が十分施されていないドローン機体における無線性能の品質確保の必要性が浮き彫りとなったと言える。

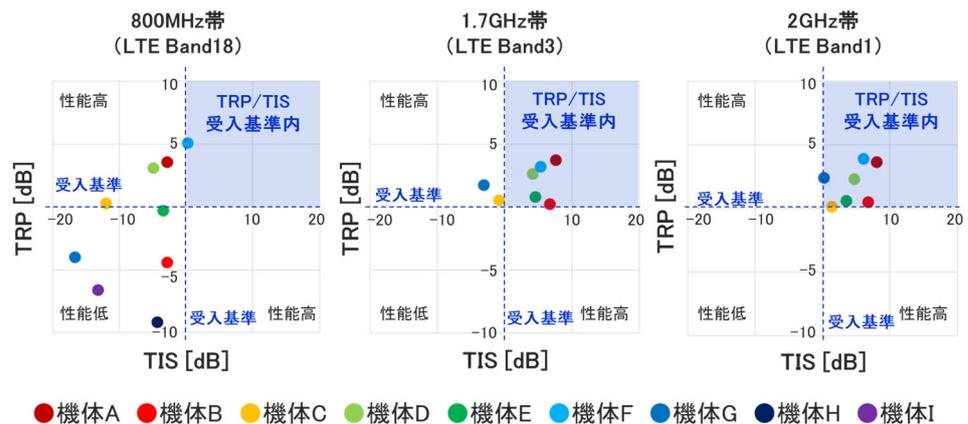


図 6 機体ごとの TRP/TIS 測定結果プロット

(b)-3-2 LTE 通信の無線性能の品質改善と効果検証

(b)-3-1 を踏まえ、ドローン機体に対する LTE 通信の無線性能改善に向けた対策を行い、対策前後の機体を用いて、ドローンの実利用シーンにおける LTE 通信品質への効果検証を実施した。

LTE 通信の無線性能改善のため、本研究の他機関と共に策定した無線性能改善プロセス (図 7) を適用すると共に、不要電波ノイズ対策等含めドローン用に設計開発した LTE 通信モジュール Corewing01 (図 8) を搭載することで対策を行った。本対策によりドローン機体の無線性能は、800MHz 帯 (Band18) の TRP において対策前後で 10dB の改善が確認できた (図 9)。

本対策による無線性能の効果検証として、LTE の 800 MHz 帯の電波環境が異なるエ

リアにおいて、対策前後のドローンを飛行させ、LTE 通信を介した飛行中のカメラ映像伝送品質を比較評価した（「電波資源拡大のための研究開発」第16回成果発表会、およびMWE2022で動画を紹介）。

電波環境が良いエリア A では機体による映像品質に大きな差異はなかったが、電波環境が比較的悪いエリア B では、対策前の機体において映像途切れが確認されたのに対し、対策後の機体では安定して飛行映像が確認できた（図10）。本結果は、無線性能の改善効果を示すと同時に、ドローンの安心安全な遠隔運航の実現における無線性能の重要性を再認識させるものとなった。

本研究成果を纏めた映像や文書を広く公開し、ドローン業界全体の無線性能の品質課題と対策の重要性の認知を高めた。これにより、機体品質の向上につながり、上空での無線品質の確保が可能となることから、無人飛行機等の安全な運行に寄与するとともに、周波数の有効利用の一層の向上に寄与するものとなった、

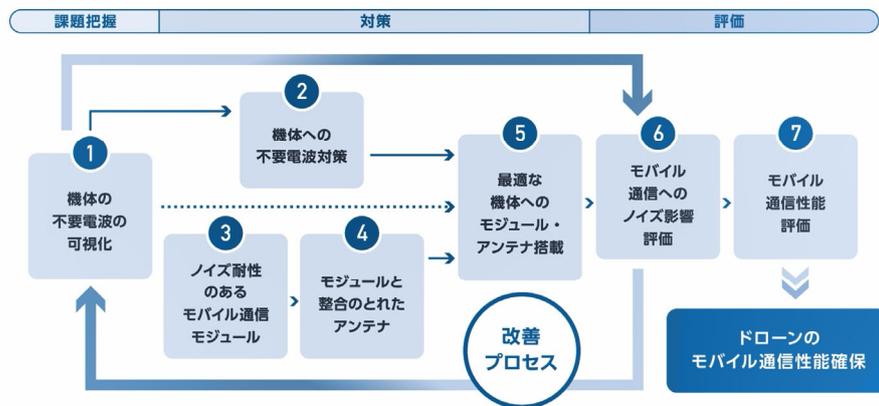


図7 無線性能改善プロセス



図8 Corewing01



図9 ドローン機体の無線性能

機体	エリアA (RSRP: -75~-85dBm)	エリアB (RSRP: -95~-105dBm)
対策前	映像品質良	映像断発生
対策後	映像品質良	映像品質良



図10 ドローン飛行時のLTE映像伝送品質の効果検証

(a) 広帯域基板集積化ノイズ抑制構造体用材料の開発

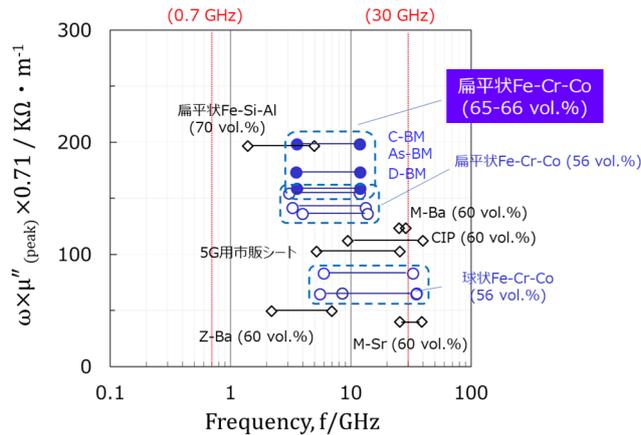
700 MHz～30GHz 帯において不要電波の抑制効果が改善されるよう、広帯域で高い透磁率を有し、かつ基板内蔵化のための熱プレスプロセスに対応可能な磁性体を開発するため、Fe-Cr-Co 系合金による樹脂複合体 ((a)-1) に着目し、電子回路基板における電磁ノイズ抑制効果 ((a)-2) を検証した結果、既存材料より優れた伝送減衰率を確認でき、目標を達成した。

(a)-1 Fe-Cr-Co 系合金による樹脂複合体の開発

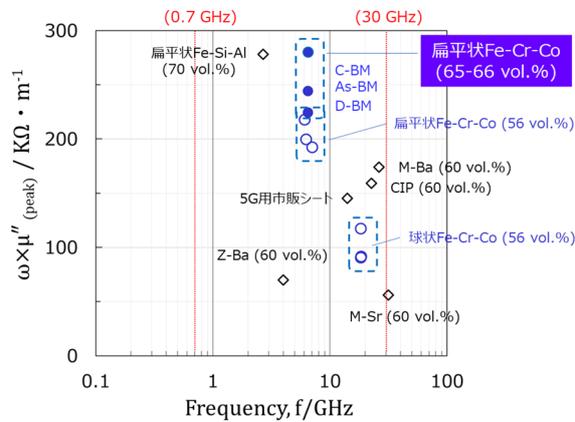
実施主体は、1990 年代後半から永久磁石を用いた電磁波吸収材料に関する研究開発の実績を有し、この知見を踏まえ、広帯域基板集積化ノイズ抑制構造体用材料を鉄-クロム-コバルト (Fe-Cr-Co) 系合金を用いて実現した。

市販の平均粒径 $20\mu\text{m}$ 程度の Fe-Cr-Co 系ガスアトマイズ粉末を用い (試料 As)、この粉末に対して多段階時効処理 (試料 C)、続けて連続冷却処理 (試料 D) を行った。これらの試料に対してボールミル加工を行って扁平状粉末を作製した (以下、試料名に「BM」を追記し、As-BM、C-BM、D-BM と表記)。得られた粉末をエポキシ樹脂に高充填化した樹脂複合体を作製し、特性を測定した。

図 11 に示すように、Fe-Cr-Co 系合金材料は高い電磁波吸収効果を SHF 帯 (3GHz～30GHz) で示し、6 GHz 付近で最も大きくなることが確認された。



(a) $\omega \times \mu''$ の帯域幅



(b) $\omega \times \mu''$ の極大値

図 11 開発した Fe-Cr-Co 系合金粉末を用いた樹脂複合体及び各種市販材料の電磁波吸収効果 $\omega \times \mu''$ の比較

(a)-2 電磁ノイズ抑制効果

図12に開発合金のボールミル粉末を用いた樹脂複合体の電子回路基板における電磁ノイズ抑制効果（伝送減衰率 $\Delta P_{\text{loss}}/P_{\text{in}}$ ）を示す。伝送減衰率 $\Delta P_{\text{loss}}/P_{\text{in}}$ は、入力電力に対する損失の割合を示し、高いほど優れたノイズ抑制効果を示す。

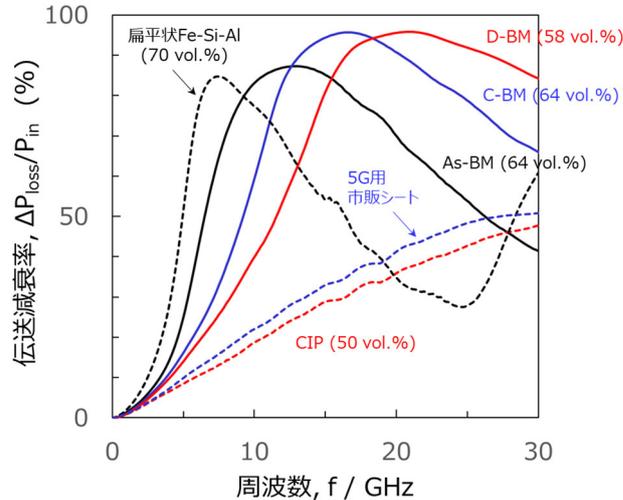


図12 Fe-Cr-Co系合金のボールミル粉末の樹脂複合体の伝送減衰率 $\Delta P_{\text{loss}}/P_{\text{in}}$ の周波数依存性

これにより C-BM、D-BM 試料は市販されている 5G 用ノイズ抑制シートやカルボニル鉄粉(CIP)ならびに扁平状セリダスト(Fe-Si-Al)粉の樹脂複合体よりも 10GHz～30GHz の高周波側に及ぶ周波数域で優れた伝送減衰率を示すことがわかり、高い電磁波吸収能を有すると判断された。以上より Fe-Cr-Co 系合金は、SHF 帯（3GHz～30GHz）において優れた電磁波吸収材料になりうると考えられる。

(b) 広帯域基板集積化ノイズ抑制構造体の設計技術

プリント基板に内蔵することで低ノイズ化を図るノイズ抑制構造体の実現に向け、熱プレスプロセスに対応可能な材料を検討し (b)-1)、基礎評価 (b)-2) の後、ドローン搭載用の DCDC コンバータの基板にノイズ抑制体を内蔵し評価した結果、既存のノイズ抑制シートと比較し、不要電波のチャネルパワーを 10dB 以上低減する効果を検証した (b)-3)。これにより、目標は達成した。

(b)-1 基板内蔵ノイズ抑制構造体の検討

プリント基板の製造時には高い温度と圧力が加わるため、高耐熱性および高耐応力性を持つ構造体が必要となるが、各種ポリマーおよびその配合比等に加えて、事前の熱処理等のプロセスについても検討した結果、エポキシ樹脂とセリダストの扁平粉を主原料とし、基板製造プロセス及びリフロー（熱によるチップ部品の半田付け）による部品実装に適応したノイズ抑制構造体を開発した（特許登録）。開発したノイズ抑制体の写真および内部構造を図13に、また実際にノイズ抑制体を内蔵し部品を実装したプリント基板および側面写真を図14に示す。

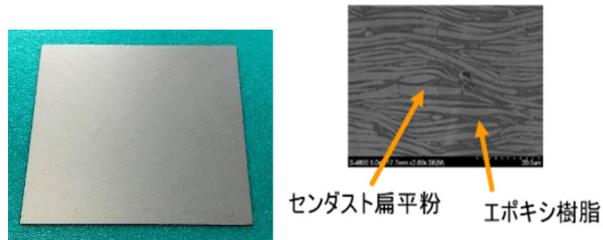


図 13 基板内蔵可能なノイズ抑制体

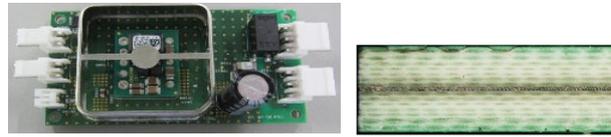


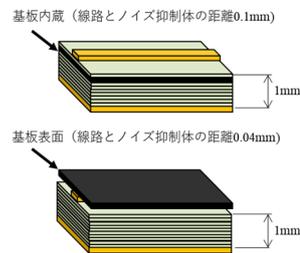
図 14 ノイズ抑制構造体を内蔵した基板および側面写真

(b)-2 基板内蔵ノイズ抑制構造体の基礎評価

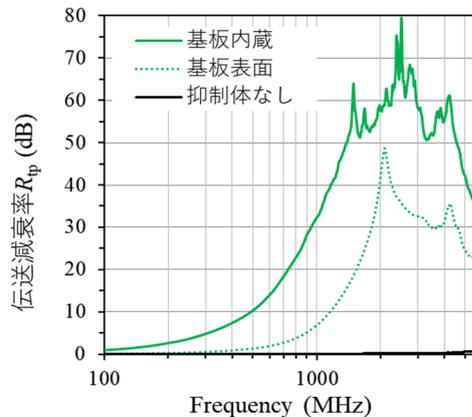
基板内蔵ノイズ抑制構造体のノイズ抑制性能を定量的に評価するため、既存のノイズ抑制シートの評価方法である IEC62333-2 で規定される伝送減衰率 R_{tp} を参考に評価系を作成した。

$$R_{tp} = -10 \log_{10} \left(\frac{10^{S_{21M}/10}}{1 - 10^{S_{11M}/10}} \right)$$

評価基板は、0.1mm 厚の基板を積層することにより、ノイズ抑制構造体を厚みや位置を変えて内蔵できる構成とした。基板の総厚を 1mm とし、特性インピーダンスが 50Ω となるように線路幅を設計した。



(a) 構成



(b) 測定結果

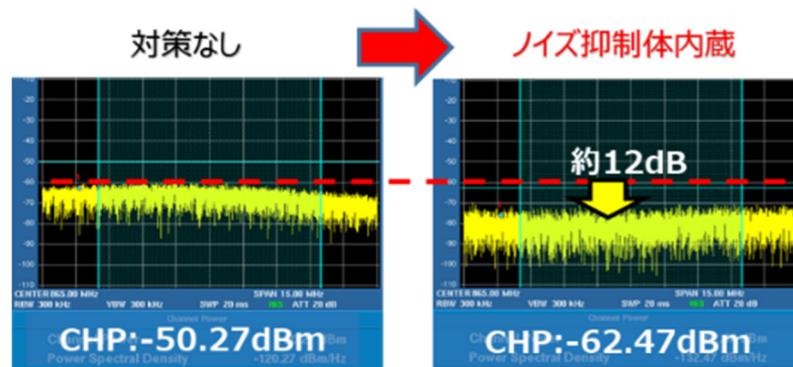
図 15 伝送減衰率測定結果

評価結果を図 15 に示す。既存のノイズ抑制シートの使い方である線路表面にシートを置いた場合と比較し、ノイズ抑制体を内蔵した場合、より大きな減衰効果が得られる結果となった。

(b)- 3 不要電波の抑制効果検証

ドローン搭載用に設計された DCDC コンバータ基板に、上記の検討で得られたセンダスト扁平粉からなるノイズ抑制構造体を内蔵し、不要電波の抑制効果の検証を行った。

不要電波の評価指標として、本研究において無線通信機器の最小受信感度との相関があることが確認されている不要電波のチャネルパワーを採用した。評価する周波数は、目視外飛行で大きな役割を果たす 800MHz 帯とした。測定結果を図 16 に示す。LTE Band18 (865MHz 帯) において、ノイズ対策をしない場合の不要電波チャネルパワーが -50.27dBm であったのに対し、ノイズ抑制体をプリント基板に内蔵した場合は -62.47dBm となり、10dB 以上の不要電波チャネルパワーの低減を確認できた。



(チャンネルパワー測定：中心周波数865MHz/帯域幅10MHz)

図 16 不要電波抑制効果の評価結果

(c) ノイズ抑制構造体の評価技術

ノイズ抑制構造体用材料の評価技術として、複素比透磁率及び複素比誘電率を 700 MHz \sim 30GHz の周波数範囲で計測可能な評価技術を開発し((c)-1)、実証した((c)-2)。更に、開発した評価技術の社会展開を目指しスタートアップ企業の立ち上げもなされた((c)-3)。以上により、目標をより高度に達成した。

(c)-1 各種測定法の開発

ノイズ抑制構造体は磁性体の高周波損失に基づいて電磁ノイズを抑制するため、磁性体およびそのコンジット材料の複素比透磁率および複素比誘電率を適切に測定し、その結果を踏まえ無線機や無線システムの低ノイズ化設計に活用することが有用である。磁性体の比透磁率は一般に 10GHz 以上では一桁台まで小さいため、比透磁率 10 以下、比誘電率 10 以下の磁性体および誘電体の複素比透磁率と複素比誘電率を 700 MHz \sim 30GHz の周波数範囲で誤差 15% 以内で計測可能な評価技術を開発し、磁性体およびノイズ抑制構造体の高周波特性の評価に利用した。

よく知られているニコルソン・ロス・ウィア (NRW) 法を参照測定法とし、新たな

方式として、以下の①ハーモニック共振器摂動法、②シールドドループコイル (SLC) 法、③マイクロストリップラインプローブ法を開発した。NRW 法はシートや基板内蔵形状では高精度での計測が困難であり、開発した3方式はこの課題を解決したものである。また、IEC TC51/WG10において、30GHzまでのノイズ抑制シートの透磁率・誘電率測定法の候補方式として3方式を提案し、国際規格化に向け活動中である。

① ハーモニック共振器摂動法

本方式は、ひとつの共振器において、共振の基本周波数に加えてその整数倍で共振器を共振させ、共振周波数と Q 値の変化から、複数の周波数で透磁率と誘電率を高感度で測定可能な方式であり、これまでに方形導波管による 3.9~18GHz に対応した製品化がなされている。

これまでの方法では、共振の発生にループアンテナ方式を利用しているが、より高周波数帯に対応するため、電界アンテナと結合孔板による新方式を開発し、Ka band (22~38GHz) においても高精度な測定が可能となった (特許申請)。

② シールドドループコイル (SLC) 法

本方式は、側面開放型 TEM セル内部に生じる磁界を励磁源として、短冊状試料を面内方向に励磁し、試料の磁束変化を試料周囲に配置された多層平面 SLC で検出するものである。6 GHz までを対象とした IEC 規格に採録されている。

本研究開発では、広帯域に対応するため、装置寸法およびインピーダンス整合を見直すとともに、校正測定における直流磁界強度を従来の 0.5T から 5T に増大させることにより高精度化を達成し、20GHz 以上においても測定可能とした。

③ マイクロストリップラインプローブ法

透磁率を測定する手段としてマイクロストリップ線路での測定可能性は示されてきたが、実際には単純な形状設計によるマイクロストリップ線路では、高周波において測定時に発生する反磁界の影響が避けられず、これに伴い共鳴周波数がずれることが課題であった。

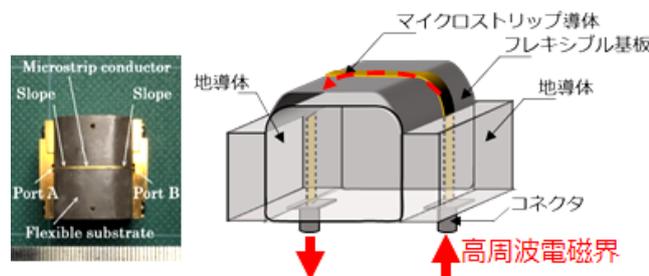


図 17 開発したマイクロストリップ型プローブ

本研究開発では、この課題を解決するため、まず、伝送線路の基本構造を変え、幅広コプレーナ線路型プリント基板プローブを開発した。信号線を幅広にして反磁界

を低減するとともに、信号線の幅方向にスリットを形成して電流が均等に流れる効果で広い範囲で適切な磁気測定に対応できる。ニッケル亜鉛 (NiZn) フェライトシート、カルボニル鉄粉 (CIP) シート等により 30GHz 以下において測定可能であることを示した。

(c)-2 精度検証

CIP コンポジットシートを対象として、NRW 法、ハーモニック共振器摂動法、シールドループコイル法及びマイクロストリップラインプローブ法による複素比透磁率の測定結果を比較した (図 18)。NRW 法を規準として、どの方式でも測定結果が概ね±15%の誤差範囲内にあり、ハーモニック共振器摂動法とマイクロストリップラインプローブ法では測定帯域が 30GHz を越え、当初の目標を達成した。

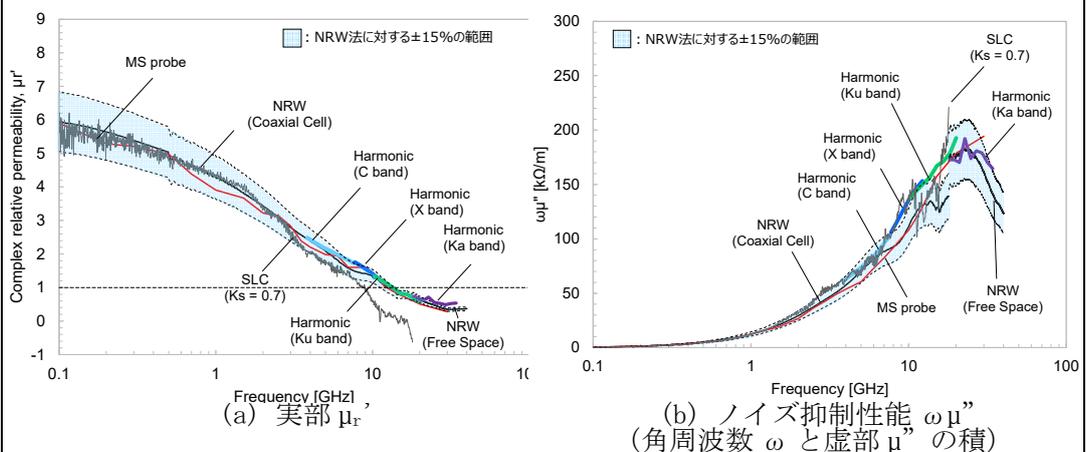


図 18 CIP の複素比透磁率

(c)-3 研究成果の社会展開 (スタートアップ企業の立ち上げ)

2023 年 1 月 4 日、マイクロストリップ線路型プローブ法を普及させるためスタートアップ企業を立ち上げ、活動を開始した (役員構成: CEO 沖田和彦、CTO 藪上信、URL: <https://www.tohoku-tmit.com/>)。

3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、各要素技術における目標の達成状況、論文数や特許出願件数などの指標が用いられ、これらを基に専門家の意見を交えながら、必要性・効率性・有効性等を総合的に評価するという手法が多く用いられている。この観点に基づき、「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」(令和 5 年 6 月 22 日)において、目標の達成状況等に関して外部評価を実施し、政策効果の把握に活用した。

また、外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等も調査し、必要性・有効性等を分析した。

4 政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

国際標準化について、IEC TC51/WG10 における透磁率・誘電率の国際規格化に加え、ノイズ抑制構造体の性能評価指針を磁性コアからの漏洩磁界及び漏洩電界により評価する方式を国際規格に

取り込むことを目指し、IEC TC51/WG9 で活動中である。

主な指標	令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度	合計
査読付き誌上発表論文数	2件 (2件)	2件 (1件)	3件 (1件)	9件 (7件)	16件 (11件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	3件 (3件)	5件 (5件)	5件 (5件)	5件 (5件)	17件 (17件)
その他の誌上発表数	0件 (0件)	1件 (0件)	5件 (0件)	1件 (0件)	6件 (0件)
口頭発表数	12件 (2件)	20件 (3件)	35件 (7件)	33件 (6件)	100件 (18件)
特許出願数	4件 (0件)	3件 (1件)	6件 (1件)	7件 (2件)	20件 (4件)
特許取得数	0件 (0件)	1件 (0件)	0件 (0件)	2件 (1件)	3件 (1件)
国際標準提案数	0件 (0件)	3件 (3件)	1件 (1件)	1件 (1件)	5件 (5件)
国際標準獲得数	0件 (0件)	1件 (1件)	0件 (0件)	0件 (0件)	1件 (1件)
受賞数	4件 (2件)	1件 (0件)	0件 (0件)	3件 (1件)	11件 (3件)
報道発表数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	2件 (0件)	2件 (0件)
報道掲載数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	4件 (0件)	4件 (0件)

注1：各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。(括弧)内は、その内海外分のみを再掲。

注2：「査読付き誌上発表論文数」には、定期的に刊行される論文誌や学会誌等、査読(peer-review(論文投稿先の学会等で選出された当該分野の専門家である査読員により、当該論文の採録又は入選等の可否が新規性、信頼性、論理性等の観点より判定されたもの))のある出版物に掲載された論文等(Nature、Science、IEEE Transactions、電子情報通信学会論文誌等および査読のある小論文、研究速報、レター等を含む)を計上する。

注3：「査読付き口頭発表論文数(印刷物を含む)」には、学会の大会や研究会、国際会議等における口頭発表あるいはポスター発表のための査読のある資料集(電子媒体含む)に掲載された論文等(ICC、ECOC、OFC など、Conference、Workshop、Symposium 等での proceedings に掲載された論文形式のものなどとする。ただし、発表用のスライドなどは含まない。)を計上する。なお、口頭発表あるいはポスター発表のための査読のない資料集に掲載された論文等(電子情報通信学会技術研究報告など)は、「口頭発表数」に分類する。

注4：「その他の誌上発表数」には、専門誌、業界誌、機関誌等、査読のない出版物に掲載された記事等(査読の有無に関わらず企業、公的研究機関及び大学等における紀要論文や技報を含む)を計上する。

注5：PCT(特許協力条約)国際出願については出願を行った時点で、海外分1件として記入。(何カ国への出願でも1件として計上)。また、国内段階に移行した時点で、移行した国数分を計上。

注6：同一の論文等は複数項目に計上しない。例えば、同一の論文等を「査読付き口頭発表論文数(印刷物を含む)」および「口頭発表数」のそれぞれに計上しない。ただし、学会の大会や研究会、国際会議等で口頭発表を行ったのち、当該学会より推奨を受ける等により、改めて査読が行われて論文等に掲載された場合は除く。

○各観点からの分析

観点	分析
必要性	ドローンやロボット等、広域低電力無線通信や高速・大容量通信等の無線通信機能を備える機器の稠密化により通信トラフィックが急激に増加し周波数がひっ迫する見通しである。今後、さらなる機器の増大により周波数のひっ迫が進み、ドローン等の機器の制御に用いられる無線LANやGNSS等の通信ネットワーク等に悪影響を及ぼし安定運用が困難になることが懸念されている。また、機器の小型化・高周波駆動化・高密度実装化が進み、機器内のスイッチングデバイス等のノイズ源が機器内のアンテナ

	<p>ナに近接配置され、電磁干渉による受信感度劣化の問題が増えることが懸念されている。</p> <p>本研究開発では、極薄でありながらノイズを効果的に抑制する基板集積化ノイズ抑制技術、及び無線設備等における不要電波等の発生源や抑制設計手法を高度に計測・解析する技術を開発し、この技術を活用し、ドローン等の静止及び動作状態における機器内部のノイズ発生と不要電波（700MHz～30GHzの帯域内）干渉を対策することにより、高密度実装化した無線設備等において従来と同等の受信感度を確保することで、制御用通信の安定化や通信特性の維持・改善によるトラフィック抑制が期待され、周波数の有効利用に貢献する。</p> <p>よって、本研究開発には必要性があったと認められる。</p>
効率性	<p>予算要求段階、公募実施の前段階、提案された研究開発提案を採択する段階、研究開発の実施段階及び研究開発の終了後における、実施内容、実施体制及び予算額等について、外部専門家・外部有識者から構成される評価会において評価を行い、効率的に実施した。加えて、実施期間中も外部の有識者と受託者から構成される運営委員会や、外部有識者による継続評価において、研究進捗や進め方等について助言を受けるなど、効率的な実施のため情報交換が積極的に行われた。</p> <p>本研究開発においては、ノイズ抑制技術に関する専門的知識や研究開発実績を有する受託者が、蓄積されたノウハウ・知見を有効に活用することで効率的で質の高い研究開発が進められ、予定した実施期間や事業費において、所期の目標を達成することができた。</p> <p>よって、本研究開発には効率性があったと認められる。</p>
有効性	<p>本研究開発では、産業用ドローンの動作状態における不要電波の高分解能計測・解析技術及び基盤集積化ノイズ抑制技術を確立し、これら技術をドローンに活用することによりノイズを有効に低減できるため、上空での無線品質の確保が可能となり、周波数の有効利用に寄与するとともに、無人飛行機等の安全な運行に寄与することができた。</p> <p>開発された要素技術は、すでに一部で製品化やスタートアップ企業が設立された。研究開発においては、外部有識者や専門家を含む研究開発運営委員会を通じて、多様な専門家からのアドバイスを得つつ、研究開発と実証実験を一体的に進め、その成果を展示会にて積極的に紹介を行うことにより、応用研究に向けた知見が得られるなど、研究成果の実用化に向けた確実性が高い。</p> <p>さらに、本研究開発で開発したノイズ抑制構造体の性能を評価するための測定方法については、IEC TC51/WG10において、国際規格化に向け提案したところであり、我が国の競争力強化や、ノイズ抑制機能の高い材料・部品の普及促進、ひいては電波環境の品質確保にも寄与することができた。</p> <p>よって、本研究開発には有効性があったと認められる。</p>
公平性	<p>本研究開発では、ドローンにおける不要電波をノイズ抑制技術により対策する設計技術の要件等を含む成果をまとめた映像や文書を広く公開し、ドローン業界全体に認知された。この設計技術が普及すると、ドローン及びその管制技術が所期の性能を十分に発揮でき、空の産業革命の推進を支える基盤技術として、またドローンに限らずEVやロボットなども含めて、社会・産業へ還元できる。</p> <p>また、本研究開発の実施に当たっては、開示する基本計画に基づき広く提案公募を行い、提案者と利害関係を有しない複数の有識者により審査・選定した。</p> <p>よって、本研究開発には公平性があったと認められる。</p>
優先性	<p>ドローンやロボット等、広域低電力無線通信や高速・大容量通信等の無線通信機能を備える機器の稠密化により通信トラフィックが急激に増加し周波数がひっ迫する見通しである。今後、さらなる機器の増大により周波数のひっ迫が進み、ドローン等の機器の制御に用いられる通信ネットワーク（制御用通信）等に悪影響を及ぼし安定運用が困難になることが懸念されている。また、機器の小型化・高周波駆動化・高密度実装化が進み、機器内のスイッチングデバイス（高周波電源モジュールや高速デジタル制御モジュール等）等のノイズ源が機器内のアンテナに近接配置され、電磁干渉による受信感度劣化の問題が増えることが懸念されている。これらは喫緊の課題であり、早急に対応する必要があることから電波政策 2020 懇談会報告書（平成 28 年 7 月）においても、優先的課題として電磁環境・測定分野における研究開発の必要性が記載されている。</p> <p>よって、本研究開発には、優先性があったと認められる。</p>

5 政策評価の結果（総合評価）

機器の小型化や実装の高密度化により電磁干渉による受信感度劣化の問題が指摘されている。特にドローンやロボット等の利用増加に伴うトラフィックの増加も進む中、ドローン等の機器の制御に用いられる通信ネットワーク等の安定運用を実現するため、機器内部の不要電波への対策をすることで、

制御用通信の安定化や通信特性の維持・改善による周波数の有効利用が期待されている。

本研究開発では、産業用ドローンの動作状態における不要電波の高度分析技術及び基盤集積化ノイズ抑制技術を確立し、これら技術をドローンに活用することによりノイズを有効に低減できることが確かめられた。これにより、周波数の有効利用に寄与するとともに、上空での無線品質の確保による無人飛行機等の安全な運行に寄与しており、目標を達成することができた。

開発された要素技術は、すでに一部で製品化されたほか、スタートアップ企業が設立された。また、研究開発と実証実験を一体的に進め、その成果を展示会にて積極的に紹介を行うことにより、応用研究に向けた知見が得られるなど、研究成果の実用化に向けた確実性が高い。

さらに、本研究開発で開発したノイズ抑制構造体の性能を評価するための測定方法については、IEC TC51/WG10 において、国際規格化に向け提案したところであり、我が国の競争力強化や、ノイズ抑制機能の高い材料・部品の普及促進、ひいては電波環境の品質確保にも寄与することができた。

よって、本研究開発には有効性、効率性等があると認められた。

<今後の課題及び取組の方向性>

前述したように、本研究開発で予定された要素技術が得られ、一部については製品化やスタートアップ企業の立ち上げ、国際規格化に向けた提案など、社会実装に向けた取組が積極的に進められている。個々の要素技術については、今後は受託者において、社会での活用や実用化に向け応用研究、国際規格化活動、論文などによる情報発信が行われる予定であり、これらについて追跡調査等でフォローアップしていく。

6 学識経験を有する者の知見の活用

「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合（第 115 回）」（令和 5 年 6 月）において、目標の達成状況や得られた成果等について、研究開発の目的・政策的位置付け及び目標、研究開発マネジメント、研究開発成果の目標達成状況、研究開発成果の社会展開のための活動実績並びに研究開発成果の社会展開のための計画などの観点から、外部評価を実施し、以下の御意見等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

- ・ドローン等の機器に搭載し不要電波の発生を予防する基板集積化ノイズ抑制技術及び、不要電波の高分解能計測・解析技術を確立し、機器の内部におけるノイズ発生と不要電波干渉（700MHz～30GHz の帯域内）を抑制するための研究開発である。各課題について技術を確立し、さらに実証して目標をすべて達成している。
- ・ドローンにおける不要電波をノイズ抑制技術により対策する設計技術により、最新ドローン試作機におけるノイズを有効に低減でき、この設計技術が普及すれば、ドローン及びその管制技術が所期の性能を十分に発揮でき、空の産業革命の推進を支える基盤技術として期待できる。
- ・ドローンを始めとする自律ロボットの安全な普及には高信頼の無線通信機能が必須であり、これを妨げる機体からの放射雑音を系統的に抑制する道筋を示せたことは大きな成果である。

7 評価に使用した資料等

○電波資源拡大のための研究開発の実施

<https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/index.htm>