



次世代エアモビリティ及び無人航空機における電波の重要性

無人航空機における電波の重要性と安全な運用

双葉電子工業株式会社 システムソリューション事業センター あね は あきら
ロボティクス開発部 UAV課 UAV一係 姉 歯 章



1. はじめに

次世代エアモビリティは「ドローン」や「空飛ぶクルマ」で注目度が急上昇している。特に、無人航空機のレベル4（有人地帯での目視外飛行）はリスクレベルの高い飛行である。実現するためにはリアルタイムで状況把握ができる無線通信が必要となっている。本稿ではレベル3で利用されている無線通信とその問題と対策を紹介し、レベル4において無線通信はいかにあるべきかを考える。

2. 無人航空機に使用されている電波

無人航空機において、その操縦や画像伝送のために電波を発射する無線設備が利用されている。これらの無線設備を日本国内で使用する場合には、電波法令に基づき、国内の技術基準に合致した無線設備を使用し、原則、総務大臣の免許や登録を受け、無線局を開設する必要がある（微弱な無線局や一部の小電力の無線局は除く）。無人航空機に使用されている主な電波の周波数帯を表1に示す。

3. 航空法における無線の立ち位置

エアモビリティや無人航空機においてなぜ無線が必要なのか？完全オートマチックではいけないのか？という質問を受けることがある。国土交通省発行の「無人航空機の飛行の安全に関する教則」に以下のことが記載されている。

- 無人航空機の操縦者は、航空機と接近及び衝突を避けるため、無人航空機の飛行経路及びその周辺の空域を注意深く監視し、飛行中に航空機を確認した場合には、無人航空機を地上に降下させるなどの適切な措置を取らなければならない。
- 目視外飛行では「機体の状況や、障害物、他の航空機等の周囲の状況を直接肉眼で確認することができないので、機体に設置されたカメラや機体の位置、速度、異常等の状態を把握することが必要である。

これらのことから、安全を確保するための情報伝達に無線は必要な要素となっている。

■表1. 無人航空機で使用されている電波の周波数帯・用途

分類	無線局免許	周波数帯	送信出力 (MAX)	通信距離※1	伝送速度	主な用途
免許及び登録を要しない無線局	免許不要	73MHz帯	※2	1～5Km	約5kbps	産業用ラジコンの操縦用
	免許不要 技術基準適合証明が必要	429MHz帯	10mW	0.5～3km	0.3～5kbps	テレメータ
		920MHz帯	20mW	1～7km	0.05～1Mbps	操縦用・テレメータ
		1.2GHz帯	10mW	0.5～2km	5～50kbps	テレメータ
簡易無線局	免許不要 登録が必要	2.4GHz帯	200mW※3	0.5～7km	0.1～20Mbps	操縦用・テレメータ・画像伝送
		351MHz帯	1W	2～10km	4.8kbps	テレメータ
		169MHz帯	地上1W 空中10mW	2～10km	10～50kbps	操縦用・テレメータ・画像伝送
	免許必要	2.4GHz帯	1W	2～10km	0.1～10Mbps	
携帯局陸上移動局	免許必要	5.7GHz帯	1W	2～10km	5～20Mbps	操縦用・テレメータ・画像伝送
		5.8GHz帯	1W	2～10km	アナログ及び10Mbps	
	アマチュア無線局の開局	5.8GHz帯	1W	2～10km	アナログ及び10Mbps	画像伝送
携帯電話端末	免許不要 技術基準適合証明が必要	800MHz帯 900MHz帯 1.76GHz帯 2GHz帯	200mW (自動可変機能が必要)	—	～100Mbps	操縦用・テレメータ・画像伝送
衛星通信	免許不要	—	—	—	～100Mbps	—
レーダー	免許不要 技術基準適合証明が必要	24GHz帯	20mW	30m 分解能0.2m	—	測距 (高度)
		60/76/79GHz	10mW	～100m 分解能0.1m	—	測距 (高度)



4. 電波干渉

4.1 電波干渉による事故例

- ①携帯電話の基地局に20m程近づいて、自動帰還モードに入り建造物に衝突。
- ②大型船を撮影する際に船舶レーダーに近づきすぎてしまい、ホバリング状態になった。
- ③AMラジオ中継局の送信アンテナから200m離れたところから離陸したところ、強力な送信電力を受け無人航空機の電子回路が制御不能となり、民家の屋根の上に不時着した。
- ④2.4GHz帯の画像伝送装置を持つドローン同士が数m近接して1台が自動帰還モードに入った。
- ⑤携帯電話の基地局近くを飛行したときGNSSの補足衛星数が0となり基地局から離れると復帰した。
- ⑥大型船舶の甲板から離陸しようとしたら、船舶レーダーの干渉でGNSSの補足衛星数が0となり離陸できなかった。
- ⑦定期的なプログラム飛行を行っている無人航空機が飛行経路を約30mずれて飛行することがある。調査するとGPSの誤差に太陽フレアの影響が加わったことが判明した。と色々ある。

4.2 無人航空機に干渉を与えるシステム

- 大量のWi-Fiアクセスポイントがある地域
- 携帯電話基地局
- 地上デジタルテレビ放送中継局
- 気象用レーダーサイト
- 船舶マリーナレーダー
- 空港バードストライク監視レーダー
- 大型AMラジオ中継局

- 大型MCA中継局が挙げられる。

4.3 対策

①Wi-Fiシステムを使用している無人航空機の場合

Wi-Fiシステムはキャリアセンス（符号センスDCF：Distributed Coordination Function）を行っている。

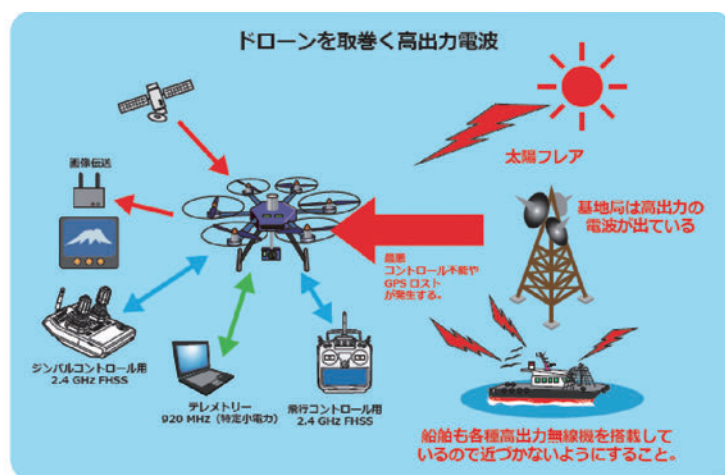
この機能によりWi-Fiのアクセスポイントが非常に多い都心の駅の周辺や展示会場では、無線機と無人航空機が通信接続ができなくなることがある。また、使用している周波数と同じ周波数で干渉を受けた場合、自動で周波数チャネルを切り替えることができないため、最悪の場合飛行できないことがある。都会のようにWi-Fiアクセスポイントがある地域での飛行は避けるか、他の通信方式を使用している無人航空機を使用することが望ましい。

②太陽フレア対策

電離層遅延対応のある2周波または3周波対応のGNSS受信機を使用している無人航空機を使用することで対処できる。

③電波塔等からの電波干渉への対応

- 飛ばす前に周囲に電波塔の有無、強い電波が飛んでいないかの確認をする。
- 飛行ルート周辺の電波塔の有無の確認を行う。
- 単純な対策だが、高出力電波源に近付かないことが一番の対策である。電波塔から50m以上離れて飛行することが被干渉対策となる。



■図1. 干渉例



5. 無人航空機の長距離飛行のための電波利用

無人航空機を長距離飛行させるためには、飛行している周囲の状況を把握するために、画像伝送機能が必要となる。さらに、機体の状態（位置、進路、姿勢、高度、速度等）を操縦者等が遠隔で把握できることが必要である。そして、有人機の近接など緊急事態における回避飛行をできることが必要である。いわゆる、画像伝送・テレメータと飛行制御可能な双方向通信が必要となる。

5.1 画像を長距離伝送できる無線周波数帯

■表2. 長距離伝送用周波数

無線システム名称	周波数帯	送信出力	通信距離	最大伝送速度
特定小電力無線局	920MHz帯	20mW	1～3km	4Mbps
小電力データ通信システム	2.4GHz帯	200mW 10mW/MHz	0.5～7km	20Mbps
無人移動体画像伝送システム※1	169MHz帯	地上1W 空中10mW	2～10km	50kbps
	2.4GHz帯	1W	2～10km	10Mbps
	5.7GHz帯	1W	2～10km	20Mbps
携帯電話端末※2	800MHz帯	200mW	—	～100Mbps
	900MHz帯			
	1.76GHz帯			
	2GHz帯			
衛星通信	—	—	—	～100Mbps

10km位までは、単独の無線システムで目視外飛行は可能であるがそれ以上の距離の場合、携帯電話網や衛星通信網を利用する方法が最適と考える。

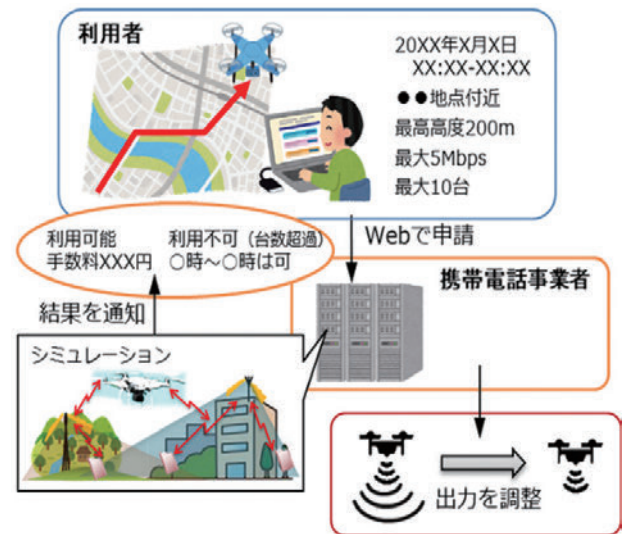
5.2 無人航空機等における携帯電話等の端末の利用

携帯電話等の上空利用について、令和5年4月20日省令発行により飛行高度制限がなくなった。携帯電話事業者に申し込むことにより、携帯電話を無人航空機等に搭載して利用することが可能となった。

携帯電話の上空利用は高まってきている。ただし、携帯電話網の無い地域での運用についての課題がある。

■表3. 携帯電話端末の上空利用が可能となる条件

通信方式	LTE-Advanced (4G) 方式 又は NR (5G) 方式
周波数帯	800MHz帯、900MHz帯、1.7GHz帯、2GHz帯に限る
送信電力制御	上空で利用される移動局にあっては、移動局が上空に存在していることを前提とした基地局からの制御情報に基づく空中線電力の制御を自動的に行える機能を有すること



■図2. 携帯電話の上空利用（出展：総務省）

○地上携帯電話網の無い地域

- ・火山活動や広域災害地域などで携帯基地局が動作停止した地域
- ・山岳地域、国定公園、超過疎地域
- ・沿岸6km～EEZ水域（200海里）上の海域

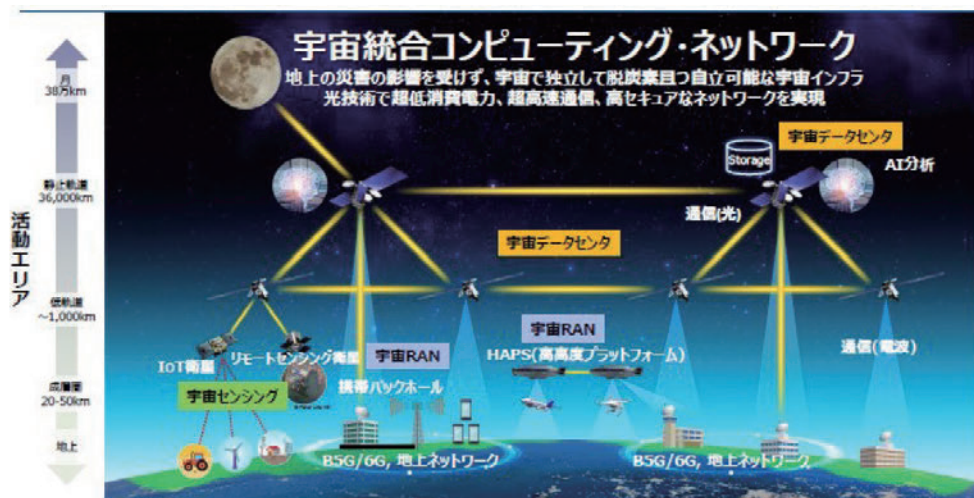
5.3 HAPS通信（実証実験中）

HAPS（High Altitude Platform Station：高高度基盤ステーション）高度20kmの成層圏に携帯基地局を搭載した翼端約80mの大型モータグライダーを飛行させてモバイル通信を提供する方式で、どこでも携帯電話を利用できるようにする方式。現在、実証実験を行っている。

5.4 衛星通信

我が国において2021年（令和3年）8月に、高度約500kmの軌道を利用する衛星コンステレーションによるKu帯（10～15GHz）非静止衛星通信システムの導入に必要な制度整備を行い、2022年にサービスを開始した。高度1,200kmのコンステレーションについても制度整備の検討を行っている。2024年には、小型モバイルに直接通信（音声や小メッセージ）のサービスが計画されている。動画はもう少し先と推測する。

無人航空機は空間移動していることから、周辺状況をリアルタイムで把握する必要がある。20フレーム/秒は必要となる。高速データ伝送が可能なStarlink、インマルサット、N-STAR、イリジウムが候補となる。現時点ではいずれも衛星を追尾する機能が必要であり、受信設備の重量が大き



■ 図3. NTT宇宙総合コンピューティング・ネットワーク（出展：NTT）

■ 表4. 民間が利用できる衛星

名称	高度	通信速度	端末形態
Starlink	550km	10~100Mbps 遅延25~50ms	固定局 4.2kg
インマルサット	36,000km	4~492kbps 遅延 ~数秒	移動局 1.6kg
N-STAR	36,000km	384kbps 遅延 ~数秒	移動局 1.3kg
グローバルスター	1,414km	72kbps 遅延約250ms	携帯 640g
イリジウム	780km	2.4~1.4Mbps 遅延50~200ms	携帯 266g
Project Kuiper Amazon	590km	数100Mbps 遅延16ms	固定局 移動局

いため無人航空機に搭載することは難しいが、実用化実験されている。今年になってStarlinkと携帯電話網の組合せで、レベル3飛行で実証実験が行われている。2024年にスマホとStarlinkが直接通信する計画も発表された。また、NTTとAmazonによる事業計画も発表された。

6. GNSS

GPS (Global Positioning System) は、アメリカ国防総省が、航空機等の航法支援用として開発したシステムである。近年はGPSに加え、ロシアのGLONASS、欧州のGalileo、日本の準天頂衛星QZSS等を総称してGNSS (Global Navigation Satellite System/全球測位衛星システム) と呼ばれている。また中国のBeiDou (北斗) も利用できるようになった。また、受信バンド (周波数チャネル) も当初はL1 (1575.42MHz) だけだったが、L2 (1227.60MHz) が加わり、近年はL5 (1176.45MHz) も受信できるGNSS

受信機が安価に入手できるようになり、無人航空機に搭載されてきている。

日本のQZSS (みちびき) は、L6 (1278.75MHz) CLAS データを受信することにより水平精度5cmが可能となり利用されている。

位置精度を向上するにはRTK (Real-time kinematic) 方式と呼ばれる地上の固定基地局からの補正データを無人航空機側のGNSS受信機に入力すると水平精度2cm以内となる。近年、Nrtip (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) と呼ばれるインターネット回線を通じてGNSSの補正データを配信する方式が主流になってきている。

■ 表5. 各衛星の測位誤差 (民間使用における精度)

衛星名	管理国	周波数	水平誤差
GPS ^{※1}	米国	L1C/A	1575.42MHz
		L2C	1227.60MHz
		L5	1176.45MHz
QZSS	日本	L1C/A	1575.42MHz
		L2	1227.60MHz
		L5	1176.45MHz
みちびき		L6	1278.75MHz
GLONASS	ロシア	L1	1598MHz~1605MHz
		L2	1242MHz~1249MHz
Galileo	EU	E1	1575.42MHz
		E5a	1176.45MHz
		E5b	1207.14MHz
BeiDou	中国	B1I	1575.42MHz
		B2I	1207.14MHz
		B3I	1268.52MHz



7. エアモビリティ（空飛ぶクルマ）

エアモビリティ（空飛ぶクルマ）は将来的に操縦者なしで人を運ぶサービスが考えられている。航空機の分類で「無操縦者航空機」（Remotely Piloted Aircraft System (RPAS)）と呼称される。現時点では航空機関連の法規が適用されている。

■表6. 航空無線例

無線設備名	周波数	用途
短波無線設備 (HF無線設備)	2.8MHz～22MHz	洋上等における航空交通管制、運航管理通信
超短波無線設備 (VHF無線設備)	118～137MHz	航空交通管制、運航管理通信
航空機用救命無線機 (ELT)	121.5MHz、243MHz、 406MHz帯	遭難時に自動送信
ATC トランスポンダ (ADS-B)	1030、1090MHz	ID番号、位置情報、速度、高度等
電波高度計	4200～4400MHz	対地高度を測定

現在の航空無線では、音声やテレメータ情報の通信をするための仕様なので周波数帯域が狭いため、画像伝送することができない。

7.1 空飛ぶクルマにおける画像伝送

地上にいる操縦者が機体の周辺状況を把握しなければならないことから、画像伝送は「無操縦者航空機」において必須の機能となる。画像伝送用の専用周波数割当てがない現状では携帯電話網と衛星コンステレーションに頼るしかない。

7.2 携帯電話網の課題

○冗長性の確保

「無操縦者航空機」を運用している場合、大規模通信障害が発生すると重大なインシデントとなる。「非常時における事業者間ローミング等に関する検討会」（総務省）で検討している最中である。上空用携帯電話については、今後の課題となると推測する。制度化されるまでは回避方法として複数の通信事業者の端末を利用することで冗長性を確保するしかないと考える。

○上空利用携帯電話は災害優先電話となる仕組みが必要

- ・無操縦者航空機を運用しているときに大規模災害が発生しても通信断にならないことが必要である。
- ・無人航空機において災害救援時に通信確保できることが必要である。

7.3 衛星コンステレーション

空飛ぶクルマは無人航空機よりはるかに大きいので、衛星追尾用アンテナが搭載可能と推測する。様々な衛星通信が利用可能である。

表7. エアモビリティに利用できそうな衛星

事業者	OneWeb	SpaceX	Amason
衛星数	618基	4,521基	3,236基予定
軌道高度	1,200km	550km	約600km
通信速度	100Mbps	100Mbps	100Mbps
遅延時間	50ms以下	50ms以下	16ms
運用	2023～	2020～	2024～

8. まとめ

電波に求められることは通信が切れないことである。

○無人航空機

- ・使用している無線システムの通信距離の限界を把握する。
- ・飛行経路における、電波・磁気障害に係る調査を行う。
- ・電波塔、大型送電線、気象レーダ等から離れた飛行計画を立てる。
- ・特にレベル4においては冗長性を確保すること。

○エアモビリティ（空飛ぶクルマ）

- ・低遅延・マルチビジョンの画像伝送ができる通信手段の確保。
- ・高冗長性や災害時の利用を考慮した制度設計が必要である。

※総務省より周波数再編アクションプラン（令和5年度版）が発表されました。楽しみです。

（2023年11月21日 情報通信研究会より）