

ドローン飛行空域の電磁環境調査とドローンの耐電磁特性の評価（第2報）

Survey of the electromagnetic environment in drone flight airspace and evaluation of drone electromagnetic resistance characteristics(2nd report)

南相馬技術支援センター 機械加工ロボット科 三浦勝吏 塚本遊

電子・機械技術部 電子・情報科 柿崎正貴

共同研究者 アンリツ株式会社 丸田純一 北村理央 横山晃三 近藤佑樹 倉光康太
新妻祐希 岡田遼平 宮崎千佳子

アンリツカスタマーサポート株式会社 藤井誠 河内毅彦 久米信之

春口亮 助川凡夫 柳川弘篤 奈須川佑太

株式会社eロボティクス 皆川好則 清本和則 高橋隆康

株式会社ドローン WORK システム 亀屋秀樹 中田吉穂

本研究では、ドローン運用時の電磁障害対策指標の確立を目的として、上空の電磁環境の実測、電波暗室内での環境再現及び通信系の耐電磁特性を評価した。その結果、外来ノイズ強度、アンテナ指向性、機体姿勢、伝搬環境が通信品質に複合的に影響し、特定条件下で通信断が発生することを確認した。

Key words: ドローン、電波干渉、EMC、LTE、無線通信、OTA、マルチパス

1. 緒言

近年、ドローン産業の市場は急速に拡大しており、農業や物流、災害対応、インフラ点検など多様な分野での活用が進んでいる。一方で、ドローンの事故が発生しており令和5年度では181件もの事故が報告されている¹⁾。中でも電磁環境に起因すると考えられる事故の件数は16件あり¹⁾、全体の約9%が電磁・電波障害が起因となり事故が発生している。このため、ドローンが飛行する空域の電磁環境を把握し、対策することは喫緊の課題となっている。

また、ドローンの安全性と均一性を確保するための認証制度である型式認証が令和4年度から開始された。認証を取得するためには CONOPS (Concept of Operations) と呼ばれる設計概念書を作成し、CONOPS で指定される想定環境内で運用した場合の耐久性及び信頼性を示さなければならない²⁾。この想定される環境には電磁干渉 (EMI) 及び高強度放射電界 (HIRF) 環境も含まれると明記されている²⁾。しかし、第二種型式認証に求められる機体の安全性の具体的な証明方法を解説する「無人航空機の型式認証等の取得のためのガイドライン解説書」³⁾では、電磁干渉 (EMI) 及び高強度放射電界 (HIRF) の検討は当対象外⁴⁾となっており対策方法に課題を抱えている企業も多い。

そこで、本研究では電磁障害対策の指標を確立することを目的にドローンを用いて飛行空域の電磁環境を調査する。また、調査結果をもとに空域と同等の電磁ノイズを電波暗室内で模擬し、ドローンに必要な通信の耐電磁特性評価を行う。

本研究は令和6年度から令和8年度の3年間、アンリツ株式会社、アンリツカスタマーサポート株式会社、

事業名「チャレンジふくしま「ロボット産業革命の地」創出事業」

株式会社eロボティクス及び株式会社ドローン WORK システムとの共同研究で行う。

令和6年度は、福島ロボットテストフィールド (以下、RTF) と南会津町実証フィールドにおいて上空の電波環境を調査し、LTE通信の受信電力 (RSRP)、マルチパス環境及びドローン搭載通信モジュールの送信指向性について基礎的なデータを取得した。

令和7年度は、これらの成果を踏まえ、より詳細な電磁環境の把握と耐電磁性評価に向けた取り組みを進めた。具体的には、2.4[GHz] ISM バンドの上空電波調査、上空の電波環境を模擬する再現手法の検討と耐電磁性評価、LTE通信におけるマルチパス特性の追加調査及びC2リンクを含む通信品質評価を実施した。

本報では、今年度実施した各種測定及び評価実験の内容とその結果について報告する。

2. 実験と結果

2. 1. 上空の電波 (2.4[GHz]帯) 調査

2. 1. 1. RTF での測定 (高度比較)

RTF 上空における 2.4[GHz]帯の電波環境を把握するため、ドローンを用いた上空測定を実施した。測定にはハンドヘルドスペクトラムアナライザ (以下、HSA) を使用し、ドローンに搭載した HSA を地上の PC から LTE 通信により遠隔操作することで、上空での測定を可能とした。

使用したドローンはドローン WORK システム製 EAGLE40 であり、機体下部に HSA 及び測定用アンテナを搭載した。アンテナは AGOS 社製の等方性アンテナ ARIA-6000 を使用した。等方性アンテナは全方位から均一に電波を受け取ることができるアンテナである。

表 1 測定ドローンのスペック

ドローン型式	EAGLE40
寸法	190[cm](軸間)、高さ80[cm]
最大離陸重量	40[kg]程度
使用する電波の周波数	920[MHz]
測定器型式	N9950A
アンテナ型式	AGOS ARIA-6000



図 1 測定ドローン外観



図 2 測定地点

調査ドローンの仕様を表 1 に、外観を図 1 に示す。

測定は RTF 西側の滑走路に設定した 4 地点 (A~D) で実施し、各地点において高度 50[m]、100[m]、140[m] の 3 条件で測定した。測定地点を図 2 に示す。高度 140[m] における地点ごとの比較結果を図 3 に示す。また、地点 D における高度別の比較結果を図 4 に示す。なお、図 3 及び図 4 は 600[MHz]~6[GHz] の範囲を掃引して得られた測定データのうち、ISM バンドを含む 2.0[GHz]~3.0[GHz] の周波数帯を抜粋して示したものである。さらに、HSA の設定条件を表 2 に示す。なお、各測定ポイントでは 1 分間の測定を行い、その間に取得した周波数ごとのピーク値を結果として示している。

地点ごとの比較結果では、地点 A で約-65[dBm]、地点 D で約-58[dBm]となり、地点 D に近づくにつれて受信電力が強くなる傾向が確認された。この傾向は他の高度においても同様であった。一方、高度別の比較では、50[m]、100[m]、140[m] の間で顕著な差はみられず、今回の測定条件では高度による受信電力の変動は小さい結果となった。

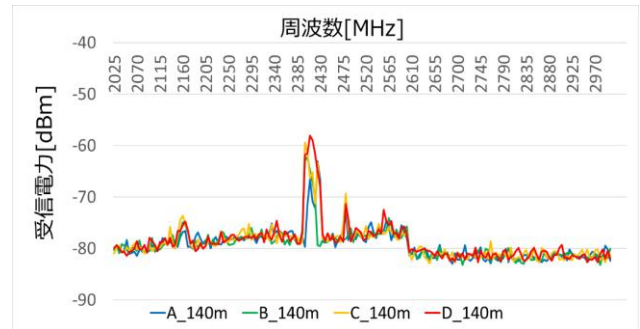


図 3 測定結果 (地点比較_140m)

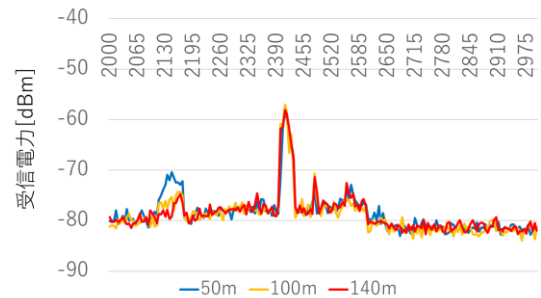


図 4 測定結果 (高度比較_地点 d)

表 2 HSA 設定条件

周波数	500[MHz]~4.5[GHz]
RBW	5[MHz]
VBW	5[MHz]
Trace point	801
Attenuation	0[dB]

2. 1. 2. RTF での測定 (方位比較)

2. 1. 1 と同様に、RTF 西側滑走路において 2.4[GHz]帯の電波調査を実施した。本測定では、特に受信電力の方位依存性を確認することを目的とし、指向性を有するアンテナを用いて測定した。

測定にはアンリツ社製スペクトラムモジュール MS27100A を使用し、ドローンは Freefly Systems 社製 ALTA-X を用いた。機体下部に測定器及び測定用アンテナ (HyperLOG6080) を搭載した。測定ドローンの仕様を表 3 に、測定器の設定条件を表 4 に、測定ドローンの外観を図 5 に示す。

測定は 2. 1. 1 と同様に、RTF 西側滑走路に設定した 4 地点 (A~D、図 2) で実施した。各地点において高度 10[m]、50[m]、100[m]、140[m] の 4 条件で測定を行い、機体の向きを東・西・南・北の 4 方向に固定して、それぞれ 1 分間測定した。なお、各測定ポイントでは取得した周波数ごとのピーク値を結果として示す。

表3 測定ドローンのスペック

ドローン型式	FreeflySystem社 ALTA-X
寸法	2273[mm] (フレームサイズ)、高さ484[mm]
最大離陸重量	15.9[kg]
使用する電波の周波数	2.400[GHz]~2.483[GHz]
測定器型式	アンリツ社 MS27100A
アンテナ型式	HyperLOG6080

表4 測定器設定条件

周波数	2300[MHz]~2600[MHz]
RBW	300[kHz]
VBW	1[MHz]
Trace point	1001
Attenuation	0[dB]



図5 測定ドローン外観

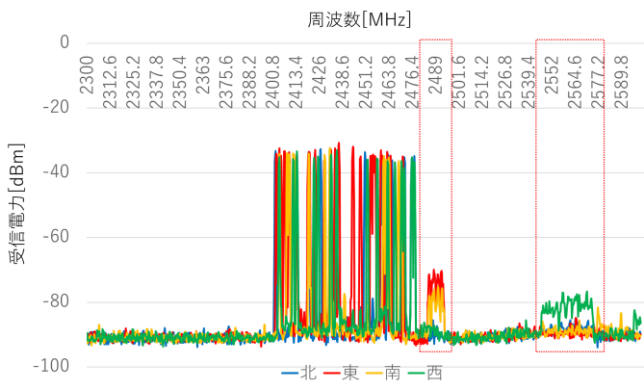


図6 測定結果 (方位比較)

地点Cにおける高度140[m]での東西南北それぞれの測定結果を図6に示す。また、地点Cにおける東向きの高度ごとの結果を図7に示す。2.484[GHz]から2.493[GHz]の帯域では東向きの時に約-70[dBm]、南向きの時に約-75[dBm]の受信電力を確認した。高度別に比較すると高度が高くなるにつれて受信電力も高くなることを確認した。高度140[m]と10[m]で約10[dB]の差がみられた。また、2.546[GHz]から2.574[GHz]の帯域では西向きの時に約-80[dBm]の受信電力を確認した。

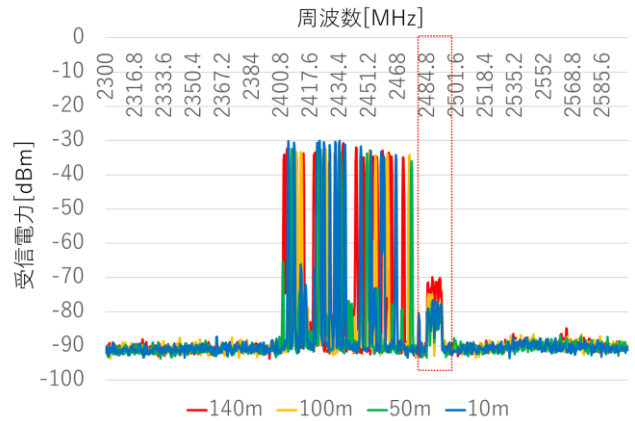


図7 測定結果 (高度比較_東向き)

なお、図6及び図7で2.400[GHz]から2.478[GHz]帯にみられる電波は測定ドローンのプロポ(送信機)及びテレメトリ通信に用いられている電波である。

2. 2. 電波環境の再現及び耐電磁気評価

2. 2. 1. 再現手法の検討

2. 1.で取得した上空の電波環境を電波暗室内で再現し、ドローンの耐電磁特性を評価する手法について検討した。現在、多くのドローンではプロポ及びテレメトリ通信に2.4[GHz]帯が使用されており、外来ノイズがこれらの通信に与える影響を把握することは重要である。本検討では、2. 1.の測定結果に基づき、ドローンの通信帯域に近接して観測された3つの電波を抽出し、それぞれを電波暗室内で再現した。再現には信号発生器を使用した。

まず、2.40[GHz]から2.43[GHz]の帯域で観測された電波(図4)を再現した。この帯域は小電力データ通信システムに分類され、Wi-Fiなどで使用される帯域幅20[MHz]のOFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)変調信号を生成した。次に、2.484[GHz]から2.494[GHz]の帯域で観測された電波(図6)を再現した。この帯域は無人移動体画像伝送システムに該当し、こちらも帯域幅20[MHz]のOFDM変調信号を生成した。さらに、2.546[GHz]から2.574[GHz]の帯域で観測された電波(図6)については、LTE通信のBand41に相当するため、LTE Band41の信号として帯域幅10[MHz]のOFDM変調信号として再現した。OFDM変調信号とは直交する複数のサブキャリアを用いて同時にデータ伝送する周波数分割多重化方式の信号である。

外来ノイズの発生源からの距離と受信電力の関係は電波伝搬損失の式に基づきシミュレーションを行った。シミュレーションでは郊外環境を想定した電波伝搬特性を再現するため、ITU-R M.1225⁵⁾に基づく電波伝搬モデルを適用した。ITU-R M.1225は、移動通信システ

ムの評価に用いられる代表的な電波伝搬モデルをまとめた国際電気通信連合 (ITU) の勧告であり、郊外・都市・屋内など複数の環境における伝搬特性を規定している。本研究では、郊外環境における伝搬損失モデルを採用し、送信源と受信点の距離、周波数、環境条件に応じて伝搬損失を算出した。伝搬特性は以下の式により求められる。

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \frac{d}{d_0} + X_\sigma \quad (1)$$

ここで、 $PL(d)$ は距離 d における損失[dB]、 d_0 は基準距離 (本検討では 1[m])、 n は損失指数、 X_σ はシャドウイングのパラメータを表す。一般的に郊外環境では損失指数 n を 3.0、シャドウイングの標準偏差 X_σ を 6 とすることが多いが、上空での電波伝搬をシミュレーションする目的から、より見通しの良い環境を想定し、 n を 2.5、 X_σ を 5 として計算した。基準距離における損失は自由空間損失を求める Fris の伝達公式に基づき算出した。これにより、受信電力 P_r は (2) 式のように求められる。

$$P_r = P_t + G_t + G_r - PL(d) \quad (2)$$

P_t は送信電力、 G_t は送信アンテナの利得、 G_r は受信アンテナの利得である。

各ノイズ信号の条件を表5に示す。また、表5の条件のもと、(1)式及び(2)式を用いて小電力データ通信システムのシミュレーションを行った結果を図8に示す。シミュレーション結果に基づき、信号発生器から出力する電力を調整することで、実際のフィールドで任意の距離から到来する外来ノイズを電波暗室内で再現できる。

表5 ノイズ信号及びプロポの条件

	周波数	送信電力	送信アンテナ利得	受信アンテナ利得
小電力データ通信システム	2.4[GHz]	30[dBm]	12[dBi]	0[dBi]
無人移動体画像伝送システム	2.4[GHz]	33[dBm]	12[dBi]	0[dBi]
LTE Band41	2.6[GHz]	30[dBm]	5[dBi]	0[dBi]
プロポ信号	2.4[GHz]	30[dBm]	12[dBi]	0[dBi]

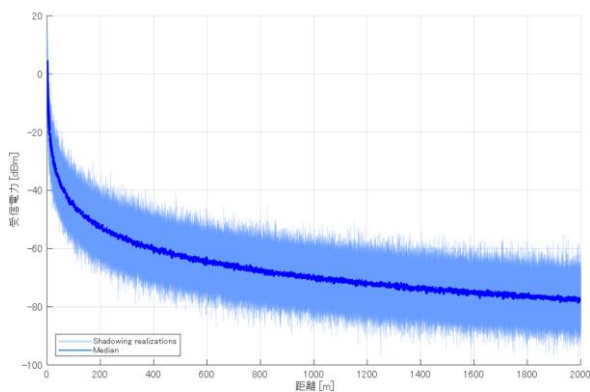


図8 小電力データ通信システムの電波伝搬シミュレーション

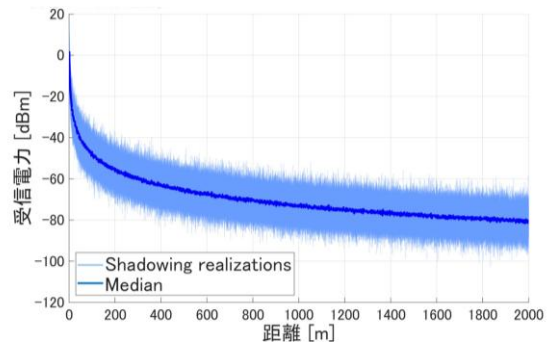


図9 プロポの電波伝搬シミュレーション

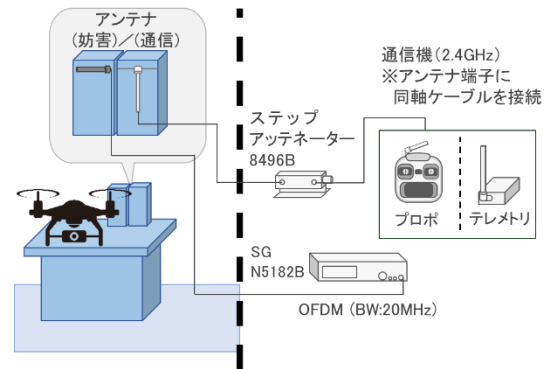


図10 測定系

また、同様にプロポ及びテレメトリ通信信号と基地局間の通信の伝搬特性をシミュレーションした結果を図9に示す。図8及び図9の結果は距離ごとに200回シャドウイングを含めた受信電力を計算することでばらつきを再現し、その中央値をとったものである。

外来ノイズだけでなく、プロポ及びテレメトリ通信信号の強度を、図9をもとに変化させることで、電波暗室内においてプロポ (または基地局) とドローンの距離的關係を再現することができる。プロポ及びテレメトリ通信の経路にステップアッテネータを挿入し、プロポ及びドローンの通信距離の変化を模擬するため減衰量を調整することで、実際の距離に相当する受信電力を模擬した。

環境再現のために構築した測定系を図10に示す。SGに同軸ケーブルを接続し、電波暗室内部に設置したモノポールアンテナに接続し外来ノイズを放射する構成とした。制御信号の放射には、プロポまたはテレメトリ通信機のアンテナ端子と電波暗室内部に設置したダイポールアンテナを同軸ケーブルでつなぎ、ダイポールアンテナから制御信号を放射した。プロポまたはテレメトリ通信機の間ステップアッテネータを挟み、図9の結果をもとに減衰量を調整することでプロポとドローンの距離を模擬する構成とした。この時の制御信号を放射する系の経路ロスステップアッテネータの設定を0[dB]としたとき38.87[dB]であった。また、外来ノイズを放射する系の経路ロスは44.85[dB]であった。

2. 2. 2. 耐電磁特性評価実験

2. 2. 1. で構築した測定系を用いて、プロポ及びテレメトリ通信に対する耐電磁特性評価を実施した。本実験では、2. 2. 1. で再現した三種類の外来電波を任意の強度で照射し、さらにプロポ及びテレメトリ通信信号の受信電力をステップアッテネータにより変化させることで、外来ノイズ環境下において通信がどの程度まで確立可能であるかを評価した。

まず、小電力データ通信システム及び無人移動体画像伝送システムに相当する電波については、2. 1. 1. で取得した上空の電波強度 (-65[dBm]) を基準値とし、ノイズ無しの状態に加えて、基準値から -20[dB]、-10[dB]、0[dB]、+10[dB]、+20[dB] の条件で外来ノイズを照射した。同様に、LTE Band41 に相当する電波については、2. 1. 1. で観測された -75[dBm] を基準値とし、同じく -20[dB] から +20[dB] までの条件で通信確立状況を確認した。さらに、+20[dB] の条件においても通信が確立できた場合には、信号発生器の出力上限まで外来ノイズの強度を増加させ、通信が途切れる限界値を確認した。

プロポ及びテレメトリ通信信号の受信電力は、図9に示した伝搬シミュレーションに基づき、プロポとドローンの距離が 100[m]、200[m]、300[m]、400[m]、500[m]、600[m]、800[m]、1000[m] に相当する電波強度を再現し、それぞれの条件下で通信状態を評価した。この時の SG 及びステップアッテネータの設定条件を表6に示す。

プロポ通信の評価では、通信状態がプロポの画面に表示されるアンテナ本数により示されるため、各条件においてアンテナ本数の変化及び通信断 (Fail-safe 動作) の有無を確認した。アンテナ本数は最大3本であり、通信品質が低下すると本数が減少し、最終的に通信断が発生し、ドローン側で Fail-safe エラーが発生する。テレメトリ通信については、Mission Planner に表示される Link Quality を指標として評価した。Link Quality は通信状態が良好な場合には100[%]を示し、通信品質が低下すると値が減少し、通信が途切れた場合には NaN と表示される。

表6 再現時のSG及びアッテネータの設定

妨害波照射時のSGの出力		
省電力データ通信システム	無人移動体画像伝送システム	LTE Band41
-10[dBm]	-10[dBm]	-20[dBm]

シミュレーションに基づくプロポとドローンの距離再現時のアッテネータの設定							
100[m]	200[m]	300[m]	400[m]	500[m]	600[m]	800[m]	1000[m]
20[dB]	40[dB]	46[dB]	50[dB]	53[dB]	56[dB]	60[dB]	66[dB]

表7 実験結果 (プロポに小電力データ通信システムを照射)

		基準値 (-65[dBm]) からのノイズ強度変化						フェールセーフ発生時のノイズ強度
		無し	-20[dBm]	-10[dBm]	0[dBm]	+10[dBm]	+20[dBm]	
通信状況 (アンテナ本数)	100[m]	3	3	3	3	2	3	-
	200[m]	3	3	2	2	3	3	+25[dBm]
	300[m]	3	2	2	2~3	3	0	+23[dBm]
	400[m]	3	2	2	3	3	0	+23[dBm]
	500[m]	3	2	2	3	3	0	+22[dBm]
	600[m]	3	2	3	3	0	フェールセーフ	+20[dBm]
	800[m]	3	2	3	2	0	フェールセーフ	+20[dBm]
	1000[m]	0	0	0	0	0	フェールセーフ	+20[dBm]

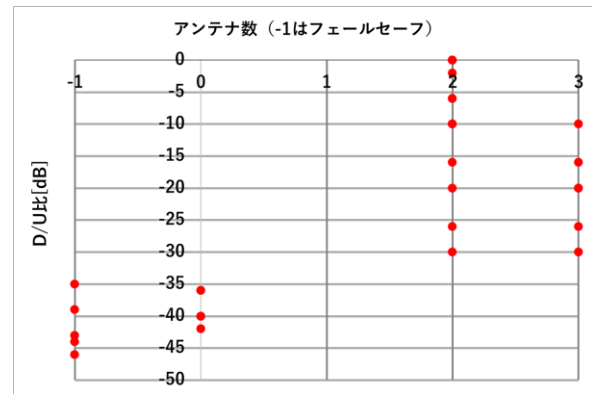


図11 D/U比とプロポの通信状態の関係

代表としてプロポとドローンの通信時に小電力データ通信システムを模擬した電波を照射したときの結果を表7に示す。また、プロポの信号と妨害波の信号から D/U 比 (Desired-to-Undesired ratio) を算出した。D/U 比とは、目的の信号 (Desired Signal) と妨害信号 (Undesired Signal) の受信強度の比率であり、通信品質の劣化を評価する上で重要なパラメータである。D/U 比とプロポの通信状態の関係を図11に示す。D/U 比が-40[dB]から-35[dB]でアンテナの本数が0になり、通信品質が著しく低下した状態となった。さらに、D/U 比が-45[dB]から-40[dB]で通信が途切れ、ドローン側では Fail-safe 動作が作動する傾向がみられた。

2. 2. 3. アンテナの指向性評価実験

本節では、ドローンに搭載されている受信機アンテナの指向性について評価した結果を述べる。対象としたアンテナはホイップアンテナであり、メーカーが推奨する水平方向及び垂直方向に適切に固定した状態と、特に固定を行わず自由な状態で設置した場合とで指向性にどのような差が生じるかを確認した。また、アンテナをドローンに取り付けた際に、機体構造がアンテナの放射特性に与える影響について評価した。

指向性の評価には、福島ロボットテストフィールドの設備である三次元放射パターン測定システムを使用した。このシステムは、アンテナの放射特性を三次元

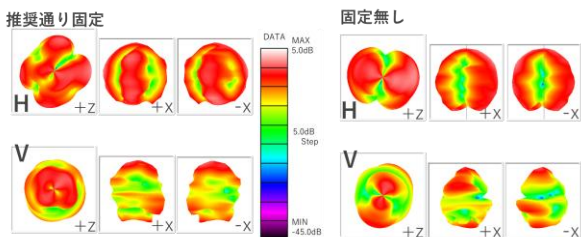
的に測定・可視化するための設備であり、被測定機器を方位角方向に回転させるとともに、測定アンテナを仰角方向に走査しながら電界強度を取得することで、アンテナの放射パターンを詳細に評価することができる。測定はベクトルネットワークアナライザを用いた。

本実験では、アンテナの設置状態及びドローン搭載の有無を組み合わせた以下の四つの条件で測定した。すなわち、受信機単独でアンテナを推奨通りに固定した場合、受信機単独でアンテナを固定しなかった場合、アンテナをドローンに設置し推奨通りに固定した場合、そしてドローンに設置した状態でアンテナを固定しなかった場合である。それぞれの測定結果を図 1 2 に示す。

受信機単独の測定結果を比較すると、アンテナを推奨通りに固定した場合のアンテナは指向性が±X、±Y、+Z 軸方向へ一様に持つが、固定しなかった場合では±X 軸方向へ指向性を持たず、利得が低くなることが確認された。また、各固定条件でドローンへ取り付けした結果について、アンテナを推奨通りに固定した場合は、アジマス方向 180° ～270°]及びエレベーション方向 90°]～150°]の方向で利得が下がるが、そのほか各方向へ指向性を持つことを確認した。固定しなかった場合ではアジマス方向 90°]～270°]及びエレベーション方向 0°]～150°]で利得が下がり、偏った指向性を持つことを確認した。また、固定していない場合においては -20 [dB]前後の値を示す水色～青色の表示が複数個所存在し、感度が著しく低下する角度が点在することを確認した。

さらに、アンテナの利得割合を示す結果を図 1 3 に示す。赤色で示されている-5 [dB]以上の利得の割合はアンテナを固定した場合で 68 [%]、固定しなかった場合で 46 [%]であり、22 [%]の差が生じた。

アンテナ単独



ドローンに設置

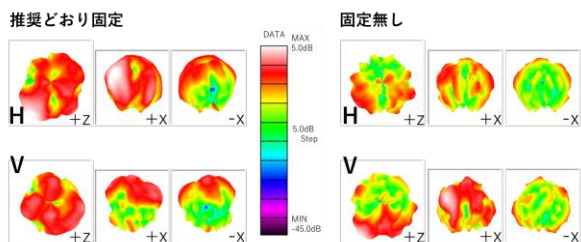


図 1 2 測定結果

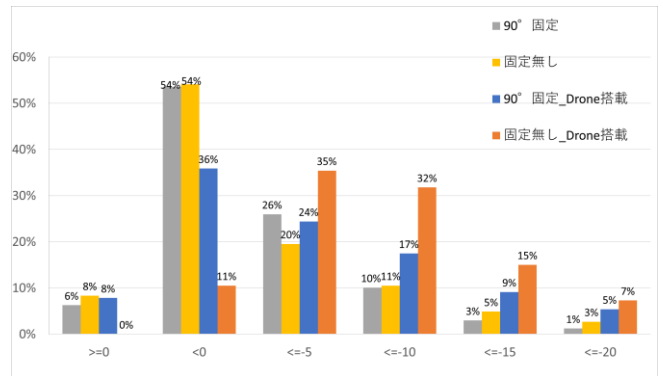


図 1 3 利得割合

2. 3. LTE 通信の伝搬環境の調査及び評価

2. 3. 1. 上空の伝搬環境測定

本項では、上空における LTE 通信信号を収録し、その IQ データを用いて伝搬モデルを生成することを目的として実施した測定について述べる。上空の LTE 通信状況の収録には、アンリツ社製 MD8190A を用いた。本装置をドローンに搭載し、図 1 4 に示す飛行経路上を速度 3 [m/s] で移動しながら 20 [sec] 間データを収録した。測定高度は、無人航空機を飛行させる際に国土交通大臣の許可が不要な 150m 未満を対象とし、その中で傾向に違いが見られそうな 10 [m] 及び 149 [m] の 2 条件とした。測定時の設定条件を表 8 に示す。なお、本測定では同一の Physical Cell ID (PCI) の基地局から送信される信号を対象として収録した。PCI は基地局を識別するための識別番号である。収録した信号から、信号強度の指標である RSRP (Reference Signal Received Power) 及び信号品質の指標である SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) を解析した。その結果を表 9 に示す。高度 149 [m] では高度



図 1 4 飛行経路

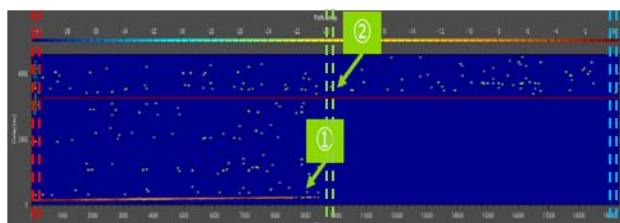
表 8 測定条件

測定ドローン	Freefly Systems社製 ALTA-X
信号収録装置	Anritsu MD8190A
収録使用端末	Galaxy S23
使用SIM	Docomo上空SIM (周波数：885MHz 帯域幅：10MHz)
使用アンテナ	Taoglas TG.22.0111 (対応周波数：824MHz～960MHz、1.7GHz～2.17GHz)

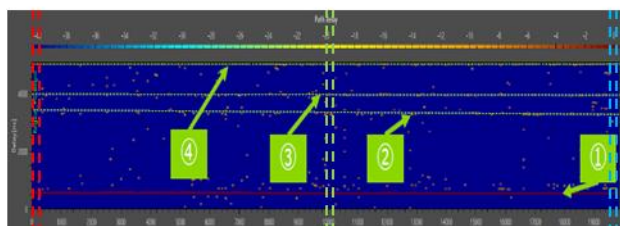
表 9 測定結果

RSRP[dBm]			
区間	測定時間[s]	高度10[m]	高度[149m]
1	0.0~0.1	-74.6	-83.3
2	10.0~10.1	-71.9	-84.4
3	19.9~20.0	-70.6	-84.2

SINR[dB]			
区間	測定時間[s]	高度10[m]	高度[149m]
1	0.0~0.1	2.7	-5.6
2	10.0~10.1	5.5	-6.3
3	19.9~20.0	6.9	-6.8



高度 10[m]



高度 149[m]

図 15 伝搬特性解析結果

10[m]と比較してRSRPが低下し、それに伴いSINRも低下する結果となった。

さらに、取得したIQデータを用いて無線伝搬特性を解析した結果を図15に示す。図15は横軸を経過時間[s]、縦軸を到来信号の遅延時間[ns]、色を信号強度[dB]として表している。なお、信号強度は観測された最大値を0[dB]とした相対値である。高度10[m]では、強度の大きい2つの到来波(図15_高度10[m]中①、②)が観測された。これらは異なる遅延時間で到達しており、後から到達する信号(②)の方が、強度が大きい区間が確認された。一方、高度149[m]では強度が支配的な到来波(図15_高度149[m]中①)が1波確認されたほか、遅延時間の大きい領域で複数の遅延波(図15_高度149[m]中②、③、④)が観測されたものの、いずれも①に比べて強度は小さかった。

表 10 シミュレーション時のパラメータ一覧

高度10m							
区間	測定時間[s]	Band	帯域幅[MHz]	RB数	送信Layer数	MCS	Precoding方式
1	0~0.1	1	20	100	1	9	Large delay CDD
2	10~10.1	1	20	100	2	10	Large delay CDD
3	19.9~20	1	20	100	2	10	Large delay CDD

高度149m							
区間	測定時間[s]	Band	帯域幅[MHz]	RB数	送信Layer数	MCS	Precoding方式
1	0~0.1	1	20	100	2	9	Large delay CDD
2	10~10.1	1	20	100	2	10	Large delay CDD
3	19.9~20	1	20	100	2	9	Large delay CDD

表 11 シミュレーション時のTput 測定結果

高度10m			
区間	測定時間[s]	SINR設定値[dB]	Tput[Mbps]
1	0.0~0.1	2.71	14.8
2	10.0~10.1	5.46	31.6
3	19.9~20.0	6.90	31.6

高度149m			
区間	測定時間[s]	SINR設定値[dB]	Tput[Mbps]
1	0.0~0.1	-5.60	0
2	10.0~10.1	-6.30	0
3	19.9~20.0	-6.76	0

表 12 SINR 固定時のTput 測定結果

高度149m			
区間	測定時間[s]	SINR設定値[dB]	Tput[Mbps]
1	0.0~0.1	6.90	28.6
2	10.0~10.1	6.90	19.8
3	19.9~20.0	6.90	31.6

2. 3. 2. 解析及びシミュレーション

表9に示す区間1~3について、高度10[m]及び149[m]それぞれのIQデータから伝搬モデルを生成した。区間1、2、3は、それぞれ図15の赤、緑、青の点線に対応する。シミュレーション時のパラメータ一覧を表10に示す。本シミュレーションではLTE Band 1、帯域幅20[MHz]、RB数100[RB]に設定して評価を実施した。なお、RB(Resource Block)とは無線通信でデータを送るときに使う通信資源の最小単位のことである。送信Layer数とMCSについては、実フィールドでは無線伝搬環境に応じてTputが最大となるような最適な値に制御されることから、最大のTputが得られる組み合わせをシミュレーションにより総当たりで探索した上で決定した。ここでいうLayerとは、複

数のアンテナを使って空間的に独立した複数のデータストリームを同時に送信する際の各データストリームのことを指し、MCS とは変調方式と符号化率を決定する値のことを指す。Precoding 方式については UE のログから分かった方式を採用した。Precoding とは、各 Layer の信号を合成して送る技術のことである。上記の条件下で LTE 通信のシミュレーションを実施し、その際のスループット (Tput) を評価した。シミュレーション評価には、ラズベリーパイ用 4G (LTE) 通信モジュール「4G Pi」を用いた。また、シミュレーション時に設定した SINR は、収録信号の解析から得られた実測値を用いた。結果を表 1 1 に示す。高度 10[m] では、区間 1 において Tput の低下が確認された。当該区間では SINR が低く、図 1 5_高度 10[m] 中①に示す主到来波の強度が時間経過とともに低下する傾向が確認された。一方、高度 149[m] では、実測に基づく SINR 条件下において Tput が 0[Mbps] となり、通信が確立できない結果となった。

このため、伝搬環境の影響をより明確に評価することを目的に、高度 10[m] 付近で計測された SINR を用いてシミュレーションを再実施した。高度 149[m] では 1 つの到来波 (図 1 5_高度 149[m] 中①の信号) が支配的であったことから、同様に 1 つの到来波であった高度 10[m] の区間 3 をリファレンスとして採用し、その SINR をシミュレーション時に用いた。本条件では、高度 149[m] 環境を完全に忠実再現するものではなく、SINR の影響を一定とした上で伝搬特性の違いに着目した評価である。結果を表 1 2 に示す。高度 149[m] の区間 1 及び区間 3 では、リファレンスである高度 10[m] 区間 3 と同程度の Tput (低下率 10[%] 以内) が得られた。区間 1 と 3 の設定は、伝搬モデル以外は全く同一であったため、計測された Tput の差は伝搬モデルの違いに由来のものであるものと考えられる。より詳細な原因の解明には、今後さらなる調査が必要である。一方、高度 149[m] の区間 2 では、割当データ数、変調方式、符号化率、送信レイヤ数といった無線パラメータが同一であるにもかかわらず、Tput が約 37[%] 低下する結果となった。

2. 4. LTE 通信品質評価実験

2. 4. 1. RTF 上空での測定実験

本節では、福島ロボットテストフィールド (RTF) 西側滑走路上空において実施した LTE 通信品質のフィールド測定結果について述べる。測定は図 1 4 に示す範囲を飛行経路として設定し、高度 50[m] 及び 100[m] のそれぞれの高度において、UL (Up Link) 及び DL (Down Link) の遅延とスループットを評価した。測定にはアンリツ社製 MT1000A と MX109030PC を使用し、Freefly Systems 社製 ALTA-X に搭載して上空の測定を行った。MT1000A と MX109030PC は LTE 通信網を

経由して測定機能を持たせたクラウド側とデータ通信することで、実際のネットワーク環境下における遅延及びスループットを直接測定することができる。また、遅延やスループットの変化とスマートフォンの動作との関連を分析するために、SmartViser 社製 viSer Neo+ を使用し、同時多面的な評価を行った。

測定系の構成を図 1 6 に示す。データ送受信の条件として、UL は動画伝送を想定し 5[Mbps]、DL は制御系信号を想定し 1[Mbps] として測定した。UL の遅延の測定結果を図 1 7 に示す。高度 100[m] における UL 測定では、滑走路南側において遅延が増大する傾向が確認された。

この遅延増大の要因を把握するため、測定時に接続されていた基地局情報と遅延の関係を図 1 8 に示す。通信が安定している区間では、LTE 2xCA (Carrier Aggregation) が確立されており、pcell の PCI が 298、scell の PCI が 133 の基地局に接続されていた。一方、滑走路南側で遅延が増大した区間では、pcell の PCI が 273、276、284 へと切り替わり、scell の接続が不安定となる現象が確認された。この影響により、一部区間では 2xCA が維持できていないことを確認した。

なお、CA は複数の周波数帯を束ねて通信速度を向上させる技術であり、pcell はセルラ通信の基本接続を担う基地局、scell は CA 時に追加される補助的な基地局である。

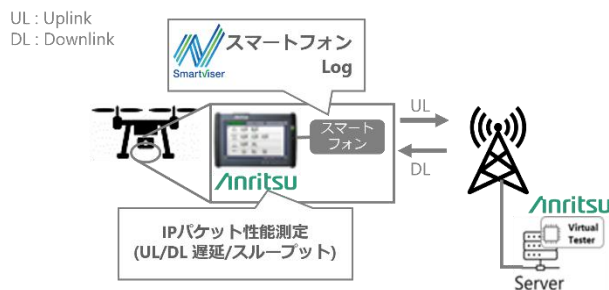


図 1 6 測定系の構成

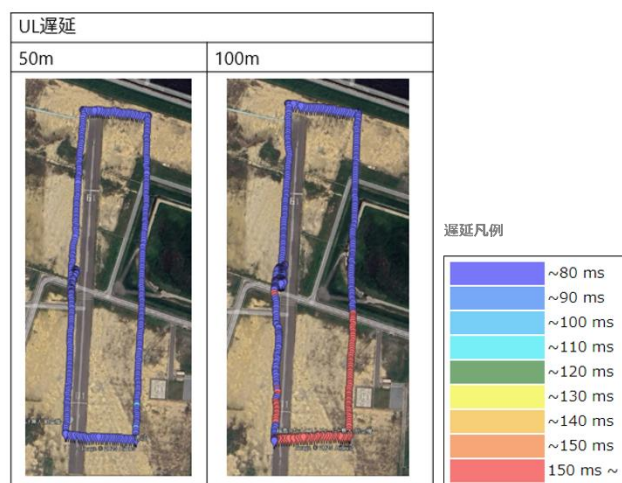


図 1 7 UL 時の遅延の測定結果

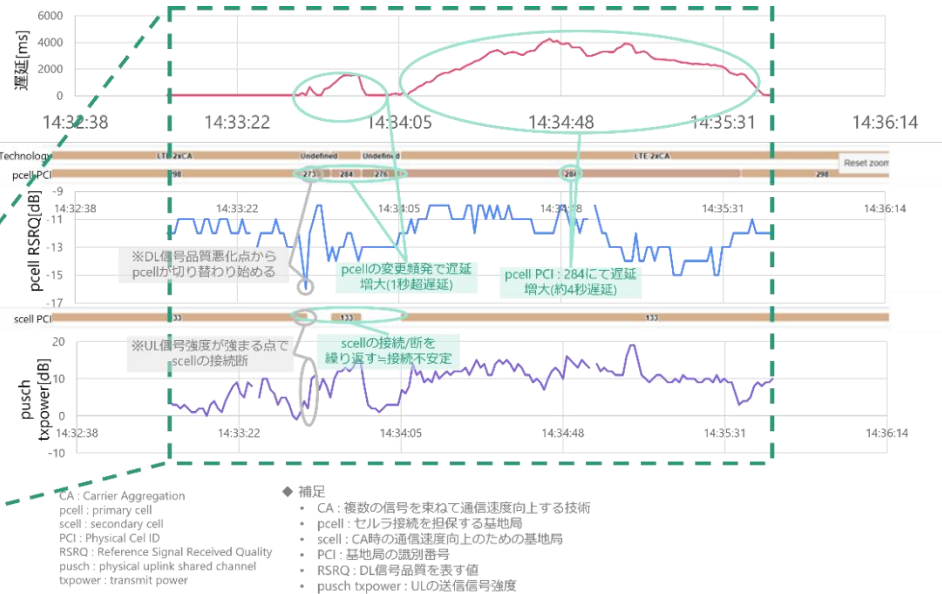


図 18 基地局情報と遅延の関係

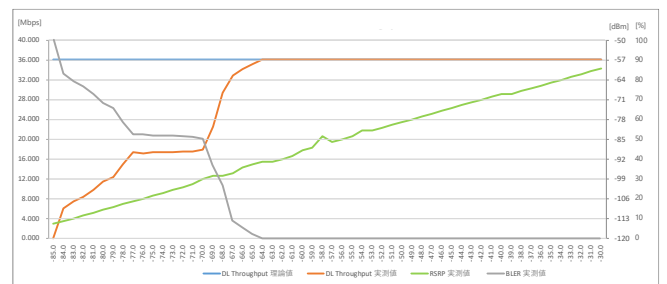
2. 4. 2. C2 リンク通信評価

型式認証を取得するための検査要領は、国土交通省航空局が発行するサーキュラーNo. 8-001にて規定されるが、その中で、緊急時の対応計画として、コマンド&コントロールリンク(以下 C2 リンク)の喪失時の安全飛行に関する設計やその際の対応、保証不可となる最低性能要件について規定するよう記載されている²⁾。そこで本項では、LTE 基地局の動作を模擬し、LTE 通信に関する様々なパラメータを変更可能な LTE 基地局シミュレータを用いて LTE 通信における非正常な状態を模擬することで C2 リンクの通信評価を行った。評価にはアンリツ社製の基地局シミュレータ MD8475B を用いた。また、測定に使用したドローン及び関連システムの仕様を表 1 3 に示す。

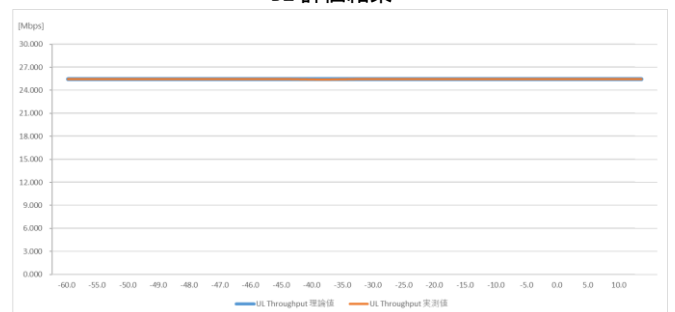
DL 及び UL それぞれの RF_Power を変化させた場合の挙動を評価した。この時のパラメータ設定を表 1 4 に示す。また、結果を図 1 9 に示す。さらに、UL 評価時の UL Ref Power の実測値を図 2 0 に示す。DL の評価では、DL Ref Power が -85.0[dBm]、RSRP が -115[dBm]/15[kHz]にて BLER が 100[%]となり、ドローンと基地局シミュレータの無線接続が切断し、同時に GCS のパラメータ更新が停止する結果となった。UL では、UL Ref Power の設定変更に関わらず、UL Throughput がほぼ一定で安定した結果となった。しか

表 1 4 シミュレータの設定

UL Ref Power(DL評価時)	10.0[dBm]
DL Ref Power (UL評価時)	-30.0[dBm]
E-UTRA Band	Band1
Channel(DL)	300
DL Bandwidth	10[MHz]
Number of DL Antennas	1
MCS(DL)	23
MCS(UL)	23
N_RB(DL)	50
N_RB(UL)	50



DL 評価結果



UL 評価結果

図 1 9 評価結果

表 1 3 ドローン及び関連システムの仕様

ドローン型式	AC-0402X
寸法	約 750mmx750mmx300mm
最大離陸重量	7.3kg
フライトコントローラ	Pixhawk 6C
GCS	Mission Planner
地上局 PC	Surface Go 2

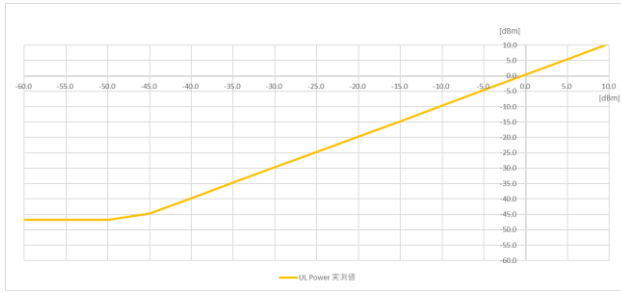


図 20 ULPower 実測値

し、ドローンが送信する UL Ref Power が -47 [dBm]で底打ちし、 -47 [dBm]より下がらなくなる結果となった。

3. 考察

3. 1. 上空の ISM バンド (2.4GHz 帯) の調査

本調査では、RTF 西側滑走路上空において 2.4 [GHz] 帯の電波環境を測定し、地点差及び高度差、さらに方位依存性について評価した。その結果、地点ごとの受信電力には明確な差がみられ、特に地点 D 付近では他地点に比べて受信電力が高い傾向が確認された。これは、周辺に存在する無線設備や地形的要因により、特定方向からの電波が強くと到来している可能性があると考えられる。

方位依存性の評価では、指向性アンテナを用いた測定により、受信電力が機体の向きに応じて変動することが明確に示された。特に、2.484 [GHz]~2.493 [GHz] の帯域では東向きで最も強い受信電力が得られ、南向きでは数 [dB] 程度低下する傾向が確認された。また、2.546 [GHz]~2.574 [GHz] の帯域では西向きで強い電波が観測でき、上空においてもドローンを用いた電波発生源の探査も有用であると考えられる。

3. 2. 電波環境の再現及び耐電磁性評価

2. 1. で取得した上空の電波環境をもとに、電波暗室内で外来ノイズを再現し、ドローンの通信系がどの程度の電磁環境に耐えられるかを評価した結果、外来ノイズの強度がプロポ信号に対して一定以上強くなると通信品質が急激に低下し、最終的には通信断に至ることが明らかとなった。特に、D/U 比が -40 [dB] を下回る領域ではアンテナ本数 0 本となり、 -45 [dB] 付近では Fail-safe 動作が発生することが確認された。これは、外来ノイズがプロポ信号に対してわずかに強くなるだけで、通信リンクが維持できなくなる可能性を示している。

また、アンテナの指向性評価では、アンテナの固定状態やドローン機体の構造によって受信電力が大きく変動することが示された。特に、アンテナを固定せずドローンに搭載した場合には、偏った指向性により方

位が違くと受信電力に 10 [dB] 程度の差が生じる結果となった。また -20 [dBi] を示す角度が不規則に存在するため、方位により受信電力がさらに 10 [dB] 以上低下し、感度の良い方向と比較すると 20 [dB] 以上、差が生じる可能性がある。

この利得差は、2. 2. 2. で示した D/U 比の閾値に匹敵する大きさであり、アンテナの向きや姿勢がわずかに変化するだけで通信断のリスクが高まることを意味している。

さらに、2. 1. の上空電波調査では、地点差や方位差によって受信電力が数 [dB]~ 10 [dB] 程度変動することが確認されている。これらの結果を総合すると、実フィールドにおいては、外来ノイズの強度だけでなく、ドローンの姿勢、アンテナの向き、飛行位置、さらには周囲の基地局配置など、複数の要因が重なった場合に通信障害が発生し得ることが分かる。

特に、外来ノイズが強い方向に機体が向いた場合や、アンテナ利得が低下する姿勢をとった場合には、D/U 比が急激に悪化し、通信断に至る可能性が高い。これは、2. 1. の測定で確認された「方位による受信電力の変動」と、2. 2. 3. の「アンテナ指向性による利得変動」が重畳することで、実際の飛行環境では通信品質が大きく揺らぐ可能性を示している。

以上の結果から、ドローンの通信系は外来ノイズに対して一定の耐性を有しているものの、距離、方位、姿勢、アンテナ設置状態といった条件が重なることで、電波障害が十分に発生し得ると考えられる。したがって、耐電磁性評価を行う際には、単一条件での評価だけでは不十分であり、想定される複数の要因を組み合わせた総合的な評価が必要であると言える。

3. 3. LTE 通信の伝搬環境の調査及び評価

高度が上がると RSRP が小さくなり、SINR も低下する結果となった。要因としては、まず基地局アンテナの方向が地上を主対象としている点が挙げられる。高度が上昇するにつれてアンテナの方向から外れやすくなるため、受信信号電力が低下しやすくなると考えられる。また、高度が高くなることで見通し環境が改善し、複数の基地局からの干渉波を受けやすくなることも通信品質に影響を与えると考えられる。実測結果では、RSRP の変動が SINR の変動と強く連動していたことから、高度によらず、移動したことによる変動は比較的小さかったと推定される。高度 10 [m] で観測された 2 つの強い到来波については、中継装置による再送信波の存在や、高反射率物質による鏡面反射が形成した複数経路の可能性が考えられる。一般に、到来する信号の電力差が小さい場合にはディップが生じやすく、SINR の劣化を引き起こす要因となる。ここでいうディップとは、受信アンテナに信号が時間差を持って到達した際に生じる位相差によって信号が打ち消し合う

ことで、受信電力が低下することを指す。その時間差と電力差の大小により、受信電力の低下度合いは変わる。今回の測定では、時間の経過とともに主波と従波の電力差が拡大した区間で SINR が改善する傾向が確認されており、ディップが浅くなったことが要因として推察される。一方、高度 149[m]の区間2では、無線パラメータが同一であるにもかかわらず T_{put} が大きく低下した。シミュレーション時には、2Layer 送信において一方の Codeword の T_{put} が、もう一方の Codeword の 50[%]程度になっていた。ここでいう Codeword とは、誤り訂正符号化された送信データの単位を指す。上記のことから、50%に悪化した Codeword に対応する Layer の SINR が低い伝搬環境であったと推測される。このような状況では、一般的に伝搬路行列のアンテナ相関が高い環境である。ここでいうアンテナ相関とは、基地局の信号を異なるアンテナで受信したときの受信信号同士の類似度を指す。アンテナ相関を低減するためには、アンテナ間隔の調整や偏波方向の変更など、アンテナ設計上の工夫が有効と考えられる。以上の結果から、上空における LTE 通信品質は単に RSRP の強弱だけで決まるものではなく、マルチパス構造やアンテナ相関といった伝搬特性にも依存すると考えられる。ドローンの C2 リンクや映像伝送の安定化を図るためには、これらの伝搬特性を踏まえたアンテナ設計や通信パラメータの最適化が不可欠である。

3. 4. LTE 通信の品質評価実験

本測定では、RTF 西側滑走路上空における LTE 通信品質を評価し、高度 50[m]と 100[m]の条件で遅延及びスループットの変動を確認した。その結果、高度 100[m]の測定において滑走路南側で遅延が増大する傾向がみられた。基地局情報との対応関係を整理したところ、この区間では pcell の PCI が複数の基地局間で切り替わり、scell の接続も不安定となっていることが確認された。この現象は、ドローンが高度を上げることで、地上とは異なる電波伝搬環境に置かれることが一因と考えられる。高度が高くなると、地上障害物の影響が小さくなるため、より遠方の基地局からの電波も受信しやすくなる。その結果、端末が複数の基地局を同時に認識しやすくなり、端末側で最適な基地局を選択する過程でハンドオーバーが頻繁に発生する可能性が高まり、端末が接続先を短時間で切り替える現象が発生しやすく、これが遅延増大の一因となると考えられる。

さらに、scell の接続不安定が確認されたことから、CA の維持が高度環境では難しくなる状況があることも示唆される。CA は複数の周波数帯を束ねることで高速通信を実現する技術であるが、scell の電界強度が不安定な場合には CA が解除され、通信速度や遅延

特性が劣化する。今回の測定では、まさにこの現象が滑走路南側で発生しており、基地局配置と高度の組み合わせによって通信品質が大きく変動することが確認された。以上の結果から、ドローンの LTE 通信は高度・位置・基地局配置の影響を強く受け、特に高度が高い場合には遠方基地局との接続可能性が増すことでハンドオーバーが頻発し、遅延やスループット低下が発生しやすくなると考えられる。これは、ドローンの C2 リンクや映像伝送において通信品質の安定性を確保する上で重要な知見であり、今後の運用設計や通信方式の検討において考慮すべき要素であると言える。

C2 リンクの評価に関しては、DL 及び UL それぞれについて RF Power を変化させた際の挙動を確認した。今回の DL の評価では、DL Ref Power が -85.0 [dBm]、RSRP が -115 [dBm]/ 15 [kHz]にて BLER が 100[%]となり、ドローンと基地局シミュレータの無線接続が切断し、同時に GCS のパラメータ更新が停止する結果となった。本評価のように、それぞれのドローンにおいて、必要とする T_{put} の最低値を把握し、その閾値を下回った場合には RTH を実行するなど、ドローンの安全飛行を考慮した設計が必要だと考えられる。

今後は、LTE 通信における非正常状態を対象として、Mobility、Connectivity、 T_{put} に関するパラメータを変更し、それぞれの場合におけるドローン及び関連システムの挙動を確認する予定である。さらに、これらの評価結果を指標としてまとめ、ドローンの安全飛行のための C2 リンクに関する評価手法を提案する予定である。これにより、LTE 公衆網では実施が困難な各種の非正常試験を実施することが可能となり、ドローンの安全飛行に資する設計及び評価に寄与できると考えられる。

4. 結言

本研究では、ドローン運用時における電磁障害対策の指標確立を目的として、実フィールドにおける上空電磁環境の調査、電波暗室内での環境再現手法の検討及び通信系の耐電磁特性評価を実施した。

まず、福島ロボットテストフィールド上空における 2.4[GHz]帯 ISM バンドの電波環境調査では、地点差及び方位差によって受信電力が数[dB]から最大で 10[dB]程度変動することを確認した。一方、高度差による影響は限定的であり、今回の測定条件においては高度による受信電力変動は小さい結果となった。また、指向性アンテナを用いた測定により、上空においても電波の到来方向に依存した受信電力の変動が明確に観測され、ドローンを用いた電波発生源の探索が有効であることを示した。

次に、実フィールドで取得した電波環境を基に、電波暗室内で外来ノイズを再現する手法を構築した。

ITU-R M. 1225 に基づく電波伝搬モデルを用いることで、距離に応じた受信電力を模擬可能であることを示し、外来ノイズ及びプロポ・テレメトリ通信信号の強度を独立に制御する評価系を確立した。この評価系を用いた耐電磁特性評価実験では、D/U 比が -40 [dB] 付近で通信品質が著しく低下し、 -45 [dB] 付近で Fail-safe 動作が発生する傾向が確認された。これは、外来ノイズがわずかに増加するだけでも通信断に至る可能性があることを示している。

さらに、ドローン搭載アンテナの指向性評価では、アンテナの固定状態及び機体構造の影響により、受信利得に最大 20 [dB] 以上の差が生じる場合があることを明らかにした。特に、アンテナを固定しない状態では、利得が著しく低下する方向が不規則に存在し、通信断リスクが大きく増大することが確認された。この利得差は、耐電磁特性評価で得られた D/U 比の閾値と同程度であり、アンテナ設置状態が通信の信頼性に与える影響の大きさを示している。

加えて、LTE 通信の上空伝搬環境の調査と評価から、高度上昇に伴う RSRP と SINR の低下、マルチパス構造の変化及びアンテナ相関の影響が通信品質に大きく関与することを確認した。また、フィールドでの通信品質評価実験では、高度 100 [m] 条件において基地局の切り替わりや Carrier Aggregation の不安定化に起因する遅延増大が確認され、高度・位置・基地局配置が LTE 通信品質に強く影響することが示された。

C2 リンクの評価に関しては、RF Power を変化させた際の挙動を確認した。今後は、LTE 通信における非正常状態を対象として、RF Power のほか、各種パラメータを変更し、それぞれの場合におけるドローン及び関連システムの挙動を確認し、評価結果を指標としてまとめ、C2 リンク確立のための評価手法を提案する予定である。

以上の結果から、ドローンの通信品質は外来電波強度のみならず、飛行位置、機体姿勢、アンテナ指向性、伝搬環境、基地局配置といった複数の要因が重畳することで大きく変動することを確認した。したがって、ドローンの耐電磁性評価においては、単一条件での評価では不十分であり、実運用を想定した複合的かつ包括的な評価が不可欠である。

本研究で得られた知見及び評価手法は、今後のドローンの型式認証対応や、電磁障害リスクを考慮した運用設計に対する有用な基礎資料となると考えられる。今後は、より多様な飛行環境や通信方式を対象とした評価を進めることで、ドローン運用の安全性及び信頼性向上に寄与していく予定である。

謝辞

上空の電波環境調査のため、測定場所を提供いただいた公益財団法人福島イノベーション・コースト構想

推進機構様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) “無人航空機に係る事故等報告一覧”, 国土交通省 https://www.mlit.go.jp/koku/accident_report.html (参照 2025 年 2 月 20 日) .
- 2) 国土交通省航空局安全部, “無人航空機の型式認証等における安全基準及び均一性基準に対する検査要領”, 国土交通省, (2024).
- 3) 無人航空機の認証に対応した証明手法の事例検討 WG “無人航空機の型式認証等の取得のためのガイドライン”, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, (2024).
- 4) 無人航空機の認証に対応した証明手法の事例検討 300 サブ WG “無人航空機の型式認証等の取得のためのガイドライン安全基準セクション 300 耐久性及び信頼性”. 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, (2024).
- 5) “GUIDELINES FOR EVALUATION OF RADIO TRANSMISSION TECHNOLOGIES FOR IMT-2000”, p.22, ITU: International Telecommunication Union (1997).