

小型無人機(ドローン)の安全運航 に不可欠なワイヤレス技術 ～「空の産業革命」「空のIoT」の実現に向けて～



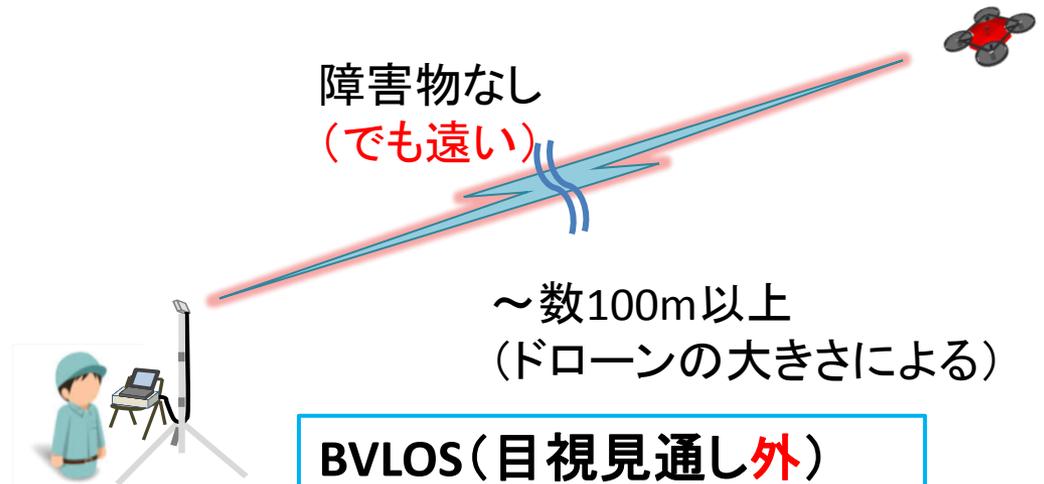
国立研究開発法人 情報通信研究機構
ワイヤレスネットワーク研究所
三浦 龍

本資料での用語の定義



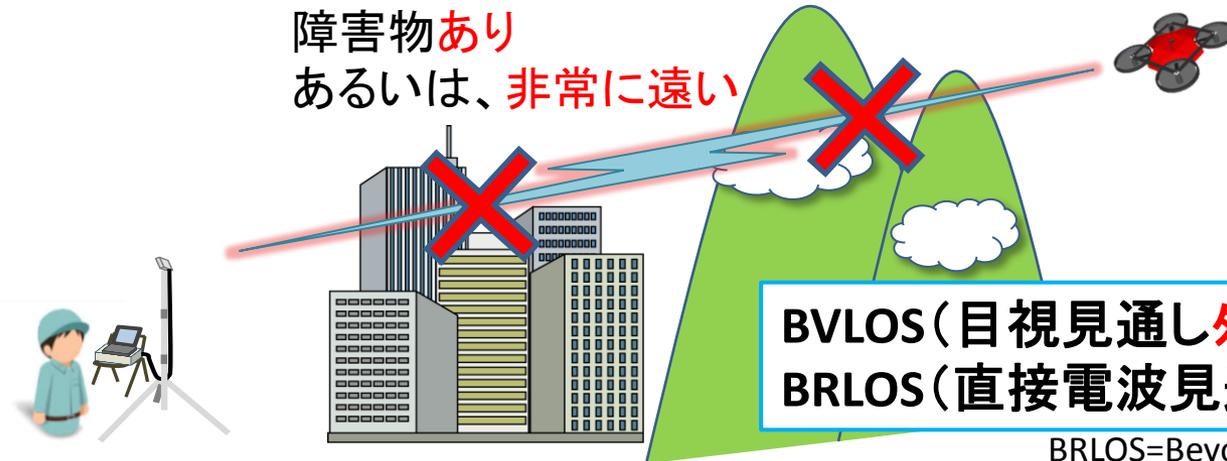
VLOS(目視見通し内)
RLOS(直接電波見通し内)

VLOS=Visual Line-of-Sight
RLOS=Radio Line-of-Sight



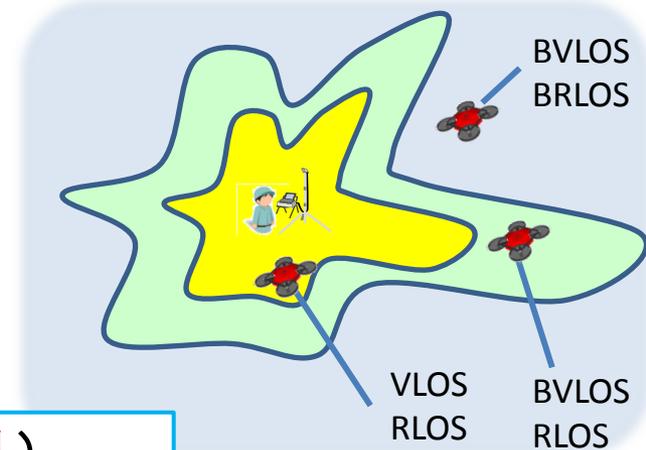
BVLOS(目視見通し外)
RLOS(直接電波見通し内)

BVLOS=Beyond Visual Line-of-Sight



BVLOS(目視見通し外)
BRLOS(直接電波見通し外)

BRLOS=Beyond Radio Line-of-Sight



急速に拡大するドローンのニーズ



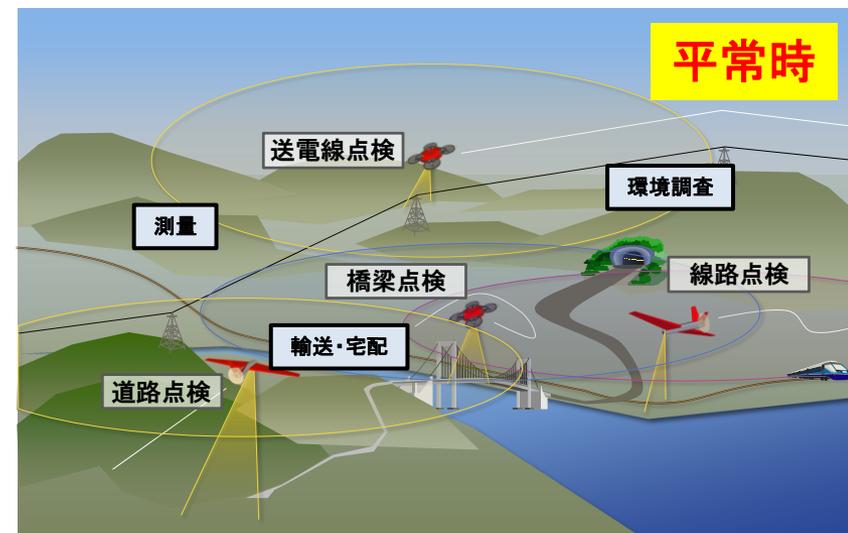
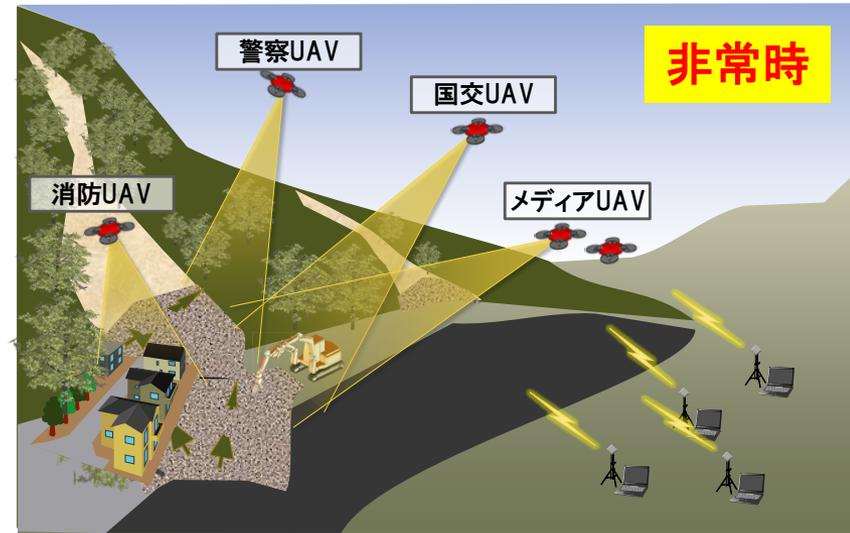
(2015年12月の航空法一部改正を踏まえ)

2015年1月「ロボット新戦略」、2023年までの世界での市場予測は「10兆円規模」

飛行高度	中空～高空	低空～中空	低空～中空
飛行距離	長距離・BVLOS	長距離・BVLOS	近距離・VLOS
用途	<div style="border: 1px solid black; background-color: yellow; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">災害モニタリング</div> <div style="border: 1px solid black; background-color: yellow; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">災害時通信中継</div> <div style="border: 1px solid black; background-color: yellow; padding: 5px; margin-bottom: 5px; margin-left: 100px;">広域インフラ点検・測量</div> <div style="border: 1px solid black; background-color: yellow; padding: 5px; margin-bottom: 5px; margin-left: 20px;">中空低空ドローンのための リレー中継</div>	<div style="border: 1px solid black; background-color: yellow; padding: 5px; margin-bottom: 5px; margin-left: 100px;">物流</div> <div style="border: 1px solid black; background-color: yellow; padding: 5px; margin-bottom: 5px; margin-left: 200px;">電波の監視</div>	<div style="border: 1px solid black; background-color: yellow; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">農薬散布</div> <div style="border: 1px solid black; background-color: yellow; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">農業・林業・漁業 モニタリング</div> <div style="border: 1px solid black; background-color: yellow; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">インフラ点検</div> <div style="border: 1px solid black; background-color: yellow; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">警備</div> <div style="border: 1px solid black; background-color: yellow; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">映像素材取得</div>
<div style="border: 1px dashed black; border-radius: 15px; padding: 5px; background-color: lightblue;">一部、人口密集地域上空での飛行を含む</div>			
適したドローンタイプ	固定翼(エンジン、電動)	固定翼(電動) 回転翼(シングルローター、マルチローター)	回転翼(シングルローター、マルチローター)

ドローンの安全運航に向けた課題

- 墜落事故リスクの増大
- 異なるユーザ、異なる業種のドローン間での衝突リスクの増大
- 有人機とのニアミス・接触リスクの増大
- 無線妨害(通信・GPS)リスクの増大
- 違法行為への悪用リスクの増大
- ハッキングリスクの増大



ドローンの安全運航におけるワイヤレス技術の役割

- 墜落事故リスクの増大
- 異なるユーザ、異なる業種のドローン間での衝突リスクの増大
- 有人機とのニアミス・接触リスクの増大
- 無線妨害(通信・GPS)リスクの増大
- 違法行為への悪用リスクの増大
- ハッキングリスクの増大

無線リンクの高信頼化
(干渉対策、共用技術、広域化、冗長化など)

一部研究開発実施中

ネットワークを介した運航管理システムの実現(位置、ID、時間など)

搭載型の衝突回避システムの実現(電波や画像など)

ネットワークを介した電波管理システムの実現(チャンネル、スロット、時間、場所など)

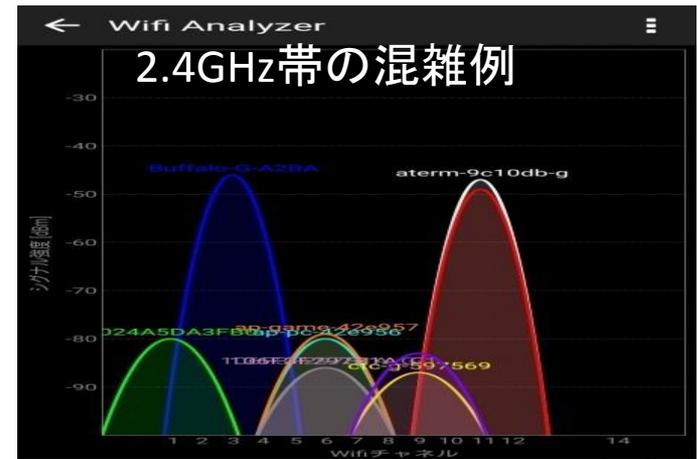
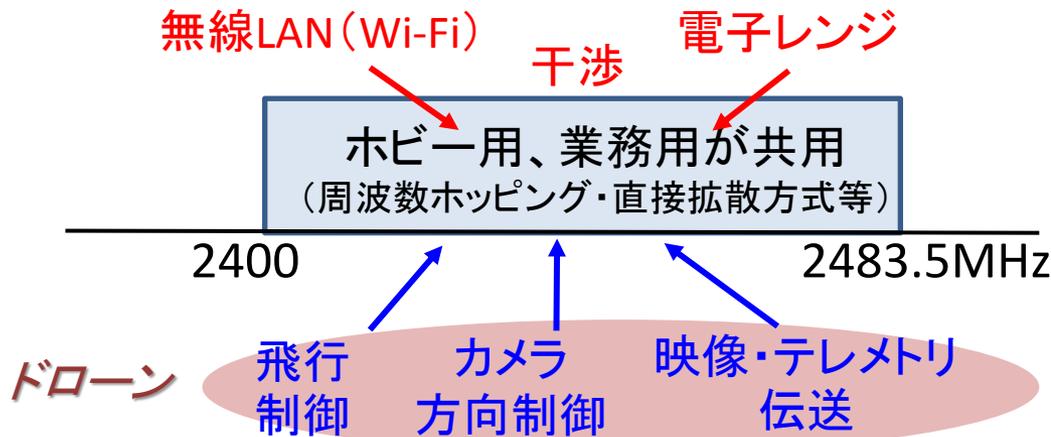
不審な電波等のセンシングシステムの実現(識別、位置など)

制御通信の暗号化等のセキュリティ技術

一部研究開発実施中

ドローン制御用無線リンクの現状

主に2.4GHz帯ISMバンド使用(一部920MHz帯使用も)



Wifi AnalyzerのHPより

- ほとんどが2.4GHz帯のISM帯を利用。(産業用へりは一部73MHz帯使用)
- 制御用には周波数ホッピングやZigBee、画像伝送用にはWi-Fi等。
- ホビー用と業務用が混在。
- 無線LANや電子レンジ等からの干渉あり。



- 安全性担保されず(電波の混雑)、制御用(コマンド・テレメトリ)としては推奨されない(画像は可)
- 長距離運用には適さず (通常、制御で1km程度、画像・テレメトリで200~300m程度)

これからの主なドローン用周波数

機体の安全
飛行に直結

コマンド・テレメトリ
(機体の制御や位置情報等)

画像伝送

免許不要バンド(共用、既存:特定小電力/小電力データ通信)

2.4GHz帯(～10mW/MHz,約84MHz幅)

920MHz帯(～20mW、約7MHz幅)

- 近距離を対象(～1km)
- **免許人同士の運用調整は不要**

特に2.4GHz帯は
業務用ドローンの
コマンド・テレメ
トリには適さず

免許バンド(共用、新規割当て予定:H28～)

2.4GHz帯(～1W, 約10MHz幅)

5.7GHz帯(～1W, 約120MHz幅)

169MHz帯(～1W, 約500kHz幅)

- 長距離まで対象(～5km)
- 広帯域伝送用として適す
- **免許人同士の運用調整が必要**

- 長距離まで対象(20km以上)
- バックアップ用として適す
- **免許人同士の運用調整が必要**

コマンド・テレメ
トリにも使えるもの
の、主に画像伝
送用

コマンド・テレメ
トリに適すが、チャ
ネルが不足

画像伝送用の周波数はある程度確保されたが、高信頼なコマンド・テレメトリを提供する周波数はまだ不足

主なドローン用周波数の利用のポイント

ドローンのための電波システムの特徴＝安全な運航・運用に直結

確実な通信と遅延時間を保証する必要があるとすると、キャリアセンス方式（無線LANと同じ方式＝送信する前に電波がすでに他者に使われていないか、耳を澄ます）の採用は適切でない

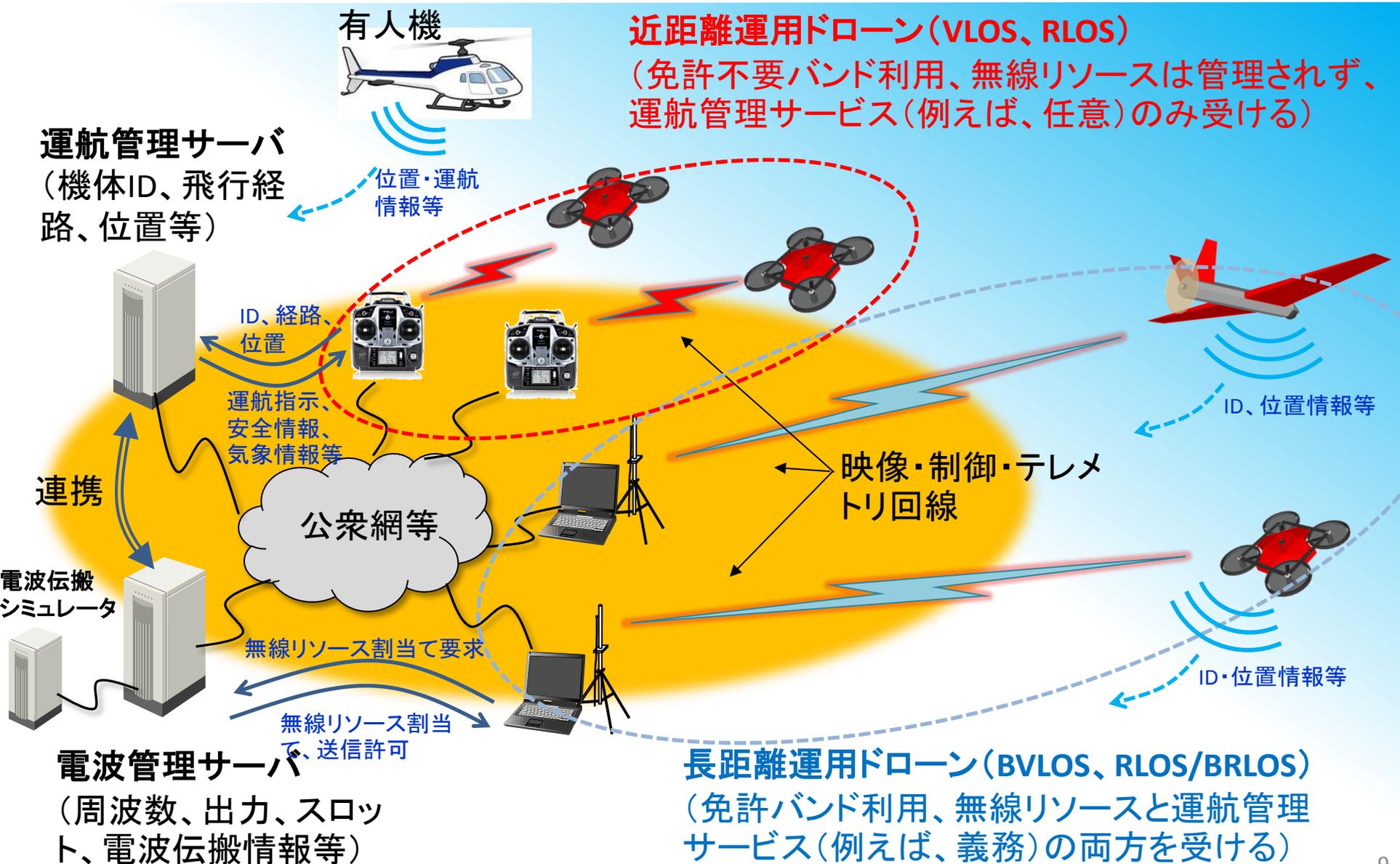
(対策例)

ドローンは
電波のトラ
ブルが事故
に直結

ドローンは3次元
の移動体

- 時間軸で確実に無線リソース(周波数)を共有する方式の採用(TDMA等)
- 免許人間(ドローン間)の運用調整(無線リソース管理)のしくみの導入(多数のドローンを収容するための周波数有効利用技術の適用)
- ドローンのID、飛行経路、位置を管理する運航管理システムとの連携
- 高さ方向や地形・建物、ドローンの姿勢等の影響を考慮した伝搬特性を推定して無線リソース管理に活用

集中管理型の統合運航管理システムの 基本構成の例



ドローンの安全運航に必要なワイヤレス関連要素技術の例

— 運航管理(長距離運航を含む) —

コマンド(→) = 制御情報
テレメトリ(←) = 位置、向き、高度、バッテリー残量、
圧縮映像、警告情報等

搭載型衝突防止方式
(ドローン版TCAS)

非GNSS位置補正システム(補正局等)

有人機



有人機のADS-B
(位置・ID情報)

直接電波見通し外(BRLOS)
無線リンク方式
(地上インフラ経由/他ドローン経由/衛星経由)
(10P補足図面参照)

位置・ID情報

位置・ID情報

位置・ID情報

公衆網等

コマンド

テレメトリ

コマンド

テレメトリ

位置・ID情報配信方式
(ドローン版ADS-B)

公衆網等

長距離コマンド・テレメトリ通信方式
(BVLOS・RLOS)
(数キロ以上、確実に到達させる周波数とチャンネル数確保)

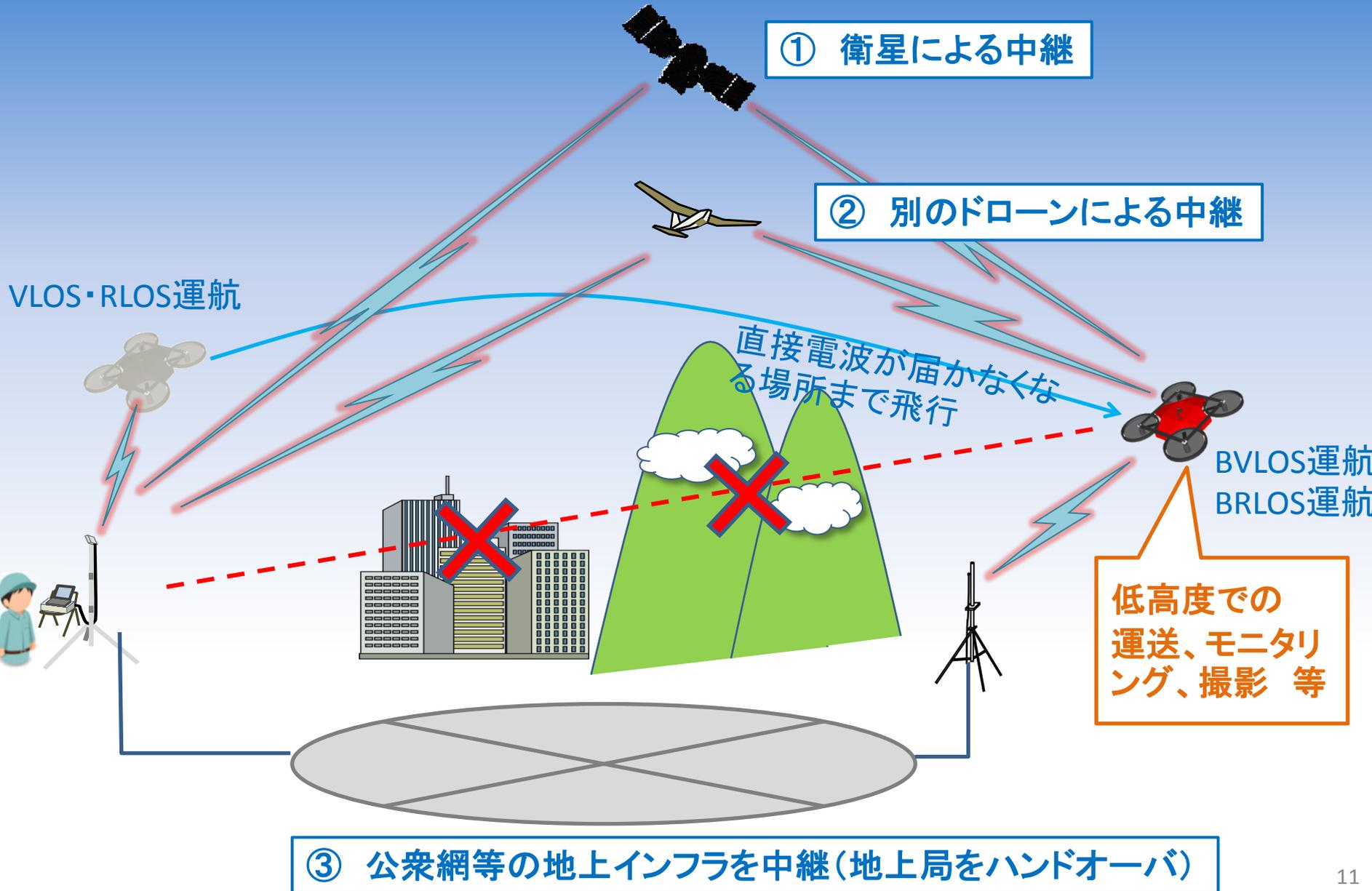
ドローン版IFR(計器飛行)方式(BVLOS・RLOS)
(テレメトリ情報や警告情報のみで安全操縦)

※衝突防止に関しては複数技術の多重化で安全を図る

統合運航管理システム
(運航管理、電波管理、有人機
インタフェース、
気象情報提供等)

(補足図面)

直接電波見通し外 (BRLOS) での無線リンク維持の技術



NASA UTMプロジェクトにおける段階的な推進構想

UTM: UAS Traffic Management

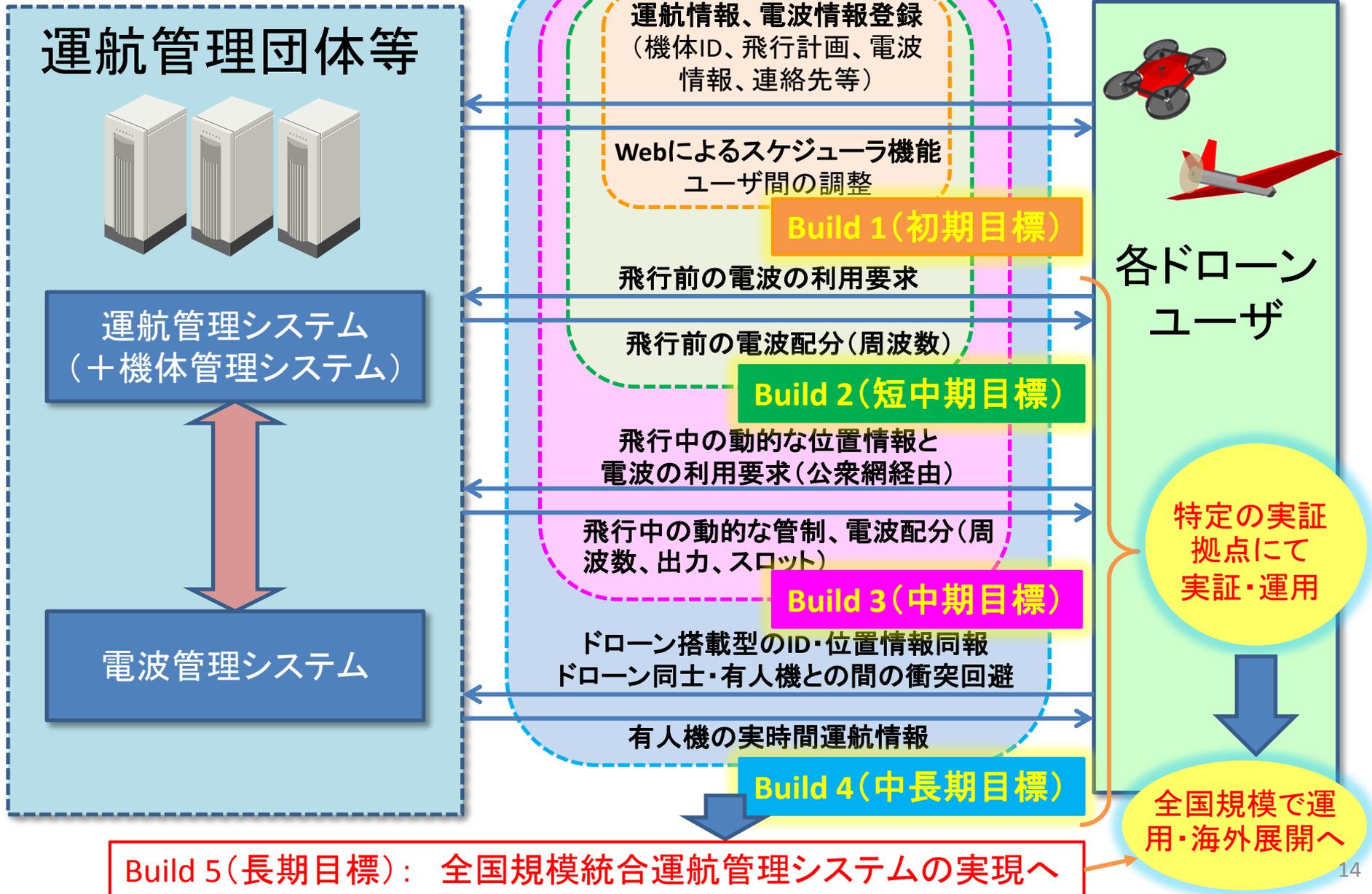
No.	内容	提供サービス
Build 1 (~2015.8)	予約空域 でのUASへの情報提供システム	無人地域 での運航／気象、航空交通情報等の提供
Build 2 (~2016.10)	BVLOS でのUASの動的な運航管理システム	人口低密度地域 での運航／動的な空域情報、混雑予測、相互調整の提供
Build 3 (~2018.1)	BVLOS でのUASの衝突・ニアミス回避システム	人口中密度地域 での運航／インターネット経由での空域モニタリング、有人機・無人機統合衝突管理
Build 4 (~2019.3)	BVLOS での大規模UAS交通管制システム	人口高密度地域 での運航／全国規模への展開



https://prod.nais.nasa.gov/eps/eps_data/162405-OTHER-002-001.pdf より

<http://utm.arc.nasa.gov/index.shtml> より

日本における段階的な展開例（電波管理を含む）



補足資料

ドローンの安全運航に必要な要素技術の例(1) (ワイヤレス技術を中心に)



電波管理	説明
3次元移動体を対象とした電波伝搬予測技術	地形や建物の遮蔽を考慮して、電波の到達範囲、不達エリアを予測し、適宜警告等を配信。無線リソース配分にも活用。
無線リソースの効率的な配分技術(免許バンド)	周波数、帯域幅、送信出力、送信スロット等の無線リソースを各ユーザからのリクエストも配慮しながら飛行前あるいは飛行中に動的に配分。相互干渉を回避しつつ収容台数を最大化。
複数周波数間自動切り替え技術	バックアップ用の狭帯域周波数と通常運用のための広帯域周波数を電波環境や周囲環境に応じてシームレスに切り替え。
搭載カメラによるVFR(有視界飛行)用映像伝送のための圧縮符号化方式	BVLOS(目視見通し外)における衝突回避や障害物回避をサポートするため、1台のドローンに複数のカメラが搭載されることを想定し、その映像を効率的に圧縮して伝送。

ドローンの安全運航に必要な要素技術の例(2)

(ワイヤレス技術を中心に)



運航管理	説明
小型機が搭載可能な位置・ID情報送信方式	ドローン版ADS-B方式とそのための電波利用技術。ドローン自身が情報発信し、周辺の他のドローンや地上局に配信。小型軽量化、省電力化、複数ドローン間の周波数共用方式の検討が必要。
ドローン同士及び有人機との衝突回避(DAA)方式	地上の運航管理システム経由で衝突回避を行う方式、あるいは、航空機同士で自動的に衝突回避を行う方式。位置情報によるか、あるいは搭載カメラによるビジョン情報等による。有人機がADS-Bやトランスポンダを搭載している場合とない場合についての検討が必要。
障害物との衝突回避技術	レーザレンジングや超音波による方式はすでに実用化されている。より長距離や視界不良環境(煙や水蒸気等)をカバーするには電波によるレーダー方式が有望。
非GNSS位置補正システム	GNSSによる測位を補完・補正する地上設置型のドローン位置補正システム(ドローン版航行援助装置)。
統合運航管理システム	業種毎のドローン運航、有人機の運航の各システムとのインタフェースを持ち、統合的にデータ管理や運航情報・気象情報の配信、無線リソース配分管理をシステム。

ドローンの安全運航に必要な要素技術の例(3)

(ワイヤレス技術を中心に)



長距離運航 (BVLOS、BRLOSを 含む)	説明
ドローン版IFR(計器飛行) 方式(BVLOS)	ドローンから送信される テレメトリ情報 や 警告情報 のみで 安全かつ容易にマニュアル及び自動操縦 を行うためのユーザインターフェースをもつコントローラ方式及び機体システム。海外の軍用では一部実用化されているが、国産機では未開発。
長距離コマンド・テレメトリ 通信方式	安全運航の要となるコマンド・テレメトリ(位置情報含む)を 長距離(数キロ以上) でも 確実に到達させる ために必要な周波数とチャンネル数を確保。
複数ドローン間マルチホップ リレー制御技術(BRLOS)	複数のドローンを数珠つなぎ に経由して遠方のドローンを制御・監視。途中に高い山や建物がある場合や建物内・地下などに有効。一部研究開発が進行中。
複数地上局間ハンドオー バ技術(BRLOS)	公衆網等のネットワークに接続された複数の地上局をハンドオーバ して遠方のドローンを制御・監視。複数の地上局がインフラとして設置可能な場合や特定の空路が設定される場合に有効。一部研究開発が進行中。
衛星通信技術(BRLOS)	マイクロ波(Lバンド)を使った低レートなものはすでに実用化されているが、 広帯域なもの は軍用大型ドローンを除き、未開発。一部試作機(Kaバンド)の開発が進行中。遠方海洋上や山岳地域等で有効。

ドローンの安全運航に必要な要素技術の例(4) (ワイヤレス技術を中心に)



悪用防止関連	説明
サイバーセキュリティC2リンク	サイバー攻撃への耐性をもつ暗号化方式により、特定の操縦者以外からの制御を不能にするC2リンク技術。一部研究開発が進行中。
ドローンによる不法な電波の監視技術	ドローンに受信アンテナを搭載し、上空から電波監視を行うことにより、マルチパスの影響等が抑制され、電波発射源探査の向上が図れる。
不審ドローンの電波の監視技術	不審ドローンが発する電波の方向とIDを探知し、その位置を特定。
不審ドローンのハッキング技術	不審ドローンのC2リンクを解析し、制御権限を取って(ハッキングして)安全に誘導・着陸させる技術。

その他	説明
気流計測用小型ライダー	ドローンを飛行させる場所周辺上空(～高さ・水平方向数100m程度)の気流状況(乱気流や下降気流等)を計測するポータブル型の小型ライダー

発足	平成27年9月～
主査	東京大学 鈴木 真二教授(航空宇宙工学)
活動内容	国内法規制、海外動向、ロードマップ、政策等を幅広く調査し、ドローン安全運航管理システムの在り方を検討
メンバー	東大、工学院大、内閣官房、警察庁、JAXA、産総研、電子航法研、NEDO、NICT、携帯電話キャリア、重工メーカー、ドローンメーカー、電機メーカー、建設機械メーカー、カメラメーカー、運送事業者、警備会社、製鉄会社等
オブザーバ	経産省、国交省、総務省、防衛省、文科省、福島県、南相馬市、エネルギー事業会社、放送会社、航空会社、道路事業者、コンサルティング会社等

※メンバーは今後増える可能性あり