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

Survey of the electromagnetic environment in drone flight airspace and evaluation of drone electromagnetic resistance characteristics

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　引野望　澤田啓介　小野宏太　近藤祐樹　北村理央
アンリツカスタマーサポート株式会社　安嶌裕之　藤井誠　奈須川佑太
株式会社ｅロボティクス　皆川好則　高橋澄雄　髙橋隆康
株式会社ドローンWORKシステム　亀屋秀樹　中田吉穂

ドローンが飛行する空域の電波環境を確認するため、ロボットテストフィールド、南会津町、神奈川県厚木市において上空の電波状況、LTE 通信の受信電力及びマルチパスについて調査した。また、ドローンの無線通信特性を把握するため、搭載された LTE 通信モジュールの送信パワーの指向性について評価した。

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）の検討は当面対象外[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、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。

初年度である令和６年度では福島ロボットテストフィールド（以下、RTF）各施設と RTF 上空の電波環境を調査した。同様に南会津町の実証フィールドで上空の電波環境を調査した。また、神奈川県厚木市において上空のマルチパス環境を調査する実験を行った。さらに、ドローンの無線通信時の送信パワーの指向性について評価した。本報では、それぞれ実施した取り組みについて報告する。

２．実験と結果

２．１．スペクトラムアナライザによる電波測定

２．１．１．RTF 各施設での地上測定

キーサイトテクノロジーズ社製ハンドヘルドスペクトラムアナライザ（以下、HSA）を用いて RTF 施設の電波環境を調査した。使用した機器の仕様や測定時の設定条件を表１に示す。

測定場所は市街地フィールド及び試験用橋梁で行った。市街地フィールドでは建物の影や５G 基地局付近、交差点付近で測定した。試験用橋梁では橋下と橋上で測定した。結果を図１に示す。この図１に示す結果は、それぞれの地点で１分間アンテナの方位を 360 度変えながら測定した時のピーク値を示したものである。各 Band 帯や５G 通信の電波状況が確認できた。

表１　測定器の仕様と測定条件

測定器型式		Keysight Technologies N9950A
アンテナ型式		HyperLOG® 30350
測定器設定条件	周波数	600[MHz]~6[GHz]
	RBW	5[MHz]
	VBW	5[MHz]
	Attenation	10[dB]

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」

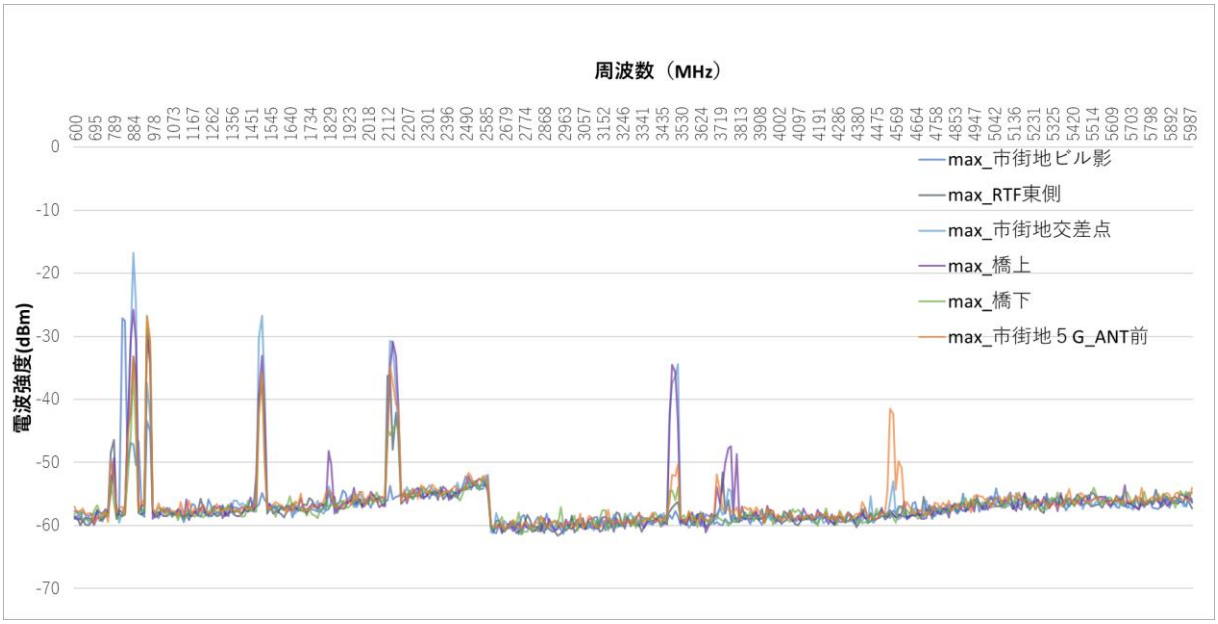


図１　RTF 各施設での電波強度測定結果

２．１．２．上空での電波測定

ドローンに HSA を搭載し、RTF 上空の電波環境を調査した。ドローンは、ドローン WORK システムの EAGLE４０を用いた。この機体下部に測定器とアンテナを取り付け測定した。ドローンのスペック及び HSA の設定条件を表２、外観を図２に示す。

測定場所は RTF 敷地内西側８地点を図３に示すように地点 a～h とし、それぞれの地点で 0［m］、50［m］及び 100［m］の高度を測定した。

高度 100［m］時の地点毎の結果を図４に示す。この時の結果はドローンがそれぞれの地点及び高度でホバリングし、１[rpm]で回転しながら測定した時のピーク値を示したものである。高度 100[m]の LTE 通信の各 Band 帯や５G 通信の電波状況が確認できた。地点毎の差は特にみられなかった。また、地点ｄの高度別の結果を図５に示す。（図４及び図５の 2.4[GHz]付近に見える波形はドローン自体がプロポ及び PC との通信で発しているものである。）

図２　測定ドローン外観

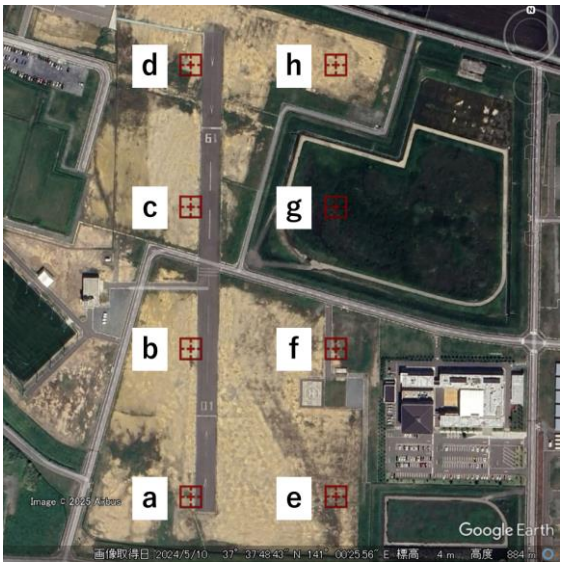


図３　測定地点

表２　ドローンのスペックと測定条件

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		2.4[GHz]
測定器設定条件	周波数	500[MHz]～4.5[GHz]
	RBW	5[MHz]
	VBW	5[MHz]
	Attenation	0[dB]

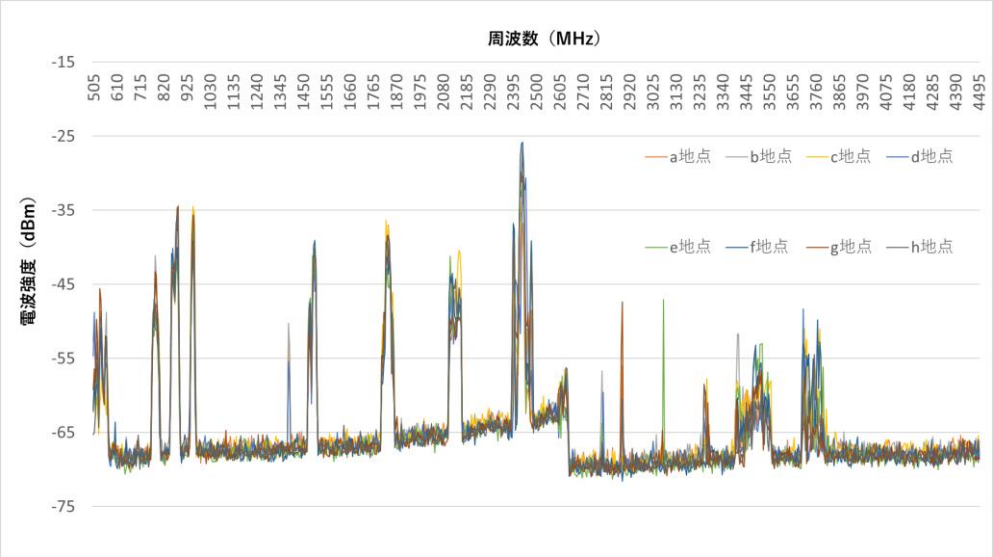


図４　RTF 上空（高度 100m）の地点別測定結果

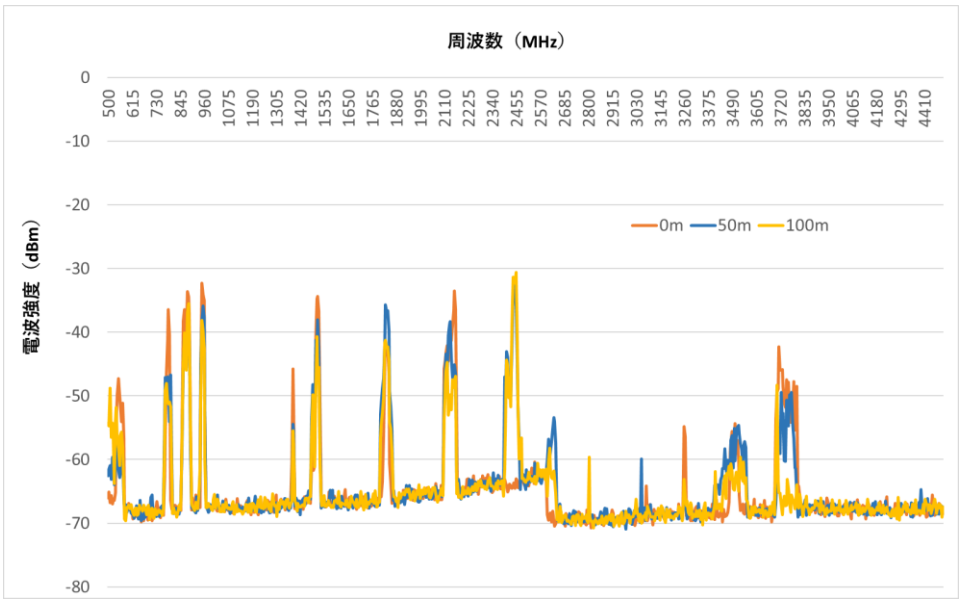


図５　RTF 上空（d 地点）の高度別測定結果

２．２．LTE 通信の基準信号受信電力の測定

２．２．１．RTF 各施設での地上測定

２．１．と同様にキーサイトテクノロジーズ社製 HSA とアンテナを用いて RTF 施設の LTE 通信の基準信号受信電力（以下、RSRP）を調査した。RSRP は LTE や５G の通信端末が基地局から受け取る電波の強さを示す。現在、ドローンを長距離飛行する際には LTE 通信を用いることが多い。そのため、LTE 通信を用いてドローンを飛行させる場合は、RSRP は重要な指標の１つである。測定場所は市街地フィールド及び試験用橋梁で行った。市街地フィールドでは建物の影や５G 基地局付近、交差点付近で測定した。試験用橋梁では橋下と橋上で測定した。結果を図６に示す。今回の結果は Band１の RSRP を測定したものである。

２．２．２．上空での測定

RTF 上空の RSRP を測定した。測定場所は２．１．２と同様に図３に示す地点 a～h とし、それぞれの地点で 0［m］、50［m］及び 100［m］の高度を測定した。測定に使用したドローン、測定器及びアンテナは２．１．２と同様である。結果を図７に示す。この時の結果はドローンがそれぞれの地点及び高度でホバリングし、１[rpm]で回転しながら測定した時の平均値を示したものである。

また、ドローン及び HAS のアンテナを変えて RSRP を測定する実験を行った。ドローンは株式会社ｅロボティクスが使用している ALTAX を使用した。ドローンのスペックを表３に示す。

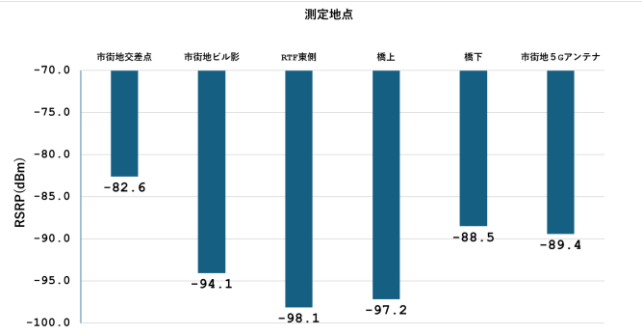


図６　RTF 各施設の RSRP 測定結果

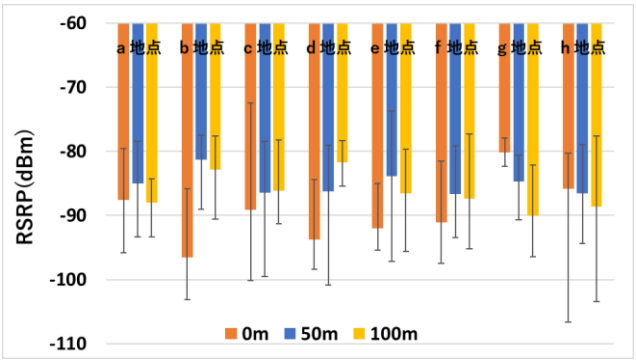


図７　RTF 上空の RSRP 測定結果

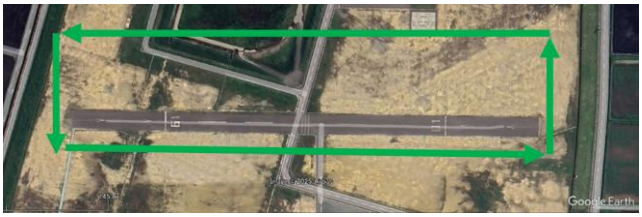
表３　ドローンのスペック

ドローン型式	FreeflySystems 社　ALTAX
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	2.4[GHz]～2.483[GHz]

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。このため、地点毎に回転して測定する必要がなくなるため、飛行経路に沿った測定が可能となる。

この等方性アンテナを用いて、RTF 上空を飛行する経路と南会津町旧檜沢中学校から帯沢地区まで飛行する経路の RSRP を測定した。RTF では、RTF 西側の滑走路を測定した。高度は 50[m]及び 100[m]の２回測定した。飛行経路及び測定結果を図８に示す。

南会津町で測定した経路は表４に示すとおり、離発着場所と緯度、経度及び高度を８地点指定（ウェイポイント）し、その地点を通って飛行するよう設定した経路である。この経路は株式会社ｅロボティクスが、「ロボット・ドローンの社会実装に向けたユースケースの創出事業」にてドローンによる配送実証実験を行った時の経路である。この事業は福島県が県内企業に委託して行ったものである。LTE 通信がうまくできないと相談があり測定した。結果を図９に示す。RTF で測定した時と比較して低い結果となった。



経路

高度 50[m]

高度 100[m]

図８　測定結果

表４　南会津町測定実験飛行ポイント

飛行座標	緯度	経度	飛行高度[m]
旧檜沢中学校校庭離発着地点	37.2052301	139.7244861	50
ウェイポイント１	37.2057918	139.7233205	50
ウェイポイント２	37.2061692	139.7222365	50
ウェイポイント３	37.2063721	139.7214369	50
ウェイポイント４	37.2065133	139.7204347	60
ウェイポイント５	37.2069547	139.7190365	60
ウェイポイント６	37.2072082	139.7183315	60
ウェイポイント７	37.207441	139.7175483	50
ウェイポイント８	37.207061	139.7173823	40
帯沢地区離発着地点	37.2068532	139.717007	20

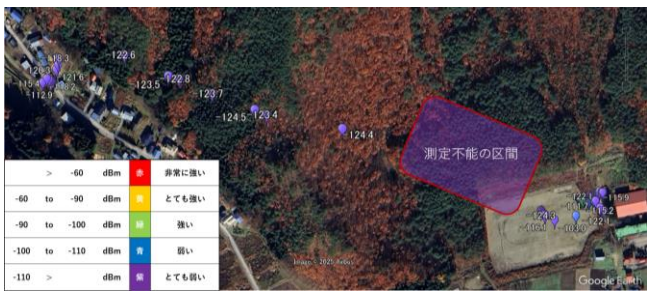


図９　南会津町測定結果

２．３．マルチパス環境の調査

２．３．１．上空のマルチパス環境

神奈川県厚木市にて上空の LTE 通信のマルチパス状況を確認する実験を行った。マルチパスとは電波が、地形や建物などに反射して複数の経路で伝播することをいう。

反射した電波は、到達するまでにわずかな遅れを生じ、波長が干渉することで受信レベルが変動する。受信レベルが変動するとフェージングという現象が発生し、この現象によって受信レベルが下がったときに通信が途切れるといった不具合が起こることがある。ドローン飛行時もマルチパス対策は課題となっているため、実際の上空のマルチパス環境がどのようになっているのか調査した。

ドローンは ALTAX を使用し、アンリツ社製の FST（Field Simulation Test）という装置を用いた。FST は実空間での携帯電話の無線信号（LTE, 5G）を取り込んで解析し、実際に発生しているマルチパスやフェージングを再現することができる装置である。

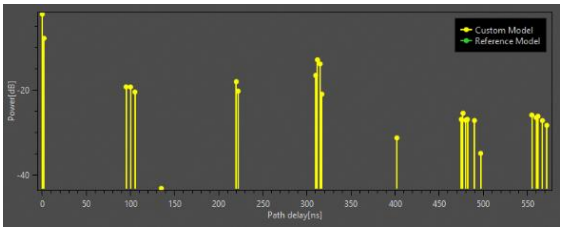
この FST をドローンに搭載し上空のマルチパス状況を取得した。外観を図１０に示す。実験は 1 地点で 100[m]、75[m]、50[m]、40[m]、30[m]、20[m]、10[m]及び 0[m]の高度でそれぞれマルチパス状況を取得した。高度毎に取得した K-Factor の結果を表５に示す。K-Factor はマルチパス環境において直進波成分（LOS：Line of Sight）と散乱波成分（NLOS：Non Line of Sight）の電力比を表す指標である[5)]。K-Factor が大きいと直進波成分が強く信号が安定していることを意味する。K-Factor が小さいと反射波が多く信号が不安定になりやすいことを意味する。なお、今回の測定では LOS が検出できない場合は K-Factor を -99 としている。また、高度 100[m]、75[m]及び 10[m]ではモデル生成ができず K-Factor を取得できなかった。この結果は Band３で取得した時の結果である。

高度 50[m]、30[m]及び 0[m]のマルチパスのモデルをそれぞれ生成した結果を図１１に示す。これは反射波がどの程度の強さで、どの程度遅れてきているのかを表している。高度 0[m]では反射波が高いパワーで多く発生し、高度 30[m]、高度 50[m]と高度が高くなるにつれて反射波のパワーが小さくなっている結果となった。

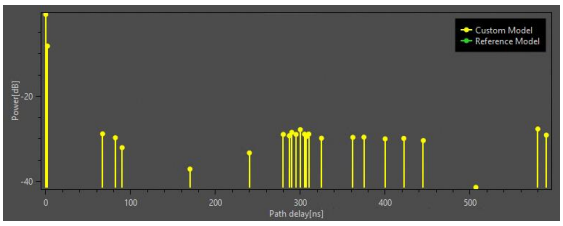
図１０　測定ドローン外観

表５　高度別 K-Factor 測定結果

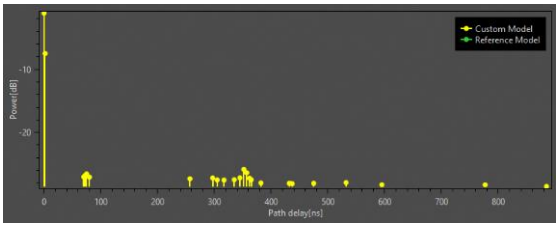
高度[m]	0	10	20	30	40	50	75	100
K Factor	-99	測定不可	-99	-5.944	0.055	-0.888	測定不可	測定不可



高度 0[m]



高度 30[m]



高度 50[m]

図１１　高度毎のマルチパスモデル生成結果

２．４．ドローンの無線通信特性の評価

２．４．１．送信パワーの指向性評価

RTF に整備されている OTA 測定評価システムを用いてドローンに搭載されている LTE 通信モジュールの送信パワーの指向性を評価した。測定系を図１２に示す。ガントリーがアジマス方向に動作し、ターンテーブルがエレベーション方向に 360 度回転することによって 3 次元的に指向性を評価することができる。測定器はアンリツ社製の MT8821C を用いて測定した。

測定したドローンのスペックを表６に、ドローンの外観モデルを図１３に示す。ヘキサコプター型のドローンで下部に搬送物を抱えて飛ぶ仕様となっており、ドローン前方に LTE 通信モジュールが搭載されている。各軸のプラス方向及びマイナス方向から見た測定結果を図１４に示す。この三次元グラフはドローンをターンテーブルの回転軸中心に設置した時の送信パワーの強さを表す。表示が赤いほど送信パワーが強く青いほど弱いことを示している。通信モジュールが設置されている方向（x 軸プラス方向）が強く、反対側（x 軸マイナス方向）が弱くなっていることが分かった。方向によって最大と最小で約 20[dBm]の差があった。この結果は Band１で通信を行った時の結果である。

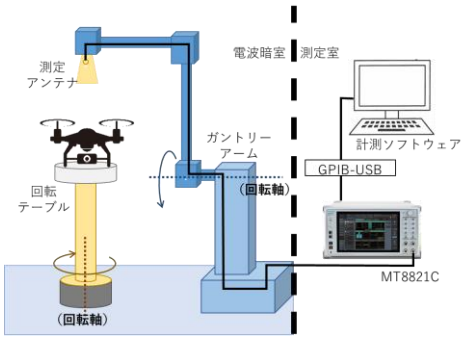


図１２　OTA 測定評価システム測定系

表６　ドローンのスペック

ドローンの用途	搬送用ドローン
寸法	1500[mm]×1500[mm]×500[mm]
最大離陸重量	25[kg]程度（重量15[kg]、ペイロード10[kg]）
使用する電波の周波数帯	LTE、2.4[GHz]

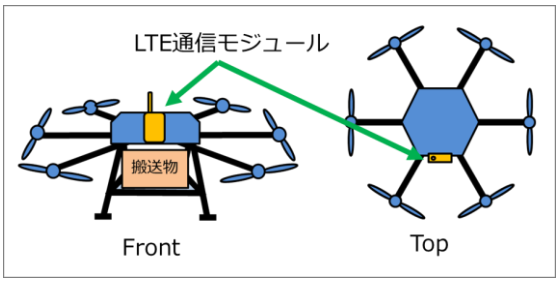


図１３　ドローンの外観モデル

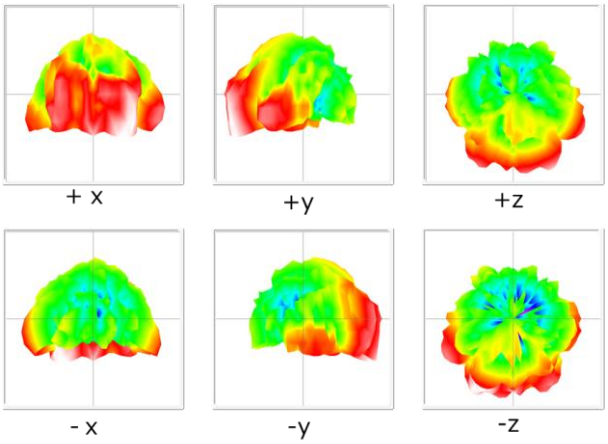


図１４　ドローンの送信パワー指向性評価結果

３．考察

３．１．スペクトラムアナライザによる電波測定

RTF 上空の電波測定を行ったところ、地点毎の差は特にみられなかった。無線通信等の基地局の位置によって結果は変わってくると考えられるので、次年度以降南会津町など、より離れた地点で測定し検証していきたい。

ある１地点を高度別に比較した場合は LTE 通信の Band によっては高度が上がるにつれて電波強度が弱くなっていく傾向もみられた。通常、LTE のアンテナは地上に向けて放射されているため、上空に行くほど弱くなったと考えられる。引き続き別のアンテナを使用して測定する、別の時間に測定するといった検証を行っていく予定である。

３．２．LTE 通信の受信電力の測定

RTF 地上測定の結果で、橋上と橋下の RSRP を比較したところ見通しのよい橋上の方が強くなると予想していたが橋上の方が弱い結果となった。別の時間帯や等方性アンテナを使用して測定するなどして再現性があるか確認する予定である。

上空の測定に関して、2 種のアンテナで測定したが、どちらも 0[m]地点と比較して上空の方が、RSRP が高い傾向にあった。これは上空のため障害物等がなく反射波などの影響を受けにくいためだと考えられる。

南会津町の測定に関して、RSRP は低い結果となった。一般的に-100[dBm]を下回ると電波が弱い[6]と言われているため、山間などの電波が弱い地域での通信形式が課題となると考えられる。次年度以降も別地点で測定しデータを集める予定である。

３．３．マルチパス環境の調査

上空のマルチパス調査に関して、高度 0[m]～20[m]では NLOS 成分が支配的となっており K-Factor は低い値となった。測定地周辺のフェンスや建物に反射した散乱波を受信しているからだと推測される。また 30[m]付近を超えるあたりで、K-Factor が高くなる傾向となった。これはフェンスや建物の高さを十分に超える高度に達したため、散乱波がドローンまで到達しなかったためと考えられる。いくつかの高度で解析できなかった原因について調査し、別地点で測定するなど引き続き検証していく予定である。

３．４．ドローンの無線通信特性の評価

送信パワーの指向性評価に関して、通信モジュールが設置されている方向が強く、反対方向が弱くなっていることを確認した。今回はドローンの中心がターンテーブルの中心になるよう設置した。これにより通信モジュールの位置がターンテーブルの中心にないことで通信モジュールと測定器のアンテナの距離が変わるため、その距離の影響が値に反映されることも考えられる。しかし、図１５のように回転テーブルが 180 度回転し、通信モジュールがドローンの裏側に移動した場合と、通信モジュールは機体前方のまま後方へ離した場合の差を比較すると、約 10[dBm]の差がみられた。このことから通信モジュールと基地局の位置関係によっては機体や搬送物の影響を受けていると推定される。

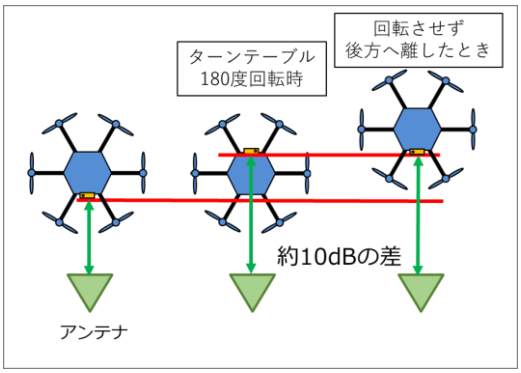


図１５　アンテナと通信モジュールの位置関係

今後は送信パワーの他、受信感度についても同様に測定する予定。また、今回取得した上空の電波状況やマルチパスの状況を再現し、再現した環境で送信パワー及び受信感度にどの程度影響があるか評価する予定である。

４．結言

RTF、南会津町実証フィールド、神奈川県厚木市において上空の電波状況、LTE 通信の受信電力及びマルチパスについて調査した。また、ドローンの無線通信特性を把握するため、搭載された LTE 通信モジュールの送信パワーの指向性について評価した。

HSA による電波測定では、RTF の地上及び上空の電波状況を確認した。上空の測定ではドローンに HSA を搭載することで上空での測定を可能とした。各地点及び高度における LTE 通信の各 Band 帯や５G 通信の電波状況を確認できた。

LTE 通信の受信電力の測定では、RTF の地上及び上空の RSRP を測定した。また、南会津町においても RSRP を測定した。各地点及び高度における LTE 通信 Band１の RSRP を確認できた。

マルチパス環境の調査では、神奈川県厚木市にて上空の LTE 通信のマルチパス状況を確認する実験を行った。各高度それぞれのマルチパス状況を取得することができた。いくつかの高度で解析できなかった原因について調査し、別地点で測定するなど引き続き検証していく予定である。

ドローンの無線通信特性の評価では、ドローンに搭載されている LTE 通信モジュールの送信パワーの指向性を評価した。このことにより、LTE 通信モジュールと基地局の位置関係によっては機体や搬送物の影響があることを確認できた。

今後は今回取得した上空の電波状況やマルチパスの状況を再現し、再現した環境で送信パワー及び受信感度にどの程度影響があるか評価する予定である。

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及び南会津町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）岩井誠人. 移動通信環境における信号強度変動特性（フェージング特性１）. 移動通信における電波伝搬. コロナ社, 2012, p.53.

６）“無線環境下における電波強度や品質の目安について”. 株式会社モバイルテクノ. https://www.fujitsu.com/jp/group/mtc/about/index2.html,（参照　2025 年 2 月 20 日）.