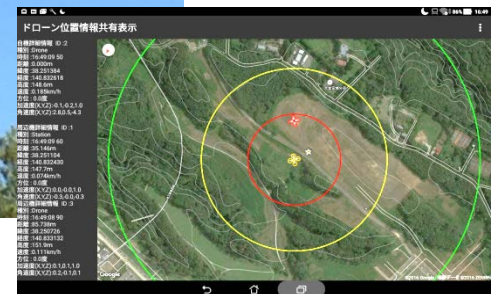
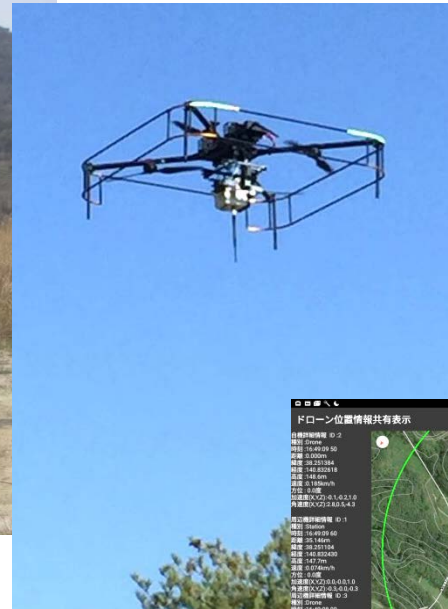


災害時等での小型無人機活用に向けた 電波利用技術の動向と取組み



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総合研究センター

三浦 龍 ryu@nict.go.jp、小野 文枝 fumie@nict.go.jp₁

1. NICTにおけるこれまでの取組み

～空飛ぶ電波タワーによる災害時の通信確保にむけて～

2. ドローンにおける無線の役割と運用体制

～無人機の安全運用にむけて～

3. 見通し外でのドローン運航のための無線技術の開発

～無瞬断マルチホップ制御通信「タフ・ワイヤレス」

～ドローン間位置情報共有ネットワーク「ドローンマッパー」

4. おわりに

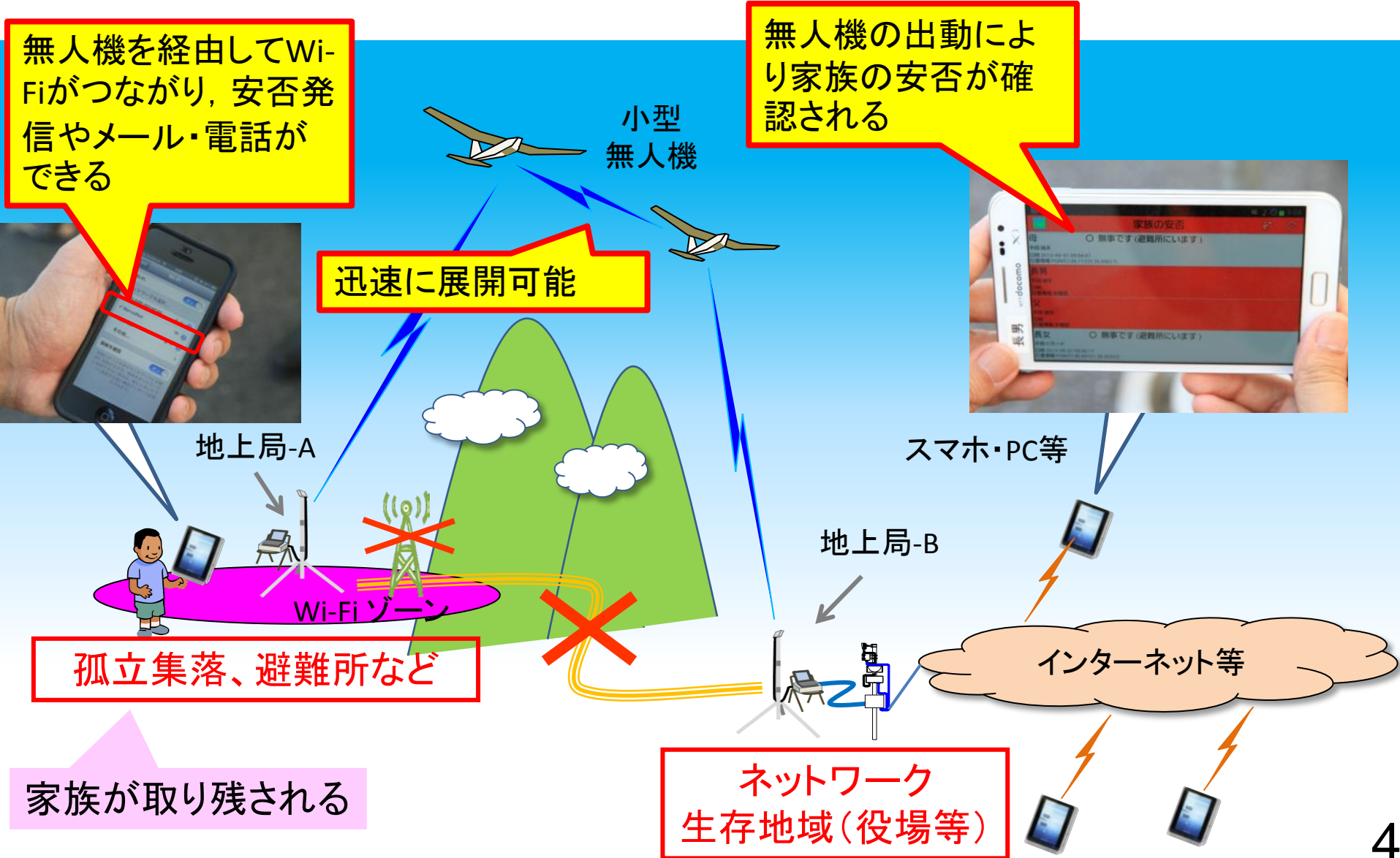
※ 本資料の一部は総務省電波政策2020懇談会第2回サービスワーキンググループワイヤレスビジネスタスクフォース資料から引用・更新したものを使用するとともに、内閣府の革新的イノベーション研究開発プログラム（ImPACT）の1つである「タフ・ロボティクス・チャレンジ」の成果も含んでいます。

1 NICTにおけるこれまでの取組み

空飛ぶ電波タワーによる災害時の通信確保に
むけて

空飛ぶ電波タワーで孤立地域を上空からつなぐ！

無人機を経由したWi-Fiゾーン形成と安否確認の例





手投げ発進



ランチャー発進

Puma-AE (米国製)

翼長	2.8m
重量	5.9kg
飛行時間	2～3時間
電波の到達距離(制御・テレメトリ、映像)	約15km(2GHz帯、出力1W) 約8km(5GHz帯、出力1W)※
発進／着陸方式	手投げ・ランチャー発進／失速回収

小型無人飛行機システム(Puma-AE)構成



標準搭載ジンバルカメラ
(可視光・赤外。可視光は
動画・静止画VGA。)

飛行制御・モニタ可能距離
は 15km (2GHz帯制御リン
クの場合)

目標追尾機能あり。映像伝送距離
は 15km
(2GHz帯制御リンクの場合)



飛行制御・モニタ用地上局

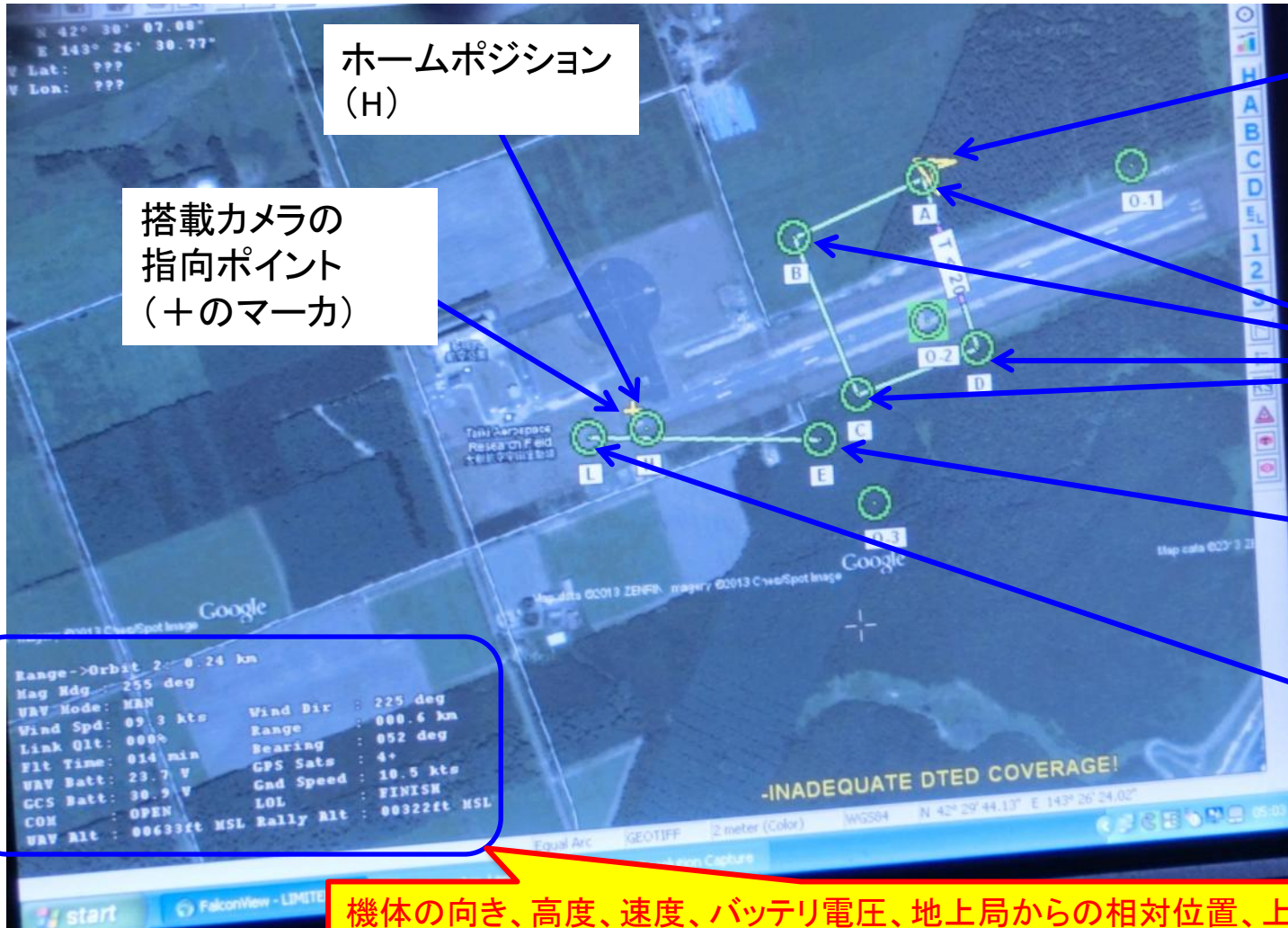


目視見通し外(BVLOS)での
計器飛行(IFR)可能



画面付き専用コントロール端末

飛行経路設定・監視画面



ホームポジション
(H)

搭載カメラの
指向ポイント
(+のマーカ)

飛行位置
(黄色のマーカ)

ウェイポイント
(A,B,C,D)

着陸進入ポイント
(E)

着陸ポイント
(L)

機体の向き、高度、速度、バッテリー電圧、地上局からの相対位置、上空の風速・風向、飛行モードなどをリアルタイム表示

※ その他、全部で175項目にわたる機体情報データを50msごとに受信・記録

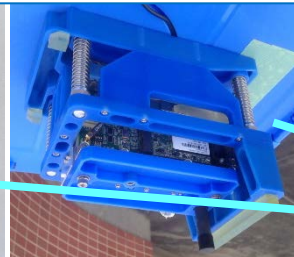
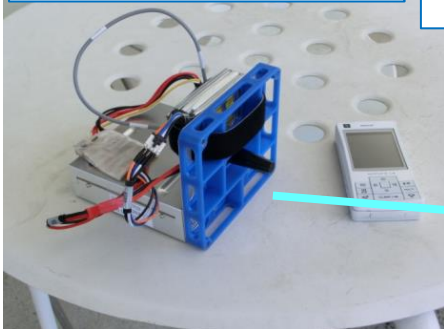
開発した小型無人機搭載用小型通信ペイロード



周波数	2 GHz帯、5 GHz帯 (実験試験局免許)	
送信出力・通信距離	2GHz帯: 2W・最大約20km 5GHz帯: 1W・最大約8km	※5GHz帯の通信ペイロードは総務省委託研究「無人航空機を活用した無線中継システムと地上ネットワークの連携及び共用技術の研究開発」に基づいて開発されたものです。
通信方式	MSK / TDMA/TDD (GPS同期)	
アンテナ	$\lambda/4$ ホイップ (水平面無指向)	
中継機数	1機中継あるいは2機中継 (Air-to-Air)	
伝送速度 (無線 / 情報)	6M bps / 400 kbps	(2機リレー中継, 符号化率1/2)
サイズ (アンテナ除く)	W90 x D100 x H116 (mm)	
重さ	500 g以下	

2GHz帯通信ペイロード
(重量 500g)

5GHz帯通信ペイロード
(重量 1100g)



ペイロードは簡単に入れ替え可能



通信用地上局

これまで実証実験実績



合計200回以上、100時間以上のフライトを実施

※各実験ごとに航空法に基づく飛行許可申請あるいは通報の手続きを実施

香川県坂出市（さぬきメディカルラリー・災害救助訓練等）
2014年5月、2015年5月、2016年3月

徳島県佐那河内村（野生サル信号捕捉実験）2016年6月

熊本県人吉市（林業ICT基礎実験）2016年11月

高知県四万十町（山間部でのフェムトセル中継実験、NHKニュースウォッチ9取材）
2015年2月

北海道芽室町（農業ICT応用実験）
2014年6月

北海道大樹町（長距離通信実験等）
2013年6月、11月

岩手県奥州市・金ヶ崎町（岩手県総合防災訓練）2015年7月

東北大学青葉山（災害時中継実験、東北大学オープンキャンパス連携実験）
2013年3月、7月、2014年7月

福島スカイパーク（無線通信実験）
2015年12月

福島県富岡町（居住制限区域での野生イノシシ信号捕捉実験）2014年10月

大利根飛行場（テレビ東京WBS取材）
2013年12月

湘南国際村（フライト訓練）
2013年3月

和歌山県白浜町（災害時中継実験、NHKニュースウォッチ9取材）
2014年3月

事例 1 中山間地域での災害時携帯電話中継実験

(2015.2 高知県四万十町)

初めて携帯電話の
中継を実証

小型無人機Puma-AE
(海拔高度1000m)

超高速インターネット衛星
(WINDS)

NICT鹿嶋
宇宙技術セン
ター
(茨城県鹿嶋
市)

災害時孤立想定地域

フェムトセル
通話ゾーン

フェムトセル
基地局

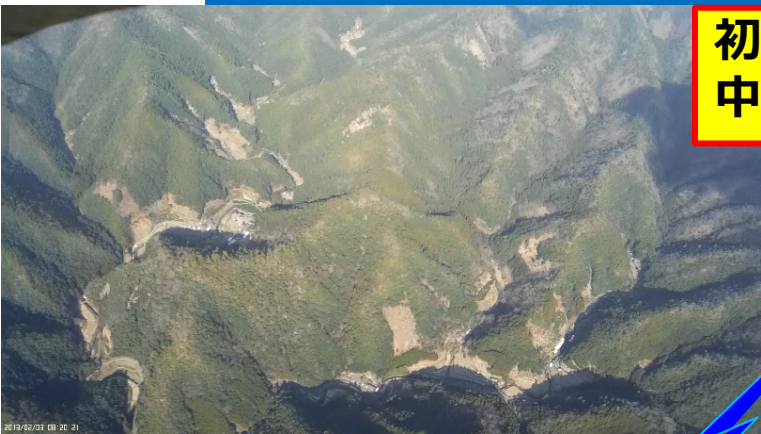
無線メッシュネットワーク
(NerveNet)

車載衛星地球局

四万十町の
光ファイバー回線

インターネット

携帯電話各社の
ネットワーク



中山間地域での災害時携帯電話中継実験 (2015.2 高知県四万十町)



地上局・フェムトセル局位置

GS2

GS1

地上局・衛星車載局位置



飛行・旋回軌跡

約400m

離着陸ポイント・制御局位置

約2km

GCS/ Takeoff/ Landing

© 2015 ZENRIN

Google earth



事例 2 岩手県総合防災訓練への参加

(岩手県奥州市・金ヶ崎町 2015年7月12日)

情報伝達ルート／システム構成

河川の氾濫状況の映像をリアルタイムで災害対策本部等に届け、救助活動等に役立てる

WINDS

(超高速インターネット衛星「きずな」)

無人機に搭載したカメラにより北上川の氾濫地区の映像を配信

小型無人機

搭載ジンバルカメラ

見たい場所に
カメラジンバル
固定

災害対策本部
(岩手県庁)

NICT鹿島宇宙
技術センター

インターネット

現地対策本部
(奥州市役所、
奥州市江刺総合支所、
金ヶ崎役場)

車載地球局

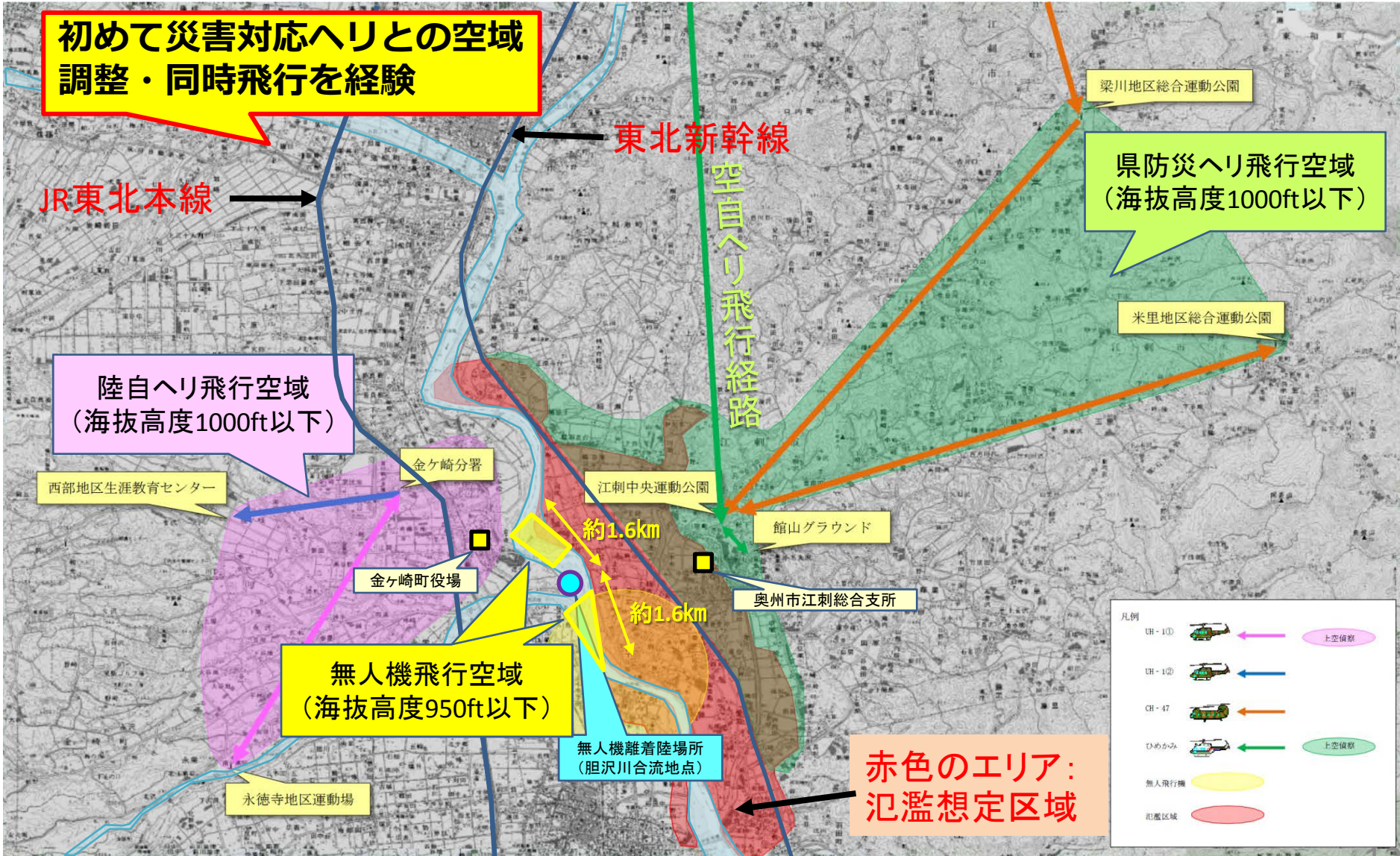
無人機地上局

現場前線基地

北上川氾濫想定地区

平成19年9月18日奥州市桜木橋付近の空中写真
(国土交通省岩手河川国道事務所提供)

防災ヘリ・自衛隊ヘリとの初の空域分割同時飛行



無人機搭載カメラのライブ録画映像

(北上川上空を飛行し、モニタ映像をYouTubeで本部にリアルタイム配信)

The image is a composite of four panels related to a drone operation:

- Top Left:** Drone flight data overlay. It shows coordinates (NAV>D), altitude (+39 10 43.86), speed (34 kts), and other parameters. The background is a live video feed of a river (Kikakuri River) from an aerial perspective.
- Top Right:** A ground station software interface (ATracker) showing a map of the area with a flight path overlaid in yellow and red. It includes a video window and various control buttons.
- Bottom Left:** A ground crew on the field. A large green tent is set up, and several people are visible, some operating equipment. The background shows a grassy field and trees.
- Bottom Right:** A weather monitor window displaying various environmental data:

風速	0.0 m/s	温度	32.7 °C	気圧	1005.7 hPa
湿度	42.9 %	露点温度	18.4 °C	密度高度	774 m
方位 (真北)	034 度	湿球温度	22.7 °C	高度	60 m
方位 (磁北)	043 度	体感温度	32.7 °C	絶対気圧	hPa
直交風速	0.0 m/s	ヒートインデックス	35.3 °C	空気密度	kg/m³
対向風速	0.0 m/s	湿合比		相対湿度	%
方位 (真北)		露合比		WBGD	°C
		露合比		TWL	kg/m³

At the bottom of the composite image, there is a black banner with white text: 岩手県総合防災訓練(20150712)_NICT. Below this banner is a Windows taskbar with various open applications like Google Earth, PumaAE, and a video player.



事例3 ICT林業への活用に向けた基礎実験 (熊本県人吉市2016.11)

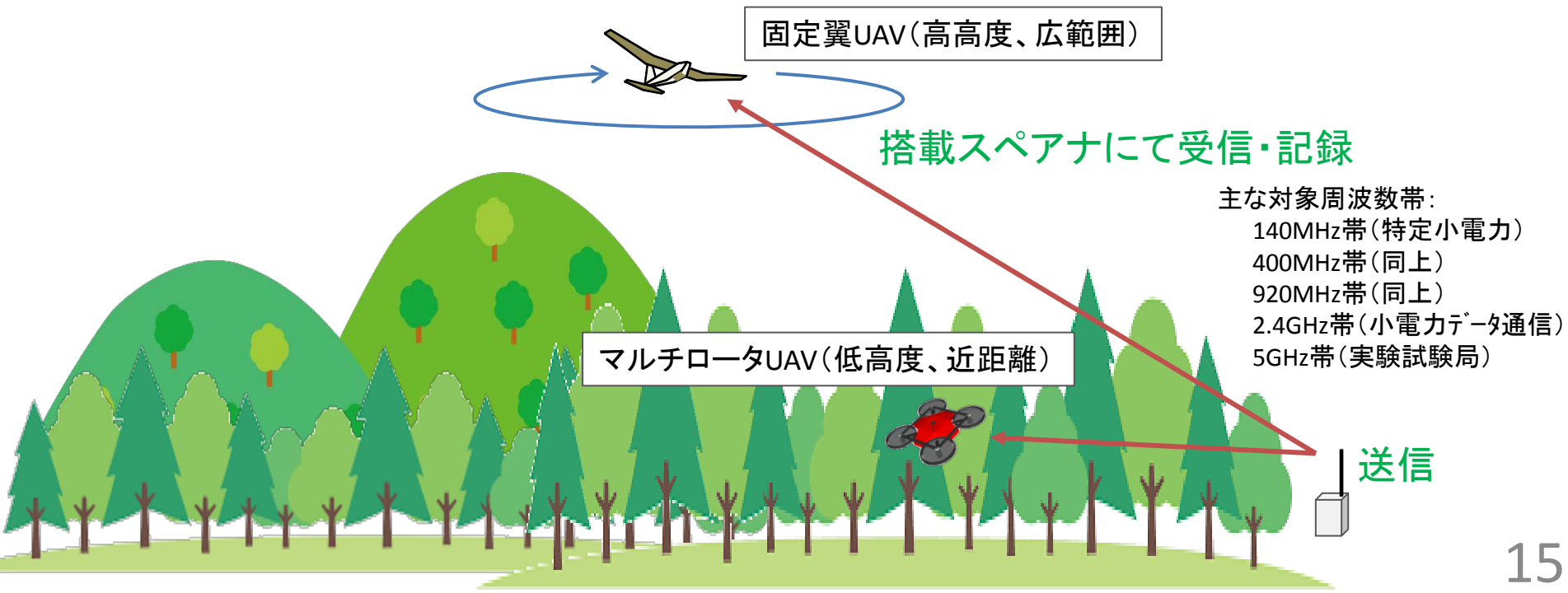
実験の目的

地域の森林資源を活用し、地域の基幹産業として儲かる林業（ICT林業）の実現にむけ、無人機を活用した各種森林情報の収集と数値化・可視化技術の確立を図る。そのための最初の取組みとして、森林環境における基本的な電波伝搬特性データを取得する。

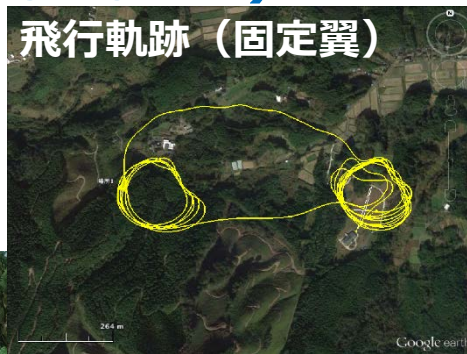
調査項目例： 距離特性、樹木による減衰特性・反射特性、機体姿勢変動の影響、季節特性（繁茂・落葉）、天候特性（乾燥・雨後）

実施主体： 九州G空間情報実践協議会

協力： 熊本県人吉市



森林内および森林上空の飛行による測定風景 (熊本県人吉市2016.11)

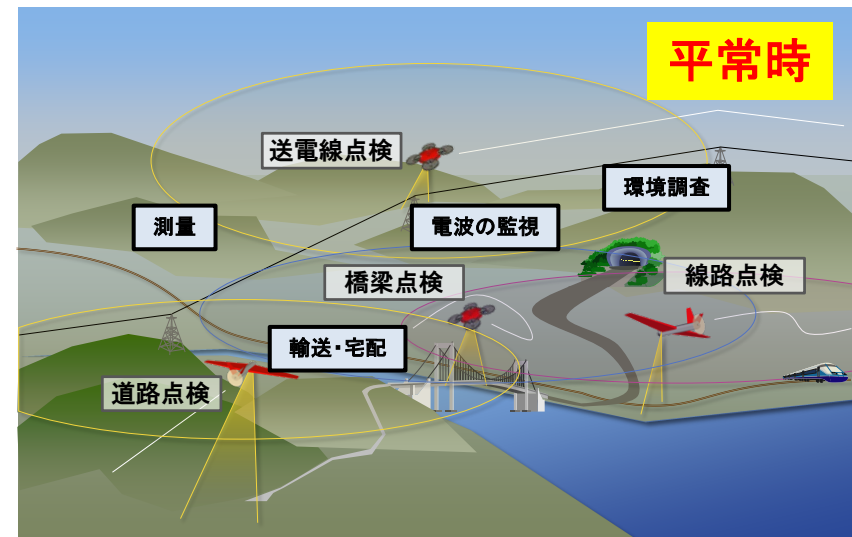
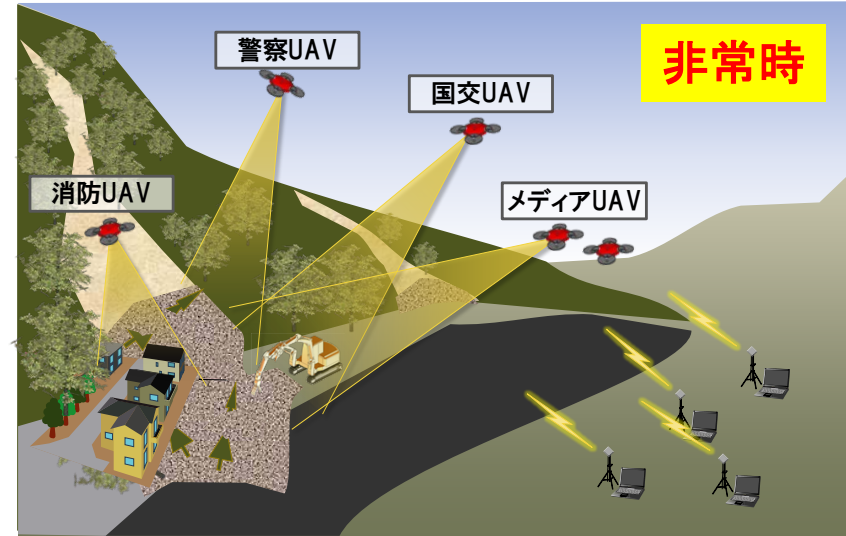


2 ドローンにおける無線の役割と運用体制

無人機の安全運用に向けて

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



電波技術の果たす役割
が期待されます

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)

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)

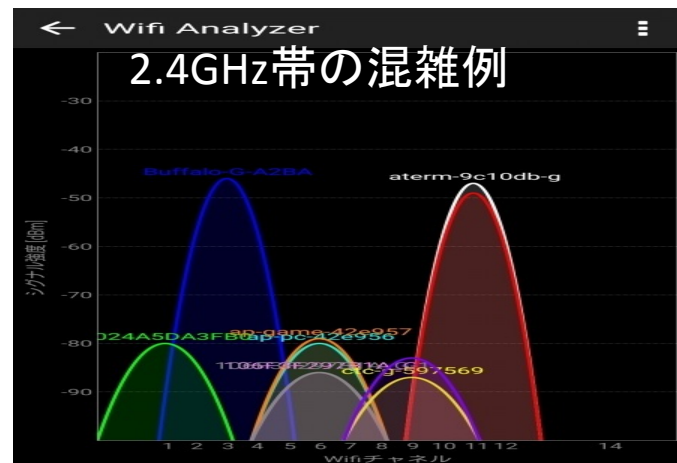
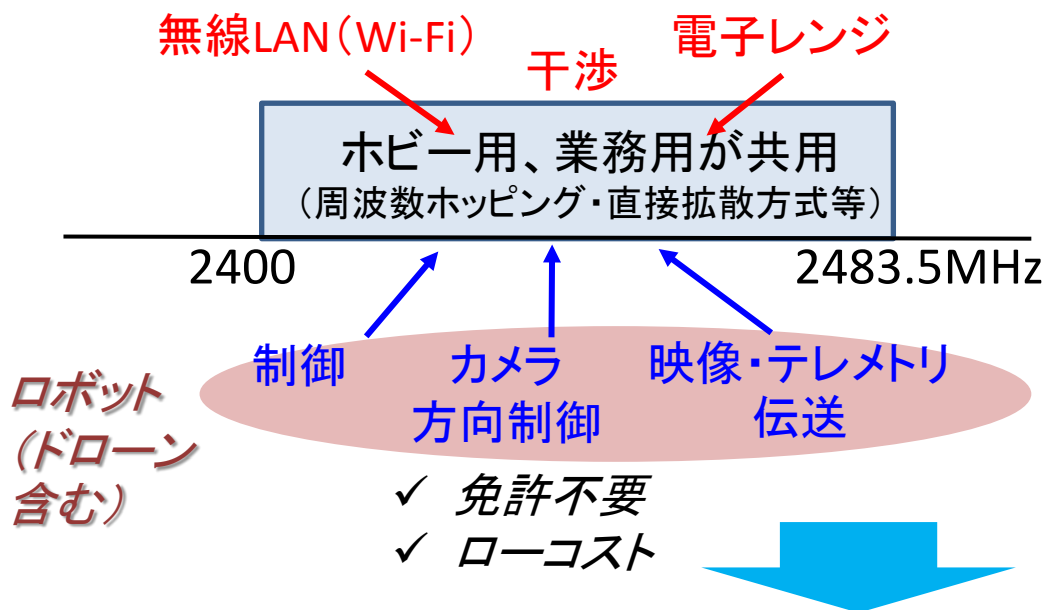
ネットワークを介した電波管理システムの実現(チャンネル、スロット、時間、場所など)

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

ロボット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、73MHz帯の使用も)



Wifi AnalyzerのHPより

- 通常は問題ないが、電波が混雑したときの安全性は担保されず、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)
- 出力が小さく、長距離運用には適さない。通常、制御で1km程度、画像・テレメトリで200~300m程度。(使用するアンテナ方式による)

無線機器使用禁止

Followings Prohibited

ロボット誤作動防止のため、下記無線機器の会場内でのご使用は禁止しております。

携帯ゲーム機／携帯音楽プレーヤー



iPod Phone



Nintendo DS



SONY PSP

その他「無線LAN」を使用する機器など

Bluetooth機器



携帯電話
Cell Phone
ヘッドセット
Headset
PDA

PC無線機材



ワイヤレスキーボード
Wireless Keyboard

ワイヤレスマウス
Wireless Mouse

カメラ



これからの主なロボット用周波数

特にドローンの場合は機体の安全飛行に直結



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)

- 近距離を対象(～1km)
- **免許人同士の運用調整は不要**

従来通り、**ホビーと一部の業務**で利用

920MHz帯(～20mW、約7MHz幅)

免許バンド(共用、無人移動体画像伝送システム、平成28年9月から免許開始)

2.4GHz帯(～1W, 約10MHz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**

主に**画像伝送用**(コマンド・テレメトリにも使用可)

5.7GHz帯(～1W, 約120MHz幅)

169MHz帯(～1W, 約340+190kHz幅)

(上空は10mW)

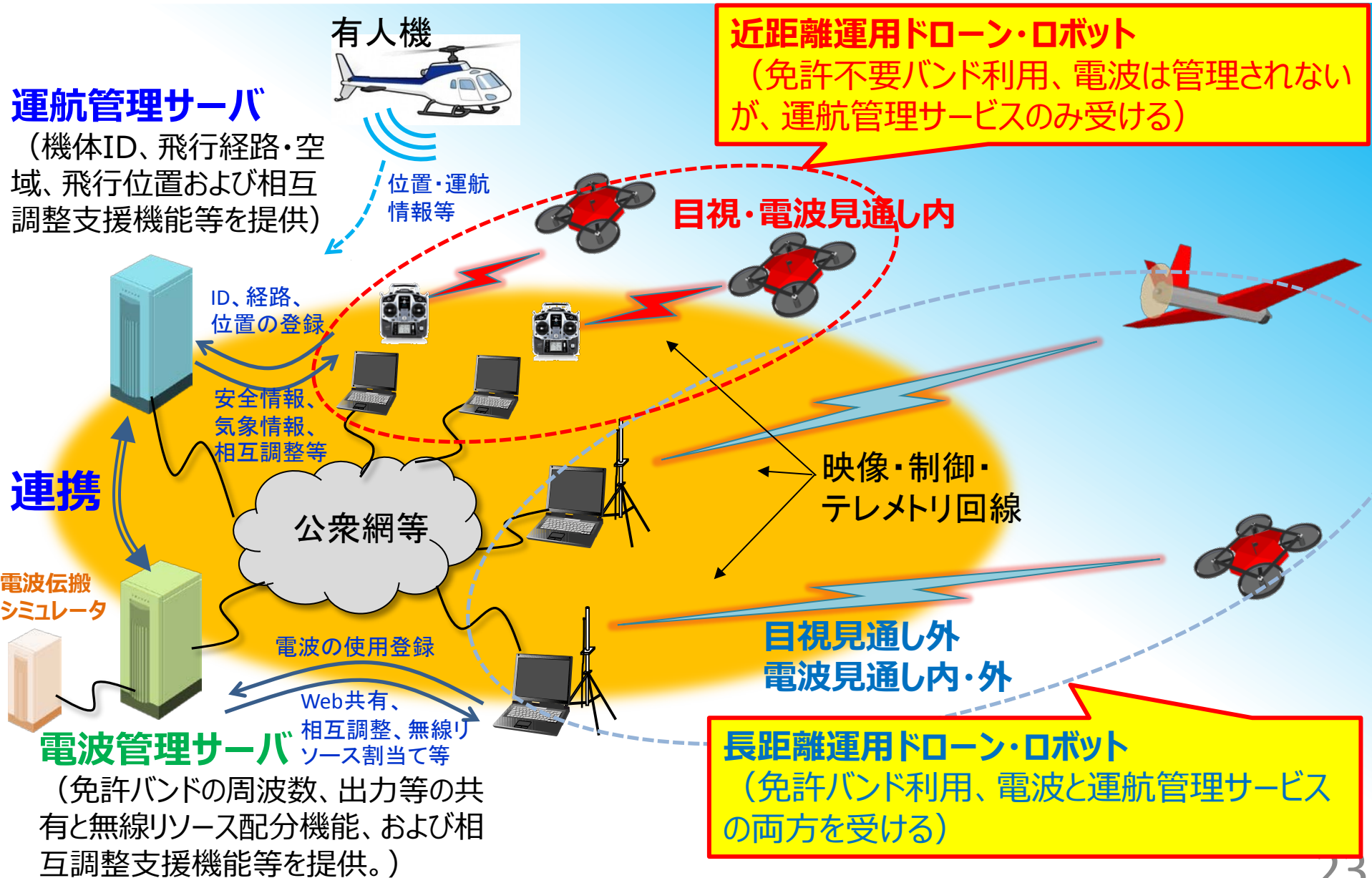
- 長距離まで対象(～5km)
- バックアップ用として適す
- **免許人同士の運用調整が必要**

バックアップ用、**5fps程度の小サイズ画像伝送可能。**

同一地域とその周辺において、異業種にまたがるロボットユーザ間の相互調整及び、同一周波数帯を使用するロボット以外の事業者との調整が必要
(電波の安全運用のため)

ドローンのための運航管理・電波管理システムの構成例

(電波管理システムは地上・海上ロボットも対象)



NASA UTMプロジェクトにおける段階的な推進構想



UTM: UAS Traffic Management

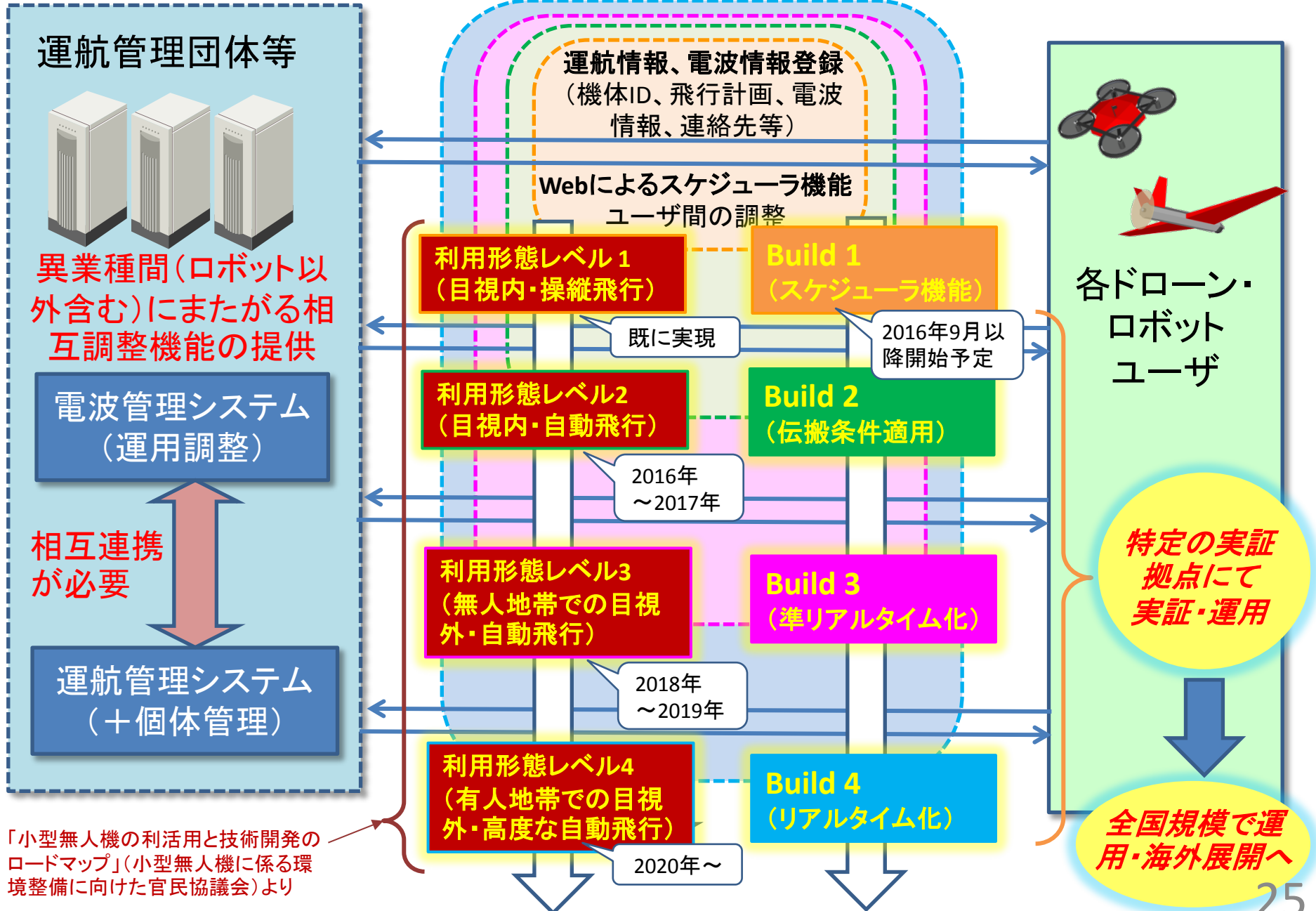
No.	内容	提供サービス
Build 1 (~2015.8)	予約空域 でのUASへの情報提供システム	無人地域 での運航／気象、航空交通情報等の提供
Build 2 (~2016.10)	BVLOS でのUASの動的な運航管理システム	人口低密度地域 での運航／動的な空域情報、混雑予測、相互調整の提供
Build 3 (~2018.1)	BVLOS でのUASの衝突・ニアミス回避システム	人口中密度地域 での運航／インターネット経由での空域モニタリング、有人機・無人機統合衝突管理
Build 4 (~2019.3)	BVLOS での大規模UAS交通管制システム	人口高密度地域 での運航／全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



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

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

電波管理システムの日本における段階的な展開例



日本無人機運航管理コンソーシアム（JUTM）の設立

（平成28年7月11日プレスリリース）



■ 名称及び目的・事業内容

名称	目的・事業内容
一般財団法人 総合研究奨励会 日本無人機運行管理コンソーシアム 【JAPAN UTM Consortium】 (UTM:Unmanned System Traffic & Radio Management System) 略称：JUTM	無人機の安全運行と社会実装推進に必要な技術開発と環境整備の実現 ①安全運行、環境整備に関するシンポジウム ②ロボットテストフィールドとの連携、運行管理システム、衝突回避技術などの研究開発、事業モデルの社会実証 ③国との研究交流会、異業種・産官学間連携、NASA-UTMなどとの交流 ④無人移動体画像伝送システムの運用調整 ⑤その他、上記関連事業

■ 運営委員会メンバー

区分	法人名等
代表	東京大学
幹事	ANAホールディングス株式会社
幹事	株式会社NTTドコモ
幹事	日本郵便株式会社
幹事	富士重工業株式会社
幹事	ヤマトホールディングス株式会社
幹事	株式会社日立製作所
幹事	東京大学
幹事	国立研究開発法人 産業技術総合研究所
幹事	国立研究開発法人 情報通信研究機構
幹事	国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
幹事	国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
オブザーバ	福島県
事務局	株式会社日立製作所

■ ワーキンググループ

WG1: 航空情報共有
(主査: 電子航法研究所)

WG2: 衝突回避・識別・通信
(主査: 産総研)

WG3: 運用調整
(主査: 工学院大)

3 見通し外でのドローン運航のための 無線技術の開発

無瞬断マルチホップ制御通信システム 「タフ・ワイヤレス」
飛しょう体間位置情報共有ネットワーク 「ドローンマッパー」



※ 本研究開発は内閣府の革新的イノベーション研究開発プログラム (IMPACT) の1つである「タフ・ロボティクス・チャレンジ」(PM: 田所諭東北大学教授)において、国立研究開発法人産業技術総合研究所と共同で実施しているものである。

見通し内運用と見通し外運用

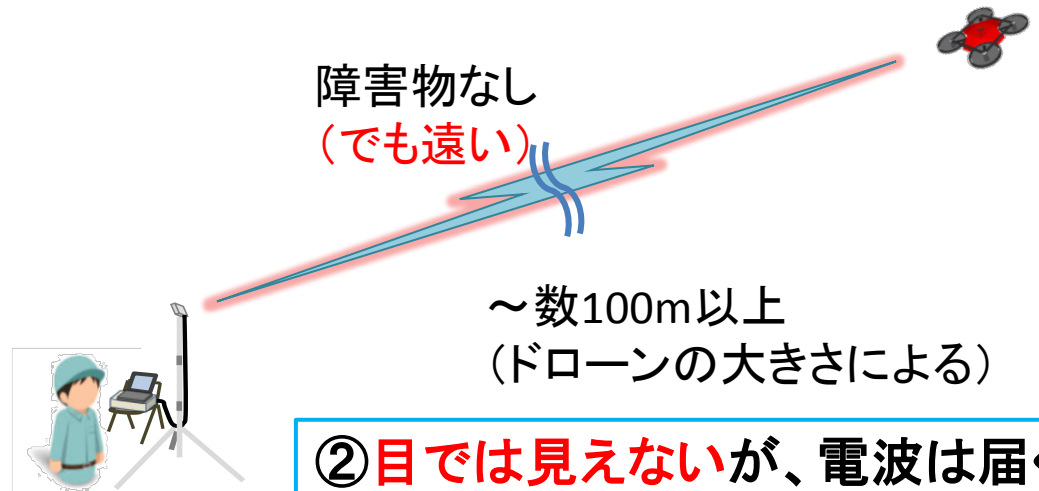
障害物なし



① 目でも見えるし、電波も届く
(VLOS+RLOS)

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

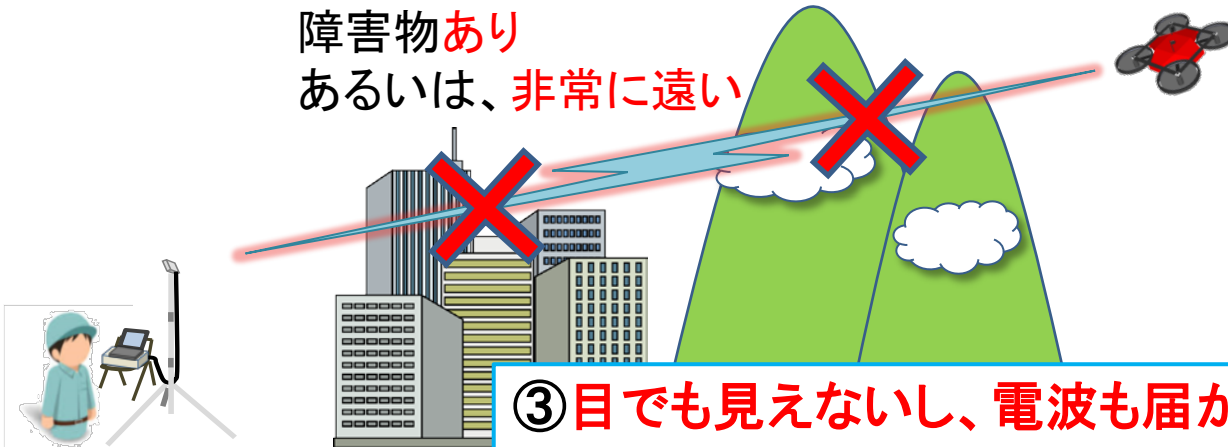
障害物なし
(でも遠い)



② 目では見えないが、電波は届く
BVLOS+RLOS

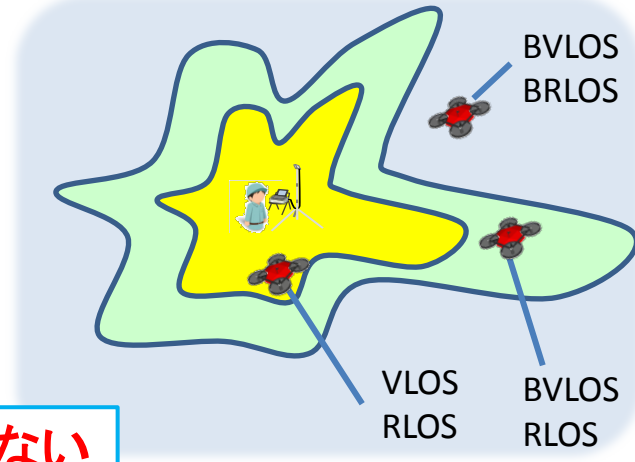
BVLOS=Beyond Visual Line-of-Sight

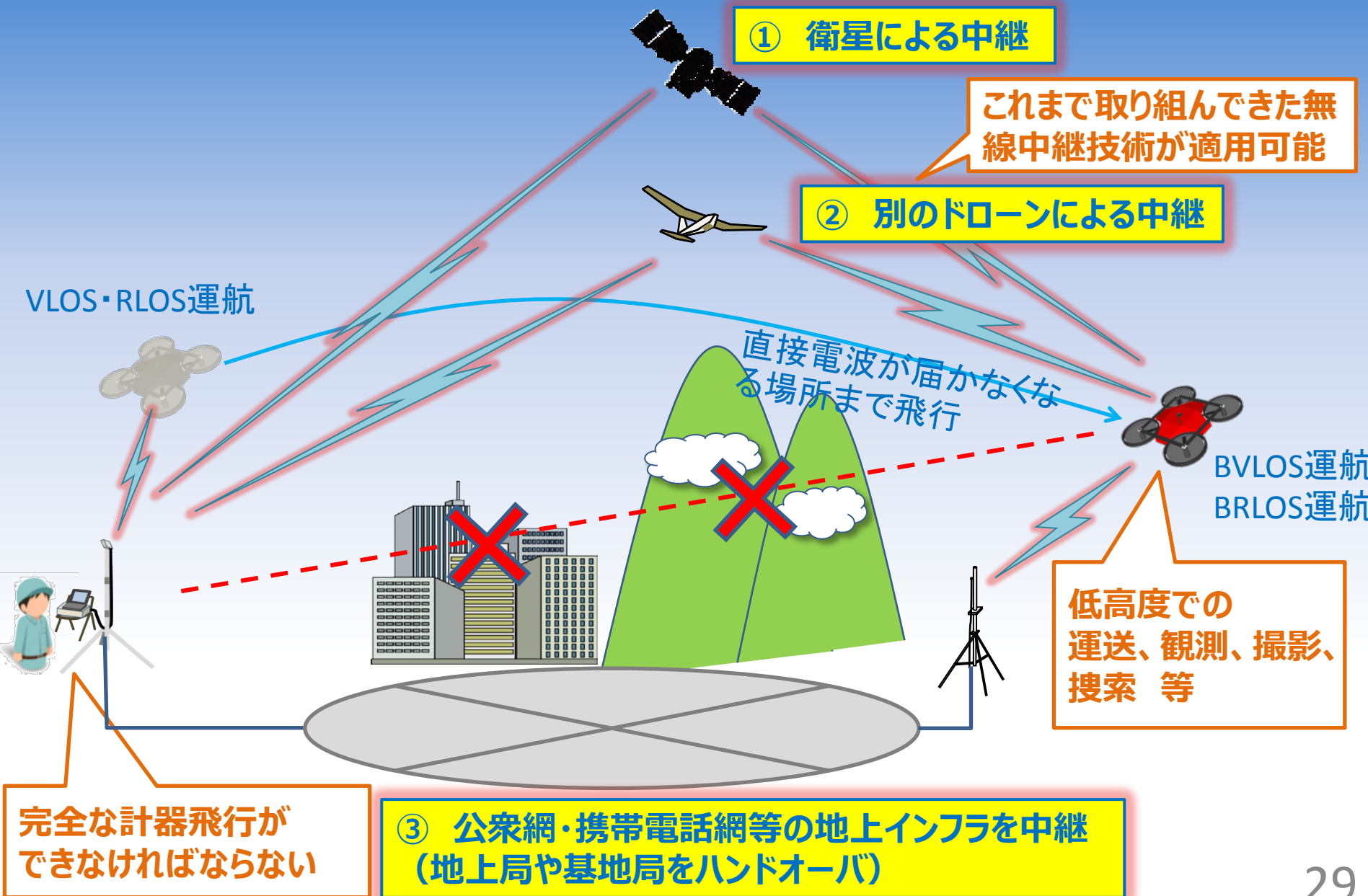
障害物あり
あるいは、非常に遠い



③ 目でも見えないし、電波も届かない
BVLOS+BRLOS

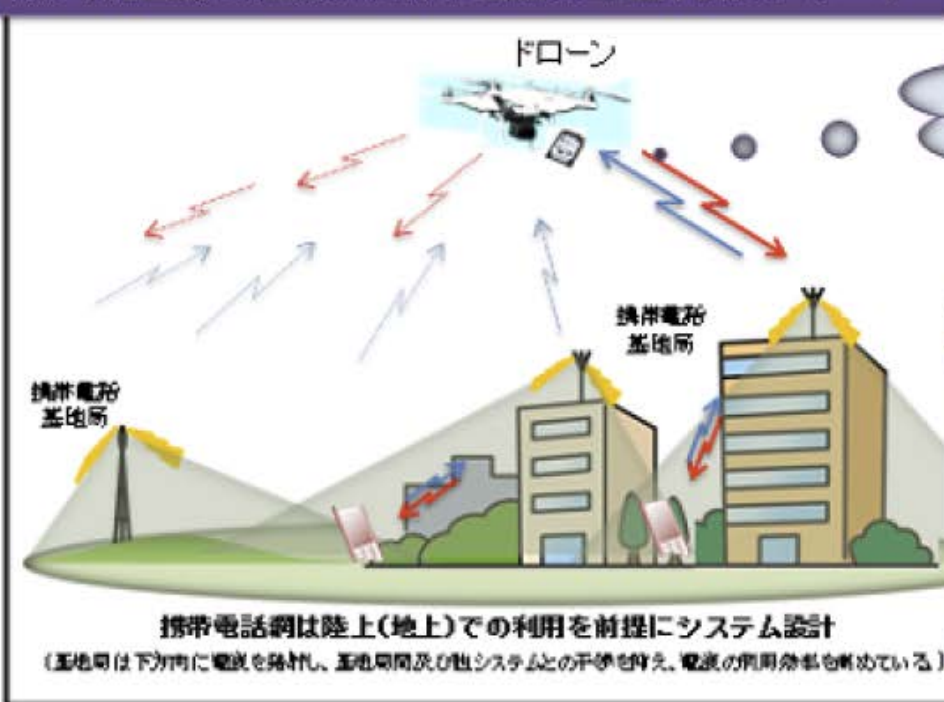
BRLOS=Beyond Radio Line-of-Sight





直接電波見通し外での無線リンク維持の技術 (携帯電話ネットワークインフラの活用)

無人航空機に搭載した携帯電話の上空利用のイメージ



携帯電話の上空利用に対するニーズの高まり

- ・ドローンに携帯電話を搭載して広域で機体の制御や映像伝送をしたい

携帯電話の上空利用に関する検討

- ▶ 携帯電話の上空での利用に関する受信環境調査を実施し、技術上・運用上の課題等を整理。
- ▶ ドローンの通信品質の確保や地上の携帯電話利用への影響などの課題があり、引き続き検証する必要があることから、試験的に携帯電話の上空利用の導入を図る。

※既設の無線局等の運用等に支障を与えない範囲で運用することが条件

総務省 電波利用ホームページより

- **平成28年度7月13日省令改正**： 携帯電話等を無人航空機に搭載して使用することについて、**既設の無線局等の運用等に支障を与えない範囲**で試験的に導入。
- 携帯電話事業者のみが**実用化試験局免許**を取得して試験評価のための運用が可能。
- **電波見通しを越えて**コマンド送信、テレメトリ受信、画像伝送が可能だが、その性能、既存の携帯電話ネットワークへの影響等について、評価が進行中。
- 災害時等には**輻輳により使用不能となるリスク**あり。

無瞬断マルチホップ制御通信

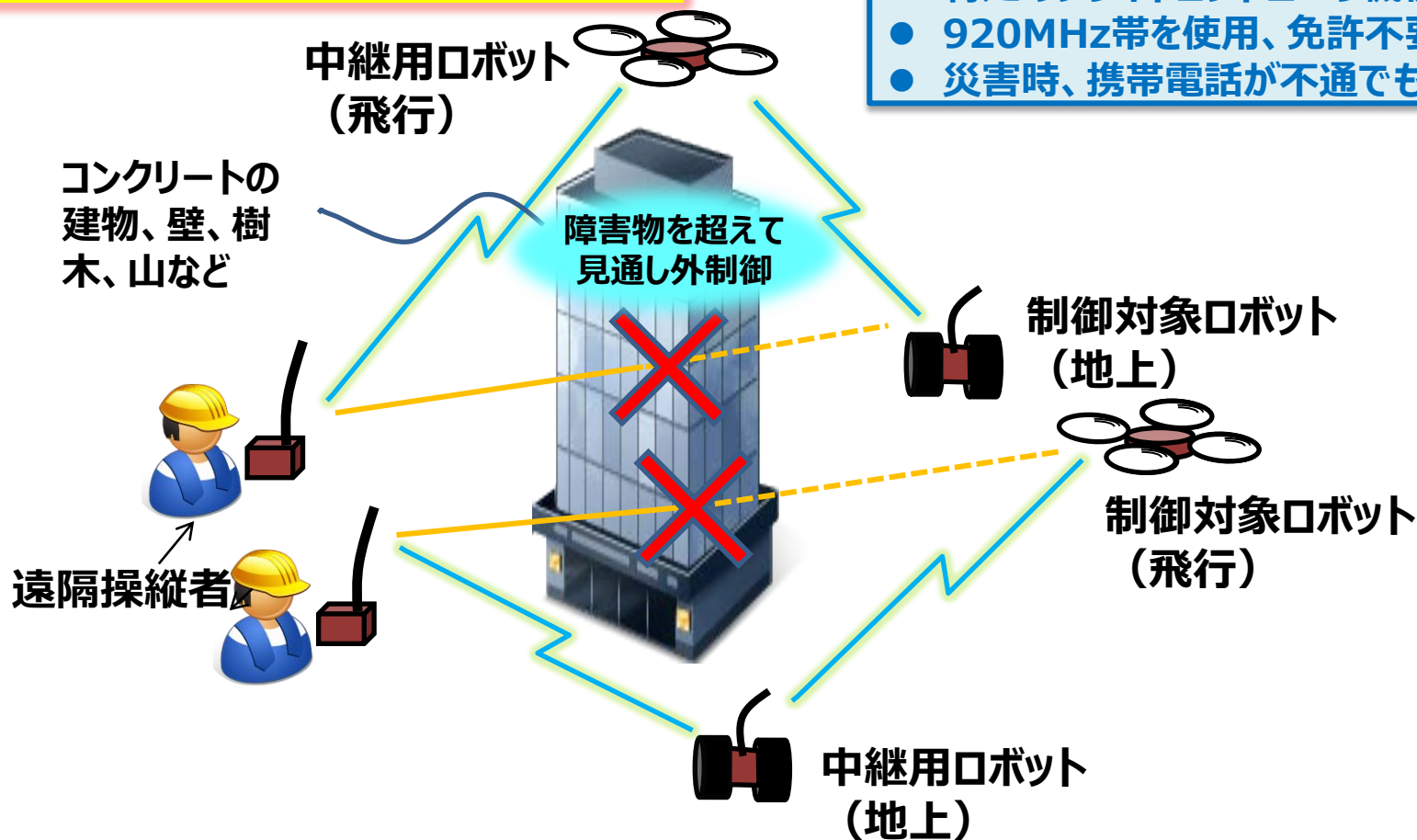
「タフワイヤレス」 (他のロボット・ドローンによる中継)

目的

ロボット同士が協力することにより、見通し外で活動するロボットへの遠隔制御を可能に

特徴

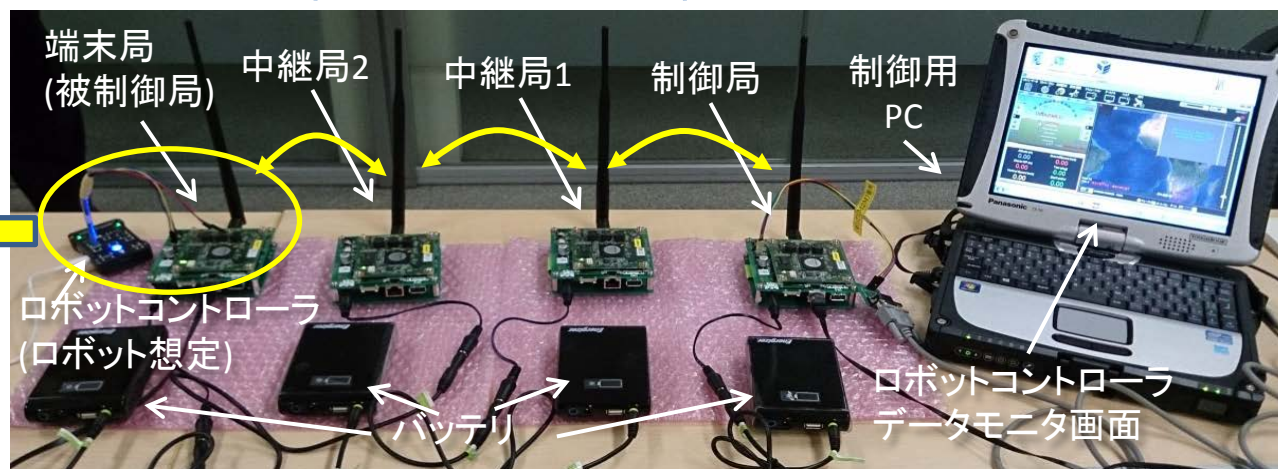
- マルチホップで見通し外のロボットを遠隔制御
- 応答遅延時間を保証 (約50~60ミリ秒)
- 経路間の切換えは、ほぼ無瞬断
- 特定のフライトコントローラ機種に依存しない
- 920MHz帯を使用、免許不要、他と共用可能
- 災害時、携帯電話が不通でも使用可能



タフ・ワイヤレス試作機



制御対象
ロボット



- ✓ エンドツーエンドの遅延時間を一定以内に保証
- ✓ 中継経路は瞬時に自動切換え
- ✓ 920MHz帯特定小電力無線を使用 (中継局間の距離は見通しで約1km程度)

実証実験 (東北大学青葉山キャンパス)

中継局用ドローン

中継用ドローンを経由して
ロボットを制御・監視

20m~30m

操縦者からは直接は通信
が繋がらない環境

小型四輪ロボット
(制御対象)

操縦者側制御局
(制御コマンド送信・
テレメトリ受信)

タフ・ワイヤレスによる 長距離ハンドオーバ飛行の例

想定
シナリオ

災害時（携帯電話回線使用不能）や山間部・離島等における長距離飛行でのドローン・ロボット運航の維持

制御対象ドローン局（見通し外まで飛行）

見通し外制御

TW
モジュール

ウェイポイント飛行
(途中、手動割り込み可能)

~1km

~1km

~1km

離着陸

直接経路は
見通し外

離着陸

TW
モジュール

TW
モジュール

TW
モジュール

制御局
(オートパイロット)

離着陸地点A

中継局1

中継局2

離着陸地点B

フィールド実験

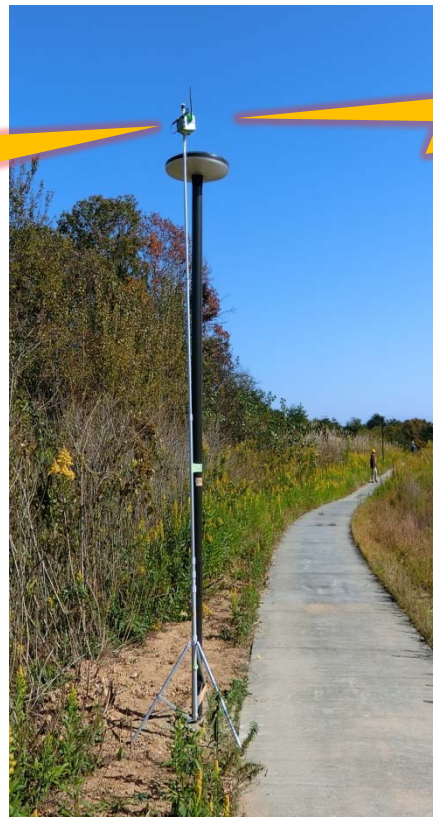
合計 1ホップ° (ダイレクトリンク) ~ 3ホップ° (中継リンク)
を無瞬断切換え

制御局 (地上固定)

中継局 1 (地上固定)

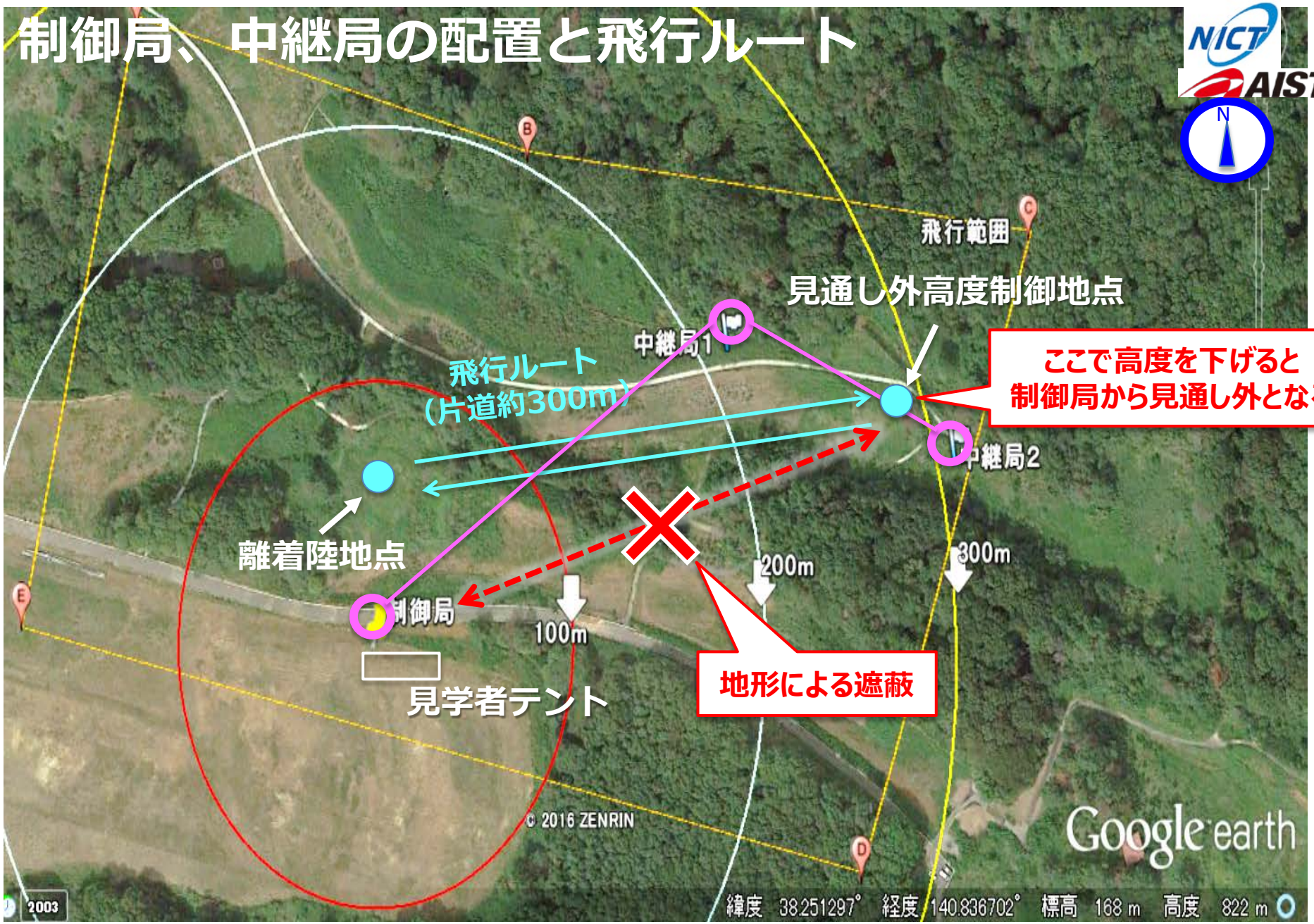
中継局 2 (UGV移動)

端末局 (ドローン搭載)



産総研RCPV

制御局、中継局の配置と飛行ルート



ここで高度を下げると
制御局から見通し外となる

地形による遮蔽

マルチホップによる見通し外ドローン制御実験 (2017年11月@東北大学青葉山キャンパス)

タフワイヤレス経由のマルチホップ
制御により遠ざかっていくドローン
(3ホップで無線中継)



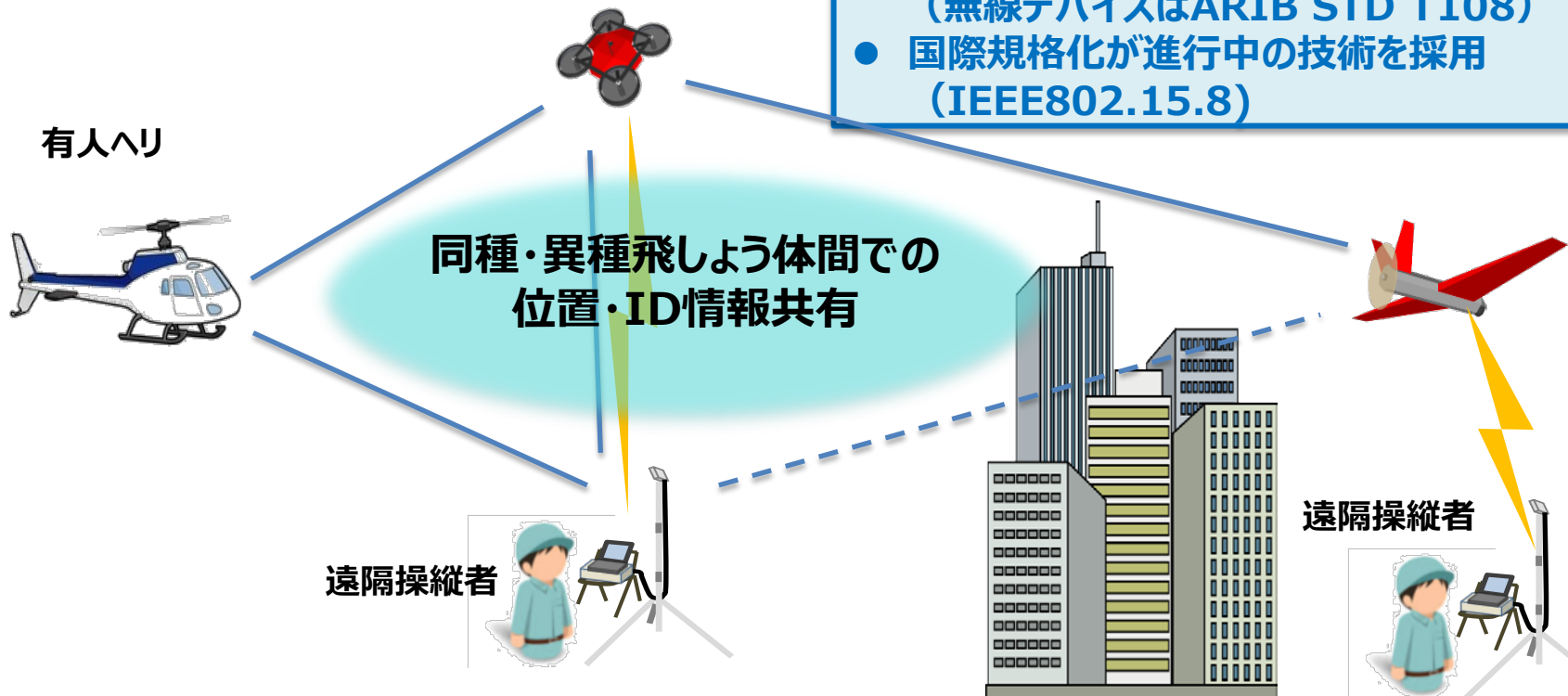
飛しょう体間位置情報共有システム 「ドローンマッパー」

目的

1~2kmの範囲で無人機どうし、あるいは有人ヘリとの間で位置情報を共有し、将来の衝突回避・運行管理に向けた基盤をめざす

特徴

- インフラや基地局が不要な小容量ネットワーク（NICTがベンチャー企業と共同開発した「端末間通信技術」がベース）
- 放送型プロトコルで通信手順を単純化
- 2ホップ先までカバー、見通し外も検知可能
- 920MHz帯使用、免許不要、他と共用可能（無線デバイスはARIB STD T108）
- 国際規格化が進行中の技術を採用（IEEE802.15.8）



フィールド実験とモニタ画面



各局の
ID
緯度・経度
高度
速度
時刻 等

Androidタブレット画面

ドローン位置情報共有表示

自機詳細情報 ID : 2
種別 : Drone
時刻 : 16:49:09 50
距離 : 0.000m
緯度 : 38.251384
経度 : 140.832618
高度 : 148.6m
速度 : 0.185km/h
方位 : 0.0度
加速度(X,Y,Z) : -0.1,-0.2,1.0
角速度(X,Y,Z) : 2.8,0.5,-4.3

周辺機詳細情報 ID : 1
種別 : Station
時刻 : 16:49:09 60
距離 : 35.146m
緯度 : 38.251104
経度 : 140.832430
高度 : 147.7m
速度 : 0.074km/h
方位 : 0.0度
加速度(X,Y,Z) : 0.0,-0.0,1.0
角速度(X,Y,Z) : -0.3,-0.0,-0.3

周辺機詳細情報 ID : 3
種別 : Drone
時刻 : 16:49:08 90
距離 : 85.738m
緯度 : 38.250726
経度 : 140.833132
高度 : 151.9m
速度 : 0.111km/h
方位 : 0.0度
加速度(X,Y,Z) : 0.1,0.1,1.0
角速度(X,Y,Z) : 0.2,-0.1,0.1

近くを飛行する他の
飛ばしう体(ドローン・
有人ヘリ等)の位置

自分(操縦者)
の位置

自分のドローン位置

警告範囲(設定可能)



飛行の様子



モニタ画面

※警告の方法は今後改善を予定

4 おわりに

- **無線技術**は無人機・ドローンの安全運航に不可欠な要素の1つ。
- 既存の電波システムは、将来の見通し外運用を想定した場合、必ずしも無人機の制御に適していない。（信頼性と到達距離）
- 国内で新たに制度化された周波数帯や、ITUやICAOで検討されている国際的な周波数帯をどのように利用していくかが、今後の無人機技術の発展とビジネス展開にとって重要。
- 特に、長距離運用に使われる免許バンドは、**業種のカベを超えた全体的な運用調整のルール**のもとで、**運航管理システムと一体**となった運用が必要。
- NICTは、様々な分野での**ドローン活用の基盤**となる無線技術の高度化と高信頼化の取組みを通じて、**ドローン運用の安全性向上とビジネス拡大**に貢献予定。

ご清聴ありがとうございました。

