

「ローカル 5G 等及び 8K 映像伝送による
自治体各種業務支援に関する調査研究」

報 告 書

〈公開用〉

令和 3 年 3 月

2020 年初めから始まった新型コロナウイルスの感染拡大への対応において、我が国では地域や組織間で横断的なデータ活用が十分にできていない等の課題が明らかになり、改めてデジタル化の遅れが指摘された。このデジタル化への対処と、新しい日常への変革のため、社会全体のデジタル・トランスフォーメーション（DX）の推進が喫緊の課題として話題となっている。

一方、DX 推進の重要基盤の 1 つである無線通信分野では、国内でも 2020 年から第 5 世代移動通信システム（5G）の商用サービスが始まり、2020 年 12 月末時点で契約数 545 万件に達している^{*1}。また、2019 年 12 月の電波法関連法令の制度改正によって、地域や産業の個別ニーズに応じて、自治体や企業等の様々な主体が自らの建物や敷地内で柔軟にスポット的な 5G ネットワークを構築して利用できる「ローカル 5G」が制度化され、既に周波数の割り当ても行われている。また総務省は 2020 年度から「地域課題解決型のローカル 5G 等の実現に向けた開発実証」を開始し、国内各地で様々なユースケースについての実証が行われている^{*2}。

本調査研究では、自治体における DX 推進に資するため、自治体各種業務支援における 8K 等の超高精細映像利用を軸としたローカル 5G 活用の有効性について調査を行った。今回の調査の場として選定した奈良県は、奈良盆地を中心とした都市的地域から、紀伊山地の中山間地域まで、特性の異なる様々な地域から成り立っている。また歴史的・景観的な観光地として観光業も発達しているという特徴がある。調査研究の結果、同県内の各市町村の自治体業務には、それぞれの地域の特色に合わせた様々な業務と課題があることがわかった。例えば、山間部の土砂災害及び道路や構造物保全のための点検・監視の効率化、観光 PR 素材映像の高精細化や観光客の動線把握などがその例である。これらは奈良県内各自治体の具体的な課題ではあるが、全国各地域に共通するものと考えられる。本調査研究では、これらの課題に対して、8K 等超高精細映像とローカル 5G 伝送を組み合わせることにより、その解決手法を提示した。その結果は、国内の多くの自治体における DX 推進に寄与できるものと考えている。

今後、本調査研究の成果をベースとしてローカル 5G 及び超高精細映像の活用がさらに進むことにより、様々な自治体業務の効率化・高度化が実現されることを期待している。

調査研究会 座長 同志社大学教授 岩井誠人

^{*1} https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban04_02000184.html

^{*2} https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01ryutsu06_02000280.html

目次

I はじめに.....	4
II 調査研究の概要.....	8
III 調査研究内容.....	11
第1章 自治体各種業務の現状と課題、ローカル5G等による課題解決の有効性の調査.....	11
1.1 自治体各種業務の現状と課題.....	11
1.2 ローカル5G等による課題解決の有効性.....	23
第2章 ローカル5G、8K映像伝送利用に関する現状と課題の調査.....	28
2.1 実証実験の実施.....	28
2.2 自治体によるローカル5Gの電波利用上の課題.....	117
2.3 ローカル5G等による8K映像伝送の活用の課題等の調査.....	136
2.4 今後の自治体業務へのローカル5Gの普及に向けて.....	140
IV おわりに.....	145

I はじめに

ローカル 5G 等及び 8K 映像伝送による自治体各種業務支援に関する調査研究を行うに当たって、はじめにローカル 5G と 8K の概要について説明する。

(1) ローカル 5G について

第 5 世代移動通信システム(5G システム)は、国際電気通信連合 無線通信部門(ITU-R)が発行した IMT-2020[1]に対して、国際標準化団体 3GPP(Third Generation Partnership Project)によって New Radio(NR)として仕様策定が行われ[2]、我が国においても、2020 年 3 月に全国キャリアによる商用サービスが開始された[3]。5G システムには、移動通信携帯電話サービスに加えて、自動車分野、産業機器分野等の Vertical セクタと呼ばれる異業種・異分野への展開・活用が期待されるとともに、その実装を通して、地域が抱える様々な社会課題を解決する切り札としても大いに期待されているところである。しかし、様々な産業分野への展開を考えた場合、地域や産業の個別のニーズは非常に多岐に渡るため、全国キャリアが各ニーズに対応することは困難である。

そこで、我が国においては、通信事業者以外の様々な主体(地域の企業や自治体等)が自ら 5G システムを構築可能とする「ローカル 5G」の導入が情報通信審議会新世代モバイル通信システム委員会において議論され、2019 年 12 月に 28.2-28.3GHz の帯域幅 100MHz を対象に制度化されるとともに、ローカル 5G の概要、免許の申請手続、事業者等との連携に対する考え方の明確化を図るため、ローカル 5G 導入ガイドラインが策定・公表された。また、2020 年 12 月には 4.6-4.9GHz 及び 28.3-29.1GHz が新たな使用周波数帯として制度化された[4]。

ローカル 5G の基本コンセプトとしては、①5G を利用していること、②地域においてローカルニーズに基づく比較的小規模な通信環境を構築するものであること及び③無線局免許を自ら取得することも免許取得した他者のシステムを利用することも可能であることの 3 項目が示されている。このうち、③が基本コンセプトに位置付けられた理由としては、ローカル 5G は基本的には自営目的での利用を想定しているが、無線技術やネットワーク技術等について専門的な知識のない利用者や地域の企業等にこそ、多くの潜在的なニーズがあることが想定され、それらのニーズにローカル 5G がきめ細やかに応えていく必要があることが挙げられる。ローカル 5G の円滑な普及には、地域の通信事業者等が、その地域特有の様々なニーズを汲み取りながら、個別のニーズに応えるためのネットワークを構築し、電気通信役務として提供することの方が有効な場合もあると考えられたからである。

地域の企業をはじめとする様々な主体によるローカル 5G 等を活用した地域課題の解決を実現するため、ローカル 5G 基地局の多種多様な設置場所・利用環境下を想定したユースケースにおけるローカル 5G の電波伝搬等に関する技術的検討を実施するとともに、ローカル 5G 等を活用した地域課題解決モデルを構築するための開発実証

も 2020 年 10 月より行われており、各地域の産学官が連携した推進フォーラムが立ち上げられ、干渉調整等の技術的な検証に限定されず、ローカル 5G をコアとしたビジネスモデルの構築(垂直・垂直展開の展望)に関する議論も盛んに行なわれている。ローカル 5G は、全国キャリアによる広域 5G システムではカバーしきれない地域ニーズをサポートする通信サービスとして、さらなる発展が期待される。

(2) 8K 映像について

我々が日常的に扱う映像の解像度は高解像度化が進んでおり、最近では超高精細映像(8K 映像)の実用化に向けた取組が盛んに行なわれており、日本国内においては 2018 年 12 月の 4K/8K 映像による実用放送が開始された[5]。現在広く普及しているフルハイビジョン(2K)映像の解像度が 1920×1080 ピクセルであるのに対して、8K 映像の解像度は 7680×4320 ピクセルとなる。8K 映像の伝送に要求されるデータレートは大幅に増加し、フレームレート 120 Hz のフルスペックの 8K を無圧縮で伝送するためにはおよそ 144 Gbps(bit per second)ものデータレートが要求される。そのため、限られた周波数帯域の中で 8K 映像を伝送するために、H. 265 (HEVC) [6]や Versatile Video Coding (VVC) [7, 8]等の高効率な映像符号化技術が必要となる。圧縮率の高い符号化では、要求されるデータレートを数十 Mbps から 120 Mbps 程度にまで圧縮可能であるが、符号化処理および復号処理に掛かる遅延時間が発生する。遅延時間を低減するためには、圧縮率を低くする方法が考えられるが、所要データレートは増加することを示唆している。そのため、8K 映像を柔軟に活用する上で、大容量の無線通信技術が望まれている。

5G システムでは、図 I-1 が示すように、超広帯域(enhanced Mobile Broadband)、超多端末同時接続(massive Machine Type Communication)及び高信頼低遅延(Ultra Reliable and Low Latency Communication)の 3つの要求条件が想定されているが、大容量の無線通信技術を必要とする 8K 映像にとっては、特に超広帯域伝送に掛かる期待は大きく、これはローカル 5G にも期待されるところである。

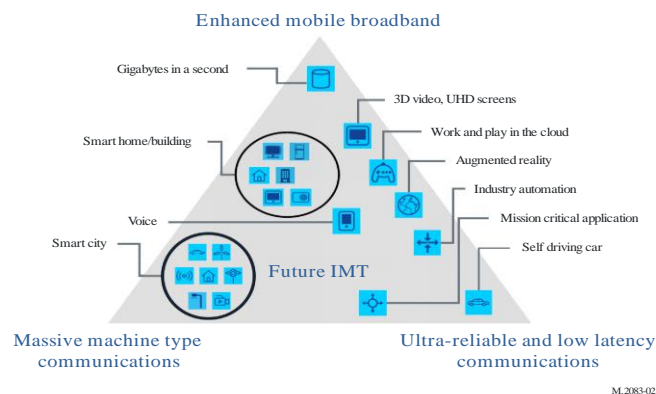


図 I-1 ITU-R における 5G のシナリオ

8K 映像は、今まで映像が主に活用されてきた放送分野のみならず、様々な分野・領域に普及・活用されていくことが期待される。図 I-2 には 8K 映像の活用が期待される領域をいくつか抜粋して示している。例えば、セキュリティ領域においては、監視カメラに 8K 映像を活用することで、広範囲にわたる密集状況で人を識別し、どんな小さな動きも検知し、事故や犯罪の防止に寄与できる。医療領域においては、8K 映像を活用することで、遠隔地における診察、並びに手術の効率化に寄与できる。検査システム領域においては、これまでの画質では見つけられなかった細かな傷も 8K 映像の高解像度を活用することで検出可能とし、品質保証に寄与できる。インフラ保守領域においては、8K 映像により、建造物・インフラ(橋、道路、線路など)の僅かな歪みやズレも計測可能とし、安全性の向上への寄与が期待される。また、これまでも活用されてきた放送・映像視聴領域においても、8K 映像は、超高臨場感で現地の雰囲気まで伝わるような新しい映像体験を提供することができる。

8K 映像の純粋な所要データレートは 100 Gbps を超える極めて膨大な値となり、映像符号化技術による圧縮後でも、100 Mbps 程度のデータレートが一般的には要求される。例えば、我が国の 8K 衛星放送においては、H. 265 による映像符号化により平均 85Mbps のデータレートが主に使われている。このことは、無線通信区間だけに限らず、End-to-End で高いデータレートをサポートできる通信システムが要求されることを意味しており、ローカル 5G への要求は当然として、ローカル 5G と事業者ネットワークやインターネットとの間の接続網にも安定して高いデータレートのサポートが要求される。

しかし、必ずしも 8K 映像の活用領域の全てにおいて高いデータレートが要求されるわけではない。例えば、低フレームレートでも十分な点検・保守業務であれば、20Mbps 程度の低いデータレートでも 8K 解像度を生かしたソリューション提供も可能である。想定するサービス・アプリケーションと構築可能な通信インフラ内容に応じて、適切なデータレートの選択が重要と考えられる。



図 I-2 8K 映像活用領域

参考文献

- [1] ITU-R Recommendation, “IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond,” Sept. 2015
- [2] 3GPP TR38.912, “Study on new radio access technology.”
- [3] 総務省, 令和2年版 情報通信白書, 2020年7月.
- [4] 総務省近畿総合通信局報道資料 “本日、ローカル5Gの新しい周波数での免許申請受付を開始ーローカル5Gの周波数帯域を大幅拡大ー”, https://www.soumu.go.jp/soutsu/kinki/01sotsu07_01001736.html
- [5] 総務省, 令和元年版 情報通信白書, 2019年7月
- [6] ITU-T Recommendation, “H.265 High efficiency video coding,” , Nov. 2016.
- [7] 猪飼, “HEVCを超える映像符号化技術,” ITU ジャーナル, Vol. 47, No. 6, pp. 27-30, June 2017.
- [8] JVET, “Working Draft 1 of Versatile Video Coding,” JVET-J1001-v2 (Apr. 2018)

II 調査研究の概要

(1) 背景と目的

近年、我が国の自治体においては、人手不足や財政悪化という困難な状況にも関わらず、災害対応やインフラ保守、測量等を始めとして自治体が対応すべき業務が増加・複雑化してきており、これらへの対応が喫緊の課題となっている。

総務省では、地域のニーズや多様な産業分野の個別ニーズに応じて、様々な主体が柔軟に構築し利用可能な 5G システム（ローカル 5G）等の導入に向けた取組を推進している。ローカル 5G では、都道府県庁や市町村役場等の自治体が免許人となり、自ら又は外部委託によってシステムの構築、運用が可能となる。

5G 及びローカル 5G の特長の 1 つに 8K 超高精細映像等の大容量情報の伝送が可能なが、8K 超高精細映像技術は、その超高精細性並びに超広視野性から、医療、交通、建築/土木、農業、教育、セキュリティ等の様々な分野での利用が始まりつつあり、自治体の関連する各種業務においてもその利用が期待される。

したがって、ローカル 5G 及び携帯事業者による 5G サービス（以下、「ローカル 5G 等」という。）並びに 8K 映像の自治体利用により、これら自治体各種業務の効率化・高度化を図り、様々な課題へ対応していくことが期待できる。

以上のような背景から、ローカル 5G 等及び 8K 映像伝送による自治体各種業務支援に対し、その有効性及び運用上の課題等について、自治体関係者やローカル 5G 等・8K 映像伝送技術関連事業者・メーカー等も参画の上、調査研究を行い、もって、今後の総務省における施策に反映することを目的とする。

(2) 調査研究会

本調査研究を効率的にかつ具体的な自治体業務の現状を把握しつつ行うとともに、最終的に自治体へのシステム導入の標準的な手順、具体的な運用方法、運用上の留意点等について整理し、取りまとめ、自治体への普及促進策などについても提案できるよう、奈良県を具体的な課題検証の場として選定した。

ローカル 5G 等及び 8K 映像伝送による自治体各種業務支援について、その有効性、経済性及び運用上の課題等についての議論・検討のため、5G を始めとする無線技術や 8K 映像伝送技術を専門とする学識経験者を座長・副座長に迎え、奈良県内の自治体関係者、5G 無線機器及び 8K 関連装置を製造販売する事業者、ローカル 5G システムを構成するために必要となる通信サービスを提供する通信事業者、ドローンによるインフラ保守・点検サービス等を提供する事業者及び奈良県庁等の自治体からインフラ測量・設計を受託する事業者が参画する調査研究会を設置し、全 5 回の会合を開催して議論を行った。

表 II-1 調査研究会スケジュール

	日時・開催地	主な議事内容
第1回	2020年11月6日 天理市	<ul style="list-style-type: none"> 調査研究実施計画説明 総務省におけるローカル 5G に関する取組紹介 シャープにおける 8K+5G エコシステムに関する取組紹介 NTT 西日本におけるローカル 5G に関する取組紹介
第2回	2020年12月23日 天川村 +オンライン会議	<ul style="list-style-type: none"> ミラテクドローンにおける取組紹介 天川村における取組と課題 災害現場撮影実験報告
第3回	2021年1月19日 オンライン会議 (ホスト：王寺町)	<ul style="list-style-type: none"> 王寺町における取組と課題 インフラ点検撮影実験報告 自治体による ローカル 5G の利用に関する調査報告
第4回	2021年2月10日 オンライン会議	<ul style="list-style-type: none"> ローカル 5G 等による自治体業務課題解決の有効性検討 ローカル 5G による 8K 映像伝送実験報告 公共測量撮影実験報告
第5回	2021年3月4日 シャープ天理事業所 +オンライン会議	<ul style="list-style-type: none"> 天理市における取組と課題 道路スクリーニング撮影実験報告 ソーラーパネル点検撮影実験報告 最終報告案確認



第1回（天理市）



第2回（天川村）



第3回（王寺町）



第5回（シャープ天理事業所）

図 II-1 会合の様様1（第4回は完全オンライン開催）



近畿総合通信局
高野局長挨拶



天理市
並河市長挨拶



天川村
車谷村長挨拶



王寺町
平井町長挨拶



奈良県 鎌仲次長挨拶



シャープ
種谷常務挨拶

図 II-2 会合の様様2

III 調査研究内容

第1章 自治体各種業務の現状と課題、ローカル 5G 等による課題解決の有効性の調査

1.1 自治体各種業務の現状と課題

1.1.1 調査手法

本項の調査に際し、本調査研究会に委員として参画している奈良県天理市、王寺町、天川村の3自治体に対してローカル 5G 等及び 8K 映像伝送の活用が想定される自治体の各種業務の現状と課題のヒアリングを実施した。

表 1.1-1 調査自治体の概要（参考）

	天理市	王寺町	天川村
人口（世帯数）	64,422(29,829)	23,778(10,564)	1,157(659)
地域の区分	市街地、ダム、高速道路	市街地	ルーラル、観光地(温泉街)
地域の特徴	東西に西名阪自動車道と名阪国道、南北軸の国道24号線や国道169号線の通じる交通の要地。東部には、天理ダム、白川ダムを擁する。市内には文化財や史跡が点在。農地面積率が高い。	王寺駅周辺の市街地と南西部の山地を擁する。新興住宅地が多く、ベッドタウンとして発達（3割近くが大阪へ通勤）。海拔が低く、水害による甚大な被害を経験。	世界遺産「紀伊山地の霊場と参詣道」の主要構成要素である修験の山脈が聳える（近畿最高峰）。「天川村をきれいにする条例」
市町村の課題	防災、インフラ点検、観光、農業、環境	防災、観光	インフラ点検、防災、観光、住民の高齢化
課題の詳細	①インフラ点検 ・インフラ点検業務の効率化 ②防災 ・危険個所の現状把握 ・住民への情報伝達手段の確保 ③観光 ・PR強化による誘客促進 ・市内周遊ルートの整備 ④農業 ・就農人口減少対策 ・病虫害、鳥獣害の状況把握 ⑤環境 ・産業廃棄物の不法投棄対策	①インフラ点検 ・インフラ点検業務の効率化 ②防災 ・危険個所における現状把握 ・減災活動の効率化 ③観光 ・観光資源の活用 ・観光プロモーションの強化	①インフラ点検 ・インフラ点検業務の効率化 ②防災 ・危険個所における現状把握 ・減災活動の効率化 ③観光 混雑期の道路渋滞対応 ④住民の高齢化 ・買い物弱者に対する支援

※人口、世帯数は「奈良県の推計人口調査（月報）令和2年12月1日現在」より

1.1.2 調査結果

以下に上記3自治体における自治体業務の課題について現状と課題を述べる。

(1) 天理市

以下に天理市における自治体業務の課題について現状と課題を述べる。

① 防災

天理市には一級河川の大和川が流れており、その水源を活用した農地面積も大きい。そのため、台風等による水害により河川の氾濫、土砂災害等の発生、樹木・建物・ビニールハウスの倒壊及び森林の風倒被害が想定される。それらの課題として、平常時においては市内の危険箇所の現状把握や市民への情報伝達手段の確立、市内に点在する国宝・重要文化財等に対する被災対策が挙げられる。発災時においては、市内の状況把握や住民の安否確認、避難活動の支援等が課題となっている。



図 1.1-1 天理市における防災の現状と課題

② インフラ設備の点検

天理市は、東西に西名阪自動車道と名阪国道、南北軸の国道 24 号線や国道 169 号線の通じる交通の要地であり、東部には天理ダムや白川ダムを要している。そのため、地震等の災害による道路や鉄道への甚大な被害が想定される。そこで、長寿命化計画に基づく橋梁の改修・耐震化や市道の舗装修繕等の整備や、点検業務における稼働効率化が求められる。



図 1.1-2 天理市におけるインフラ設備点検の現状と課題

③ 観光

市内には文化財や史跡が点在しているため、デジタル媒体を活用した情報発信により観光客を誘客することで豊富な観光資源を活用することができる。また、ハイシーズンの問合せ対応や渋滞情報の把握・渋滞緩和等の観光分野における業務効率化も課題である。

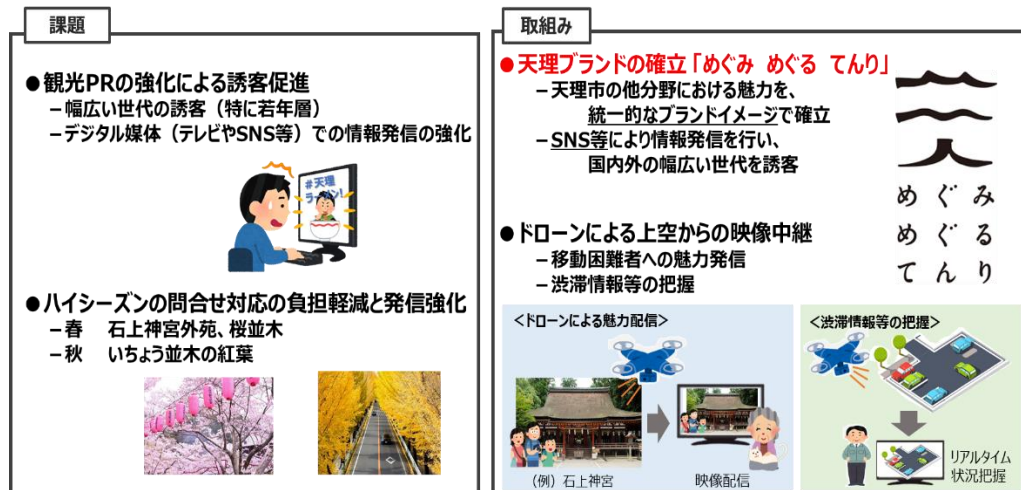


図 1.1-3 天理市における観光の現状と課題

④ 農業

就業人口の減少や、高齢化に伴う次世代への経営継承・ノウハウの継承など、農業を魅力的な働き場所として市内の農地の維持管理につとめることが課題である。



図 1.1-4 天理市における農業の現状と課題

⑤ 環境

特に市内東部山間地域における産業廃棄物の不法投棄対策や建設残土などの投棄や、積み上げによる土砂災害への対策が課題となっている。



図 1.1-5 天理市における環境の現状と課題

(2) 王寺町

以下に王寺町における自治体業務の課題について現状と課題を述べる。

① 防災

王寺町は天理市同様大和川流域であり、内水をはじめとした自然災害への対策が課題である。過去に台風や集中豪雨による浸水被害だけでなく、ため池の決壊や地すべり等の被害も発生しており、危険箇所の現状把握や被災時の各種情報収集等の業務における職員の安全担保や業務効率化が求められている。



被害
<p>防災 大和川流域にあるため、自然災害（特に内水）の対策が課題である。</p> <p>●水害 大和川による水害が頻発し、台風や集中豪雨による床上・床下浸水・田畑冠水等の被害が出ている。 1982年「57年水害」：家屋全壊66戸、半壊174戸、床上浸水1,445戸、床下浸水272戸 浸水想定区域：王寺3丁目、久度5丁目から王寺1,2丁目、久度1～4丁目、舟戸1,2丁目、葛下1～3丁目、本町1,2丁目、元町2丁目、藤井1,2丁目</p> <p>ため池の破損・決壊も想定され、住民の避難誘導やため池の応急工事等の対策も必要。 主なため池：本町6か所、舟戸2か所、葛下1か所、太子1か所、畠田5か所、藤井1か所</p> <p>道路、橋梁等のインフラの被害点検や補修も必要な場合がある。 大和川の重要水防箇所にて定められた橋梁：8か所</p> <p>●土砂災害 自然災害によって生じる地すべりにより、大和川の閉塞及び決壊による浸水等の水害発生、奈良・大阪を結ぶ交通網への影響が発生する。 土砂災害警戒区域：急傾斜地24か所、土石流10か所、地すべり2か所 砂防三法関係指定区域：地すべり防止区域1か所、急傾斜地崩壊危険区域2か所</p>   <p>「57年水害」被災時の写真</p>

図 1.1-6 王寺町における想定被害

災害における課題




<p>平常時</p> <ul style="list-style-type: none"> ●危険箇所における現状の把握 (道路、市街地、下水道など) <p>現在、防災情報システムの活用を進めているが、被災時の情報収集に人手を要しており、効率面・安全面の課題がある。 →情報収集の省力化と防災情報システムとのデータ連携による職員のコスト削減・安全確保</p>	
<p>発災時</p> <ul style="list-style-type: none"> ●状況の早期把握 (道路、橋梁、河川、傾斜地など) ●住民の安否確認 (道路不通時の現況確認) ●避難所等への住民の誘導 ●避難所等への連絡手段・物資搬送手段の確保 	
<p>回復期</p> <ul style="list-style-type: none"> ●道路状況の把握 ●住民への生活物資搬送手段の確保 	

図 1.1-7 王寺町における防災の課題

② インフラ設備の点検

王寺町は王寺町地域防災計画に基づき、町内の安全確保、長寿命化を実施しているが、平常時の点検業務や緊急対応時の確認業務等の省力化が急務である。また、奈良県と大阪府を結ぶ交通網の要衝地として、今後市街地の再開発も行うことが求められている。

<p>インフラ更新</p> <ul style="list-style-type: none"> ●長寿命化対策 ●災害に強いインフラ整備 ●市街地の再開発 	 
<p>日常維持管理</p> <ul style="list-style-type: none"> ●計画保全の推進 ●点検作業の効率化 ●ライフサイクルコストの削減 	<p>インフラ資産に関する原則</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ライフサイクルコスト¹²を削減する <ul style="list-style-type: none"> ○長寿命化を図り、計画的・体系的な改修・更新を実施する。 ・多様化するニーズに対応する <ul style="list-style-type: none"> ○施設の耐震化やバリアフリー化等、時代とともに多様化するニーズに対応した整備を行う。 ・継続的な管理と定期的な取組の見直しを実施する <ul style="list-style-type: none"> ○計画的な点検を行い、施設の状況を把握し、適切な修繕更新を実施することにより、施設の長寿命化を図る。 <p>平成29年3月「王寺町公共施設等総合管理計画」より抜粋 (https://www.town.sji.nara.jp/material/Files/group/4/koukyousisetsu-usugo-u-kannkeikaku.pdf)</p>

図 1.1-8 王寺町におけるインフラ設備点検の現状と課題

③ 観光

王寺町には達磨寺や明神山等の観光資源があり、現在は王寺町の公式マスコットキャラクターである雪丸等を活用した観光プロモーションを実施している。また観光資源をより効果的に活用するために、周遊型広域観光ルートの整備を行い観光客の動線把握や交通渋滞緩和を図り、広域観光を推進する必要がある。



図 1.1-9 王寺町における観光の現状と課題

(3) 天川村

以下に天川村における自治体業務の課題について現状と課題を述べる。

① 防災

天川村は東西 20km の幅広い範囲に天ノ川が流れており、それに沿って集落が点在しているため、災害発生時の早期状況把握、住民への連絡手段の確保が大きな課題である。現状、林道の災害調査業務においては 10 名前後が 1 日かけて調査・報告書等作成を行う必要があり多大な時間を要している。また、現在住民への連絡手段として防災行政無線を利用しておりデジタル化が推進されているが、災害時に電波が届かない可能性がある地域も存在することから、災害に強い防災無線システムの導入が必要である。

東西20Kmの幅広い範囲に天ノ川に沿って、集落が点在しているための災害発生時における村職員と住民の連絡や、地域間の状況把握が課題

防災

- 危険箇所における現状の把握
(村道、林道、河川、傾斜地など)
⇒台風・大雨等の事前及び事後確認

林道の災害調査 (台風等で300ミリ以上の雨が降った場合)
職員が4班構成 (各班2~3名) で林道を中心に点検業務に従事
洞川地区、中央地区、西部地区(中央地区より地域)、西部地区 (その他)
森林組合委託林道 森林組合 (1班3名) が従事
⇒調査 概ね1班当たり 半日~1日 報告書作成を含めると深夜、翌日まで対応する必要あり
⇒延長が長い林道の場合 (例 林道殿野坪内線 延長9km) は調査時間を要するとともに脆弱な箇所が多く、いたるところで土砂の洗い出しが発生しており手作業で除去しながら調査をするため、終点到達するには、多大な時間を要する。

防災行政無線等住民への周知連絡手段の課題
防災行政無線のデジタルへの更新が求められているが、村の地勢を考えると狭隘な地形に強いアナログ (60MHz帯) が有効でないか。
災害時や、緊急時を考慮するとデジタル防災無線では電波の届く範囲に不安がある。
⇒災害時に強い防災無線システムを維持できるかが大きな課題である。
デジタル化時には補完手段が必要

天川村 あしのせ谷 (H23.9)





図 1.1-10 天川村における想定被害

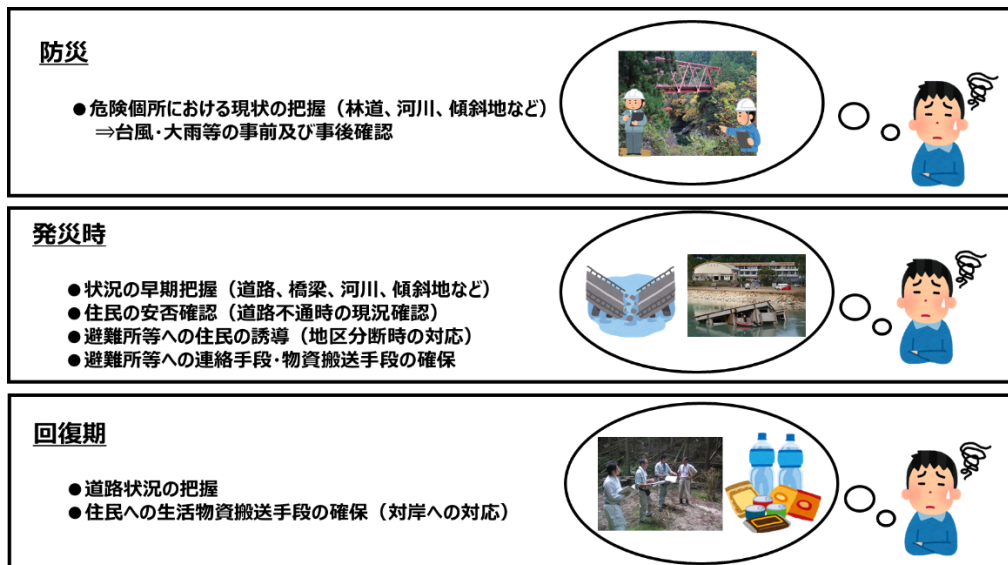


図 1.1-11 天川村における防災の課題

② インフラ設備の点検

天川村は山間部の面積が非常に大きく、土砂滑り等の災害によるインフラ設備の崩壊が想定される。そのため災害に強いインフラ設備を整備することや、平常時の点検業務の効率化が求められる。

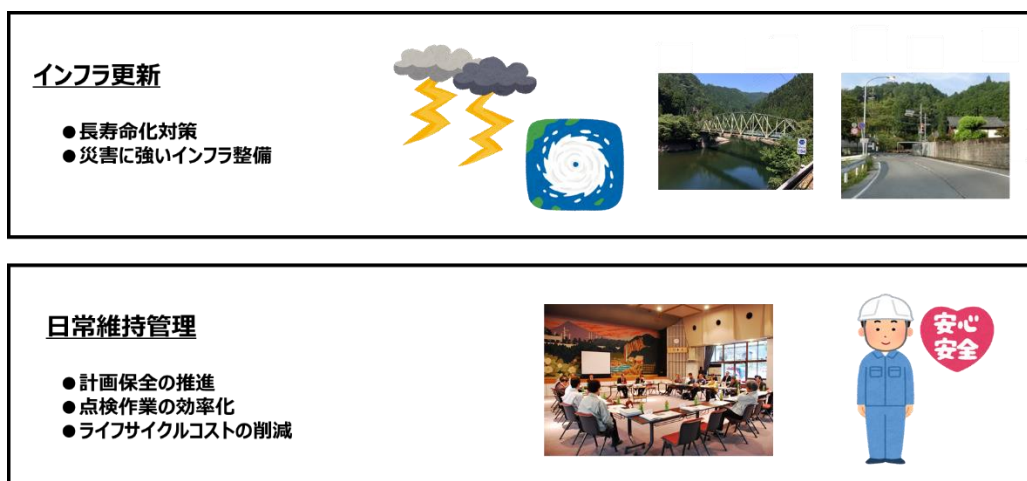


図 1.1-12 天川村におけるインフラ設備点検の現状と課題

③ 観光・その他

天川村では、溪流でのバーベキューや紅葉の観光等で訪れる観光客が多く、現状混雑期は職員が注意喚起のため対応している。そのため、職員の稼働削減のための仕組みづくりや、より観光を活性化させるための情報発信等が課題に挙げられる。また、住民の高齢化対策としての買い物支援や鳥獣害対策など課題が挙げられている。

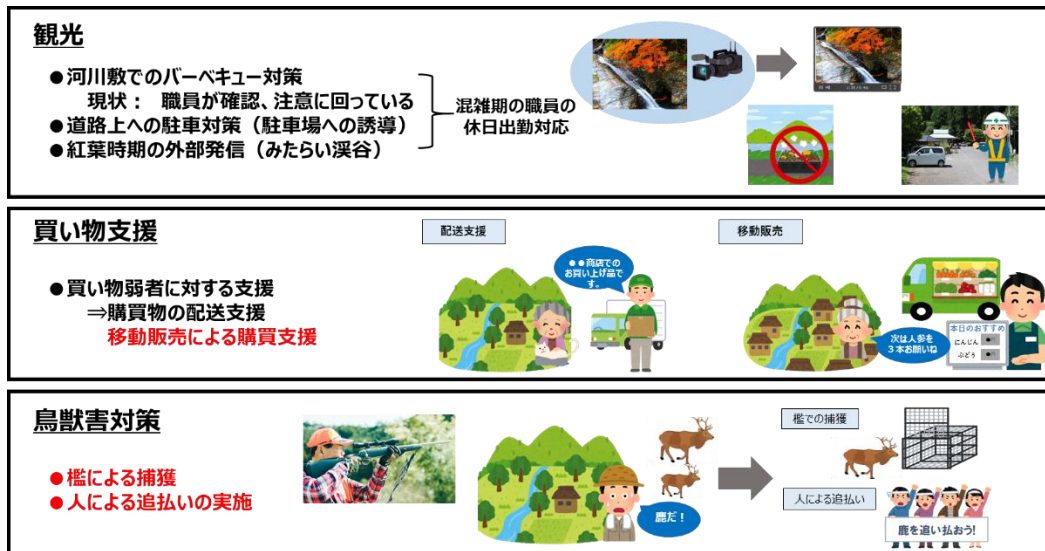


図 1.1-13 天川村における観光・その他の現状と課題

(4) 奈良モデル

前項まで奈良県内の3市町村の現状と課題を記載したが、奈良県では平成21年度に『「奈良モデル」検討報告書』[9]を作成し、県と市町村の役割分担の方向性を示している。「奈良モデル」とは、「市町村合併に代わる奈良県という地域にふさわしい行政のしくみ」であるとともに、人口減少・少子高齢社会を見据えて、「地域の活力の維持・向上や持続可能で効率的な行財政運営をめざす、市町村同士または奈良県と市町村の連携・協働のしくみ」と定義されている。これまで、消防の広域化や南和地域における広域医療提供体制の再構築、道路インフラの長寿命化、連携・協働によるまちづくり等さまざまな取組で成果を挙げている。

道路インフラの長寿命化においては、市町村の土木技術職員が減少し、土木技術職員がいない町村もあることを背景に、橋梁長寿命化修繕計画の策定、橋梁点検や修繕事業（設計・工事）を平成22年度から県が市町村から受託しており、既に27市町村で実施実績がある。

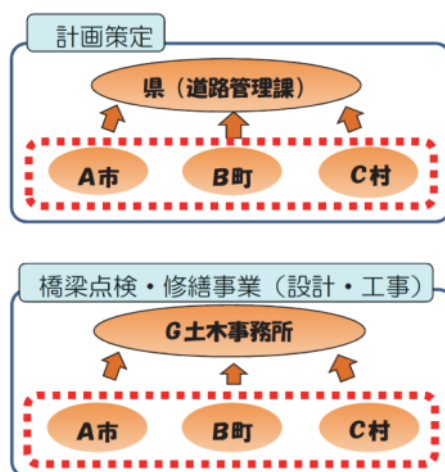


図 1.1-14 道路インフラ長寿命化における県と市町村の連携イメージ（出典[9]）

参考文献

[9] 奈良県、奈良モデルのあり方検討委員会報告書、平成29年

このように奈良県では各市町村と土木事務所などの県組織の結びつきが強いため、現場の意見をより広く収集すべく、県内の土木事務所（中和・吉野・高田・奈良）の計画調整課及び王寺町 地域整備部に対し、現状の課題や新技術への期待について、調査研究会とは別途でヒアリングを実施した。参考として、内容を下記に記載する。

～（参考）土木事務所ヒアリング～

- ・現状の近接目視・打音検査とドローン検査が同じ品質であることが望ましく、発注者としては、ドローンの導入メリット、品質、費用などの情報が必要。先行事例やNETIS（新技術情報提供システム）登録があると実施しやすい。
- ・市街地での安全性やドローン飛行許可の取り方など業者がスムーズに導入できるようになるとよい。
- ・橋梁点検の評価は視認者の主観に影響される。画像を基に AI で客観的に判定できると評価のバラつきが減る。
- ・5年毎の法定点検に対し、補修の人手が不足しており、補修が終わる前に次の点検計画が始まる状況。慢性的な人手不足のため、簡易点検を実施する箇所については、ドローンが活用できれば便利。
- ・現場作業は秋（10～12月）に集中することが多いことから、ガードマンの手配や点検車の確保が難しい場合がある。このためドローンが活用できれば便利。
- ・点検現場に行けない際に、現場担当から「ここを見て欲しい」という要望を受ける場合がある。遠隔で高精細の映像によって確認できれば便利。
- ・8K 映像を基に崩落土量などの災害規模の定量化が遠隔で実現できれば、発注時の見積もりの負担が軽減する。現場の図面化までできれば更によい。

1.2 ローカル 5G 等による課題解決の有効性

1.2.1 調査手法

上記で述べた各自治体の業務課題に対して、解決に資するユースケースを検討し、技術面、運用面、財政面の観点で有効性を吟味した。

1.2.2 調査結果

(1) 天理市

① ユースケース概要

ユースケースの概要図を図 1.2-1 に示す。

本ユースケースは、市内において監視カメラや水位計等の各種デバイスを活用して、効率的な情報収集を行うものである。ローカル 5G を利用して各種データをサーバに蓄積し、平常時及び発災時の市内の状況把握や帳票記録等が容易になる。発災時は、収集した情報を活用して減災活動を迅速に進めることが期待できる。また、発災時には市民の避難指示等の情報発信を行うシステムと組み合わせることで、効率的な減災活動を行うことができる。

その他、ドローンを活用して市全体を見回ることで、観光地の混雑状況の確認や不法投棄の防止、農作物の状況確認、鳥獣害対策等の様々な分野で業務効率化を図ることができる。

② 課題解決の有効性

本ユースケースにより、ローカル 5G を活用したリアルタイムな情報収集や状況把握が可能となることで、大雨による河川の氾濫や低地における浸水等の被害状況を踏まえた対応策検討や住民の避難誘導を迅速に行うことが可能となる。また、平常時と発災時の各種データを蓄積することで、より効率的な防災対策検討が可能となる。

また、ドローンでの情報収集により市内広域に渡る情報収集が可能となるだけでなく、空撮ならではの俯瞰的な情報を観光地情報や不法投棄対策、鳥獣害対策など幅広く活用可能となる。具体的には、本市でめざす天理ブランド確立に向けて SNS 等でドローンによる空撮映像を配信することで、国内外の幅広い世代の誘客が可能となる。

技術面に関しては、ローカル 5G 及びドローンを活用することで従来では実現できなかった 8K 映像等の大容量データを扱うことができるようになる。ただしドローンを運用するための電源が現状数十分程度しか持たないため、現状では実運用は難しく、電源問題の解決が必要である。また、市全体でローカル 5G を利用することを想定した場合は、ローカル 5G の利用範囲をより大きくできるような基地局の設計が必要である。

運用面に関しては、従来人の手で行っていた業務を各種デバイスで実施することで、職員の安全を担保した上で大幅な作業時間削減が見込める。

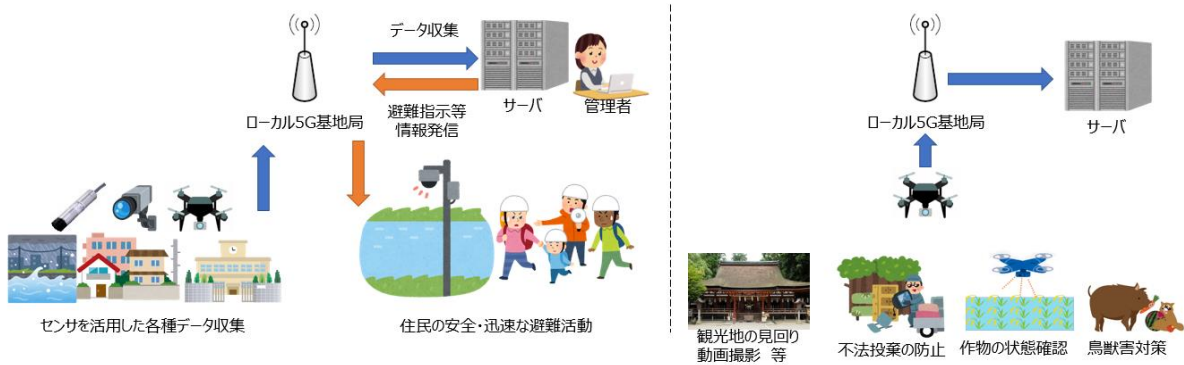


図 1.2-1 天理市におけるユースケース

(2) 王寺町

① ユースケース概要

ユースケースの概要図を図 1.2-2 に示す。

本ユースケースは、町内において監視カメラや水位計等の各種デバイスを活用して、効率的な情報収集を行うものである。ローカル 5G を利用して各種データをサーバに蓄積し、平常時及び発災時の町内の状況把握や帳票記録等が容易になる。発災時は、収集した情報を活用して減災活動を迅速に進めることが期待できる。

また、ローカル 5G を観光や道路交通情報等のデータ収集にも活用することができるため、観光スポットを撮影したデータを観光プロモーションに活用したり、観光スポットの観光客数の把握や観光客の動線把握が可能である。

② 課題解決の有効性

本ユースケースにより、迅速な情報収集や状況把握が可能となるため、発災時の正確かつリアルタイムな状況把握による住民の速やかな避難誘導が可能となる。また、本町は大和川の重要水防箇所にて定められた橋梁（8 か所）や土砂災害警戒区域（急傾斜地 24 か所、土石流 10 か所、地滑り 2 か所）が数多くあるが、各種デバイスを活用して情報収集を行うことで、平常時の危険箇所の状況把握にかかる稼働削減に効果的である。

技術面に関しては、ローカル 5G 及びドローンを活用することで従来では実現できなかった 8K 映像等の大容量データを扱うことができるようになる一方で、ドローン運用のための電源問題の解決が課題となる。また、ローカル 5G に対応した各種デバイスを導入する必要がある。

運用面に関しては、従来人の手で行っていた減災活動について各種デバイスを用いて実施することで職員の安全を担保した上で大幅な作業時間削減が見込めるため、導入効果は高い。具体的には、河川の水位や危険な地域の状況等デバイスから得られる情報は遠隔で非常に短時間で収集できる。平常時及び発災時の町内の見回り業務における庁舎-現地間の移動時間を削減することができ、データの収集業務に係る時間を約 7 割以上削減できる見込みである。

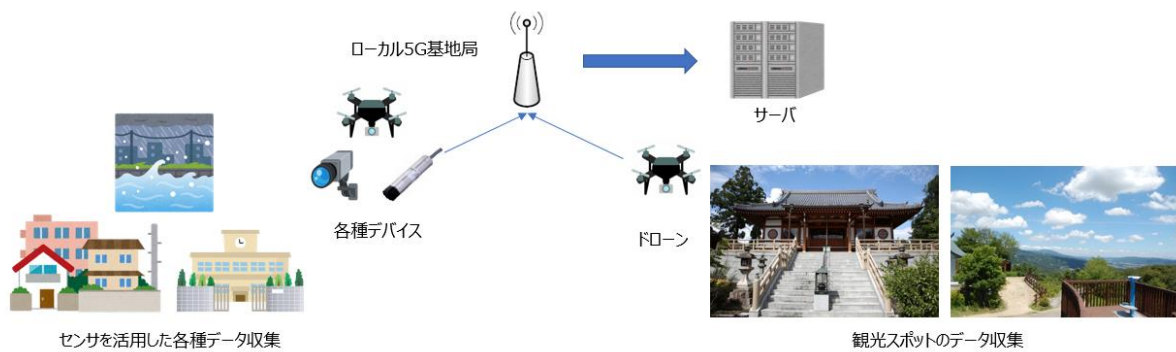


図 1.2-2 王寺町におけるユースケース

(3) 天川村

① ユースケース概要

ユースケースの概要図を図 1.2-3 に示す。

本ユースケースは道路や橋梁等の自治体管理施設の点検をドローンにより効率的に行うものである。ローカル 5G を活用してドローンの制御を行い、空撮した 8K 映像データをサーバに蓄積し、ひび割れ等の異常がないか確認することができる。また、発災時においても、災害現場をいち早く確認するためにドローンを応用することができる。

また、ローカル 5G を観光や道路交通情報等のデータ収集にも活用することができるため、観光スポットを撮影したデータを観光プロモーションに活用したり、道路交通情報を収集して渋滞緩和のための交通誘導に利用することができる。

② 課題解決の有効性

本ユースケースにより、ドローンで空撮した 8K 映像データを元に災害時の被害所状況把握が可能となる。特に現在、調査稼働が大幅にかかっている林道の状況調査においてドローンを活用することで、稼働の大幅な削減が可能となるだけでなく、脆弱な場所に訪れることなく安全に調査を行うことができる。

技術面に関しては、ローカル 5G 及びドローンを活用することより、従来では実現できなかった 8K 映像等の大容量データを扱うことが可能となる一方で、ドローン運用のための電源問題の解決が課題となる。

運用面に関しては、8K 映像を活用することで従来よりも撮影距離を大きくしても画質を維持できるため、ドローンが障害物に接触する可能性が低く飛行安全性に優れていると言える。また、従来人の手で行っていた業務をドローンで実施することで大幅な作業時間削減が見込める。

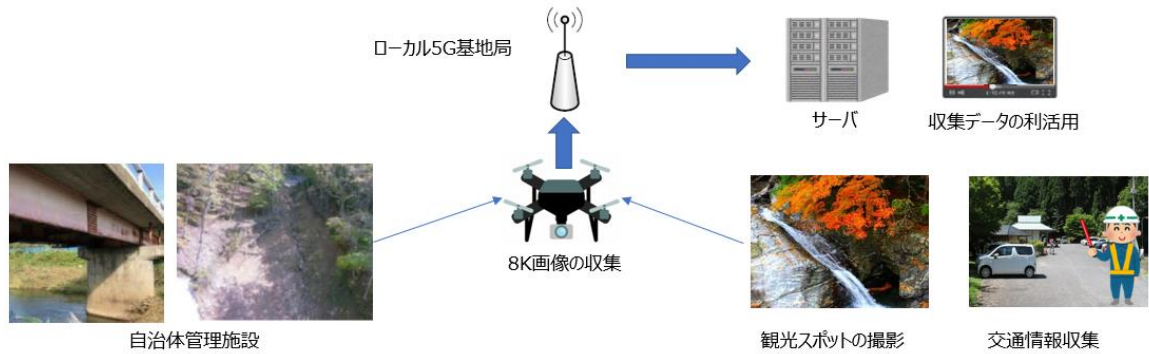


図 1.2-3 天川村におけるユースケース

(4) 技術面における共通課題

ローカル 5G を運用する上で 3 自治体に共通する技術課題としては 2 点ある。

1 つ目は、自治体全域でローカル 5G を利用することを想定した場合は、ローカル 5G の利用範囲をより拡大できるような基地局の設計が必要不可欠になるという点が挙げられる。電波の届く範囲を拡大することは共通の技術課題である。

その解決策としては移動基地局などの整備である。固定式ではなく移動式にすることで、柔軟な運用が可能である。

2 つ目は、ドローンを運用するための技術課題として、電源が現状数十分程度しか持たないことから、現状では実運用が難しく、電源問題の解決が必要である点が挙げられる。

その解決策として、様々なユースケースを実現しえる技術および製品の研究開発を継続して行うことで電源問題の解消に努める必要がある。

(5) 運用面における共通課題

ローカル 5G を運用する上で 3 自治体に共通する運用課題としては 2 点ある。

1 つ目はローカル 5G を利用するためには、基地局設置時に免許が必要であり、自治体でローカル 5G を利用するためのノウハウを取得する必要があることが挙げられる。

その解決策として、実証実験等を通じた企業及び自治体のローカル 5G に関するノウハウ習得を実施すること。加えてローカル 5G に関するノウハウを持つ民間事業者への業務委託による運用負担の軽減、ノウハウの習得が必要である。

2 つ目は現在の制度では、公道上は他者土地利用となるため固定通信しかできず、現状公道上のドローンと通信できないことから、他者土地利用に関する制度緩和の必須がある点である。

(6) 財政面における共通課題

ローカル 5G を運用する上で 3 自治体に共通する財政面の課題として、現在の構築費用では自治体の負担が非常に大きいことから、他の通信方式の場合と同等まで構築

費用の低減を行う必要がある。令和3年3月現在、ローカル5G設備一式（2基地局、屋外設置）の場合の費用が約1.5億円であるが、BWA方式での設備構築費が約1億円、ローカルLTE方式での設備構築費は1基地局あたり数千万円である。

その解決策として、製品の標準化による価格低減、自治体への財政的支援の実施、民設民営による補助金スキーム、近隣自治体でのローカル5G設備の共同利用による財政負担低減等が考えられる。特に、民間事業者との連携に関しては地域BWA整備において事例があり、コア設備を民間事業者より安価に提供し、自治体は基地局の整備のみで事業が可能になっている。そのため、自治体は負担する導入コストは基地局のみで最小限となり財政負担が軽減できる。また、保守・運用を民間事業者がサポートすることで自治体の運用負担も低減することができる。その他にも、民間事業者のノウハウを活用して様々なユースケースを実現することや、小規模自治体のローカル5Gの導入ハードルの低減化が可能である。

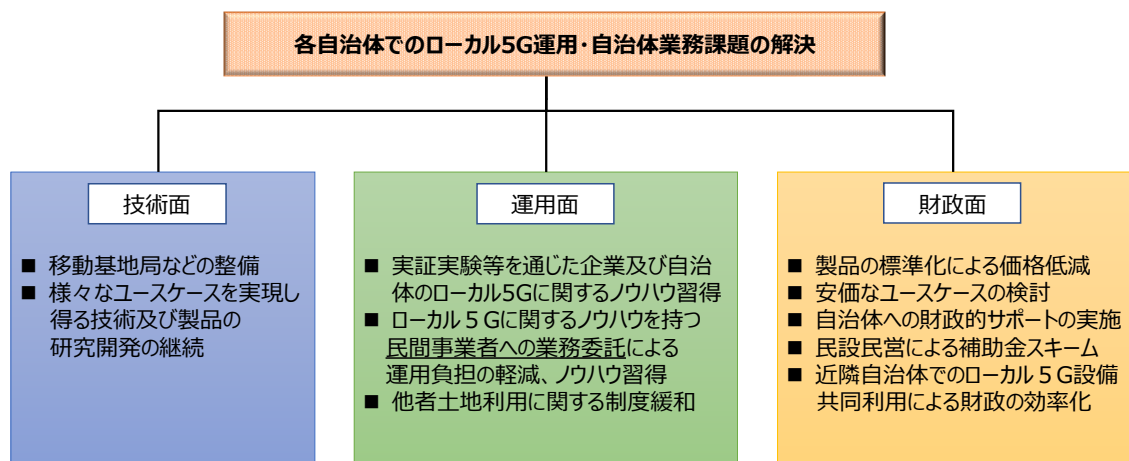


図 1.2-4 自治体へのローカル5G導入の共通課題

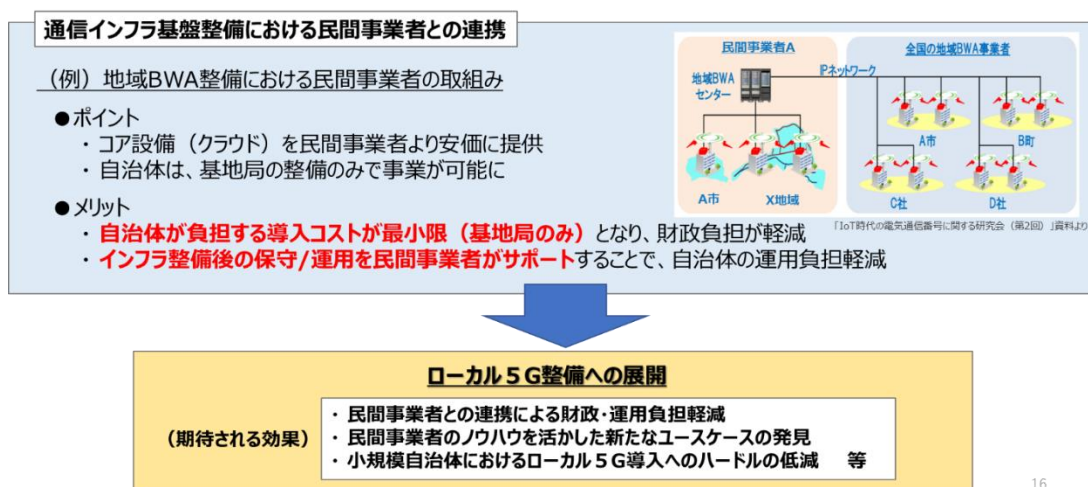


図 1.2-5 通信インフラ基盤整備における民間事業者との連携

第2章 ローカル 5G、8K 映像伝送利用に関する現状と課題の調査

2.1 実証実験の実施

本調査研究では、ローカル 5G 及び 8K 映像を自治体各種業務で利用する場合の技術的な課題を調査するために、以下の実証実験を実施した。

- 8K カメラを搭載したドローンから撮影した 8K 映像を、実際にローカル 5G によって伝送し、通信エリアや 8K 映像の伝送可能距離等を測定する実験
- 災害現場の映像撮影、橋梁やダム等のインフラ点検、地形・区画等の公共測量などの自治体業務においてドローンから撮影した映像を利用する場合の、8K 映像と 4K 映像等との比較実験

2.1.1 8K カメラ搭載ドローンからのローカル 5G による映像伝送実験

(1) 試験場所

本実験は、広島県東広島市に位置するシャープ株式会社通信事業本部の構内にローカル 5G 無線エリアを構築して実施した。東広島市は高度産業に力を入れてきた経緯があり、シャープ株式会社の周辺にも自動車部品の工場などが集積しており、国勢調査の結果に応じて設定される人口密集地区（DID：Densely Inhabited District）に指定されている（<https://www.gsi.go.jp/chizujoho/h27did.html>）。



図 2.1-1 シャープ(株)通信事業本部、上空からの俯瞰図



図 2.1-2 事業所構内実験エリア

図 2.1-1 の一部を拡大し、図 2.1-2 に示す。ローカル 5G 無線サービスエリアは事業所構内のテニスコートに隣接する駐車場をカバーするように構築した。駐車場は平坦であるものの、地面は砂利が撒かれた非舗装の駐車エリアと、アスファルト舗装エリアが混在している。基地局装置のアンテナ装置を、テニスコートと駐車場の境に立っている電柱に取り付け、駐車場の地表面に加えて上空を主要な無線サービスエリアと想定して設計している。

本実験における無線サービスエリア測定は、図 2.1-2 に示す 6 ヶ所（測定ポイント①、②、③、④、⑪、⑫）を対象とした。アンテナ装置を起点として向かって 0 度の水平方向に 20m 毎に測定ポイント①、②、③、④を設け、測定ポイント④が最も遠く水平距離 80m である。測定ポイント①～④は一平面のみ（後述するアンテナパターンの YZ 平面）の測定となるが、加えてアンテナ装置から見て左斜め方向（ -45 度）の測定ポイント⑪、右斜め方向（ $+45$ 度）の測定ポイント⑫も設けることでアンテナパターンの XZ 平面の評価も行うようにした。それぞれの測定ポイント①、②、③、④、⑪、⑫において、高度もパラメータとして（本実験では主に 0、20、40、60、80m など）スループット測定を実施することで、構築した無線サービスエリアを三次元的に評価することとした。

基地局装置は、大きくは CN (Core Network)、BBU (BaseBand Unit)、RRU (Remote Radio Unit、アンテナ装置) に分類できる。図 2.1-3 に示すように、CN と BBU については防水処理が施されていないため車両内に配置、RRU は防水ボックスで保護する形で電柱の高さ 2.3m の位置に設置した。



• RRU
(Remote Radio Unit)

• CN (Core Network)
• BBU (BaseBand Unit)

図 2.1-3 ローカル 5G 基地局装置

※アンテナゲインのメインローブ方向



アンテナ仰角45度

図 2.1-4 RRU のアンテナ拡大図

図 2.1-4 に示すように、RRU は 4 つのアンテナを備えている。本実験においては、RRU を高度 2.3m と比較的高度が低い位置に設置する条件の下で、地上付近の移動局だけでなく、上空に位置する移動局についても通信サービスを提供する必要がある。そのために、アンテナパターンも考慮して、アンテナを仰角 45 度の上向き方向に向けて設置し、地表面と上空の双方を無線サービスエリアに含めるようにした。

なお、上述したローカル 5G 無線サービスエリア構築しての実験のために、隣接周波数帯使用者との調整等を実施したうえで総務省中国総合通信局に申請し、表 2.1-1 に示すように実験基地局、実験移動局の無線局免許を受けている。

表 2.1-1 実験無線局の免許

無線局の種類	免許の番号	識別番号
実験試験局	中実第1002号～中実第1004号	S Hローカル5G RRUひろしま 1～3
実験試験局	中実第1005号	S Hローカル5Gいどうきひろしま

(2) 試験装置

① 基地局

表 2.1-2 にローカル 5G 基地局の諸元を示す。本基地局は既存無線通信方式 4G/LTE をベースとして新しい通信方式 (NR: New Radio) を拡張的に使用する NSA (Non-Stand Alone) 方式ではなく、4G/LTE とは独立して NR を単独で使用可能である SA (Stand Alone) 方式の構成としている。使用する周波数帯は、Sub6 (3.6～6GHz) でローカル 5G に確保される周波数のうち屋外での使用が可能な 4.8 - 4.9GHz 帯 (100MHz 帯域幅) である。

表 2.1-2 ローカル 5G 基地局の諸元

項目	仕様
周波数帯	4.8 - 4.9GHz (対応周波数は 4.6 -4.9GHz)
占有周波数帯域幅	100MHz
電波の形式	99M9 X7W
複信方式	TDD
TDD configuration	Local5G準同期設定 (ダウンリンク: アップリンク = 5 : 4)
二次変調方式	DFT-S-OFDM/CP-OFDM
一次変調方式	n/2 BPSK/QPSK/16QAM/64QAM/256QAM
サブキャリアスペーシング	30kHz
アンテナタイプ	単一アンテナ×4
空中線電力	200 mW (23dBm) ※4アンテナ合計
アンテナ利得	4.6 dBi ※給電線損失を含む
EIRP	0.56W (27.6dBm) (4アンテナ分)

複信方式は TDD (Time Division Duplex) でありダウンリンクとアップリンクの比率 (TDD configuration) は変更可能であるが、ローカル 5G ではアップリンクの時間

比率が高いパターンの利用ニーズが多くなることが予想される。本実験では、図 2.1-5 に示す準同期方式（※）を使用するが、この場合ダウンリンクとアップリンクの比率は 5 : 4 でありそれぞれに割り当てられる時間はほぼ同等である。準同期設定は非同期運用の一つであり、キャリア 5G（全国 MNO）とスロット境界を同期させることを前提としている。同期方式の場合は、各スロットでのアップリンクとダウンリンクの選択をキャリア 5G と合わせる必要があるため、ダウンリンクとアップリンクの比率は 7 : 2 となりアップリンクの割合が小さい。

（※）準同期方式の詳細については 2.2.1 節であらためて述べる。

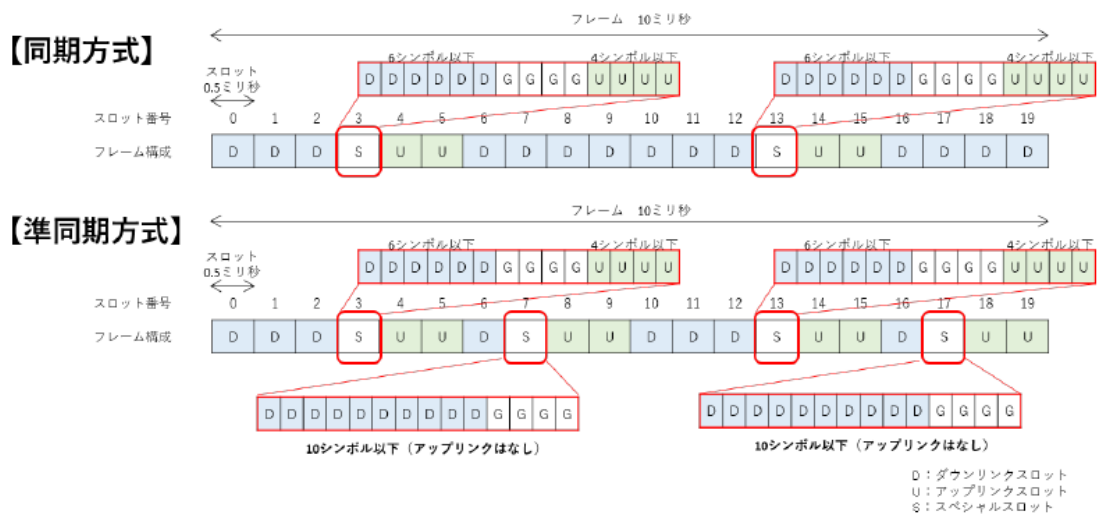


図 2.1-5 準同期方式（総務省「ローカル 5G 導入に関するガイドライン」より
https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban14_02000485.html)

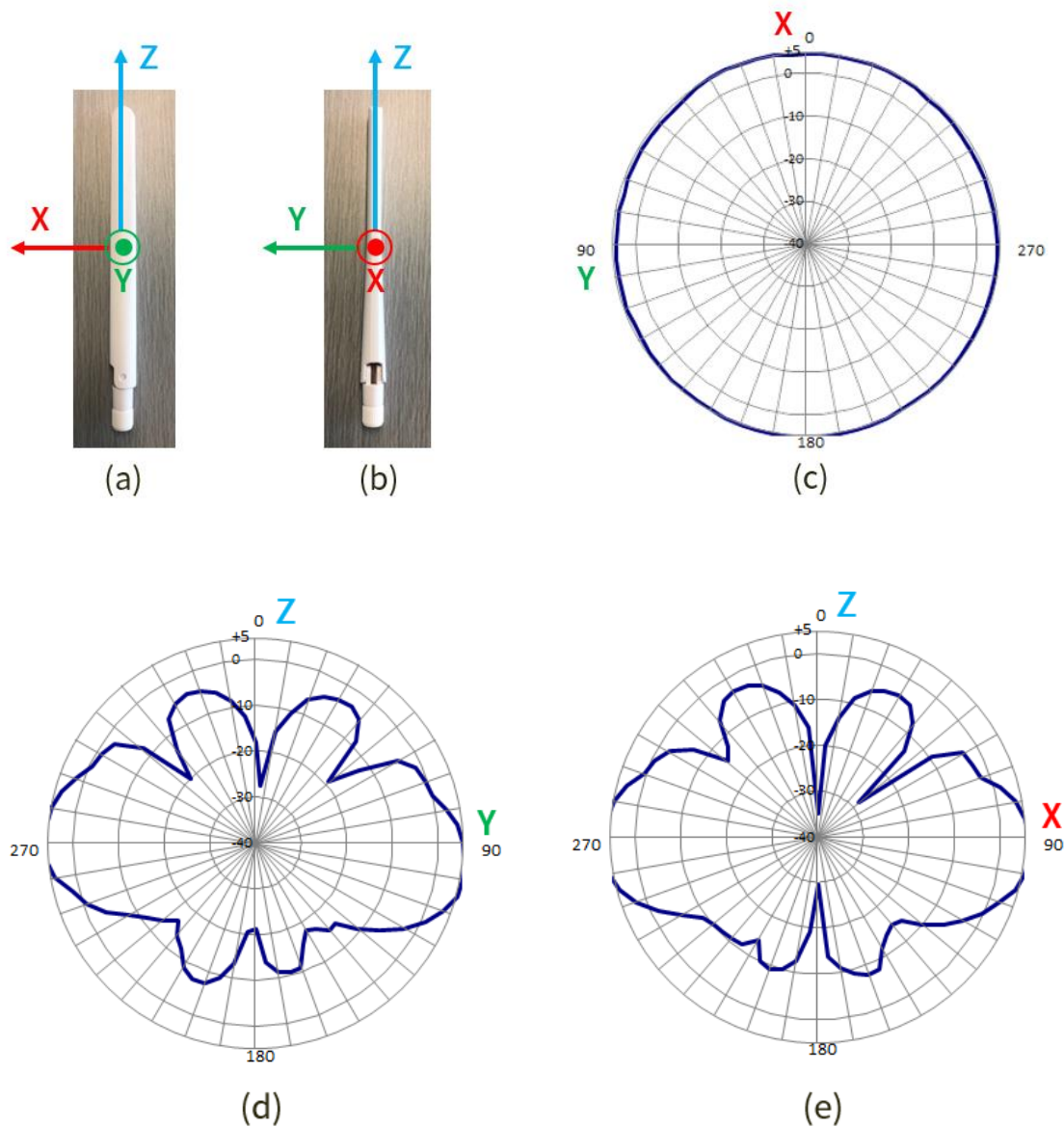


図 2.1-6 基地局アンテナ外観とアンテナパターン

基地局装置の RRU が具備するアンテナについて、真正面から見た形状を図 2.1-6 (a)に、真横から見た形状を(b)に示す。直方体に近い平たい形状であり、(a)に示すように真正面から見た平たい面上において縦方向に Z 軸、横方向に X 軸、平たい面から垂直の方向を Y 軸と定義する。図 2.1-6 (c)、(d)、(e)にアンテナパターンを示す。アンテナパターンは放射パターンとも言い、指向性、ゲイン (利得) などの特性を示し、中心からの距離が遠いほど指向性、ゲインが強いことを意味する。(c)に示すように XY 平面においては指向性がなく、つまり全方位に同じゲインを有する。(d)に示すように YZ 平面においては指向性があり、Y 軸方向に最も大きいゲインがあるメインローブを形成している。また、Y 軸を中心として対象なゲインとはなっておらず、例えば、90 度から 70 度にかけてはゲインが 5dBi 以上落ち込んでいる一方で、90 度か

ら 110 度にかけては約 2dBi 程度しかゲインは落ち込んでおらず、つまり後者の方がゲインが大きいこともわかる。(e)では、同様に XZ 平面においても指向性があり、X 軸方向に最も大きいゲインがあるメインローブを形成し、X 軸を中心として対象なゲインとはなっていないことが分かる。一方で、YZ 平面においても、XZ 平面においても、Z 軸を中心として対称性のある傾向が見られる（ゲインの落ち込むノッチの深さが異なる点は測定分解能の精度に依存していると考えている）。

このように指向性のあるアンテナパターンであるため、たとえ基地局-移動局間距離が同じであっても、方向の差異により基地局での受信電力差異や、スループット優劣差が生じる。

② 移動局

表 2.1-3 にローカル 5G 移動局の諸元を示す。基本的には基地局の仕様、指示に合わせて 4.8~4.9GHz 帯の 100MHz 帯域幅で動作するものの、送信に関しては最大の変調方式は 64QAM までとなっている。また、アンテナは 1 本しか備えておらず、指向性は持たない。電波出力は最大で 23dBm であるものの、本実験における無線サービスエリア構築場所（事業所構内駐車場）の広さと無線エリア要求仕様（設計方針）に従い 17dBm に制限して運用した。前述した要求仕様は、移動局が水平距離 30m、高度 30m に位置する時に基地局に対して約 100Mbps のトラフィックを送信することを可能とすることであり、そのためにはマージンも取ったうえで移動局の送出電波を基地局が -60dBm で受信する必要がある。これらの設計方針に従った伝搬路シミュレーション計算の結果、移動局の送信電力は 17dBm で十分であると見積もった。

表 2.1-3 ローカル 5G 移動局の諸元

項目	仕様
周波数帯	4.8 - 4.9GHz (対応周波数は 4.6 -4.9GHz)
占有周波数帯域幅	100MHz
電波の形式	99M9 D1A, D1B, D1C, D1D, D1E, D1F, D1X, D7W G1A, G1B, G1C, G1D, G1E, G1F, G1X, G7W
複信方式	TDD
二次変調方式	DFT-S-OFDM/CP-OFDM
一次変調方式	$\pi/2$ BPSK/QPSK/16QAM/64QAM/256QAM
アンテナタイプ	単一アンテナ
空中線電力	50 mW (17dBm) ※最大23dBm
アンテナ利得	1.0dBi ※給電線損失を含む
EIRP	0.06 W (18dBm)

③ ドローン

図 2.1-7 は、本実験で使用したドローンであり、ローカル 5G 移動局 (スマートフォン) をホルダで固定して取り付けている。本実験では、ドローンにローカル 5G 移動局、8K カメラ、パソコンなどを取り付ける必要があるため、十分な積載量 (ペイロード) を持つ大型のドローンを使用した。ローカル 5G 移動局のアンテナは指向性を持っておらず、筐体の背面に設置されている。本実験においては、ローカル 5G 基地局の指向性アンテナが仰角 45 度で上向きである条件の下で、ローカル 5G 移動局は地上においても上空においても基地局と無線通信可能な状況が求められる。したがって、ローカル 5G 移動局のアンテナの仰角は 0 度とし、つまりはスマートフォンの筐体が地面と直行するように設置した。



図 2.1-7 ローカル 5G 移動局を取り付けたドローン

表 2.1-4 ドローンの仕様

項目	
モデル	SAITOTEC YOROI 6S1500F
飛行時寸法	1650 (W) x 1430 (D) x 900 (H) mm
機体重量	15kg
最大ペイロード	15kg
離陸最大重量	42kg (バッテリー12kg含む)
飛行時間	本実験においては約12分 (ペイロードに依存する)

(3) 試験

① スループット測定

①-1 手順

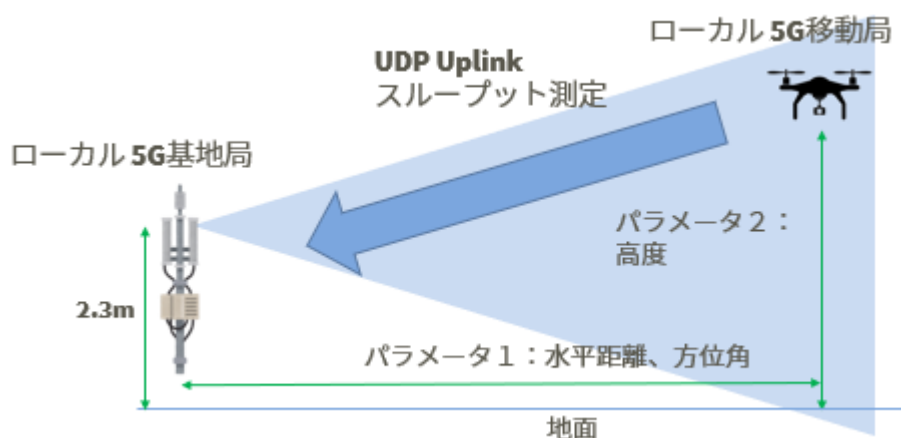


図 2.1-8 試験構成図

表 2.1-5 に試験パラメータを示す。図 2.1-8 に示したようにパラメータ 1（水平距離と方位角）で決定する測定ポイント①、②、③、④、⑪、⑫において、パラメータ 2（高度）を振って、スループット測定を行う。また、スループット値に加えて、スループット測定時の無線関連データ、RSRP（Reference Signal Received Strength）、MCS（Modulation and Coding Scheme）、BLER（Block Error Rate）も取得する。

表 2.1-5 試験パラメータ

パラメータ	値
水平距離X[m]	20, 40, 60, 80
高度Z[m]	0, 20, 40, 60, 80
方位角 (アンテナ正対方向を0度とする)	-45, 0, +45

表 2.1-6 測定項目

測定項目	測定内容
スループット	UDPアップリンクスループットをiperfアプリで測定。 測定ポイントは水平距離、高度、方位角のパラメータで決定する。
RSRP	各測定ポイントにおけるスループット測定時に、ローカル5G移動局において観測されるダウンリンクの電界強度指標として測定。
MCS	各測定ポイントにおけるスループット測定時に、ローカル5G移動局がアップリンクフレーム送信時に選択するMCSを測定。
BLER	各測定ポイントにおけるスループット測定時に、ローカル5G移動局が送信するアップリンクフレームの誤り率を測定。

RSRP とは、基地局が送信する参照信号 (Reference Signal) を移動局がどれだけの大きさで受信できたかを示す受信電力値であり、通信環境を判断する一つの指標で、基本的には受信電力が大きいほど良通信環境である。基地局の送信電力と RSRP からパスロス (伝搬路損失) が分かるので、伝搬路が基地局-移動局間で対称であると仮定すると、移動局が送信した信号の基地局における受信電力も推定できる。

MCS は変調方式と符号化率の組み合わせで定義される値で、本実験で使用する移動局では表 2.1-7 に示すように MCS0~MCS28 を使用する。Modulation order は変調オーダ (変調方式) を意味し、それぞれ、2 : QPSK、4 : 16QAM、6 : 64QAM である。Spectral efficiency (周波数利用効率) は、1Hz あたりに伝送できる情報ビット数を意味する。MCS の値が大きいほど変調度が大きく符号化率も高くなるので、送信する総情報量も多くなる。例えば、使用可能な最大値である MCS28 では Spectral efficiency が 5.5547 であるが、システム帯域幅 100MHz、TDD configuration で決定される Uplink 率 40%、データ送信に使用可能な無線リソース割合 97%、オーバーヘッド 14% の条件で、 $5.5547 \times 100M \times 0.4 \times 0.97 \times (1-0.14) =$ 約 185Mbps のように最大スループット値を算出できる。

BLER は誤り率である。本実験で使用する移動局は送信フレームに適用する MCS を通信状況に応じて適宜選択するが、その基本的な指標として誤り率が使用される。誤り率が高くなると低 MCS を選択する、誤り率が低くなると高 MCS を選択する、というように通信環境に応じて適切な MCS を選択することで送信する総情報量を最大化するのが基本的な制御方法である。

表 2.1-7 MCS テーブル (3GPP TS38.214 Table5.1.3.1-1 から引用)

MCS Index <i>I_{MCS}</i>	Modulation Order <i>Q_m</i>	Target code Rate <i>R</i> x [1024]	Spectral efficiency
0	2	120	0.2344
1	2	157	0.3066
2	2	193	0.3770
3	2	251	0.4902
4	2	308	0.6016
5	2	379	0.7402
6	2	449	0.8770
7	2	526	1.0273
8	2	602	1.1758
9	2	679	1.3262
10	4	340	1.3281
11	4	378	1.4766
12	4	434	1.6953
13	4	490	1.9141
14	4	553	2.1602
15	4	616	2.4063
16	4	658	2.5703
17	6	438	2.5664
18	6	466	2.7305
19	6	517	3.0293
20	6	567	3.3223
21	6	616	3.6094
22	6	666	3.9023
23	6	719	4.2129
24	6	772	4.5234
25	6	822	4.8164
26	6	873	5.1152
27	6	910	5.3320
28	6	948	5.5547
29	2	reserved	
30	4	reserved	
31	6	reserved	

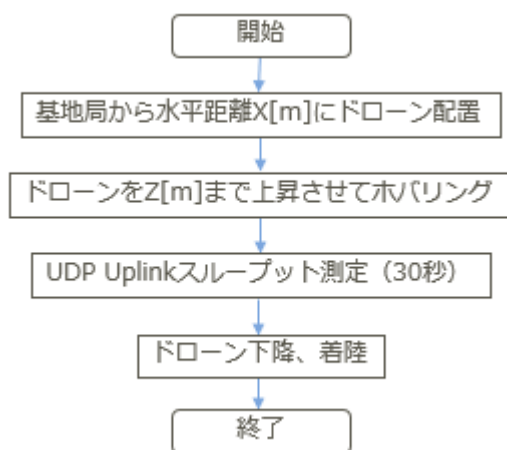


図 2.1-9 試験フロー図

図 2.1-9 に試験手順のフロー図を示す、基本的には各測定ポイントの高度 0m にドローンを移動し、パラメータ 2 で決定する高度まで上昇してホバリング状態に移行した後に、スループット測定開始する。測定ツールとして iperf を使用し、トラフィックのプロトコルは UDP を使用、30 秒間測定した。UDP を使用したのは、本実験の最終目的である 8K 映像伝送のための映像伝送プロトコルとして UDP ベースの SRT (Secure Reliable Transport) を使用するためである。30 秒の測定後、ドローンを下降、着陸させ、取得ログの確認を行う。以上が測定手順の 1 サイクルとなる。実際にトラフィックを流す時間は 30 秒のみであるものの、測定ポイントへのドローンの上昇、測定後のドローンの加工時間を含めると、1 ヶ所の測定当たり平均で約 3 分要した。ドローンのペイロードの大小に依存する飛行時間は、本実験のセットアップ条件においては 12 分程度であったため、飛行時間のマージンを取りつつ、平均的には 3~4 回測定する度にドローンのバッテリーを交換することとなった。

図 2.1-10 は実験の様子である。ローカル 5G 移動局側には、移動局操作担当者、スループット測定担当者、ドローン操縦者、ドローン安全運行管理者を配置、ローカル 5G 基地局側には、基地局操作担当者、スループット測定担当者を配置して実験に臨んだ。まず、測定ポイントの高度 0m においてローカル 5G 移動局をドローンに装着し、無線ログ取得開始、スループット測定のスクリプト実行 (a)、ドローンを起動して上昇させ (b)、測定する高度まで到達するとホバリングさせて停止させて UDP パケットの送信を開始してスループット測定 (c)、スループット測定終了後にドローンを下降させて地上に着陸させる。



図 2.1-10 実験風景

①-2 測定結果

本実験の最終的な目的は、ローカル 5G 基地局アンテナ仰角が 45 度の条件下において、ローカル 5G 移動局が最長何メートルの距離で 8K 映像伝送可能であることを確認することである。したがって、仰角 45 度周辺を主な対象としてスループット測定実施した。

測定ポイント①、②、③、④ (図 2.1-2 参照) のスループット測定結果を図 2.1-11 に示す。基地局からの水平距離が横軸、高度が縦軸であり、各スループット値の下には、ローカル 5G アンテナから移動局の位置する各測定ポイントまでの直線距離を記している。今回測定できたポイントのうち、最大のスループットを得ることができたのは、ポイント②-3 (水平距離 40m、高度 40m、直線距離 57m) でありスループットは 106Mbps であった。図 2.1-4 で説明したようにローカル 5G のアンテナ素子の正対面を仰角 45 度の方向の上空に向けており、図 2.1-6 に示すようにアンテナパターンのメインローブは仰角 45 度の方向で最もゲインが大きくなるように形成される。したがって、ローカル 5G 移動局からローカル 5G 基地局までの直線距離が同じ場合は、移動局が仰角 45 度方向近くに位置するほどスループットが大きくなることが予想され、測定結果も予想にしたがった結果ではある。ただ、測定ポイントを仰角 45 度周辺に絞っているため、同一直線距離でのスループット評価という観点からはサンプル数が少ないとは考えている。なお、ポイント④-4 (水平距離 80m、高度 120m) の位置においては、ドローン移動中にローカル 5G 基地局との接続状態が解除されて圏外となりスループット測定はできなかった

スループット測定中の各測定ポイントにおける RSRP の中央値を図 2.1-12 に、選択 MCS の中央値を図 2.1-13 に示す。なお、ポイント③-1 と④-4 については無線

ログが取得できなかった。基地局から遠ざかるほど RSRP 値は小さくなる傾向はある。しかし、ポイント②-4 (水平距離 40m、高度 60m) においては -118.3dBm と極端に小さく、比較的距離が遠いポイント③-4 (水平距離 60m、高度 80m) の -112.7dBm よりも低い値となっている。また、仰角 45 度方向においては、ポイント④-3 (水平距離 80m、高度 80m) の位置 (直線距離 113m) は、ポイント②-3 (水平距離 40m、高度 40m) の位置 (直線距離 57m) と比べて基地局からの距離が 2 倍となるため、理論的には 6dBm 低下するはずだが、実際の測定値は 8.5dBm の低下である。このように、移動局での測定誤差があると考えたほうがよい。

図 2.1-11～図 2.1-13 と照らし合わせるために、図 2.1-6 のアンテナパターンのうち YZ 平面のものを仰角 45 度に合わせて回転させて図 2.1-14 に再掲する。

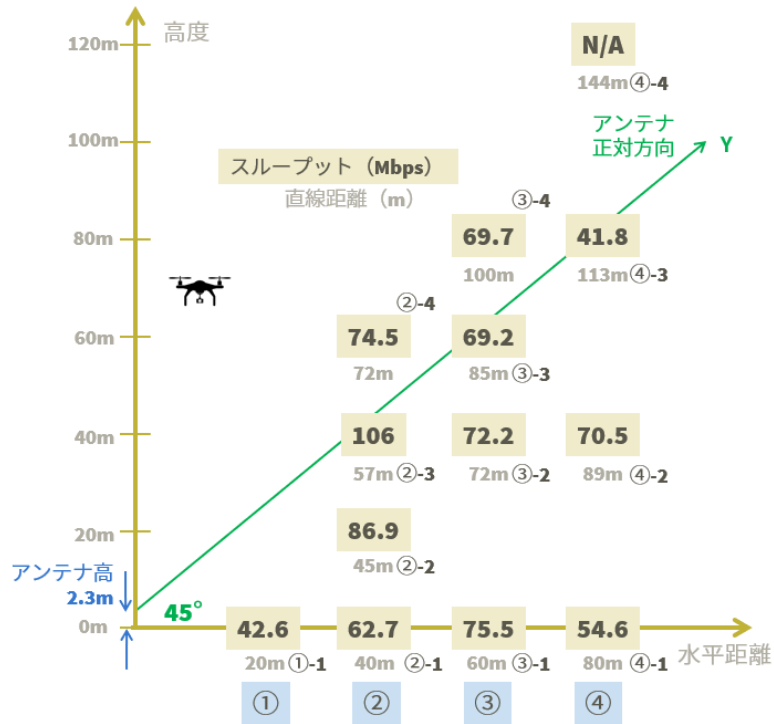


図 2.1-11 アップリンクスループット測定結果 1

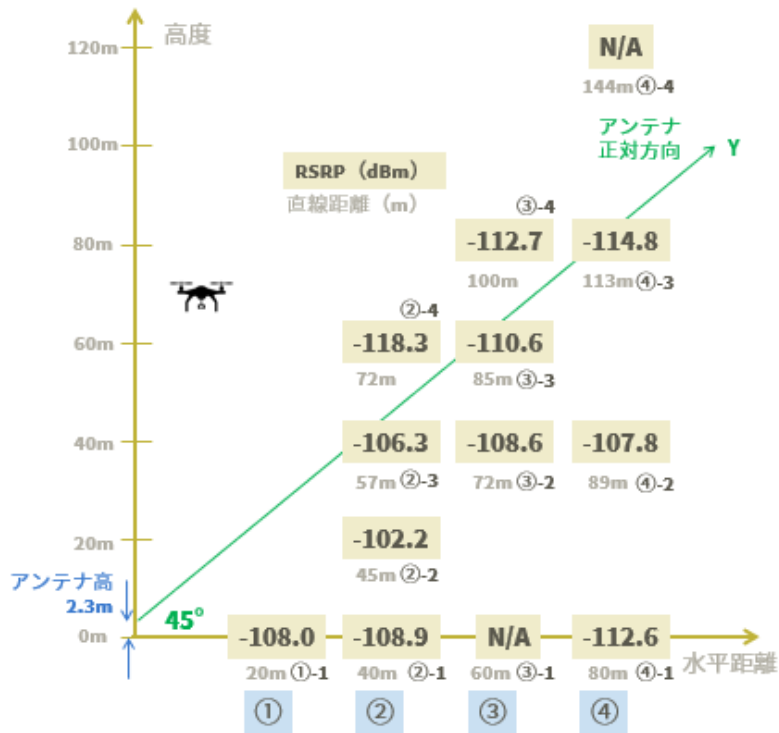


図 2.1-12 移動局の RSRP 測定結果 1

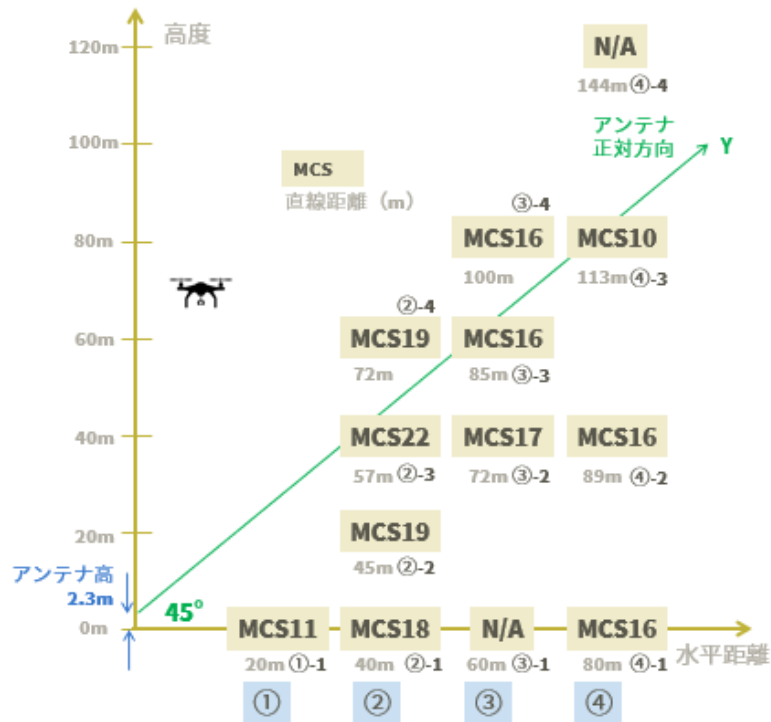


図 2.1-13 移動局の主要選択 MCS 測定結果 1

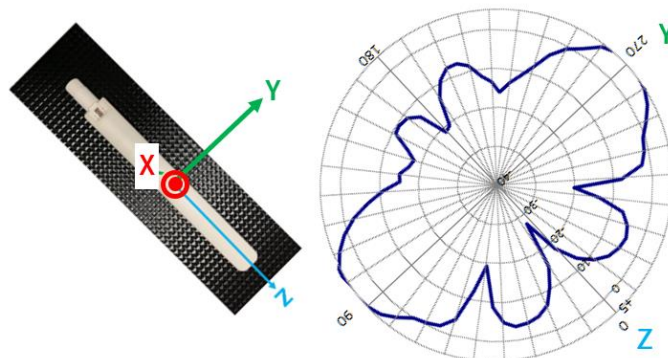


図 2.1-14 基地局アンテナ外観とアンテナパターン（角度を変えて再掲）

RSRP 測定結果の図 2.1-12 とスループット測定結果の図 2.1-11 と対比すると、上空においては RSRP 値が大きいほどスループット値も大きくなる相関関係は見えている。ここで、アンテナ正対方向の 3 点（測定ポイント②-3、③-3、④-3）についてスループット変動に加えて、選択 MCS と BLER の時間変動の様子を図 2.1-15～図 2.1-17 に示す。スループットをはじめ、選択 MCS と BLER は実際はもっと細かく変動しているが、ここでは 2 秒間の平均値をグラフ化している。なお、Throughput (Tx) は移動局側で測定したスループットで、ネットワーク階層の Layer1（物理層）で無線リソースにマッピングされて実際に無線上に送信された全トラフィック量である。実際には無線伝送して基地局で受信した時に誤りが発生しうるが、それも含んだトラフィック量である。Throughput (Rx) は基地局側で測定したス

ループットで、誤りなく正常に受信できたトラフィック量である。したがって、基本的には Throughput (Rx)は Throughput (Tx)を上回ることはない。BLERは10%付近、もしくはそれを下回る値で安定して推移しており、その結果スループットも安定し、Throughput (Tx)と Throughput (Rx)の差異がほとんどないことが分かる。

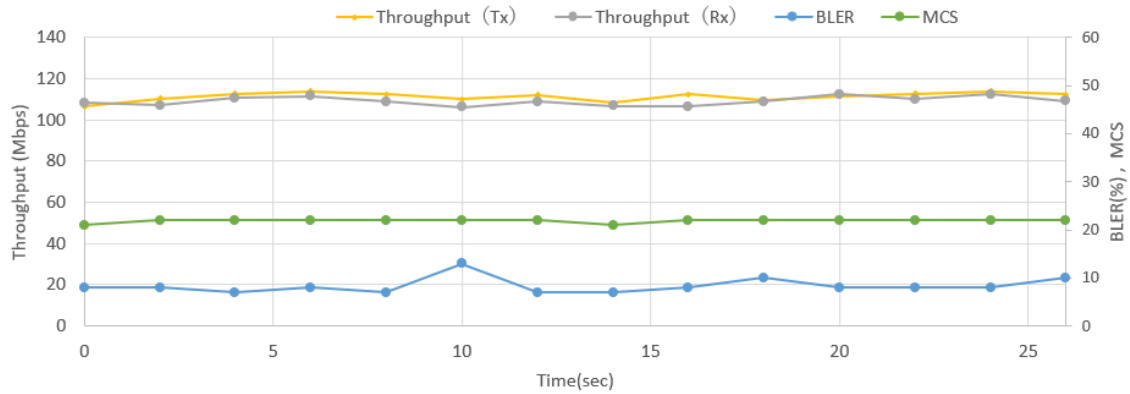


図 2.1-15 ポイント②-3におけるスループット時間変動

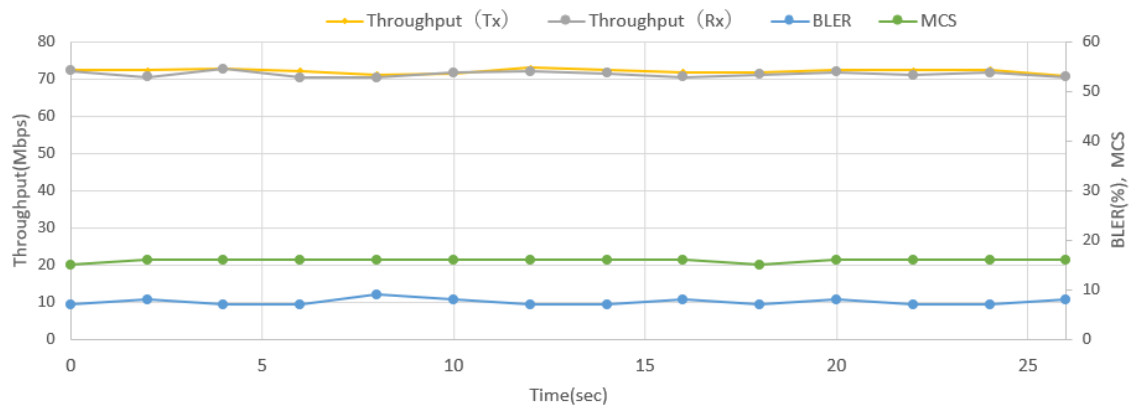


図 2.1-16 ポイント③-3におけるスループット時間変動

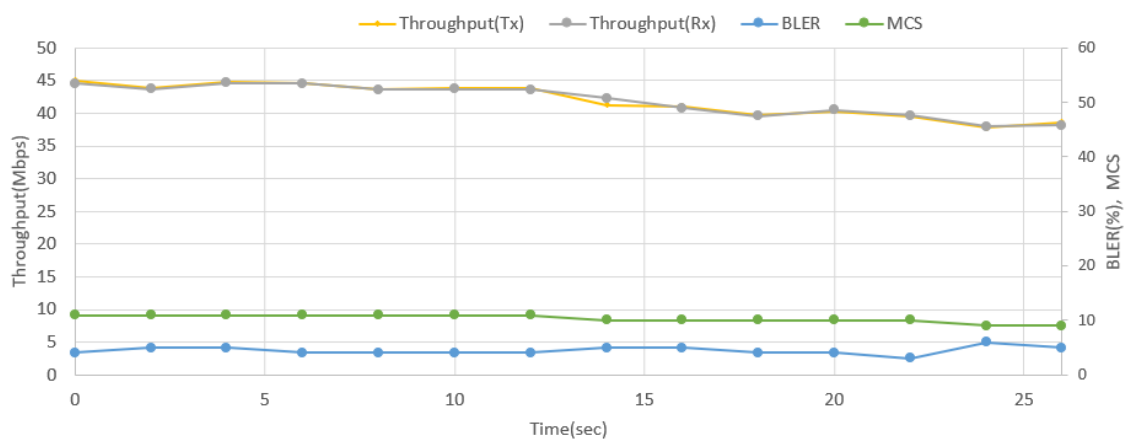


図 2.1-17 ポイント④-3におけるスループット時間変動

一方で、高度 0m のスループットに着目すると、図 2.1-11 で示すように、水平距離 60m でのスループット値が 75.5Mbps と最も大きく、より基地局に近い位置である水平距離 20m においては約 42.6Mbps と小さい値となっており、基地局装置からの距離とスループットは比例しないことが分かる。この特性については、アンテナパターンの観点からは、基地局アンテナから見た各測定ポイントの角度差（ポイント①-1 と④-1 とで約 5 度）はそれほど大きくないものの、図 2.1-14 における地平線方向（角度 315 度の方向）にゲインがノッチ状になっているため、実際にゲイン差が発生している可能性はある。一方で、後述するシミュレーション結果では、高度 0m においては移動局から工場建屋で反射して基地局に到達する反射波の方が支配的であることが示されており、その結果としてポイント①-1、②-1、④-1 とで距離に応じた RSRP の差が見られないと考えている。

高度 0m の 3 点（測定ポイント①-1、②-1、④-1）についてスループット変動に加えて、選択 MCS と BLER の時間変動の様子を図 2.1-18～図 2.1-20 に示す。なお、ポイント③-1 では無線ログ取得できていない。共通する点は、MCS がほぼ固定的に選択されているものの BLER の大きな変動が顕著に見られ、大きいときには 20% を超えていることである。スループットの大小に直接影響しているのは、選択している MCS と BLER である。図 2.1-18 に示すポイント①-1 におけるグラフにおいては、低めの MCS11 を安定的に選択しているにも関わらず、BLER は激しく揺れており最大で 20% を超えている。当然、BLER が大きくなった時に Throughput (Rx) は落ち込んでおり、さらに、Throughput (Tx) と Throughput (Rx) の差分量も大きくなっている。同様の結果は、図 2.1-19 に示すポイント②-1 におけるグラフにも見られる。図 2.1-20 に示すポイント④-1 においては、MCS16 が安定的に選択されている、BLER の変動はポイント①-1、②-1 に比べて小さくはあるものの、その値は 20% と大変大きく、測定時間を通して Throughput (Tx) と Throughput (Rx) の差分が 10% 程度発生していることが分かる。

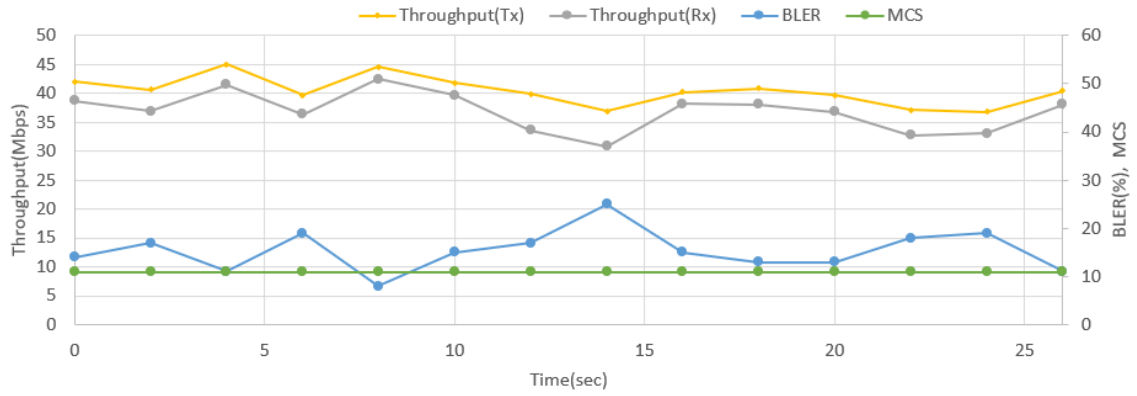


図 2.1-18 ポイント①-1におけるスループット時間変動

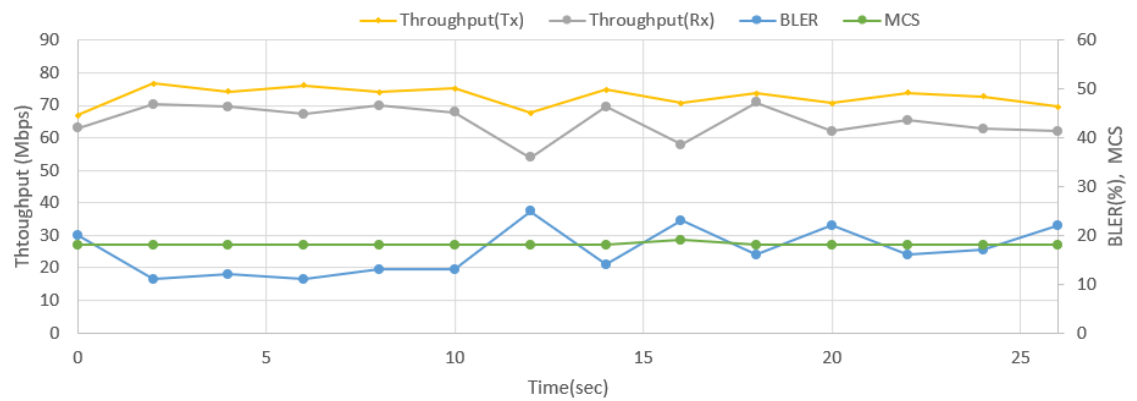


図 2.1-19 ポイント②-1におけるスループット時間変動

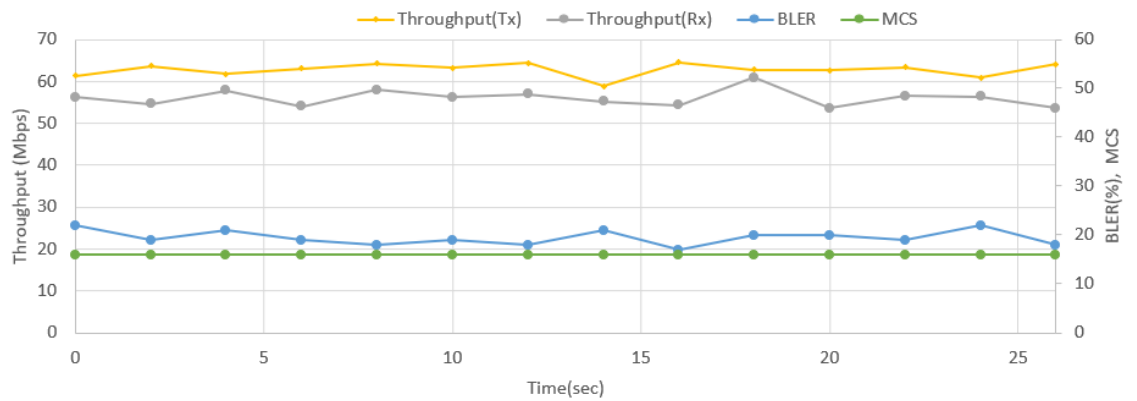


図 2.1-20 ポイント④-1におけるスループット時間変動

測定ポイント⑪、⑫については、スループット測定値のみ図 2.1-21 に示す。

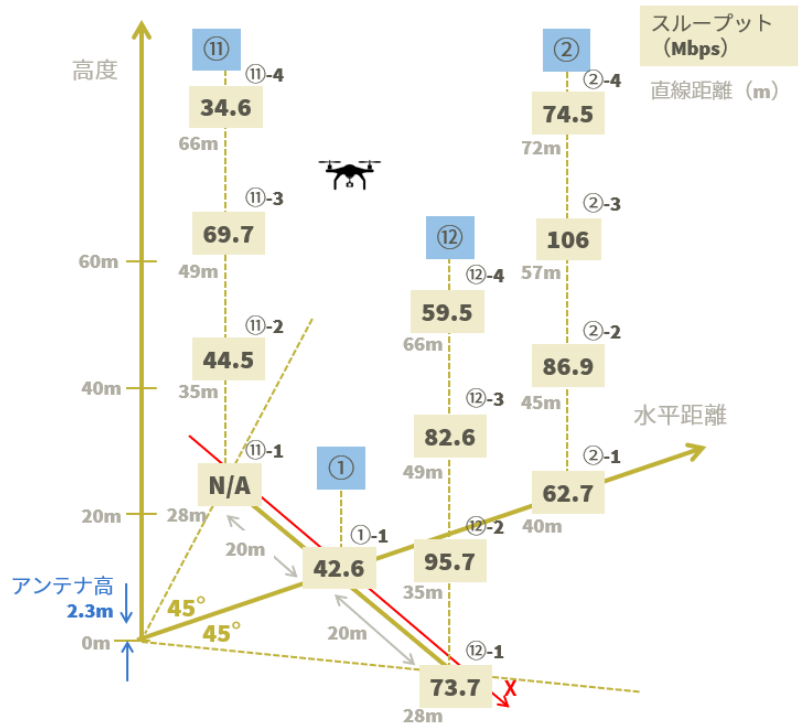


図 2.1-21 スループット測定結果 2

①-3 シミュレーションとの比較

レイトレース (Ray Trace) の手法を使用してシミュレーションを行った。構造物のモデルを図 2.1-22 に示す。図 2.1-2 にローカル 5G サービスエリアを構築した事業所内駐車場を示したが、南側に位置する工場建屋とテニスコートとの間で垣根を構成する樹木を構造物のモデルに反映している。工場建屋は高さ 5m のコンクリート、樹木はローカル 5G 基地局の前方 0.5m の位置に横一列に 2m 間隔で 7 本並んでおり、それぞれ高さ 3m としてモデル化している。

また、基地局と移動局それぞれのアンテナパターンも考慮している。基地局アンテナについては、図 2.1-6 に示したように XY 平面では一様のゲインがあり、XZ 平面および YZ 平面では指向性があり、それぞれ、X 軸方向、Y 軸方向にメインローブを形成する。また、移動局アンテナは指向性がなく XYZ 空間に一様に等ゲインがあるととした。

本試験の場合、ローカル 5G 移動局からローカル 5G 基地局へのアップリンクスループット値が測定対象である。したがって、移動局が送信する電波が工場建屋や樹木などの構造物で反射、回折して基地局に至る主要なレイ (素波) を計算した。

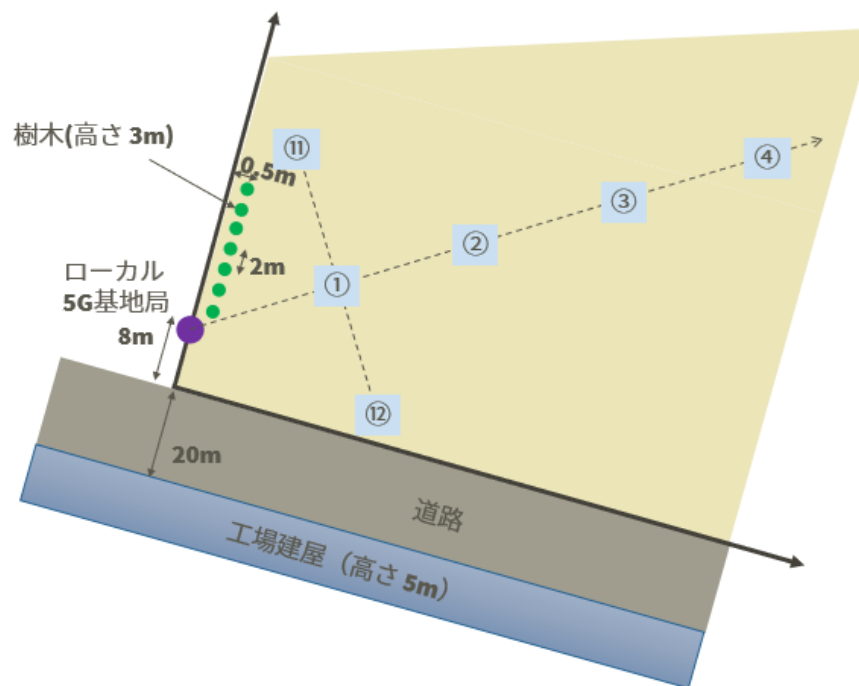
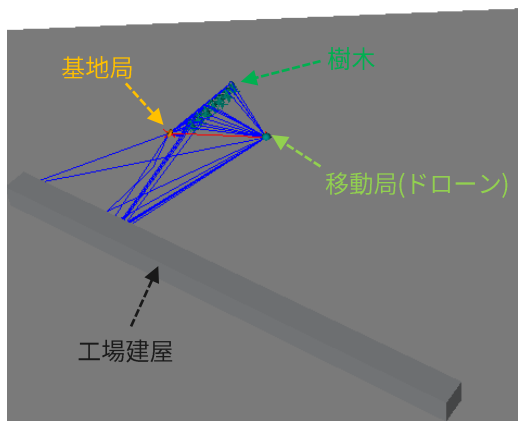
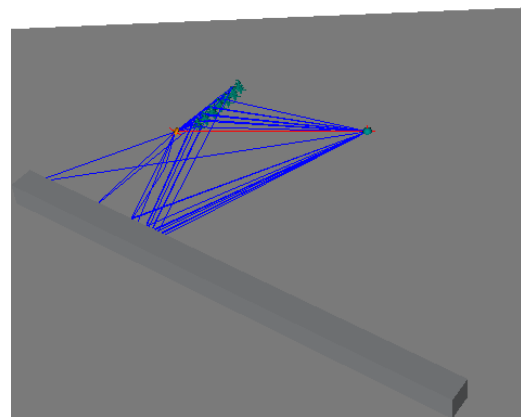


図 2.1-22 レイトレースシミュレーションのための構造物モデル

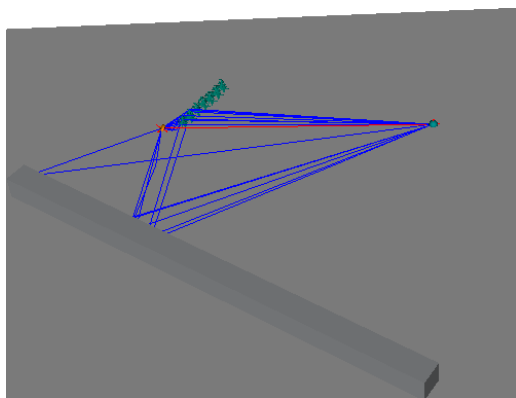
アンテナ正対面における高度 0m の測定ポイント (①-1、②-1、③-1、④-1) における主要素波のシミュレーション結果を示す。工場建屋に反射して基地局に到達する素波の割合が大きく、基地局のアンテナを仰角 45 度で上方向に向けていることも相まって、基地局における受信強度は移動局から直達する素波よりも支配的であることが分かった。



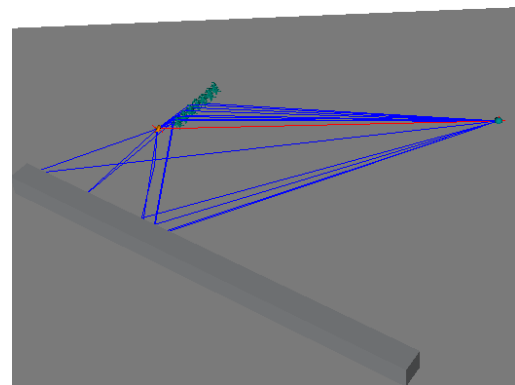
(a) ポイント①-1 (水平 20m、高度 0m)



(b) ポイント②-1 (水平 40m、高度 0m)



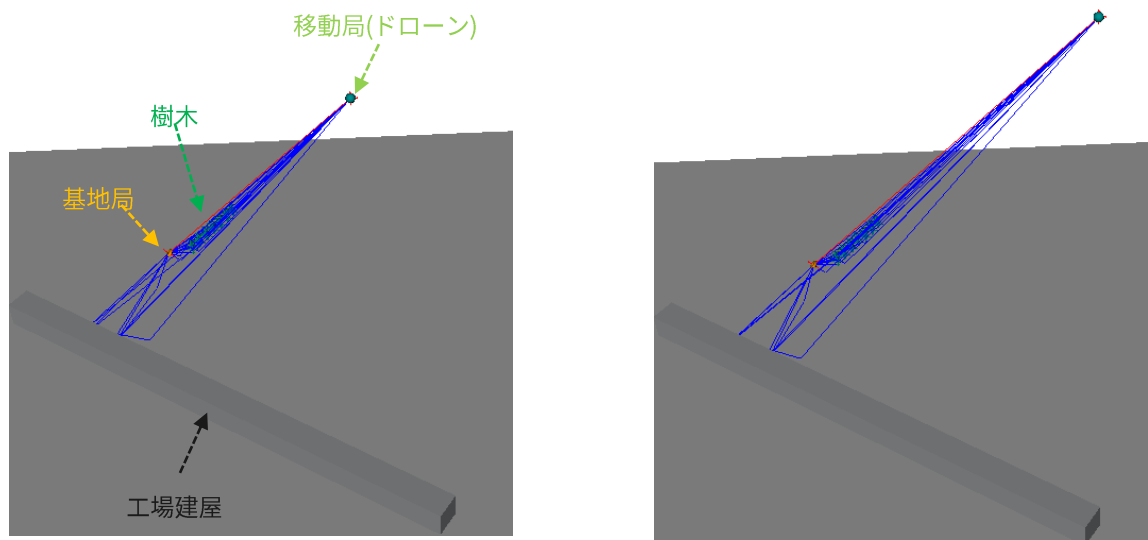
(c) ポイント③-1 (水平 60m、高度 0m)



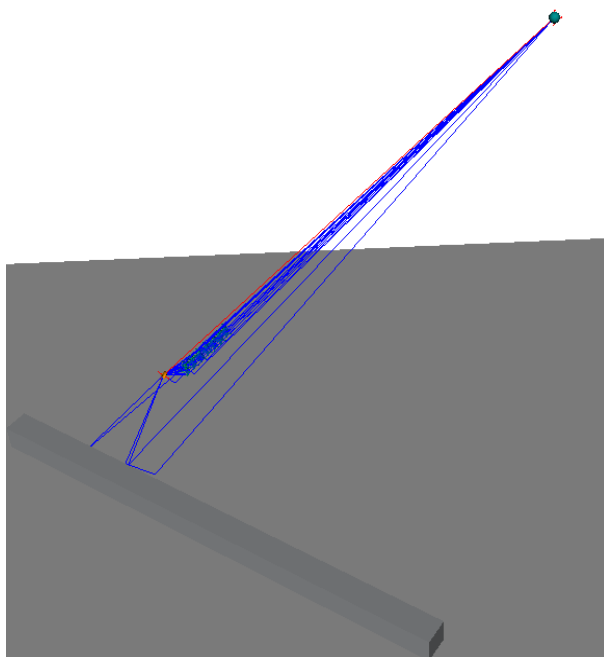
(d) ポイント④-1 (水平 80m、高度 0m)

図 2.1-23 レイトレースシミュレーション結果 (高度 0m)

アンテナ正対方向である仰角 45 度方向の測定ポイント (②-3、③-3、④-3) における主要素波のシミュレーション結果を示す。工場建屋に反射して基地局に到達する素波も見られるものの、高度が上がるほど、移動局から直達する素波が支配的になっていると言える。



(a) ポイント②-3 (水平 40m、高度 40m) (b) ポイント③-3 (水平 60m、高度 60m)



(c) ポイント①-1 (水平 80m、高度 80m)

図 2.1-24 レイトレースシミュレーション結果 (仰角 45 度方向)

このようにシミュレーションした主要な素波を合算して基地局における受信電力を求め、受信電力に応じて BLER10%となる MCS が選択されるという前提でスループット値を算出した結果が図 2.1-25 である。基地局アンテナの真正面の方向 (ア

ンテナの YZ 平面) において、水平距離 10~80m、高度 10~80m の範囲で、それぞれ 10m 間隔でプロットしている。実際の実験では、実験時間の制限で、高度 0m とアンテナ仰角 45 度の正対方向に焦点をおいて測定したこともあり、実験結果とシミュレーション結果の詳細な比較はできない。しかし、傾向としてはシミュレーション結果の方が実験結果よりも良好な結果となっていることは分かる。例えば、水平距離 40m、高度 40m において実験結果は 106Mbps であるが、シミュレーション結果では約 140Mbps 程度と約 3 割増しである。いくつかの要因が考えられる。まず、レイトレースシミュレーションでは使用するシミュレータにより受信電力の絶対値が変わりうることもあり、各測定ポイントの相対評価の目的で使用することが好適である点がある。また、今回使用したモデルの中では、工場建屋と樹木の 2 つのみを組み入れたが、その他の構造物、例えば、シャープの事業所外の建造物も考慮することで、より実験値に近い結果を導ける可能性もあるかもしれない。

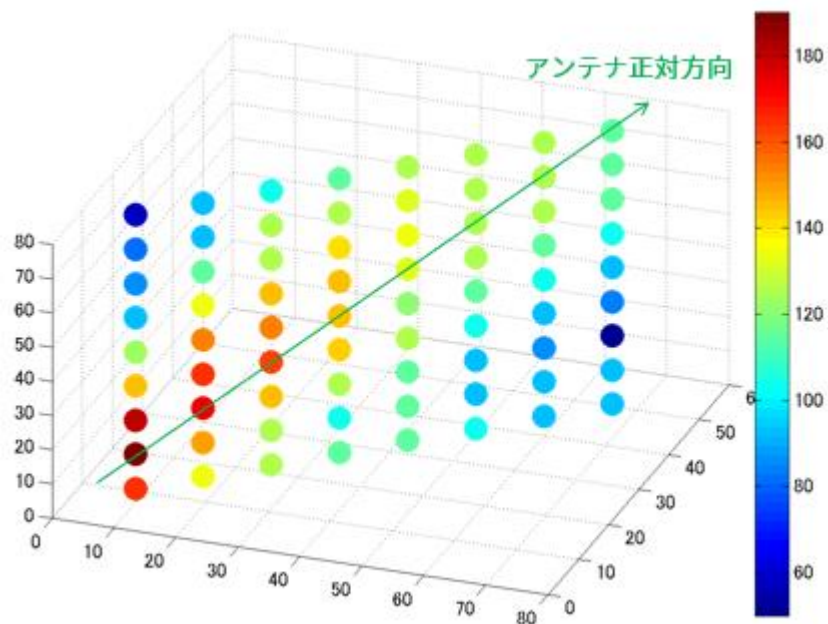


図 2.1-25 スループットシミュレーション結果

② 8K 映像伝送

既に開始している BS4K/8K 放送では 8K 映像の生データを約 1/1000 に圧縮して約 85Mbps のビットレートで放送している。本実験においても同等の平均 80Mbps の 8K 映像ストリーミングを実施することとした。この場合、可変レートで圧縮していることと、適用した映像伝送プロトコル SRT に制御のためのオーバーヘッドがあることから最大 20%程度トラフィック増加して実際には最大約 100Mbps に至ると見積もった。iperf でのスループット測定結果では、水平 40m、高度 40m において 106Mbps であり、平均的に安定して 100Mbps 以上を維持できていたため、最遠でその地点までは 80Mbps の 8K 映像伝送が可能であると推測した。

なお、SRT とは IP ネットワークで使用できる映像伝送プロトコルで、UDP ベースであるが、損失パケットを再送して回復する制御を行う。また、パケットの暗号化にも対応している。

実験の構成図を図 2.1-26 に示す。ドローンに載せる搭載物の機能は、8K カメラ、プロトコルコンバータ、ローカル 5G 移動局の少なくとも 3 つで構成される。本実験では、ローカル 5G 移動局として使用したスマートフォンが 8K 映像撮影カメラも搭載しているため、前述したプロトコルコンバータの機能もさらに実装することで、スマートフォン 1 台で前述した 3 つの機能が働くようにして機器構成をコンパクト化した。ローカル 5G 移動局は 8K 映像データを HEVC で圧縮して SRT プロトコル (PUSH 方式) に載せてローカル 5G 基地局に向けて送信し、一旦 SRT サーバに蓄積する。ローカル 5G 基地局側に設置された 8K デコーダは、SRT サーバから SRT プロトコルで 8K 映像データを読み出し (PULL 方式)、HEVC をデコードして映像再生し 8K モニタに映し出す。

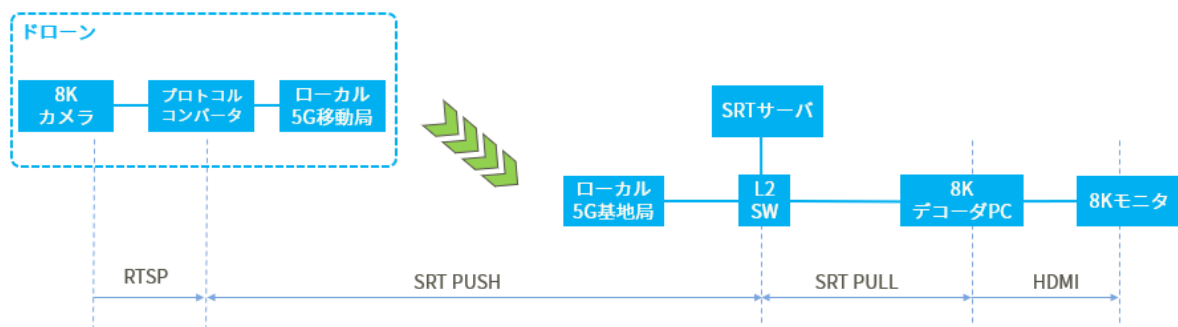


図 2.1-26 8K 映像伝送実験の構成図

実験では、まず、水平 20m、高度 0m の位置からドローンを離陸させて高度 20m まで上昇させホバリングし、基地局側に設置した 8K モニタにおいて映像再生を確認した。その後、ドローンを水平 30m、高度 30m の位置まで移動させ、ドローン本体を基地局正面方向から+90 度、-90 度水平方向回転 (ラダー) させても映像伝送を維持できることを確認した。+90 度、または-90 度よりも回転させると移動局と基地局の見通し

がドローン本体に遮られる位置関係となることもあり、映像再生はフレーム飛びするようになったが、ドローンの向きを0度方向に戻すと映像再生は復活した。その状態から、ドローンを最終目標地点に設定していた水平40m、高度40mの位置に移動させる途中で映像再生は停止した。映像ビットレートと最大無線伝送能力とのマージンが少ない地点では、映像ビットレートの変動や無線環境の変動により、安定した映像伝送が難しいことを示していると考えている。

図 2.1-27 に実験の様子を示す。SRT サーバ、8K デコーダ PC、8K モニタは車両内に配置している。車両内の 8K モニタに映し出されている映像は、上空のドローンからローカル 5G 無線伝送でライブ配信されてきたストリーミング映像となる。



図 2.1-27 8K 映像伝送の様子

2.1.2 8K映像と2K（又は4K）映像の比較実験

災害現場の映像撮影、橋梁やダム等のインフラ点検、地形・区画等の公共測量などの自治体業務において、2K（又は4K）カメラを搭載したドローンにより撮影した映像を利用する場合と、8Kカメラを搭載したドローンにより撮影した映像を利用する場合について、実証実験を実施し、「効率性」と「確実性」の2つの検証項目の観点から比較評価を行うことで、業務内容の明確化、8K映像の有効性、業務改善度合、技術課題の洗い出しおよび業務で想定される伝送データ量などを検討した。



実際には、下記の手順に従って事前調査と実験計画、実証実験、比較評価を行った。

- ① 協力各自治体等へのヒアリングを実施し、庁外業務で利用シーン毎に想定対象地区を選定
- ② 想定対象地区の現地視察を実施して実証実験の内容を具体化
- ③ 実証実験を実施し、8K映像と2K（又は4K）映像の比較評価を実施

実証実験の実施場所については、対象となる自治体業務ごとに、調査研究会に参加する奈良県庁を始めとする自治体や奈良県測量設計業協会から候補地を挙げていただき、実証実験の際に連携・協力を頂いた。また、実証実験結果の評価においても、調査研究会の構成員にご協力頂いた。

今回、5つの利用シーン（災害現場の映像撮影、橋梁のインフラ点検、地形・区画等の公共測量、道路インフラのスクリーニング検査、太陽光発電のインフラ点検）を想定して実証実験を実施しており、それらの協力自治体・協会、検討項目および比較評価項目を表 2.1-8 に示す。



表 2.1-8 想定利用シーンと評価項目

	想定利用シーン	協力自治体等	検証項目	評価項目
1	災害現場の映像撮影 	天川村	効率性	(a). 作業時間
				(b). ドローン操縦容易性
				(c). 安全性
			確実性	(d). 直上からの状況把握性能
				(e). 情報収集範囲
				(f). 現場地図作成精度
				(g). 非災害時の状況と災害時の状況の重ね合わせ精度
				(h). 情報の統合度合
2	橋梁のインフラ点検 	王寺町	効率性	(a). 作業時間
				(b). ドローン操縦容易性
				(c). 安全性
			確実性	(i). インフラ補修箇所発見性能

3	地形・区画等の公共測量 	奈良県測量設計業協会	効率性	(a). 作業時間
				(b). ドローン操縦容易性
				(c). 安全性
			確実性	(j). 誤差含有度合
4	道路インフラのスクリーニング検査 	天理市	効率性	(a). 作業時間
				(b). ドローン操縦容易性
				(c). 安全性
			確実性	(k). インフラ補修箇所発見性能
5	太陽光発電のインフラ点検 	シャープ エネルギーソリューション	効率性	(a). 作業時間
				(b). ドローン操縦容易性
				(c). 安全性
			確実性	(l). インフラ補修箇所発見性能

なお、実証実験における 8K のドローン撮影にあたっては、表 2.1-9 に記載のシャープ試作の 8K カメラを DJI 製ドローンに搭載した特別仕様のものを用いた。2K（又は 4K）カメラおよび赤外線カメラなどを搭載したドローン撮影は、適宜実証実験の内容に合わせて市販の既存機材を用いて比較対象とした。

表 2.1-9 8K 撮影機材

機器	型番等	主な仕様
8K カメラ 	シャープ 8K プロシューマカメラ(試作機) ※令和元年度 5G 総合実証試験にて実績あり	8K 映像ビットレート：20, 50, 100, 150, 200Mbps フレームレート：30fps
ドローン 	DJI Matrice600 ※カメラは上記 8K カメラを搭載	機体重量(バッテリー込み)：9.6kg 最大運搬重量：5.5kg 最大重量時飛行時間：約 18 分

以降の章で 5 つの実証実験の詳細内容について報告し、最後に映像の比較による実証実験の総論をまとめる。

(1) 災害現場の映像撮影

災害現場の実証実験場所を天川村様にご提供いただき、ドローンによる映像撮影を実施した。

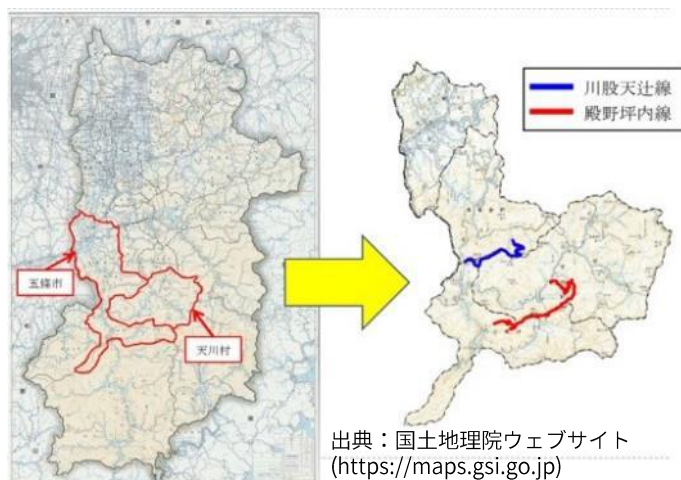


図 2.1-28 災害現場の実験対象（天川村）

【選定場所】

村内の以下の2か所を災害現場として想定して撮影を実施した。

- ① 坪内林道災害現場（土砂災害現場）
土砂崩れが起こった場所の監視を想定
- ② ふるさとセンターつどい（建屋被災現場）
建屋近くで土砂崩れの恐れがある場所を想定



図 2.1-29 災害現場の選定場所

【撮影日時】

1日目：2020年10月21日（坪内林道、ふるさとセンター）、天候：晴れ

2日目：2020年11月9日（坪内林道、みたらい溪谷）、天候：晴れのち曇り

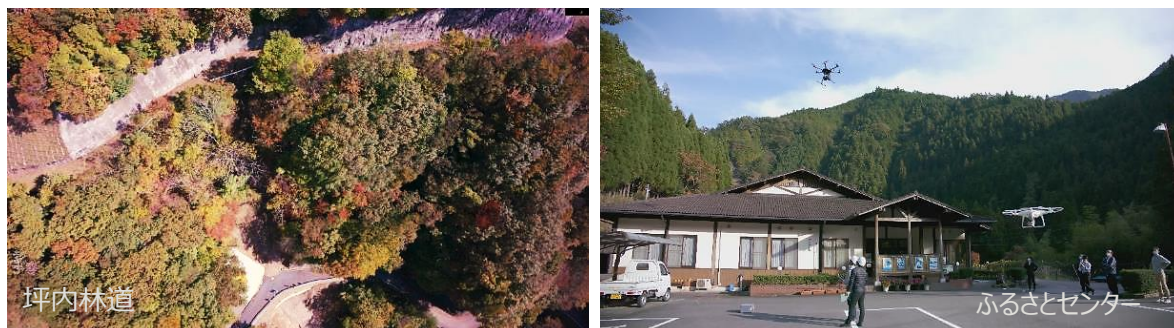


図 2.1-30 災害現場の撮影風景

【撮影機材】

使用した撮影機材を表 2.1-10 に示す。8K 撮影用として、シャープ開発品の 8K カメラを搭載した DJI Matrice 600 Pro、4K 撮影用として、DJI Phantom4 Pro を使用した。

表 2.1-10 災害現場の撮影機材

	8Kカメラ搭載ドローン	4Kカメラ搭載ドローン
機体本体名	DJI Matrice 600 Pro	DJI Phantom4 Pro
最大飛行速度・時間	40～65km/h・約18分	50～72km/h・約30分
対角寸法・全重量	1133mm・15kg	350mm・1.4kg
搭載カメラ	8Kカメラ（開発品）	標準搭載品
センサー	33MP, 16:9, 4/3inch	20MP, 3:2, 1inch
最大解像度	7680x4320(静止画) 7680x4320(30P動画)	5472x3648(静止画) 3840x2160(30P 動画)
レンズ焦点・画角	9mm・92°	8.8mm・84°
写真		

【撮影条件】

実証実験の各ドローンの撮影条件を表 2.1-11 に示す。8K カメラ搭載ドローンは動画のみを撮影し、4K カメラ搭載ドローンは動画および静止画を撮影した。なお、撮影データの動画データレートは SD カード記録時の設定値、静止画データサイズは撮影後のファイルサイズを参考にした。

表 2.1-11 災害現場の撮影条件

	8K カメラ搭載ドローン	4K カメラ搭載ドローン
レンズ焦点 (画角)	9mm(92°)	8.8mm (84°)
動画解像度	7680×4320	3840×2160
動画フレームレート	29.97fps	23.98fps
動画コーデック	HEVC/H.265	HEVC/H.265
動画データレート	200Mbps	100Mbps
静止画解像度	—	5472x3648
静止画撮影間隔	—	遠隔手動操作
静止画コーデック	—	JPEG
静止画データサイズ	—	約 7MB/枚

【実験内容】

実験内容としては、以下の観点を想定して計画した。

- ①土砂災害現場：土砂崩れの災害現場を発見、詳細な災害状況の撮影データを取得
 - ②建屋被災現場：建屋含めた被災現場を発見、詳細な被災状況の撮影データを取得
- また、各現場における飛行ルートは以下の通りである。

① 土砂災害現場：坪内林道災害現場

- ・俯瞰撮影：8K および 4K カメラにて、高度 120m からの俯瞰撮影
- ・詳細撮影：8K および 4K カメラにて、10m 毎に高度を変えて詳細撮影

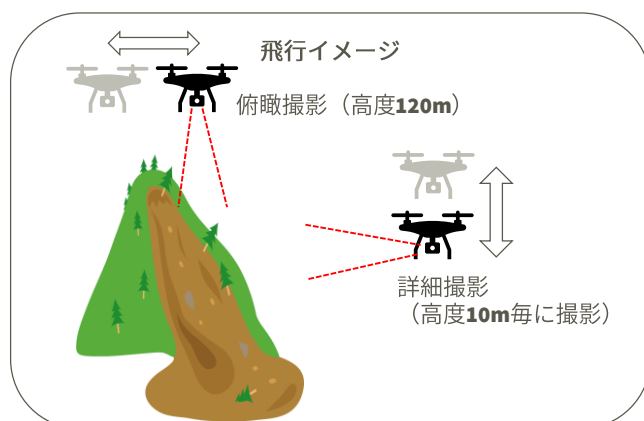


図 2.1-31 災害現場の飛行ルート (坪内林道)

② 建屋被災現場：ふるさとセンターつどい

- ・俯瞰撮影：8K および 4K カメラにて、高度 120m からの俯瞰撮影
- ・詳細撮影：8K および 4K カメラにて、10m 毎に高度を変えて詳細撮影



図 2.1-32 災害現場の飛行ルート（ふるさとセンター）

【評価項目】

実証実験で得た情報および撮影データ等を、表 2.1-12 の評価項目を参考にして検証した。

表 2.1-12 災害現場の評価項目詳細

検討項目	評価項目	内容詳細
効率性	(a). 作業時間	単位撮影時間当たりの撮影面積に関して定量的な比較を行う。
	(b). ドローン操縦容易性	自律およびマニュアル操作の時間比およびドローンの誘導精度の比較を行う。
	(c). 安全性	落下安全性確保の為に対象物と十分な離間距離を取ったときの撮影精度と撮影範囲の比較を行う。
確実性	(d). 直上からの状況把握	ドローン直下の状況把握可能な範囲と精度の比較を行う。
	(e). 情報収集範囲	例えば、瓦礫などがあって立ち入れない地域を想定した場所の上空などからの撮影範囲と精度の比較を行う。さらに、画像処理を用いた救助率向上の可能性検証及びその比較を行う。
	(f). 現場地図作成精度	災害時を想定した評定点の数が不十分、あるいは存在しない場面における、災害現場地図の作成可否と作成精度の比較を行う。さらに、例えば、流出した土砂の厚さの検出可否や検出精度の比較を行う。
	(g). 非災害時の状況と災害時の状況の重ね合わせ精度	被災状況を一目瞭然とするために、非災害時の状況を撮影していた場合及び国土地理院等が無償公開している情報を利用した場合の双方における重ね合わせ地図の作成の可否と作成精度の比較を行う。

	(h). 情報の統合度合	例えば、現場救助隊員に持たせた GPS のトラッキングデータとの重ね合わせや、探索漏れの可視化の可否や精度の比較を行う。
--	--------------	--

【検証結果】

検討項目「効率性」「確実性」の評価項目ごとの検証結果を示す。

■ 「効率性」の検証結果

作業時間、ドローン操縦容易性、安全性について述べる。

(a). 作業時間

作業時間の評価項目の実証として、「林道沿いの調査の場合」、「役場から災害現場へ直行の場合」、「年間の試算」の3点について検証した。

<林道沿いの調査の場合>

坪内林道入り口から崩落現場までの林道沿い 6.6km を調査したと仮定した場合の全体の移動距離と作業時間の比較グラフを図 2.1-33 に示す。林道調査時間の現状は車で 30 分以上かかるが、ドローンで上空 70m を飛行する時間は約 10 分にとどまる。なお、現状の調査時間は車で崩落現場まで順調に往復したとして最小時間を算出した。途中がれきなどがあると取り除くなどして経路の安全確保にも時間がかかるため、実際はさらに移動時間を要すると考えられる。

さらに、役場と現場の移動時間を考慮すると、調査データを役場で把握できるまでにかかる時間は 80 分以上必要となる。一方、ドローンを活用する場合 18 分となり、作業時間としては約 7 割以上削減可能である。



図 2.1-33 災害現場の作業時間（林道沿いの調査の場合）

< 役場から災害現場へ直行の場合 >

崩落現場の位置が判明しており、詳細調査が必要であると仮定した場合の移動距離と作業時間の比較グラフを図 2.1-34 に示す。車の場合、現地まで片道 40 分、撮影 60 分必要と算出された。一方、ドローンは直線距離で崩落現場へ向かうことが可能で、役場→林道崩落現場 2600m、高低差 554m なので直線距離 2658m を往復するのみである。そのため、時速 40km で換算すると現場まで 4 分、撮影 4 分、帰りも 4 分の合計 12 分で作業が完了する。ドローン活用で災害現場へ直行の場合、作業時間としては、約 9 割以上の削減効果を見込めることが分かった。

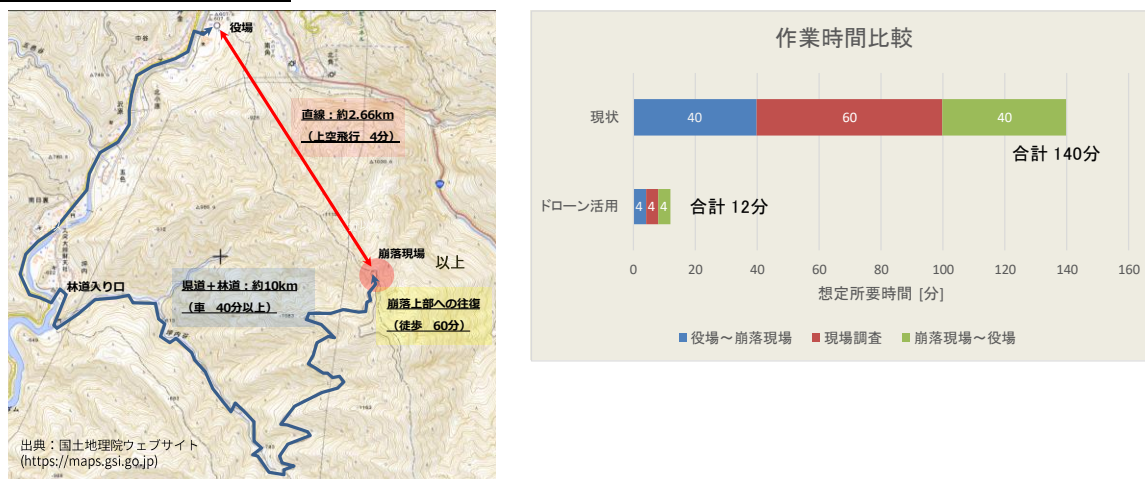


図 2.1-34 災害現場の作業時間（災害現場へ直行の場合）

< 年間の試算 >

続いて、年間の作業時間（人日/年）を試算した。前提条件として、村管理林道が延べ約 62km・35 か所（1 か所平均約 1.8km）とすると、

・現状の人手の場合：

発災 1 回あたり、10 人/4 班で調査対応、平均 1.5 日かかる。
年 2 回の発災として、30 人日/年。（天川村役場の情報）

・ドローン活用の場合：

1 か所平均 1.8km あたり、調査時間約 10 分とする。全箇所約 6 時間、
村内移動の時間を加味、ドローン担当 2 人が 2 日で 3 時間ずつ調査を行い、
年 2 回の発災として、 $2 \times 2 \times 2 = 8$ 人日/年。

となり、30 人日/年がドローン活用で 8 人日/年に削減可能となる。すなわち、ドローン活用で年間約 7 割の作業時間の削減効果を見込めることがわかった。

(b). ドローン操縦容易性

<映像枚数と撮影範囲の比較>

坪内林道入り口から崩落現場までの林道沿い 6.6km をドローンで撮影調査したと仮定した場合の写真1枚当たりの面積、必要高度、撮影枚数を図 2.1-35 に示す。8K /4K 静止画を同一解像度、地上画素寸法 1 cm/ピクセルを前提で撮影したとして撮影枚数を比較すると、8K 画角で約 130 枚、4K 画角で約 217 枚となり、8K は 4K の 6 割の枚数で撮影が可能である。8K 画角が広いことにより林道沿いの周辺状況を撮影範囲に楽に収めることができるため、ドローンの操縦は4Kに比べ容易であるといえる。



図 2.1-35 災害現場のドローン操縦容易性

(c). 安全性

<障害物回避性の比較>

現場では木々への引っかけりリスクが無視できなかった。図 2.1-36 は地上画素寸法 1cm/ピクセルを確保するために、4K ドローンで高度 36m、8K ドローンで高度 73m にて撮影した画像である。4K ドローンではすぐ目の前に木々が迫っており、衝突のリスクを憂慮しなければならないのに対して、8K ドローンでは木々はドローンの十分下方にあり余裕をもって撮影が可能であった。したがって、飛行に関するドローンの安全性は8Kのほうが優れていることが分かった。

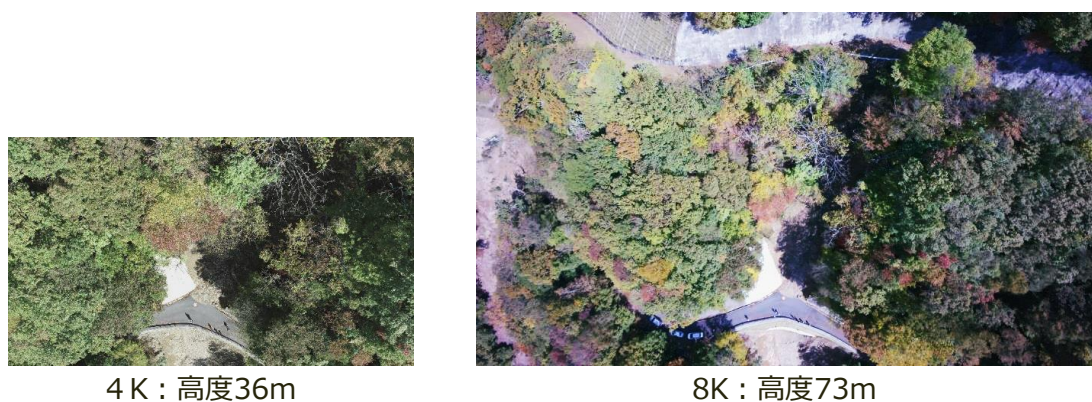


図 2.1-36 災害現場の安全性 (坪内林道土砂災害現場)

■ 「確実性」の検証結果

直上からの状況把握/情報収集範囲、現場地図作成精度/非災害時の状況と災害時の状況の重ね合わせ精度、情報の統合度合についての検証結果を述べる。

(d)/(e). 直上からの状況把握/情報収集範囲

<解像度比較>

解像度が高ければ、被災状況の状況解析の向上が期待できる。図 2.1-37、図 2.1-38、図 2.1-39 は同一高度 30m 上空より 4K/8K ドローンで撮影したものである。図 2.1-37 ではガードレールの状況が、図 2.1-38 では補修箇所のクラックの正確な幅が 8K のほうが精度よく見て取れる。また、図 2.1-39 では 8K のほうが排水路の蛇腹が確認でき破損がないことが判別でき、同一高度では、8K は 4K に比べてより詳細状況を取得し、被災状況の状況解析の向上を見込めることが確認できた。

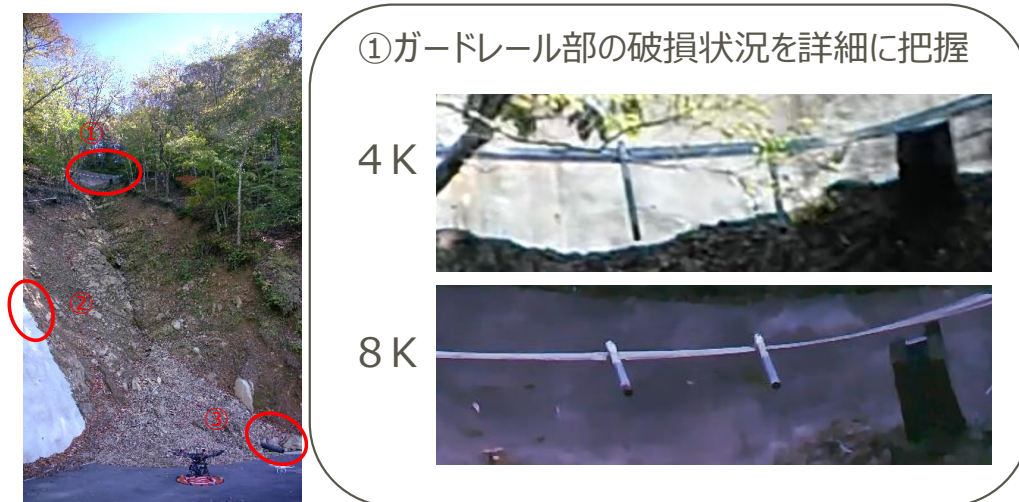


図 2.1-37 災害現場の解像度比較 (①ガードレール)



図 2.1-38 災害現場の解像度比較 (②補修箇所クラック)



図 2.1-39 災害現場の解像度比較 (③排水路)

<画角比較>

画角が広ければ、発見率および救助率向上が期待できる。図 2.1-40 はふるさとセンター上空 120m から 4K/8K ドローンで俯瞰撮影したものである。同一高度では、8K は 4K に比べて広い画角を確保できることを確認した。

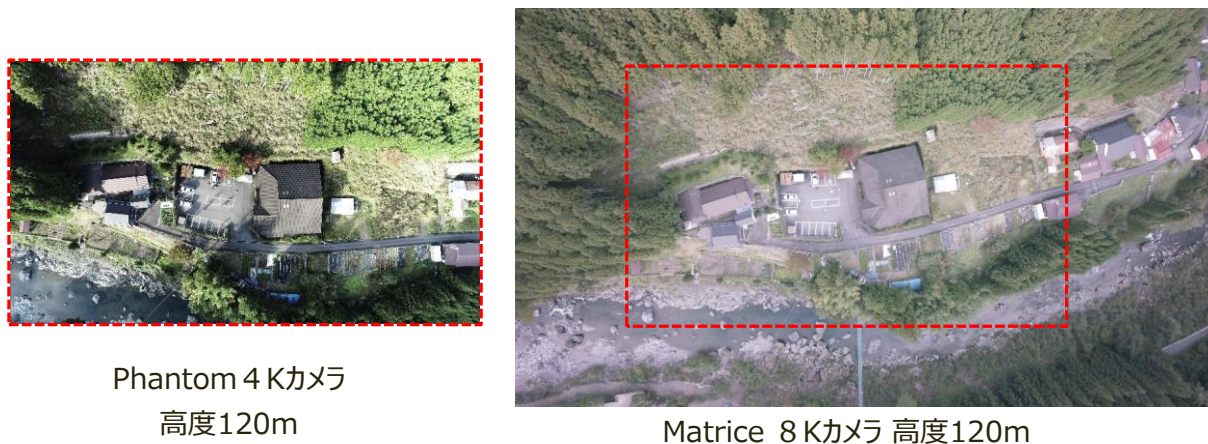


図 2.1-40 災害現場の画角比較 (ふるさとセンター上空)

<ダイナミックレンジ比較>

被災状況の撮影において、情報の欠落は重大な判断の過誤を起こす可能性がある。撮影実験では、図 2.1-41 のように Phantom の 4K カメラにおいて撮影画像に白飛び／黒つぶれが発生し被災状況が見えにくい状況となり、ドローンを操作して測光ポイントをずらし丁度よい明るさになるようにするか、都度手動による露光調整を必要とした。一方、広いダイナミックレンジ (HDR 対応) の 8K カメラでは暗い部分明るい部分の両方を同時に撮影できており、見たい箇所のデータを確実に取得できる優位点があることを確認した。



図 2.1-41 災害現場のダイナミックレンジ比較

(f)/(g). 現場地図作成精度/非災害時の状況と災害時の状況の重ね合わせ精度

この評価項目については、今回の機材およびロケーション・シチュエーションでは比較調査は困難であった。(f) 現場地図作成精度に関しては後述の実証実験「地形、区画等の公共測量」にて検証した。

(h) 情報の統合度合

<GPS ロスによる情報損失>

今回の実証実験では、図 2.1-42 に示すように山間部での現場作業中に「GPS が入らない・入りにくい」状況がたびたび発生した。このとき、ドローンの安定飛行が困難になり、取得した映像が揺れ所望の画像が得られないケースが多々あった。将来的に目視外にて飛行させる際にはGPS データは必要な情報である。この状況を打開する方策の1つとして、GPS をキャッチできる所まで高度を上げてGPS ロスを解消してから撮影作業を開始するといったこと何度か試みた。高く飛ばばGPS を捕捉しやすいため、最初から高度をとって詳細観測できる8Kは情報損失を防ぐ面でも優位といえる。



図 2.1-42 災害現場の情報の統合度合

【まとめ】

天川村における災害を想定して2か所(坪内林道土砂災害現場、ふるさとセンター)の現場を選定し、8K/4K ドローン撮影による実証実験および調査検証を実施した。

検討項目「効率性」「確実性」の評価項目ごとの検証結果を表 2.1-13 にまとめる。

表 2.1-13 災害現場の実証実験における検証結果のまとめ

検討項目	評価項目	検証結果
効率性	(a). 作業時間	<ul style="list-style-type: none"> ・ 林道沿いの調査の場合、ドローンを用いることで作業時間としては約7割以上削減可能 ・ 災害現場へドローン直行の場合、作業時間としては、約9割以上の削減効果 ・ 年間にすると約7割の作業時間削減効果がある
	(b). ドローン操縦容易性	同一解像度での比較では、8K は 4K より撮影範囲を広げることで6割の枚数で撮影が可能
	(c). 安全性	8K は 4K の倍の高度で同等画質を確保でき、飛行安全性に優れる
確実性	(d). 直上からの状況把握	「解像度」「画角」「ダイナミックレンジ」を比較検証し、8K による状況把握性能/情報収集範囲の優位性を画質比較にて確認
	(e). 情報収集範囲	
	(f). 現場地図作成精度	(別実証実験にて検証)
	(g). 非災害時の状況と災害時の状況の重ね合わせ精度	(今回の実証実験では調査困難であり、課題事項とした)
	(h) 情報の統合度合	山間部における GPS ロスによる情報損失を体感し、回避策として8K による高度をとって観測できる優位点を確認

(2) 橋梁のインフラ点検

橋梁のインフラ点検の実証実験場所を王寺町様にご提供いただき、株式会社ミラテクドローン様と連携してドローンによる点検撮影を実施した。

【選定場所】

図 2.1-43 の王寺町にある葛下川の候補4橋のうち2橋（①達磨橋、②王寺大橋）を、今回の実験場所として選定した。



図 2.1-43 橋梁点検の選定場所

【撮影日時】

2020年11月19日（事前ロケ、明神山）、天候晴れのち曇り

2020年12月 9日（達磨橋、王寺大橋 本番撮影）、天候晴れ



図 2.1-44 橋梁点検の撮影風景

【撮影機材】

使用した撮影機材を表 2.1-14 に示す。8K 撮影用としてシャープ開発品の 8K カメラを搭載した DJI Matrice 600 Pro を使用し、株式会社ミラテクドローン様より赤外線カメラと可視 4K カメラの 2 台を搭載したドローンおよび 5K カメラを搭載したドローンを提供いただいて撮影した。

表 2.1-14 橋梁点検の撮影機材

	8Kカメラ搭載ドローン (シャープ)	赤外線+4K可視カメラ 搭載ドローン <small>(提供：株式会社ミラテクドローン様)</small>	5Kカメラ搭載ドローン
機体本体名	DJI Matrice 600 Pro	DJI Matrice 210 RTK	
最大飛行速度・時間	40～65km/h・約18分	61～81km/h・約24分	
対角寸法・全重量	1133mm・15kg(8K含)	643mm・4.91kg	
搭載カメラ	8Kカメラ(開発品)	DJI Zenmuse XT2	DJI Zenmuse X5S
センサー	33MP、16:9、4/3inch	12MP、4:3、1/1.7inch	20MP、4:3、4/3inch
解像度	7680x4320(静止画) 7680x4320(30P動画)	4000x3000(可視静止画) 640x512(赤外線、<50mK)	5280x3956(静止画)
レンズ焦点・画角	18mm・62°	8mm・57°	15mm・72°
写真			 XT2 Dual Sensor  X5S 5Kcamera

【撮影条件】

実証実験の各ドローンの撮影条件を表 2.1-15 に示す。8K ドローンは動画および静止画を撮影し、赤外線/4K および 5K ドローンは静止画を撮影した。なお、撮影データの動画データレートはSDカード記録時の設定値、静止画データサイズは撮影後のファイルサイズを参考にした。

表 2.1-15 橋梁点検の撮影条件

	8K ドローン	赤外線/4K ドローン	5K ドローン
レンズ焦点(画角)	18mm(62°)	19mm(32°)/8mm(57°)	15mm(72°)
動画解像度	7680x4320	—	—
動画フレームレート	29.97fps	—	—
動画コーデック	HEVC/H.265	—	—
動画データレート	200Mbps	—	—
静止画解像度	7680x4320(8K)	640x512/4000x3000(4K)	5280x3956(5K)
静止画撮影間隔	5秒間隔	2秒間隔	2秒間隔
静止画コーデック	JPEG	JPEG	JPEG
静止画データサイズ	約15MB/枚	約900KB/枚 / 約2MB/枚	約9MB/枚

【実験内容】

実験内容としては、以下の観点を想定して計画した。

① 赤外線 撮影点検：

目視では確認できないひび割れや破損状況の効率的な発見と検出

② 可視 撮影点検

低解像度の赤外線では確認できない微細なひび割れや破損状況の発見と検出

また、各現場における飛行ルートは図 2.1-45 に示す通り、橋桁の側面撮影および橋脚の側面撮影、そして王寺大橋は橋下に潜り込んでの橋脚撮影を実施した。通常、点検では対象が静止物のため静止画を主に撮影に用いるが、8K ドローンでは動画でも撮影記録した。

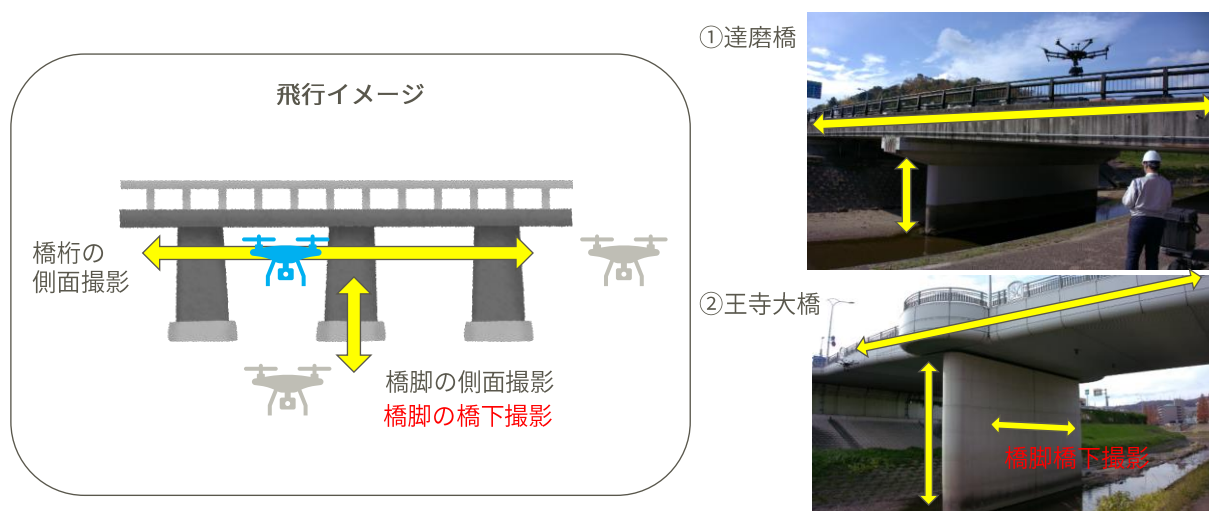


図 2.1-45 橋梁点検の飛行ルート

【評価項目】

実証実験で得た情報および撮影データ等を、表 2.1-16 の評価項目内容を参考にして検証した。

表 2.1-16 災害現場の評価項目詳細

検討項目	評価項目	内容詳細
効率性	(a). 作業時間	点検箇所当たりの撮影時間に関して定量的な比較を行う。
	(b). ドローン操縦容易性	自律及びマニュアル操作の時間比、ドローンの姿勢安定性の比較を行います。例えば、GPS を捕捉しにくい橋脚検査において評価を行う。
	(c). 安全性	検査対象物とドローンの衝突安全性確保のために、十分な離隔距離を取った場合の撮影精度と撮影範囲の比較を行う。

確実性	(i). インフラ補修箇所発見性能	一定面積内で検出できる、ひびの長さや幅に対する精度及び欠陥の検出限界を、近接目視同等の画像をリファレンスとして比較を行う。
-----	-------------------	---

【検証結果】

検討項目「効率性」「確実性」の評価項目ごとの検証結果を示す。

■ 「効率性」の検証結果

作業時間、ドローン操縦容易性、安全性について述べる。

(a). 作業時間

<達磨橋を点検するとした場合の概算>

作業時間の評価項目の実証として、達磨橋を点検するとした場合の概算の作業時間を算出検証した。なお、現状の人手による点検作業を図 2.1-46 のような橋梁点検車を使用すると仮定する。

・現状の人手の場合

点検面積＝約 138m² (橋桁側面＋橋脚側面) × 2 (両側)

達磨橋の点検面積＝約 276m²

橋梁点検車使用による目視点検の場合、1日の点検面積 450m²/日 8h

(※参考文献 1、2)

よって現状人手による点検時間は、

達磨橋の点検時間＝約 4 時間

(仮定：交通封鎖、準備・撤収作業等の前後 1h ずつ含まず)

・ドローン使用の場合

今回の実証実験での撮影時間 (橋桁側面＋橋脚側面) 片側のみ

[8K] 9分 (静止画 5 秒間隔 75 枚)

※カメラの都合で 5 秒間隔、もし 2 秒間隔でできたら撮影時間約 4 分

[5K] 7分 (静止画 2 秒間隔 122 枚)

これらから、片側最大約 10 分の撮影時間とすると両側での点検時間は、

達磨橋の点検時間＝約 20 分

(仮定：ドローンの前後準備作業含まず)

以上により、人手による点検作業に比べ、ドローン活用による点検作業は約 91%の作業時間削減が見込める。

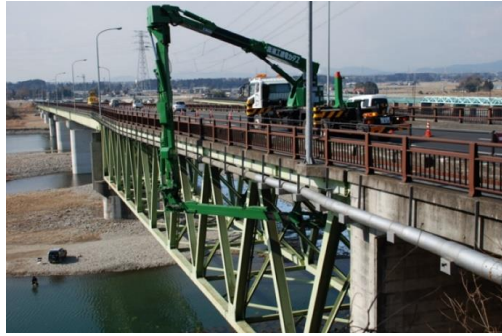


図 2.1-46 橋梁点検の橋脚点検車（出典：※参考文献 2）

※参考文献 1：国土交通省 橋梁定期点検業務等積算基準（平成 31 年）

※参考文献 2：土木学会 土木建設技術発表会（平成 10 年）

(b). ドローン操縦容易性

<撮影位置による操縦容易性>

橋梁に対するドローンの撮影位置（橋梁側面、橋梁上面、橋梁下面）によって操縦の容易性が変化することがわかった。

橋梁側面：問題なく近づいて撮影ができる

橋梁上面：現状規制により、国道および県道上空のドローン撮影不可

橋梁下面：図 2.1-47 に示すようないくつかの課題を確認した

- ・ 達磨橋など橋下が狭い橋梁は、ドローン飛行進入危険のため今回撮影断念
- ・ 橋梁の道路真下が撮影できない ⇒ 点検には上面カメラ付きのドローンが必要
- ・ GPS ロスが発生。操縦が難しい ⇒ GPS なしで飛行できる自律航行が必要
- ・ 気流によりドローンが壁に吸い付く現象 ⇒ 常に微調整の飛行操作が必要

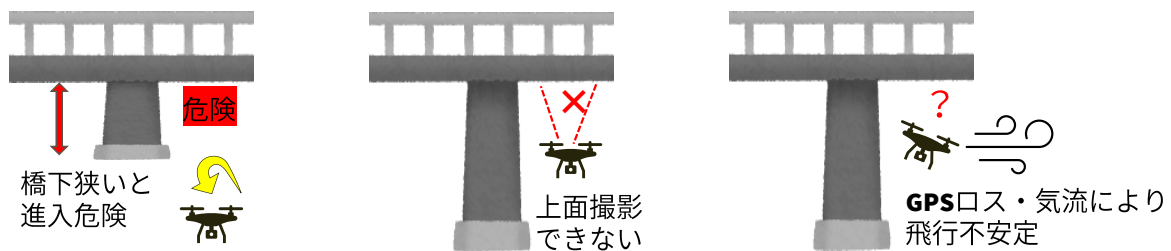


図 2.1-47 橋梁点検のドローン操縦容易性

(c). 安全性

<衝突回避の比較>

橋梁下面では、GPS ロスと吸い込み現象による橋梁への衝突リスクがあり、図 2.1-48 に示すように横からの安全確認をしながら、細心の操縦をする必要があった。8K カメラドローンでは、5K ドローンカメラと比較して撮影距離を約 2 倍確保できる

ことから、横からの安全確認も容易であり余裕をもって撮影できた。したがって、撮影距離をとって詳細観測できる8Kは安全面で優位性があるといえる。



GPSロス状態で5Kカメラドローンで撮影。
正面からの距離感わかりづらいため、
できる限り横からの安全確認を実施

GPSロス状態で8Kカメラドローンで撮影。
ある程度余裕をもって離れて撮影できるため、
安全確認も容易

図 2.1-48 橋梁点検の安全性

■ 「確実性」の検証結果

インフラ補修箇所発見性能について、赤外線カメラによる撮影と8K/5K/4K可視カメラによる撮影における検証結果を述べる。

(i). インフラ補修箇所発見性能

<赤外線撮影による点検 ①達磨橋>

達磨橋の橋桁、橋脚の側面を赤外線撮影した結果を図2.1-49に示す。橋の側面全長約40mを、静止画2秒間隔で撮影し、撮影枚数33枚程度となった。

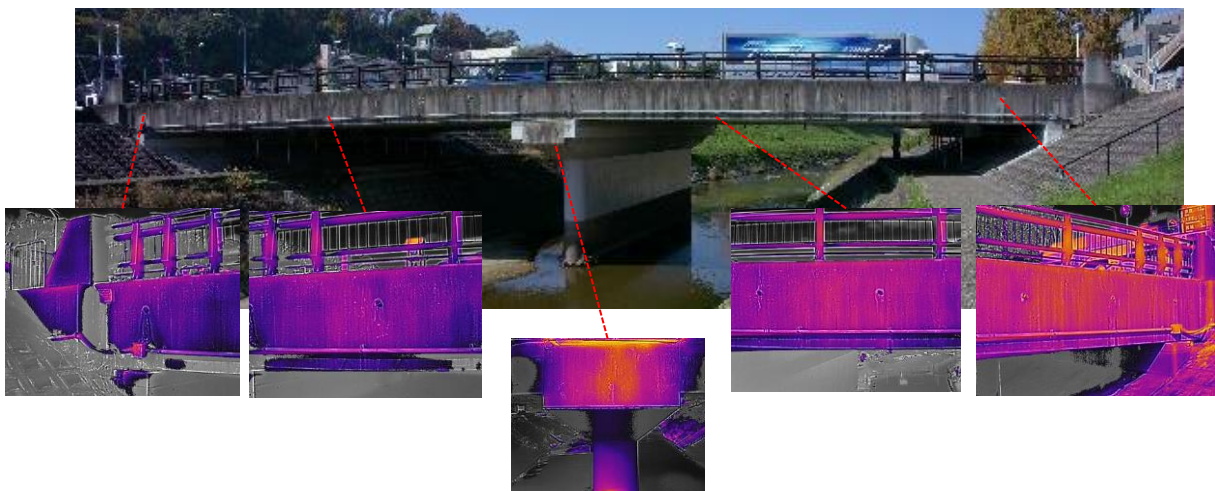
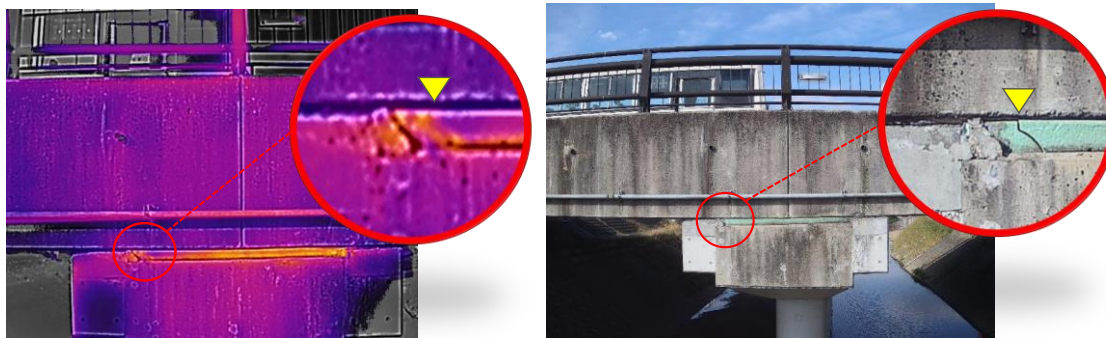


図 2.1-49 橋梁点検の赤外線撮影による点検 (①達磨橋)

図 2.1-50 の左画像に示すように、赤外線画像では達磨橋の橋梁の支え部分に急な色変化があり、赤外線カメラでクラックが発生している兆候を捉えることができる。一方 4K 可視カメラの右画像では問題の箇所が目立った色変化がなく、クラックの聴講を捉えることは難しいが、図の丸印のように該当箇所を拡大して確認すると、赤外線カメラでは解像度が低いためクラックの状況を把握することは難しいが、同時撮影の可視 4K カメラでは、橋梁に走るクラックが明確に確認できる。つまり、赤外線カメラで異常の可能性のある場所をすばやく探索し、可視 4K カメラ画像で拡大して詳細を確認することで、状況を正確に把握し補修の必要性を含めた正確な判断を下すことができることがわかった。

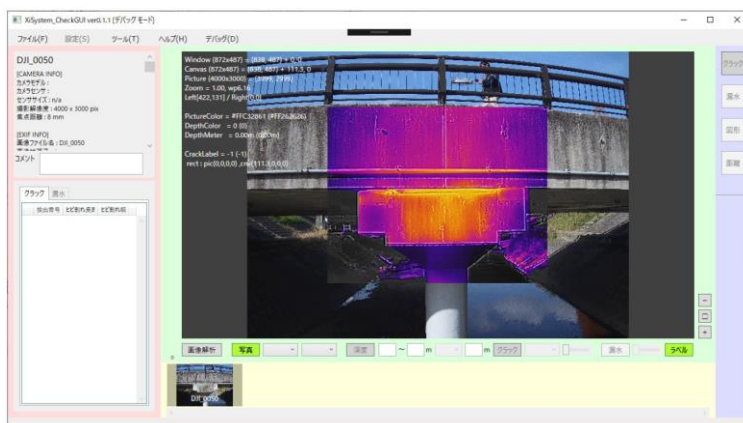


<赤外線撮影画像>
橋梁の支え部分に急な色変化が見える。
クラックが発生している兆候を確認

<可視撮影画像>
可視で汚れなどではないことを2重に確認。
※現状早急に補修が必要となる箇所ではない

図 2.1-50 橋梁点検の赤外線と可視撮影画像比較

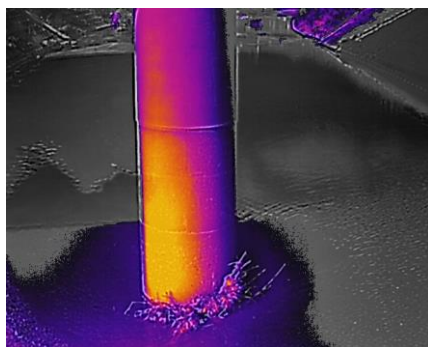
なお、赤外線画像と可視画像は画像の解像度が違うので、赤外線画像で特定した箇所を可視画像から見比べて探し出すのは一手間必要となる。図 2.1-51 に示すような赤外線画像と可視画像の自動合わせ込みツールで、赤外線画像と可視画像を同じ位置に重ね合わせ表示できれば補修箇所の発見と可視画像拡大が同時に提示可能であり、補修箇所発見の効率化を図れるだろう。



撮影機材：ミラテドローン提供
Dual Sensorカメラ(XT2)
撮影画像：赤外線画像(640x512)
可視画像(4000x3000)
撮影距離：約6m
点検ソフト：シャープオリジナル

図 2.1-51 橋梁点検の重ね合わせツールの紹介

なお、今回の実証実験により赤外線撮影には課題があることがわかった。赤外線による異常（破損）箇所検出は、その周辺箇所との温度差を利用している。そのため、冬場の寒い時期では、全体に冷えてその温度差が少なくなるため、異常検出が難しい。図 2.1-52 の橋脚撮影では 12 月の撮影ということもあり、たとえ破損箇所があったとしても破損箇所近傍の温度差が小さくなる一方で日照状態の差異による温度差が上回ってしまい、状態を把握することができない。そのため現状では、赤外線によるインフラ点検では、異常部分の温度差が適切なレベルになり、状態検出が容易である春から秋にかけての実施が望ましい。



<赤外線撮影画像>

日照による温かいところは見えているものの、破損箇所が検出できるほどの温度差は見えない。



現状：赤外線によるインフラ点検は、温度差異箇所を検出しやすい春から秋にかけての実施が望ましい

図 2.1-52 橋梁点検の赤外線撮影の課題

<赤外線撮影による点検 ②王寺大橋橋>

「王寺大橋」の橋脚側面を赤外線撮影（静止画 34 枚）したものを図 2.1-53 に示す。こちらは特に異常は見られなかった。

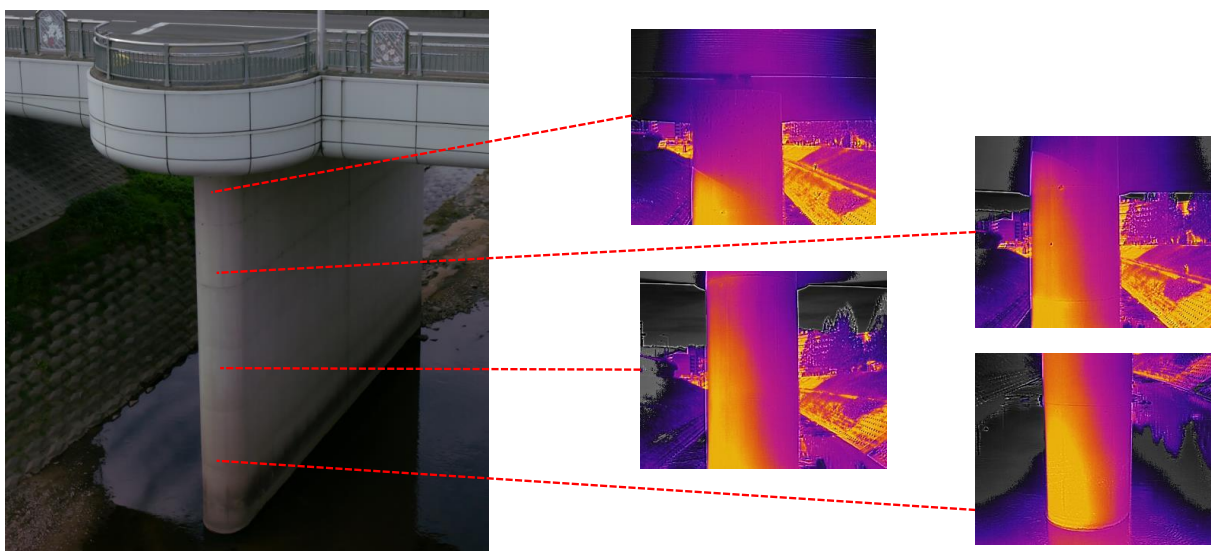


図 2.1-53 橋梁点検の赤外線撮影による点検（②王寺大橋）

<可視撮影による点検 ①達磨橋オルソ画像>

達磨橋をドローン撮影した複数枚の静止画により、図 2.1-54 のようなオルソ画像（パノラマ画像）を生成した。元画像は 5K で撮影した静止画で、使用枚数は 120 枚である（ミラテクドローンにて画像生成）。

オルソ画像は、例えば図 2.1-54 の達磨橋の橋桁側面にある配管を点検したい場合、一枚一枚すべての静止画像を見ていく必要なく、観察したい場所を 1 枚のオルソ画像内で自由に移動拡大して配管の詳細状況を詳細に点検するといったことが可能となる。

また、元画像を 8K ドローンで撮影した静止画で、オルソ画像の生成を試みた。この場合、5K が使用枚数 120 枚に対して、8K では 75 枚で橋梁の全体像を生成でき、撮影枚数の削減しつつ詳細な点検用の画像が生成できる感触を得た。

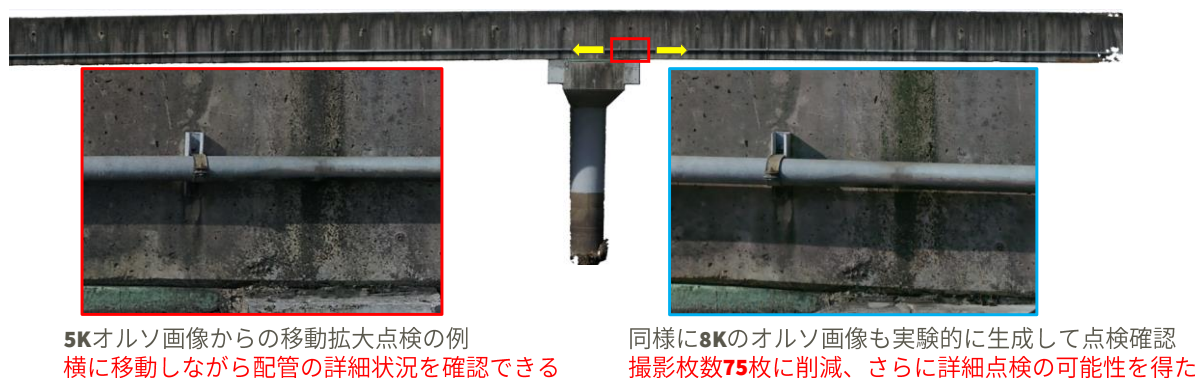


図 2.1-54 橋梁点検の達磨橋オルソ画像（①達磨橋）

例えば、図 2.1-55 に示すように達磨橋のオルソ画像を見ていくと配管に何かが引っかかっているのが見て取れた。そこを拡大してみると、4K 画像では針金がなにかのように見えるが、5K では糸かもしれないとわかり、8K 画像でははっきりと糸目を感じ、糸だと断定できる。このように、画像の解像度が大きいほど、異物の詳細な状況を確認でき、異物の材質までみてとれる。

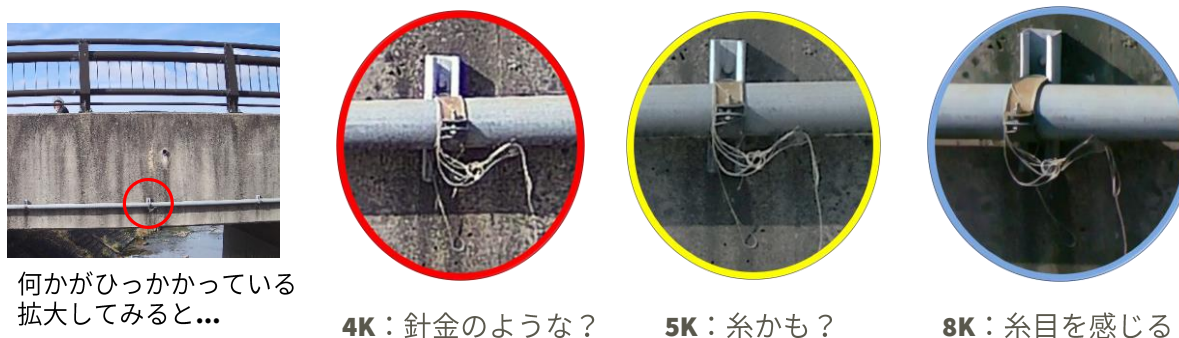


図 2.1-55 橋梁点検の 8K による詳細点検（①達磨橋）

<可視撮影による点検 ②王寺大橋オルソ画像>

王寺大橋の橋脚を撮影した複数枚の静止画により、図 2.1-56 のようなオルソ画像を生成した。元画像は 8K 撮影の静止画で、使用枚数は 20 枚である。オルソ画像により、ひび割れなど観察したい場所を自由に移動拡大して詳細に点検することができる。また、今回の例ではひび割れのチョーク点検がなされている状況を確認できる。

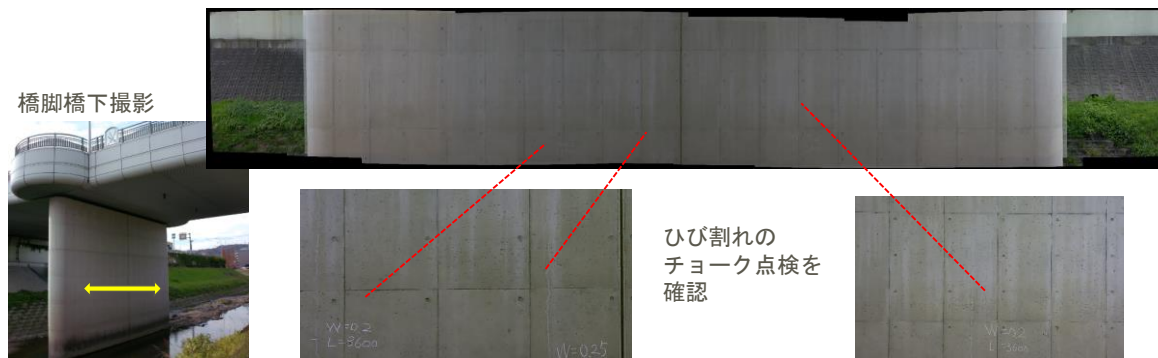


図 2.1-56 橋梁点検の王寺大橋橋脚のオルソ画像

この王寺大橋の橋脚のひび割れを、図 2.1-57 に示すような撮影距離で、5K および 8K で撮影し、ひびの自動検出を試みた (5K はミラテクドローン、8K はシャープにてひび検出)。図 2.1-58 に示すように、どちらも 0.数ミリのひびを検出できた。特に 8K は 5K の倍の撮影距離で検出できており、安全性を担保しながら橋梁のひびの検出が可能である。なお、コンクリートの型枠筋や汚れなど、ひびでないものをひび割れとして検出する過検出の課題が確認され、完全自動化のためには過検出を抑制する技術が必要である。

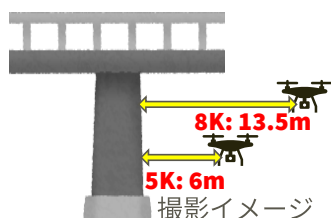


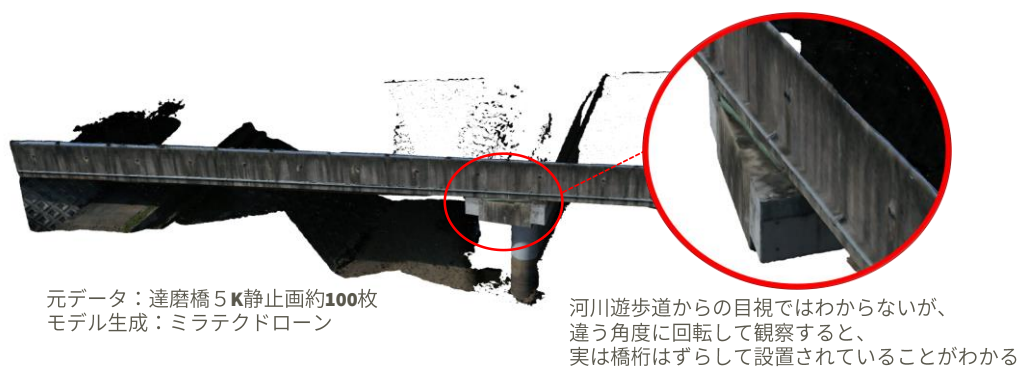
図 2.1-57 橋梁点検のひび撮影距離



図 2.1-58 橋梁点検のひび自動検出

<可視撮影による点検 その他の解析手法（3D モデル）>

その他の補修箇所の発見解析手法として SfM 技術による 3D モデルがあげられる。今回撮影したドローンによる可視撮影の複数枚静止画から図 2.1-59 に示すような 3D モデルを生成できる（ミラテクドローンによる生成）。3D モデルの利点は、現場では不可能な自由な角度から、観察したい場所を拡大して点検することができることであり、現場を見ることができない人に状況説明するには非常にわかりやすい有用な手法である。



元データ：達磨橋 5 K 静止画約 100 枚
モデル生成：ミラテクドローン

河川遊歩道からの目視ではわからないが、違う角度に回転して観察すると、実は橋桁はずらして設置されていることがわかる

図 2.1-59 橋梁点検の 3D モデル

【まとめ】

王寺町における橋梁のインフラ点検を想定して 2 か所の現場を選定し、赤外線および 8K/5K/4K ドローン撮影による実証実験および調査検証を実施した。検討項目「効率性」「確実性」の評価項目ごとの検証結果を表 2.1-17 にまとめる。

表 2.1-17 橋梁点検の実証実験における検証結果のまとめ

検討項目	評価項目	検証結果
効率性	(a). 作業時間	・ 人手による点検作業に比べて、ドローン活用により約 91%の作業時間削減が見込める
	(b). ドローン操縦容易性	・ 橋梁側面については問題なく近づいて撮影できるが、橋下の撮影にいくつかの課題あり
	(c). 安全性	・ GPS ロスによる衝突回避の難しさを体感し、8K による距離を取った撮影の優位性を確認
確実性	(i). インフラ補修箇所発見性能	<ul style="list-style-type: none"> ・ 赤外線による補修ポイントの早期発見の優位性を確認し、可視カメラによりさらに詳細状況を確認できることを確認 ・ 可視カメラによる点検では、ひびの検出において 8K は 4K に対して 2 倍の撮影距離による検出が可能であることを確認 ・ オルソ画像や 3D モデルなどの解析手法にさらに 8K を導入することにより確実性を向上できる

(3) 地形、区画等の公共測量

地形、区画等のドローンによる公共測量の実証実験について、(社)奈良県測量設計業協会様にご協力いただき、サンディスト株式会社様と連携して実施した。

【事前調査】

実験計画時に公共測量に関して事前調査を行った。公共測量とは、国・自治体などの公共団体が発注する測量のことであり、精度などが国土院発行のマニュアル（※参考文献1）に規定されており、これに準拠しなければならない。ここでは、測量精度レベルごとに運用基準（第57条）が表 2.1-18 のように取り決められている。地上画素寸法はGSD（Ground Sampling Distance）とも呼ばれ、センサー1ピクセルあたりの測量精度のことで、単位は cm/pixel である。マニュアルでは、三次元点群測量において最も高い精度である位置精度 5cm 以下を要求する場合、GSD 値で 1cm/pixel 以下を満たす必要があり、今回の実証実験ではこれを目安とした。

表 2.1-18 公共測量のマニュアル（第57条 運用基準）

位置精度	地上画素寸法
0.05m 以内	0.01m 以内
0.10m 以内	0.02m 以内
0.20m 以内	0.03m 以内

※参考文献1：「無人航空機(UAV)を用いた公共測量マニュアル（案）」
（平成28年3月制定、平成29年3月改正）

【選定場所】

現場は、サンディスト株式会社様が実際にドローンによる測量業務を実施している大和高田市総合公園内のグラウンド及び周辺とした。図 2.1-60 に示すように撮影範囲は 130mx130m、対空標識（基準点）を設置しドローンによる測量を実施した。

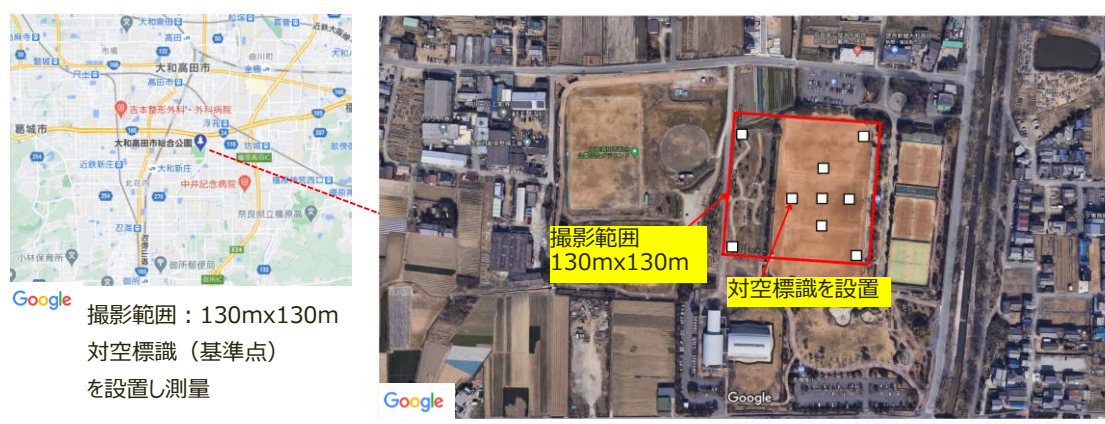


図 2.1-60 公共測量の選定場所（大和高田市総合公園内）

【撮影日時】

2020年12月4日（本番撮影） 天候：快晴



大和高田市総合公園
およびドローン撮影風景



作業風景

図 2.1-61 公共測量の撮影風景

【撮影機材】

使用した撮影機材を表 2.1-19 に示す。8K 撮影用として、シャープ開発品の 8K カメラを搭載した DJI Matrice 600 Pro、5K 撮影用として、DJI Phantom4 Pro、4K 撮影用として DJI Inspire1 の 3 機種を使用して画像データを取得した。

表 2.1-19 公共測量の撮影機材

	8Kカメラ搭載ドローン (シャープ)	5Kカメラ搭載ドローン (提供：サンディスト株式会社様)	4Kカメラ搭載ドローン
機体本体名	DJI Matrice 600 Pro	DJI Phantom4 Pro	DJI Inspire 1
最大飛行速度・時間	40～65km/h・約18分	50～72km/h・約30分	～79km/h・約18分
対角寸法・全重量	1133mm・15kg(8K含)	350mm・1.4kg	581mm・3.1kg
搭載カメラ	8Kカメラ(開発品)	5Kカメラ(標準品)	4Kカメラ(Zenmuse X5)
センサー	33MP、16:9、4/3inch	20MP、3:2、1inch	16MP、4:3、4/3inch
最大解像度	7680x4320(静止画) 7680x4320(30P動画)	5472x3648(静止画) 3840x2160(30P動画)	4608x3456(静止画) 3840x2160(30P動画)
レンズ実焦点距離・画角	18.000mm・62°	8.604mm・84°	15.476mm・72°
写真			

【撮影条件】

実証実験における各種ドローンの撮影条件を表 2.1-20 に示す。なお、8K ドローンは当初静止画撮影を試みたが、バッテリーによる飛行時間の制限により動画撮影として、解析時に静止画データに変換し公共測量用の撮影データとしている。撮影データの動画データレートはSDカード記録時の設定値、静止画データサイズは撮影後のファイルサイズを参考にした。

表 2.1-20 公共測量の撮影条件

	8K ドローン	5K ドローン	4K ドローン
レンズ焦点 (画角)	18mm (62°)	8.604mm (84°)	15.476mm (72°)
動画解像度	7680x4320	—	—
動画フレームレート	30fps	—	—
動画コーデック	HEVC/H.265	—	—
動画データレート	200Mbps	—	—
静止画解像度	—	5472x3648 (5K)	4608x3456 (4K)
静止画撮影間隔	—	2 秒間隔	2 秒間隔
静止画コーデック	—	JPEG	JPEG
静止画データサイズ	—	約 7MB/枚	約 6MB/枚

【実験内容】

公園内の 130m×130m を測量範囲として、基準点としての対空標識を 9 か所 (標定点 GCP 5、検証点 CP4) に設置し、各種ドローンによる撮影を実施した。操縦はオートパイロットで撮影時にホバーリング (停止) せず、移動しながら 2 秒間隔で撮影するとした。各撮影写真のオーバーラップ率 (90%, 60%) を換算し、各種ドローンで異なる飛行速度、飛行ルートを設定した。飛行ルート例と対空標識などを図 2.1-62 に示す。

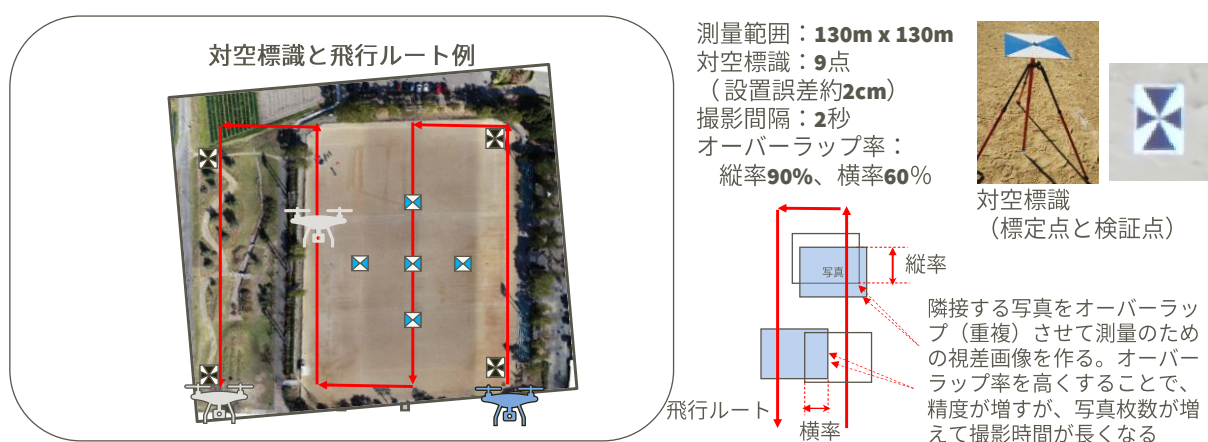
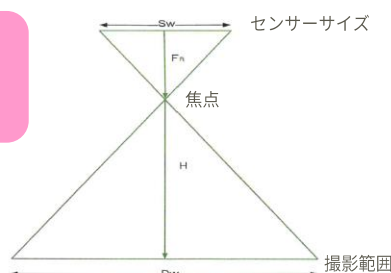


図 2.1-62 公共測量の飛行ルート

<各カメラの撮影高度について理論比較 同撮影精度>

撮影すべき高度は、センサーサイズ・実焦点距離・画素数そして目標とする GSD 値によって決まる。表 2.1-18 で示したように三次元点群測量において最も高い精度である位置精度 5cm 以下を要求する場合、GSD1cm/pixel 以下を満たす必要がある。GSD1cm/pixel としたときの各種ドローンの撮影高度、撮影範囲を図 2.1-63 に示す。各ドローンのカメラ・レンズ仕様が異なるので、写真 1 枚の撮影高度・範囲が異なり、理論的に同撮影精度(GSD1cm/pixel)において 8K は高度 73m と高くできる。

同精度の場合、
各ドローンのカメラ・レンズ仕様が異なるので、
写真 1 枚の撮影高度・範囲が異なる



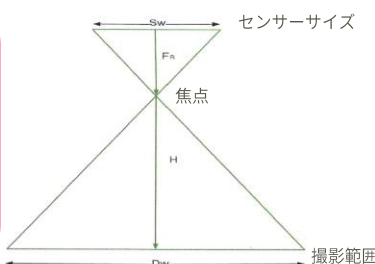
ドローン	カメラ・レンズ	センサーサイズ		実焦点距離	画素数		撮影高度	撮影範囲		GSD (cm/pixel)
		Sw	Sh		imW	imH		Dw	Dh	
Inspire	ZENMUSE X5 + DJI 15mm	17.500mm	13.125mm	15.476mm	4608pixel	3456pixel	40m	45m	34m	0.98
Phantom	Phantom4Pro V2も同じ(3:2)	12.833mm	8.556mm	8.604mm	5472pixel	3648pixel	36m	54m	36m	0.98
Matrice	SHARP 8K	18.840mm	10.600mm	18.000mm	7680pixel	4320pixel	73m	76m	43m	0.99

図 2.1-63 公共測量のドローンごとの撮影範囲と GSD 比較 (同撮影精度)

<各カメラの測量精度について理論比較 同撮影高度>

測量精度は、センサーサイズ・実焦点距離・画素数そして目標とする高度によって決まる。撮影高度 73m としたときの各種ドローンの撮影範囲、GSD を図 2.1-64 に示す。同高度の場合、各ドローンのカメラ・レンズ仕様が異なるので写真 1 枚の撮影範囲と精度は異なる。理論的に高度 73m で 8K は GSD 約 1 cm/pixel と細かくできる。

同高度の場合、
各ドローンのカメラ・レンズ仕様が異なるので、
写真 1 枚の撮影精度・範囲は異なる。
例：Phantomの焦点距離は短いので
撮影範囲はかなり広がる代わりに
精度は落ちる



ドローン	カメラ・レンズ	センサーサイズ		実焦点距離	画素数		撮影高度	撮影範囲		GSD (cm/pixel)
		Sw	Sh		imW	imH		Dw	Dh	
Inspire	ZENMUSE X5 + DJI 15mm	17.500mm	13.125mm	15.476mm	4608pixel	3456pixel	73m	83m	62m	1.79
Phantom	Phantom4Pro V2も同じ(3:2)	12.833mm	8.556mm	8.604mm	5472pixel	3648pixel	73m	109m	73m	1.99
Matrice	SHARP 8K	18.840mm	10.600mm	18.000mm	7680pixel	4320pixel	73m	76m	43m	0.99

図 2.1-64 公共測量のドローンごとの撮影範囲と GSD 比較 (同撮影高度)

<実験した測定高度>

実際と理論との差を確かめるため、同精度と同高度パターンに分けて撮影を行った。各パターンの測定高度を図 2.1-65 に示す。なお、撮影データの解析は実際にドローンによる公共測量業務に携わっているサンディスト株式会社様にお願いした。注意点としては、Phantom は 5K カメラではあるがセンサーサイズ・実焦点距離の影響で、同精度 (GSD1cm/pixel) では撮影高度は Inspire (4K) より低くなっている。




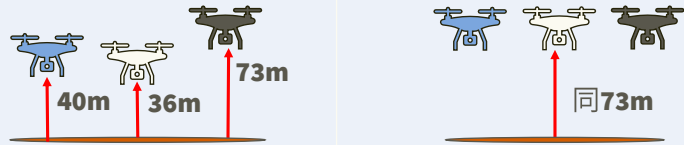
ドローン (カメラ)	同精度(GSD1cm/pixel)	同高度
Inspire (4K) 	40m	73m
Phantom (5K) 	36m	73m
Matrice (8K) 	73m	
測定高度 カメラパラメータなどは各ドローン固定 変化するパラメータは高度のみとした		

図 2.1-65 公共測量にて実験した測定高度

【評価項目】

実証実験で得た情報および撮影データ等を、表 2.1-21 の評価項目を参考にして検証した。

表 2.1-21 公共測量の評価項目詳細

検討項目	評価項目	内容詳細
効率性	(a). 作業時間	単位撮影時間当たりの撮影面積に関して定量的な比較を行う。
	(b). ドローン操縦容易性	自律およびマニュアル操作の時間比およびドローンの誘導精度の比較を行う。
	(c). 安全性	落下安全性確保の為に対象物と十分な離間距離を取ったときの撮影精度と撮影範囲の比較を行う。
確実性	(j). 誤差含有度合	計測条件 (撮影機材、カメラパラメータ、撮影高度、写真ラップ率並びに標定点の位置及び個数) 及び解析パラメータ (カメラキャリブレーション、点群生成処理の設定並びに標定点の入力及び補正) と測量の精度に関して比較を行う。

【検証結果】

検討項目「効率性」「確実性」の評価項目ごとの検証結果を示す。

■ 「効率性」の検証結果

作業時間、ドローン操縦容易性、安全性について述べる。

(a). 作業時間

ドローンによる公共測量の作業工程は図 2.1-66 のようになる。ここでは、解像度で作業時間に影響を与える「ドローン撮影」、「解析演算」の作業時間を検証した。




図 2.1-66 公共測量の作業工程

※参考文献 1 : 「無人航空機(UAV)を用いた公共測量マニュアル (案)」
(平成 28 年 3 月制定、平成 29 年 3 月改正)

参考として、その他の作業時間について述べると、撮影データ解析後はトレース作業による図面化に 3～4 時間ほど作業量として見込む必要あり、その時間は習熟度により大きく変わる。また、すべて人手による測量の場合、今回の同面積の測量作業は丸 1～2 日を見込む必要がある。ただし、人手による測量の場合、測量しながら図面化作業を行い解析は不要のため、作業工程は上図と異なり今回比較困難とした。

< 「ドローン撮影」作業時間の比較 >




精度優先で、「同精度」GSD 約 1cm/pixel における各種ドローンに設定された撮影時間、飛行速度、飛行ルートを図 2.1-67 に示す。約 1cm の測量精度を維持しつつ高度をとって撮影できる 8K は 4K に比べて撮影作業時間を約半分に短縮できることがわかる。なお飛行速度および飛行ルートは、カメラ・レンズ仕様、撮影間隔、高度やバッテリー時間などによって、写真 1 枚の範囲 (1Shot) と撮影枚数、撮影時間が制約され、ドローンソフトによって自動設定される

	Inspire (4K)	Phantom (5K)	Matrice (8K)
撮影高度	40m	36m	73m
測量精度 (GSD理論値) 同精度	0.98cm/pixel	0.98cm/pixel	0.99cm/pixel
写真1枚の撮影範囲 1Shot	45m x 34m	54m x 36m	76m x 43m
撮影枚数	359枚	250枚	131枚
撮影時間	15分18秒	11分20秒	6分54秒
飛行速度	1.8m/s	1.9m/s	2.2m/s
飛行ルート			

カメラ・レンズ仕様、撮影間隔、高度やバッテリー時間などによって、写真1枚の範囲(1Shot)と撮影枚数、撮影時間、飛行速度、飛行ルートはドローンソフトによって自動設定される

図 2.1-67 公共測量の「ドローン撮影」作業時間の比較 (同精度)

続いて、高度優先で「同高度」73mにおける各種ドローンに設定された撮影時間、飛行速度、飛行ルートを図 2.1-68 に示す。高度を高くすれば撮影範囲が広がり撮影時間を減らせるが、8K に比べて、4K/5K は測量の理論精度が約 1/2 程度に落ちる。なお、Phantom で飛行ルートが 1.5 往復と短くなっているのは、測量面積に対して撮影の 1 Shot が非常に大きいためである。

	Inspire (4K)	Phantom (5K)	Matrice (8K)
撮影高度 同高度	73m	73m	73m
測量精度 (GSD理論値)	1.79cm/pixel	1.99cm/pixel	0.99cm/pixel
写真1枚の撮影範囲 1Shot	83m x 62m	109m x 73m	76m x 43m
撮影枚数	106枚	65枚	131枚
撮影時間	4分45秒	3分15秒	6分54秒
飛行時間	3.3m/s	3.8m/s	2.2m/s
飛行ルート			

カメラ・レンズ仕様、撮影間隔、高度やバッテリー時間などによって、写真1枚の範囲(1Shot)と撮影枚数、撮影時間、飛行速度、飛行ルートはドローンソフトによって自動設定される

図 2.1-68 公共測量の「ドローン撮影」作業時間の比較 (同高度)

< 「解析演算」作業時間の比較 >

ドローンによる測量の場合、撮影した写真データの解析演算時間が必要であり、各種条件で撮影した画像の解析演算作業時間の比較を表 2.1-22 に示す。また解析に使用した PC スペックを表 2.1-23 に示す。同程度の枚数の解析時間を見ると、4K/5K に比べ、情報量の違いから 8K では約 2 倍の時間を要するが、同じの測量精度(1cm/pixel)では、8K は測量に必要な撮影枚数削減の効果により解析時間が 26 分 25 秒とわずかながら一番少ない結果となった。

表 2.1-22 公共測量の「解析演算」作業時間の比較

	Inspire (4K)		Phantom (5K)		Matrice (8K)
撮影高度	40m	73m	36m	73m	73m
測量精度 (GSD理論値)	0.98cm/pixel	1.79cm/pixel	0.98cm/pixel	1.99cm/pixel	0.99cm/pixel
撮影枚数	359枚	106枚	250枚	65枚	131枚
点群生成時間	11m:52s	3m:25s	9m:39s	2m:23s	9m:43s
地表モデル生成時間	6m:57s	2m:38s	6m:26s	2m:14s	7m:54s
オルソ画像生成時間	12m:33s	5m:03s	10m:37s	3m:04s	8m:48s
解析時間 合計	31m:22s	11m:06s	26m:42s	7m:41s	26m:25s

表 2.1-23 公共測量の「解析演算」に使用した PC スペック

CPU	AMD Ryzen 9 3900X12-Core (3.1GHz/4.3GHz)
RAM	RAM64GB
GPU	NVIDIA GeForce RTX2060 (Driver: 26.21.14.4587)
OS	Windows 10 Pro, 64-bit

(b). ドローン操縦容易性

公共測量の実証実験において判明したドローン操縦容易性に関する留意点を表 2.1-24 に示す。

表 2.1-24 公共測量のドローン操縦容易性

項目	容易	難しい
フライト作業	今回の操縦は、オートパイロットで飛行ルートも自動設定のためフライト作業は容易であった	飛行時間が短いとバッテリー交換が多くなり、オートパイロット設定含め作業時間ロスが大きい
シャッターコントロール	Inspire および Phantom はフライトコントローラから飛行中のシャッター・露光調整が可能	実験で使用した 8K カメラは遠隔からのシャッター・露光調整ができない。フライト前にカメラキャリブレーションを地上で事前調整する必要があり、時間を要する
飛行時間	今回 8K で高度を取ることで撮影枚数、飛行時間が短くできることを実機で確認できた	バッテリーが持つ時間内にフライトを完了させるため、飛行速度と飛行ルートが制約された。

<動画撮影の試行>

今回の実証実験では、実験で使用した 8K 試作カメラが安定した静止画 100 枚以上のインターバル撮影に撮影間隔として 5 秒間隔を要するため、ドローンの飛行ルート設定で飛行時間オーバーとなった。そのため、一般に写真測量は、静止画撮影が一般だが、8K ドローンは動画にて撮影を実施した。撮影条件は以下となる。

「動画撮影条件」

- ・ フレームレート：30fps (frame/sec)、圧縮レート：200Mbps (SD カード記録)
- ・ 動画から 2 秒間隔でフレームを抜き出し、静止画 2 秒間隔撮影と同等とした一方で、動画撮影には利点もある。それらの項目を以下に挙げる。

「動画撮影の利点」

- ・ フレームの抜出位置および抜出間隔を調整することで、撮影後でも撮影間隔を自由に設定できる。
- ・ 進行方向(縦)のオーバーラップ率を撮影前に気にしなくてよい直進でなく曲がりくねって操縦していても処理に必要な撮影位置の写真を後から抜き出せる。

憂慮すべき点は、一般に静止画撮影に比べて動画撮影は画質が悪くなるため、精度がだせるのかどうかである。この点に関して、後述の(j)誤差含有度合にて解析比較した結果を述べている。

(c). 安全性

公共測量の安全性で最も気になるのはドローンの衝突である。今回の測量現場で一番高い建造物の高さは屋外照明の約 15m であったが、実際の公共測量の現場では様々な高さの物があることが予想される。代表的な建造物の高さを図 2.1-69 に示す。飛行高度 73m であれば多くの障害物をクリア可能であり、高度が高くても精度よく測定できる 8K は安全面で優位であるといえる。

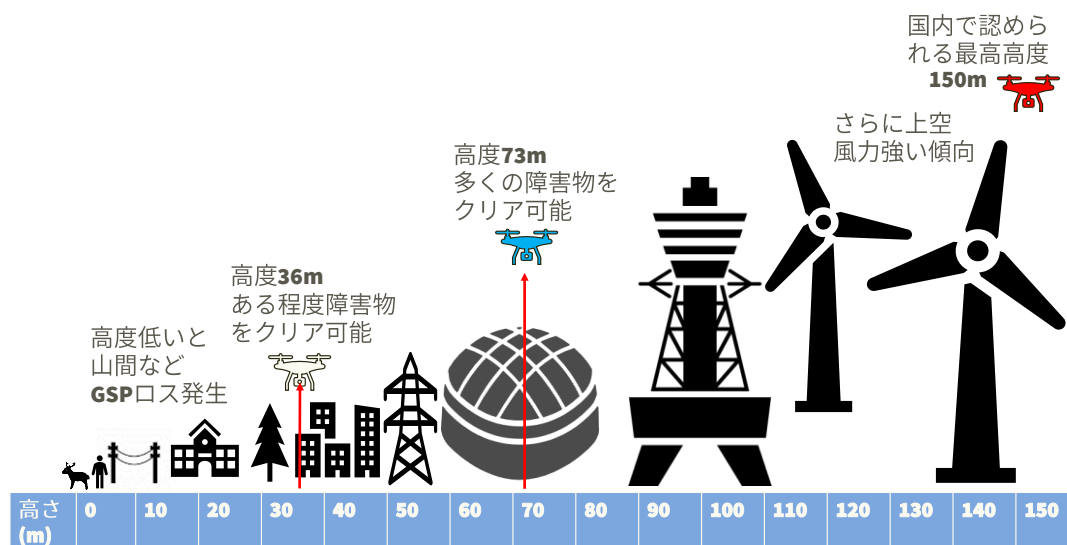


図 2.1-69 公共測量の安全性 (高度)

■ 「確実性」の検証結果

誤差含有度合についての検証結果を述べる。

(j). 誤差含有度合

<オルソ画像>

ドローン撮影した複数枚の静止画により、図 2.1-70 のオルソ画像(パノラマ画像)を生成した。測量したい範囲より伸び代を含めて大きめに生成している。1枚の写真撮影範囲、飛行ルートが異なるので生成されるオルソ画像の形状は異なる結果となる。

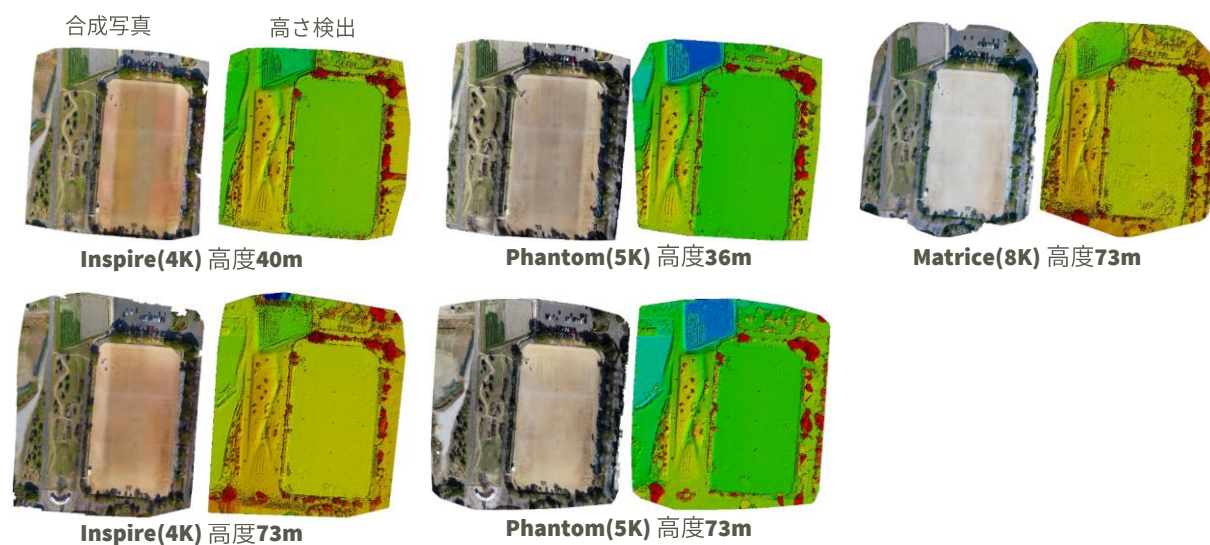


図 2.1-70 公共測量のオルソ画像の全体比較

続いて、オルソ画像をデジタル拡大し、各画質を比較してみた。一部を図 2.1-71 に示し、比較結果を以下に述べる。

- 高度 40m/36m の 4K/5K はブロック形状が見てとれ、マンホールの浮きもわかる
- 高度 73m の 4K/5K では一様にぼやけている。
- 高度 73m では対空標識の形状は歪み、かろうじて基準点の交差部分が残る程度
- 高度 73m の 8K では、グレーチングの網形状が判別できる。しかし、ブロックの隙間など細かい所が消え、対空標識のエッジが若干ぼやけている

結果として、当然ながら画質的には高度を下げた方が良い結果となっている。



図 2.1-71 公共測量のオルソ画像の拡大比較

< 測量誤差 >

続いて、写真撮影による公共測量としてどの程度の測量誤差となるのかを解析した。対空標識(標定点5点、検証点4点)を設置時にGPS測定した位置と、ドローン撮影により対空標識を画像検出し演算して得た位置との誤差RMSE(Root Mean Square Error)を測量ソフトにより解析し、表 2.1-25 にまとめた。対空標識のうち、標定点を基準として地表モデルを構築、検証点にてその測量精度の正確性を検証した。なお、標定点の数量が十分かつ誤差が少なければ、検証点の誤差も減少し、測量精度は向上する傾向にあり、今回は十分な量の評定点を設置しているといえる(※参考文献2、3)。

結果として、Matrice 8Kでは高度73mでも、測量精度2.04cmとなり目標の位置精度5cm以下で測量できることを確認した。また、Phantom 5Kの高度73mにおいては、GSD理論値とほぼ同等の測量精度を達成している。一方で、5Kドローンを除いて4K/8Kドローンでは理論値よりも大幅に誤差が拡大している。

表 2.1-25 公共測量の測量誤差比較

	同精度 (理論値)			同高度		
	Inspire(4K)	Phantom(5K)	Matrice(8K)	Inspire(4K)	Phantom(5K)	Matrice(8K)
撮影高度	40m	36m	73m	73m	73m	73m
地上画素寸法 (GSD理論値)	0.98cm /pixel	0.98cm /pixel	0.99cm /pixel	1.79cm /pixel	1.99cm /pixel	左に同じ
標定点RMSE (モデル精度)	4.57cm	0.43cm	2.08cm	7.07cm	0.87cm	
検証点RMSE (測量精度)	3.61cm	1.68cm	2.92cm	4.71cm	2.04cm	

※参考文献2：「空撮マッピングプロジェクトにおける精度とは？」

<https://www.pix4d.com/jp/blog/accuracy-aerial-mapping>

※参考文献3：「GCPの数とドローンマップの精度の関係」

<https://www.pix4d.com/jp/blog/GCP-accuracy-drone-maps>

<理論値に対する誤差拡大の原因についての考察>

8K ドローンによる誤差拡大の原因について、いくつか考えられる可能性について考察した。今後の技術的な課題として表 2.1-26 にリストアップする。

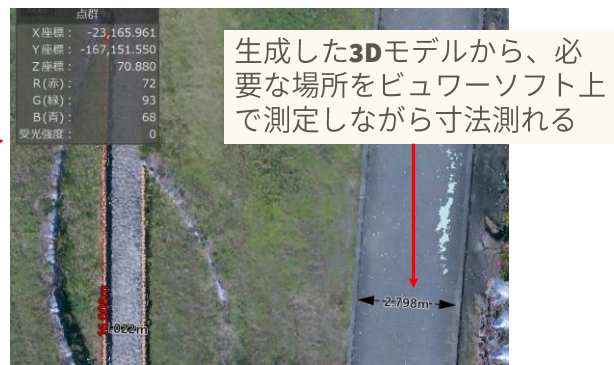
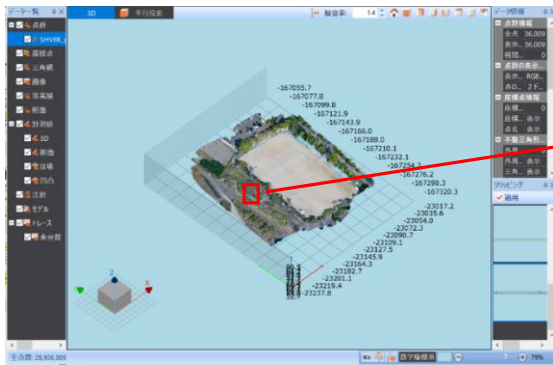
表 2.1-26 公共測定の測量誤差拡大の原因

誤差拡大要因	推定される原因
GPS 性能	Phantom は GPS/GLONASS (ロシア衛星) 対応により、GPS より多くの複数の衛星をもとに位置精度を高く測定可能。
写真の GPS データ	撮影写真に GPS 位置情報がついていると解析ソフトの性能が向上する模様。今回 8K 写真には GPS 情報はない。
オートフォーカス	8K カメラは 30m 固定のマニュアルフォーカスでピントは固定とした。Phantom、Inspire は飛行中にオートフォーカス可能。
シャッター	Phantom のカメラはグローバルシャッター(メカニカルシャッター)仕様で移動しながら歪みぼけなく高品位に撮影できる。8K カメラ、Inspire の ZenmuseX5 はローリングシャッターであるため、高速で移動しながら撮影すると画像が歪みやすい。
動画圧縮	今回の 8K 撮影では動画圧縮率 1/300 以下で録画している。8K カメラ静止画の JPEG 圧縮率は約 1/7 程度である。動画の圧縮は人が気にしない細かいところや暗いところをぼかす傾向があり、1枚で見ると静止画より情報量は格段に落ち画質は悪い。

以上より、今回は試験的に 8K カメラ試作機を測量できるようにドローンに搭載したため、実践での測量用のカメラとしては万全ではないことがわかった。しかしながら、測量を考慮したカメラではないにもかかわらず位置精度として 5cm 以下を達成しており、上記課題を解決できれば、将来さらに GSD 理論値に近い測量精度を狙える感触を得られた。今回の課題は今後のドローン搭載 8K カメラの改善につなげる。

<参考：ドローン写真からの図面化について>

公共測量では、撮影後は写真解析で三次元点群データを取得し、トレースにより図面データ化することで作業完了となる。作業としては、図 2.1-72 に示すようなオルソ画像や 3D モデルを生成し、寸法をいれて写真付きで分かりやすく図面化していく。熟練者で約 4 時間の作業である。

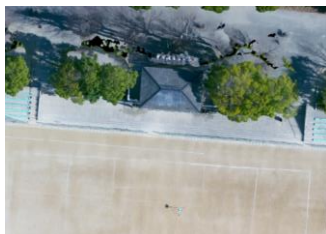


今回の撮影結果から作成した3Dモデル（提供：サンディスト様）

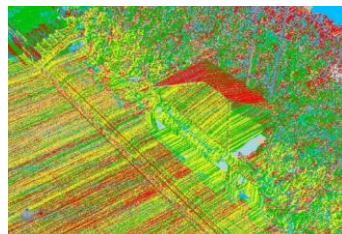
図 2.1-72 公共測量の3Dモデルによるトレース作業例

<参考：レーザー測量について>

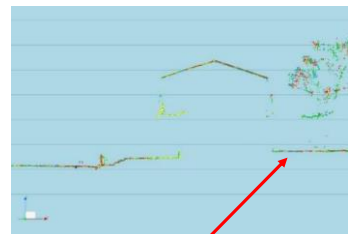
公共測量では、今回実証実験にて比較検討として含めていないが、レーザーによる測量も行われている。精度は数 mm 単位となり、航行速度と高度により精度は変わる。レーザー測量の利点として、建物、起伏の激しい箇所、草木、地表面を精度よく測量し、図 2.1-73 に示すような三次元点群データを生成できる。なお、レーザーによる測量点は色情報を持っていないが、空撮写真と組み合わせることでカラーの 3D モデルを得られる。したがって、レーザーによる高密度な三次元点群データと、高精細な 8K カメラ搭載ドローンの映像を組み合わせ、極めて精度の高いカラー 3D モデルを理論的に形成可能であり、将来の実験の取組の 1 つとしたい。



対象とした建屋周辺



機材キャリブレーションで得たデータ



木々の形状と、その下の地表面の形状も見て取れる

図 2.1-73 公共測量のレーザー測量例

【まとめ】

大和高田市総合公園の一面を現場として選定し、8K/5K/4K ドローン撮影による公共測量の実証実験および調査検証を実施した。検討項目「効率性」「確実性」の評価項目ごとの検証結果を表 2.1-27 にまとめる。

表 2.1-27 公共測量の実証実験における検証結果のまとめ

検討項目	評価項目	検証結果
効率性	(a). 作業時間	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高度を倍にとることで撮影枚数を 70%削減可能 ・ さらに <u>8K は 4K に比べて同じ測量精度で撮影作業時間を約半分に短縮できる</u>ことを確認
	(b). ドローン操縦容易性	オートパイロットによる自動撮影の容易さを確認、 <u>各種課題を抽出</u>
	(c). 安全性	<u>8K では測量精度を維持しつつ 4K より高高度な撮影が可能なので、建築物などの障害物への衝突リスクを低減可能</u>
確実性	(j). 誤差含有度合	<ul style="list-style-type: none"> ・ 8K ドローンでは高度 73m で地上画素寸法 (GSD) 1cm が理論的に可能 ・ 一般的な静止画撮影ではなく動画撮影を用いても実測で 3cm 以下の誤差で測量できることを確認 ・ ドローン写真を用いた三次元点群測量において最も高い精度区分である 5cm 以内をクリア

(4) 道路インフラのスクリーニング検査

自律飛行するドローンから撮影する映像により、自治体が管理する道路インフラの損傷程度を検出・分類する業務支援を想定し、道路インフラのスクリーニング検査と称して、実験場所を天理市様にご提供いただいて実証実験を実施した。

【選定背景】

天理市様へのヒアリングにより、次のような課題感があることが今回の実証実験の背景となった。

- ・ 天理市では旧市街道、田園地帯、山間地帯、観光道など多種多様な道路があり保全管理している。ひび割れだけでは補修しないが、ひび割れは道路補修の予兆で把握は重要である。
- ・ 道路補修の優先順位は、1. 住民からの連絡、2. 定期点検 である。定期点検は、全ての管理道路で実施したいところだが道路予算や人員が不足しており、主要道路や交通量が多い所を優先している。災害発生時や天候によって現場にたどり着けないこともあり、人手不足解消も含め課題となっている。
- ・ 以上から、道路スクリーニングにより本格的な点検・補修が必要とされる道路かどうかふるいにかける事前の簡易調査が望まれる。

【事前調査】

国道や県道などの道路点検は国土交通省の舗装点検要領（※参考文献1）に従って、実施されており、点検頻度は5年に1回とされている。道路検査の安全性の診断基準は表 2.1-28 に示すように規定されており、区分としてⅠ健全・Ⅱ表層機能保持段階・Ⅲ修繕段階の3段階にわかれており、その判断は表 2.1-29 に示すひび割れ率・わだち掘れ量・IRI(平坦性)の数値量によって判断される。

表 2.1-28 道路検査の安全性の診断基準

区分		状態
<u>Ⅰ</u>	<u>健全</u>	<u>損傷レベル小</u> :管理基準に照らし、劣化の程度が小さく、舗装表面が健全な状態である。
<u>Ⅱ</u>	<u>表層機能保持段階</u>	<u>損傷レベル中</u> :管理基準に照らし、劣化の程度が中程度である。
<u>Ⅲ</u>	<u>修繕段階</u>	<u>損傷レベル大</u> :管理基準に照らし、それを超過している又は早期の超過が予見される状態である。
	(Ⅲ-1 表層等修繕)	表層の供用年数が使用目標年数を超える場合(路盤以下の層が健全であると想定される場合)
	(Ⅲ-2 路盤打換等)	表層の供用年数が使用目標年数未満である場合(路盤以下の層が損傷していると想定される場合)

表 2.1-29 道路検査の安全性の診断基準

区分		ひび割れ率	わだち掘れ量	I R I(平坦性)
I	健全	20%未満程度	20mm 未満程度	3mm/m 未満程度
II	表層機能保持段階	20%以上程度	20mm 以上程度	3mm/m 以上程度
III	修繕段階	40%以上程度	40mm 以上程度	8mm/m 以上程度

点検手順とその評価方法の概要は、図 2.1-74 のように対象道路の起点～終点まで、ひび割れのスケッチから始まり最終的に1ブロック 20m 単位の診断を所定の記録様式に記録し、診断区分Ⅲ修繕段階となった区間が補修候補となる（※参考文献2）。

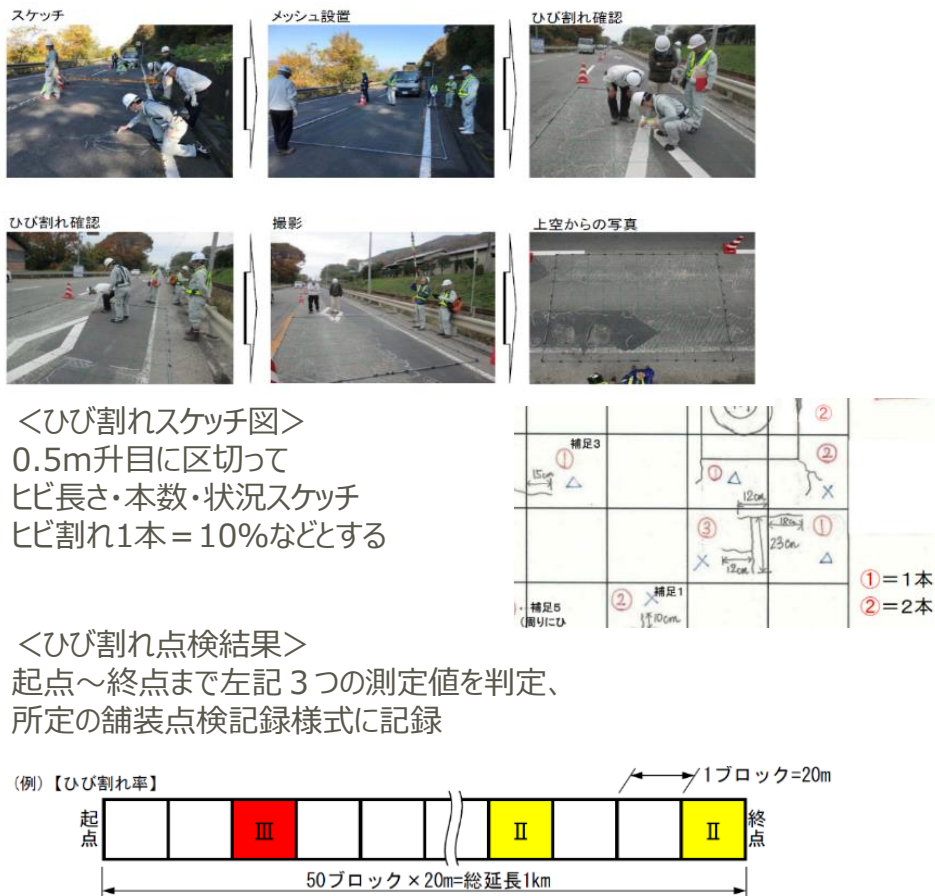


図 2.1-74 道路検査の点検手順と評価方法

※参考文献1：「国土交通省 舗装点検要領」（平成29年）

※参考文献2：「国土交通省 舗装点検技術の評価方法」（平成30年）

自治体管理の全道路でこのような手間のかかる道路点検の実施は時間的にも費用的にも実現は難しい。そのため、事前にドローンによりスクリーニングにより補修する道路を選別できれば業務改善として有効であると考えられる。

【選定場所】

令和4年度に法整備される予定の「目視外飛行の許可及びメンテナンス等産業用途での人口密集地での飛行許可」を想定し、次のような基準を定めた。

- 1) 車が入りづらい道路（狭幅、急坂）
- 2) あまり人が通らず状況がわかりづらい道路
- 3) 災害などで通行止めが起こりやすそうな道路

次に、天理市内から上記想定基準にあたる図 2.1-75 に示す以下の候補4か所を選出した。

- ① 杣之内町（内山永久寺跡前山の辺の道、市道72号）
- ② 滝本町（天理市浄水場前、市道711号）
- ③ 長滝町（九頭神社前、市道88号）
- ④ 柳本町（黒塚古墳横、市道186号）

実際に安全性など現場の事前確認を行い、最終的に①杣之内町、②滝本町の2か所を本番撮影として実証実験を実施した。



図 2.1-75 道路検査の選定場所

【撮影日時】

2020年1月14日（事前確認、候補4か所を視察）

2020年1月28日（本番撮影、2か所）天候：晴れのち曇り、風速：微風～1m/s



図 2.1-76 道路検査のドローン撮影風景

【撮影機材】

使用した撮影機材を表 2.1-30 に示す。8K 撮影用として、シャープ開発品の 8K カメラを搭載した DJI Matrice 600 Pro、4K 撮影用として、DJI Phantom4 Pro を使用して撮影データを得た。

表 2.1-30 道路検査の撮影機材

	8Kカメラ搭載	4Kカメラ搭載
機体本体名	DJI Matrice 600 Pro	DJI Phantom4 Pro
最大飛行速度・時間	40～65km/h・約18分	50～72km/h・約30分
対角寸法・全重量	1133mm・15kg(8K含)	350mm・1.4kg
搭載カメラ	8Kカメラ（開発品）	標準品
センサー	33MP、16:9、4/3inch	20MP、3:2、1inch
最大解像度	7680x4320(静止画) 7680x4320(30P動画)	5472x3648(静止画) 3840x2160(30P動画)
レンズ焦点・画角	18mm・62°	8mm・84°
写真		

【撮影条件】

実証実験の各ドローンの撮影条件を表 2.1-31 に示す。ドローンは手動によるマニュアル操作となったため、静止画撮影による道路の一定速度によるトレースができない。そこで、8K ドローンおよび 4K ドローンともに動画を撮影し、後ほど静止画に変換して道路の損傷程度の検出を試みた。なお、撮影データの動画データレートは SD カード記録時の設定値、静止画データサイズは撮影後のファイルサイズを参考にした。

表 2.1-31 道路検査の撮影条件

	8K ドローン	4K ドローン
レンズ焦点（画角）	18mm(62°)	8.8mm(84°)
動画解像度	7680x4320	3840x2160
動画フレームレート	30fps	29.97fps
動画コーデック	HEVC/H.265	HEVC/H.265
動画データレート	200Mbps	100Mbps
静止画解像度	—	—
静止画撮影間隔	—	—
静止画コーデック	—	—
静止画データサイズ	—	—

【実験内容】

実証実験は、8K/4K 各ドローンをマニュアル操作で選定した道路沿いに飛行させ、図 2.1-77 に示すように飛行高度 36m と 73m の 2 条件で動画撮影を実施した。これら撮影画像からひび割れなどを発見・検出して道路の安全性診断への適用可能性を調査することとした。

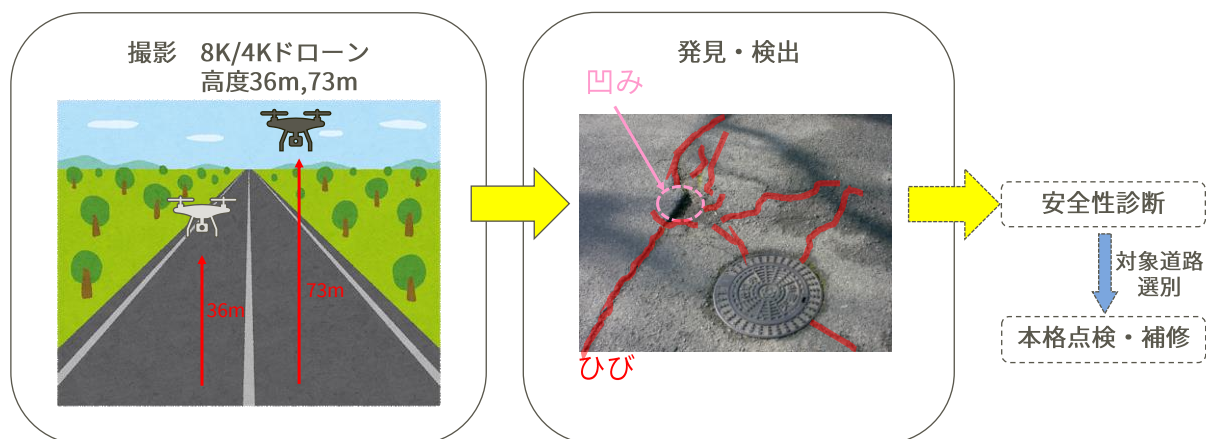


図 2.1-77 道路検査の飛行ルート

【評価項目】

実証実験で得た情報および撮影データ等を、表 2.1-32 の評価項目を参考にして検証した。

表 2.1-32 道路検査の評価項目詳細

検討項目	評価項目	内容詳細
効率性	(a). 作業時間	単位撮影時間当たりの撮影時間に関して定量的な比較を行う。
	(b). ドローン操縦容易性	自律及びマニュアル操作の時間比、ドローンの姿勢安定性の比較を行う。
	(c). 安全性	検査対象物とドローンの衝突安全性確保のために、十分な離隔距離を取った場合の撮影精度と撮影範囲の比較を行う。
確実性	(k). インフラ補修箇所発見性能	自治体が管理する道路インフラが、補修が必要な状態か否かの判断を行うに当たっての基礎データとして、ドローンの高度と画角に対する解像度と有効範囲の比較実験を行う。

【検証結果】

検討項目「効率性」「確実性」の評価項目ごとの検証結果を示す。

■ 「効率性」の検証結果

作業時間、ドローン操縦容易性、安全性について述べる。

(a). 作業時間

作業時間を道路 100km あたりの日数として、点検開始から結果報告までのトータル日数を算出比較した。

- ・ すべて人手 : 約 55 日/100km

※参考文献 3 の日数 166 日/300km を参考にした

- ・ 車両点検システム : 約 6 日～21 日/100km

※参考文献 4 の各種車両点検システムの作業日数を参考にした。内訳は以下となる。

点検作業 : 1～3 日/100km (車両点検可能最大速度 : 50～100km)

診断報告 : 20～5 日

車両点検システムは光学+レーザー測量による自動点検であり、システムによって日数、コストが変わり、点検時間が短いほど診断結果報告に日数がかかる傾向にある。なお、点検時は車両通行止め等が必要となる。

- ・ ドローン利用 : 約 3～4 日/100km

ドローンによる簡易的な点検の想定飛行速度から、点検作業時間を算出した。また、ひび割れ検出の演算時間から、診断報告にかかる概算日数を算出した。

点検作業 : 4K ドローン高度 36m(速度 1.9m/s) → 14.6 時間/100km

8K ドローン高度 73m(速度 2.2m/s) → 12.6 時間/100km

診断報告 : 1 日 (ひび割れ検出演算および報告書自動作成)

以上から、ドローンを利用することによって作業時間は、人による点検に比べて 90% 以上、車両点検に比べて 50%以上削減できる可能性があることがわかった。なお、ドローンは状況により更に速度アップが可能であり、更に作業時間を短縮できる可能性がある。

※参考文献 3 : 「土木学会論文集」 Vol. 73 No. 2-I P. 409-415 (平成 29 年)

※参考文献 4 : 「国土交通省 報道発表資料 : 『路面性状を簡易に把握可能な技術』の試験結果」 (平成 30 年)

(b). ドローン操縦容易性

ドローンによる道路点検の場合、現場状況は千差万別のため非常に多くの留意点があることがわかった。8Kにおいては、障害をさけて高度を取りつつ撮影・飛行時間を短くできる優位性を確認した。実証実験を通して確認したドローン操縦容易性に係る事項を表 2.1-33 に示す。

表 2.1-33 道路検査のドローン操縦容易性

項目	難しい内容
GPS	山間・森林地帯ではGPSを捉えられず、ドローンの飛行は不安定で操縦は困難であった
天候	雨風が強い日は撮影作業を延期しなければならない
時刻	夕方近くや昼の濃い影により道路状況が判別しにくい状況になることがあった
地形	道路は標高が変化し直線ではないため、操縦によって都度飛行経路と高度を調整する必要がある
障害	道路側面の高い木々や建築物、道路上空の細い電線など回避して飛行する必要がある
通行	車・バイク・人の通行があり、監視者やパイロンを配置し注意喚起もしくは通行止めにするなどの処置が必要
発着	ドローンの発着に適した上空が開けた空き地が近くになく目的の現場から遠くなる時がある
許可	市道道路わきは私有地であることが多く、飛行範囲に留意して操縦する必要がある
電源	道路を往復して詳細に撮影する場合、バッテリーがもたないため交換が必要となる時がある

(c). 安全性

今回のドローンによる調査を実施して確認した安全性にかかわる事項を以下にまとめ、図 2.1-78 にその様子を写真で示す。

- ・ 道路わきからの木々の枝や電信柱、電線への接触を避けるため、最低でも高度30m以上の飛行が必要
- ・ 高度70m程度をとれば障害物はわずか、しかし道路の標高は変わるのでドローンの高度計の数値を頼れない
- ・ 様々な障害物が道路上にはあり、万が一の接触防止のための障害物センサーを搭載したドローンは必須
- ・ 特に発着時は危険。十分な上空が開けた発着場所の確保と上昇下降時の細心注意での目視確認が必要



図 2.1-78 道路検査の撮影データ

■ 「確実性」の検証結果

インフラ補修箇所発見性能についての検証結果を述べる。

(k). インフラ補修箇所発見性能

<オルソ画像>

8K/4K ドローン撮影した複数枚の静止画により、図 2.1-79 に示すオルソ画像（パノラマ画像）を生成した。それぞれの8K/4K 画像を拡大比較してみると、撮影高度が高くても8K ドローンは4K ドローンに比べてより詳細に路面状況を確認可能であることがわかる。

山の辺の道のオルソ画像

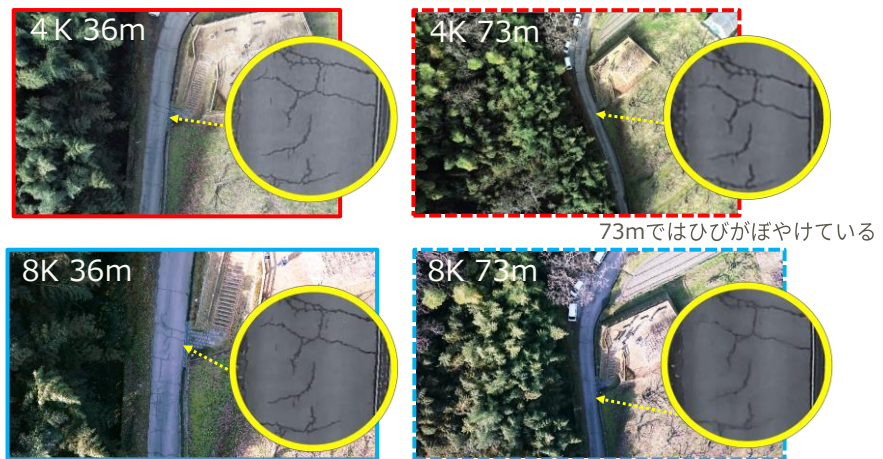


図 2.1-79 道路検査のオルソ画像

<ひび検出>

図 2.1-80 に示すように、道路専用ではない既存ソフトでひびの自動検出を試みて、ドローン撮影でも道路のひびの自動検出が可能であることを確認した。写真上の道路15m を升目で区切ってひび検出率を簡易算出しており、算出方法は

$$\text{検出率} = (\text{ひび検出できた升目数}) / (\text{ひびがある升目数})$$

とした。高度 36m では 4K/8K とともにひび検出率が 90%以上と高いが、高度 73m と高度が高くなると 4K は検出されるひびが少なくなり、検出率が 16%と極端に落ちる。一方、8K は高度 73m でも検出率 72%と比較的維持できており、ひびを一つ一つ細かくとらえるには不十分であるものの、道路の補修が必要かどうか全体の安全性を診断し、ふるいにかける簡易調査としては十分活用できる。



図 2.1-80 道路検査のひび検出

<ひび検出の課題 1 >

図 2.1-81 に示すように、道路に落ちる木枝の影をひびとして誤検出する問題があることを確認した。撮影する時間帯によって影の位置が変わるため、この問題は回避できると考える。

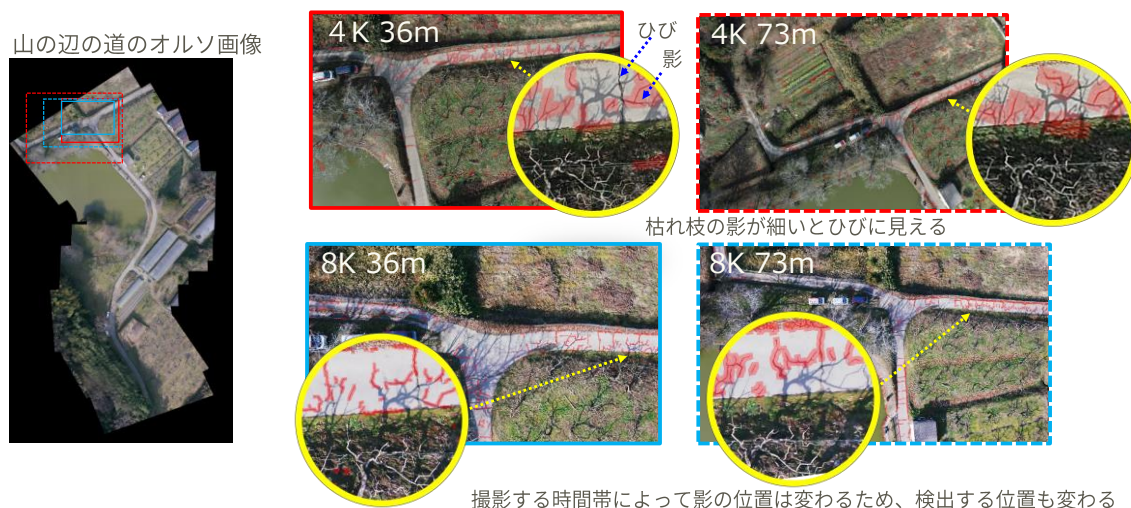


図 2.1-81 道路検査のひび検出の課題（影）

<ひび検出の課題 2 >

また、図 2.1-82 に示すようにドローンからの撮影で道路上にある木枝や電線をひびとして誤検出する問題があることを確認した。動画などによる奥行き方向の検出によりいずれも技術的問題で解決できると考えられる。これら誤検出の課題を解決すれば、安全性診断の基準値の「ひび割れ率」については、ドローン撮影による自動判定が可能といえる。

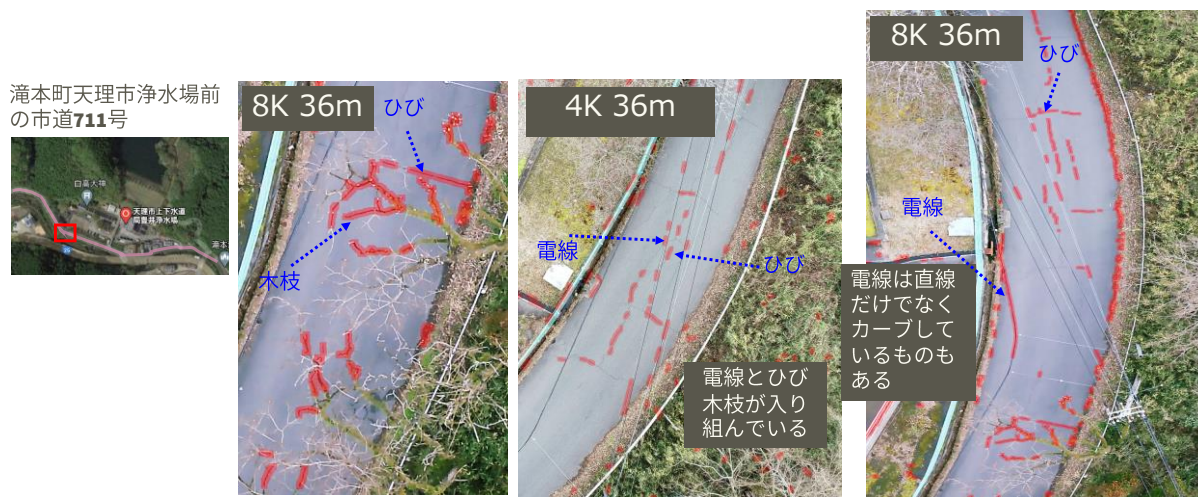


図 2.1-82 道路検査のひび検出の課題（木枝、電線）

<わだち掘れ量、IRI >

安全性診断の基準値には「ひび割れ率」以外に、図 2.1-83 に示す「わだち掘れ量」と「IRI（平坦性）」がある。「わだち掘れ量」「IRI」に関しては、8K/4K カメラによる単純な撮影では測定精度が足りないことがわかった。精度を上げるには、ステレオカメラなどの測定手法や、レーザー測量搭載のドローンによる別の測定手法が必要となる。

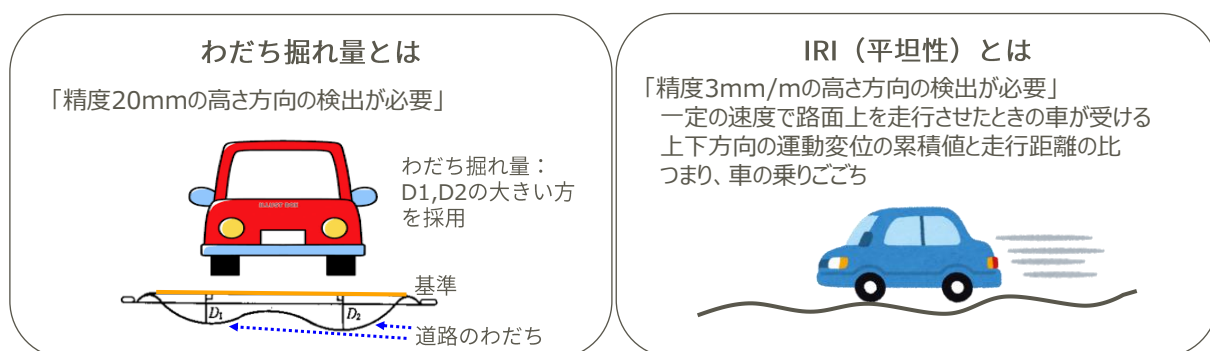


図 2.1-83 道路検査のわだち掘れ量と IRI

【まとめ】

天理市様管理の市道2か所を選定し、8K/4K ドローン撮影による道路スクリーニングの検証実験を実施した。検討項目「効率性」「確実性」の評価項目ごとの検証結果を、表 2.1-34 にまとめる。

今回のドローンによる道路スクリーニングは、本格的な点検・補修が必要とされる道路かどうかふるいにかける事前の簡易調査として有効であり価値があるといえる。

表 2.1-34 道路検査の実証実験における検証結果のまとめ

検討項目	評価項目	検証結果
効率性	(a). 作業時間	<ul style="list-style-type: none"> ・ドローンによりすべて人手に比べ 90%以上、車両点検に比べ 50%以上削減できる可能性があり ・8K で高度をとることで 4K に比べて撮影作業時間を短縮できる
	(b). ドローン操縦容易性	ドローンによる道路点検の場合は非常に多くの留意点があり
	(c). 安全性	操縦の容易性を担保するためには <u>安全性確保が最も重要</u>
確実性	(k). インフラ補修箇所発見性能	<ul style="list-style-type: none"> ・安全性診断基準の「ひび割れ率」算出においては、ドローンで撮影した画像からのひび検出が十分活用できることを確認。 ・特に 8K は 4K に比べて高度が高くてもより詳細に路面のひび割れ状況を確認可能 ・安全性診断基準の「わだち掘れ量」「IRI」算出においては、8K カメラ撮影だけでは精度が不十分で、レーザー等他のセンサーや手法が必要であることを確認

(5) 太陽光発電のインフラ点検

太陽光発電のインフラ点検の実証実験場所をシャープエネルギーソリューション（SESJ）にご提供いただき、株式会社ミラテクトローン様と連携してドローンによる点検撮影を実施した。

【選定背景】

- ・ 太陽光発電は、地球温暖化対策に貢献するとともに、災害による停電発生時にも電源として利用できるなどの利点から、自治体自身がメガソーラーを設置・運用したり、各種自治体施設に太陽光パネルを設置する等の取組が行われている。
- ・ 例えば、奈良県水道局では、図 2.1-84 のクリーンエネルギーを利用し、環境と共生する水づくりを推進するため御所浄水場に太陽光発電を導入している。



・ 図 2.1-84 奈良県水道局の太陽光発電システム

設置場所：奈良県御所市戸毛

出典：<http://www.pref.nara.jp/7179.htm>

- ・ これらの点検業務の効率化・確実化のためにも、センサー・ドローン・ロボット活用によるスマート保安の導入が期待されており、経産省のスマート保安官民協議会のアクションプラン案としても採用され、実用化への動きが活発化している。
(参考文献：経産省第2回 電力安全部会資料1 [電気保安分野におけるアクションプラン案](#))
- ・ 運用としては、メガソーラーの敷地内では、ドローン発着場や基地局を設置できる空き地・電源があり、ローカル 5G 導入の親和性は非常に高いとみている。
- ・ また、8K 活用に関してははまだ自動化高度化できていない微細なパネル割れやクリップ、架台の点検などが期待されている

【事前調査】

太陽光発電のインフラ点検を業務として実施しているシャープエネルギーソリューション（株）に太陽光発電の点検についてヒアリングし、表 2.1-35 にまとめた。これら点検項目をもとに実証実験として各ドローン撮影を実施し、作業効率性の評価と異常発見・検出できるかどうか比較評価した。なお、項目番号①～③はドローンによる保安点検ですでに実用化されつつある項目である。また、項目番号4～6は、今回初めて試みる点検項目で8K撮影による効果を確認した。

表 2.1-35 太陽光発電点検の主な項目

番号	項目名	内容	対応	検出可能なカメラ	
				赤外線	可視
①	パネルセル異常	パネル内部のセルモジュールが故障すると異常発熱する	パネル交換の判断が必要	○	—
②	パネル損傷	徐々に割れが広がり、セル異常に発展する可能性あり	パネル交換の判断が必要	○	○
③	パネル汚れ	パネル表面の汚れにより影ができるため発電効率が落ちる	パネル表面の清掃	○	○
4	クリップ緩み	パネルを固定するクリップのボルトが緩んでいるとパネルが脱落する可能性	クリップのボルトを締め直し	—	○
5	架台下	パネルを載せる架台下の腐食、発錆、たわみ、破損、地盤に異常がないか確認	架台の補修	—	○
6	架台スペーサ	パネルを載せる架台の高さの微調整用地震や地盤沈下などで徐々にずれる	スペーサの再調整	—	○
7	雑草	夏場に成長して発電や点検などの邪魔になる	雑草の刈り取り、除草剤散布	○ (近赤外線)	○
8	外部配線	外部配線の何らかの原因による損傷	配線の補修・交換	—	—

【選定場所】

シャープエネルギーソリューション（株）管理の大淀町桧垣本にあるメガソーラーを実証実験の現場として選定した。

発電所概要

- ・ 名称：シャープ桧垣本太陽光発電所
- ・ 場所：奈良県吉野郡大淀町
※桧垣本自治会所有地を活用
- ・ 敷地面積：約28,908m²

太陽電池モジュール

- ・ 設置枚数：8,550枚
- ・ 設置容量：2,052kWdc
- ・ 発電容量：1,750kWac
- ・ 年間発電量：204万kWh/年（約570世帯分）

事業概要

- ・ 運転開始：2013年3月、事業期間：20年

事業社 合同会社クリスタル・クリア・ソーラー
(シャープと芙蓉総合リースで出資)



図 2.1-85 太陽光発電の選定場所

【撮影日時】

2020年12月25日（強風のため撮影中止） 天候：曇り時々雨、風速：6.0m/s以上
2020年1月6日（再撮影本番） 天候：曇りのち晴れ、風速：～3.0m/s



図 2.1-86 太陽光発電の撮影風景

【撮影機材】

使用した撮影機材を表 2.1-36 に示す。8K 撮影用としてシャープ開発品の 8K カメラを搭載した DJI Matrice 600 Pro を使用し、4K 撮影用として市販の DJI Phantom4 Pro を比較として使用した。また、株式会社ミラテクドローン様より赤外線カメラと可視 4K カメラの 2 台を搭載したドローンを提供いただいて赤外線画像の撮影を行った。

表 2.1-36 太陽光発電の撮影機材

	8Kカメラ搭載 (シャープ)	4Kカメラ搭載 (シャープ)	赤外線+可視4Kカメラ搭載 (提供: ミラテクドローン様)	
機体本体名	DJI Matrice 600 Pro	DJI Phantom4 Pro	DJI Matrice 210 RTK	
最大飛行速度・時間	40~65km/h・約18分	50~72km/h・約30分	61~81km/h・約24分	
対角寸法・全重量	1133mm・15kg	350mm・1.4kg	643mm・4.91kg	
搭載カメラ	8Kカメラ (開発品)	標準品	DJI Zenmuse XT2 (19FR)	
センサー	33MP, 16:9, 4/3inch	20MP, 3:2, 1inch	12MP, 4:3, 1/1.7inch	遠赤外線
最大解像度	7680x4320(静止画) 7680x4320(30P動画)	5472x3648(静止画) 3840x2160(30P動画)	4000x3000(静止画) 3840x2160(30P動画)	640x512(静止画) 温度感度<50mK
レンズ焦点・画角	18mm・62°	8mm・84°	8mm・57°	19mm・32°
写真				

【撮影条件】

実証実験の各ドローンの撮影条件を表 2.1-37 に示す。8K ドローンおよび 4K ドローンは動画を撮影し、赤外線ドローンは静止画を撮影した。なお、撮影データの動画データレートは SD カード記録時の設定値、静止画データサイズは撮影後のファイルサイズを参考にした。

表 2.1-37 太陽光発電の撮影条件

	8K ドローン	4K ドローン	赤外線/4K ドローン
レンズ焦点 (画角)	18mm(62°)	8.8mm (84°)	19mm(32°)/8mm(57°)
動画解像度	7680x4320	3840x2160	—
動画フレームレート	29.97fps	29.97fps	—
動画コーデック	HEVC/H.265	HEVC/H.265	—
動画データレート	200Mbps	100Mbps	—
静止画解像度	—	—	640x512/4000x3000(4K)
静止画撮影間隔	—	—	2秒間隔
静止画コーデック	—	—	JPEG
静止画データサイズ	—	—	約900KB/枚 /約2MB/枚

【実験内容】

実証実験は、表 2.1-35 に示した事前調査における太陽光発電の主な点検項目を参考に、以下の3種類の実験作業に分けて実施した。

- ・パネル点検 (点検項目 1～3) :
⇒赤外線撮影と 8K/4K 可視撮影によるセル異常と割れ・汚れ箇所の発見と検出
- ・クリップ点検 (点検項目 4) :
⇒8K/4K 可視撮影によるクリップ緩みの発見と検出
- ・架台点検 (点検項目 5、6) :
⇒8K/4K 可視撮影による架台下のゆがみや異常、スペーサのずれの発見と検出

実験作業の撮影エリアと点検箇所を図 2.1-87 に示す。通常作業では現場全域を点検するが、実証実験の時間節約のため現場全域ではなく一部箇所だけの撮影としている。

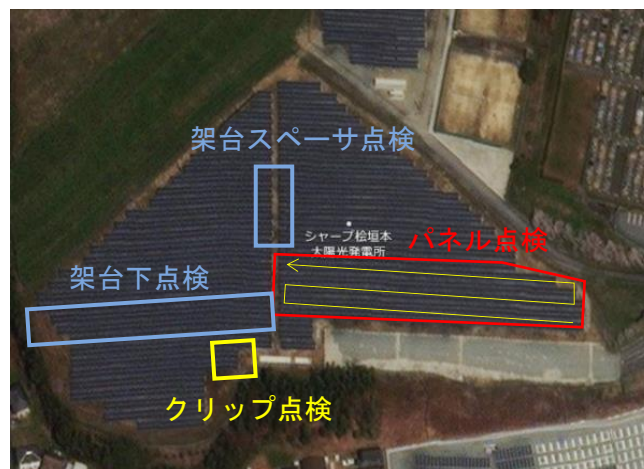


図 2.1-87 太陽光発電の撮影エリアと点検箇所

点検作業の飛行方法を表 2.1-38 に示す。ドローンの操縦はマニュアルで、パネル真上からの撮影とした。なお、赤外線ドローンの撮影高度は基本 30m であるが、状況により変更して撮影している。また、架台点検では、カメラのジンバルのチルト角度を状況により変更して撮影した。

表 2.1-38 太陽光発電の点検作業の飛行方法

点検種類毎の飛行高度		
点検種類	8K/4K ドローン	赤外線ドローン
パネル点検	高度 2m～5m	基本高度 30m
クリップ点検	高度 5m～30m	-
架台点検	高度 2m～5m	-

【評価項目】

実証実験で得た情報および撮影データ等を、表 2.1-39 の評価項目を参考にして検証した。

表 2.1-39 太陽光発電の評価項目詳細

検討項目	評価項目	内容詳細
効率性	(a). 作業時間	単位撮影時間当たりの撮影時間に関して定量的な比較を行う。
	(b). ドローン操縦容易性	自律及びマニュアル操作の時間比、ドローンの姿勢安定性の比較を行う。
	(c). 安全性	検査対象物とドローンの衝突安全性確保のために、十分な離隔距離を取った場合の撮影精度と撮影範囲の比較を行う。
確実性	(1). インフラ補修箇所発見性能	ソーラーパネル欠陥の検出限界を、赤外線および近接目視同等の画像をリファレンスとして比較を行う。

【検証結果】

検討項目「効率性」「確実性」の評価項目ごとの検証結果を示す。

■ 「効率性」の検証結果

作業時間、ドローン操縦容易性、安全性について述べる。

(a). 作業時間

太陽光発電の点検頻度は「月次」点検が基本である。今回の実証実験の現場全域を点検現場としたときの作業時間を算出した。敷地面積は約 28,908m²、パネル設置枚数は 8,550 枚、発電容量は 1,750kWac の規模である。

すべて人手の場合：約 180 分=2 人で 1.5 時間ほど

丁寧に見ていく時間はなく、異常がないか巡回して見て回る程度の時間である。

ドローン利用の場合：高度 30m および高度 60m の場合の作業時間を表 2.1-40 に示す。ミラテクドローン様が操縦した赤外線ドローンによるパネル点検の実際の撮影時間を基に、画角に入る列数から全域のドローン撮影時間を換算して算出した。

表 2.1-40 太陽光発電の作業時間

ドローン搭載カメラ	高度30m		高度60m	
	画角に入る列数	全体撮影時間	画角に入る列数	全体撮影時間
赤外線（画角32°）	 2列	約 26 分 <small>（ミラテクドローン様操作換算）</small>	ドローン搭載の小型赤外線センサーでは 高度30mで2列ずつの撮影が適正	
8K（画角62°）	 3列	約 17 分	 6列	約 9 分
4K（画角82°）	 4列	約 13 分	 9列	約 6 分 <small>※詳細点検に適さない画質</small>

以上により、パネル点検の作業時間だけを考えた場合、赤外線ドローンによるパネル点検の作業は人手に比べ約 85%削減可能である。また、8K ドローンにより高度 30m で約 91%削減、高度を 2 倍とれば約 95%削減できる可能性があることがわかった。なお、広角カメラの 4K ドローンで高度 60m から撮影すれば、撮影時間のさらなる短縮は可能であるが、汚れなどは判別するのは難しく点検には適さない画質であった。

(b). ドローン操縦容易性

今回のドローンによる点検を実施して確認したドローン操縦容易性にかかわる事項を表 2.1-41 に示す。

表 2.1-41 太陽光発電のドローン操縦容易性

項目	容易	難しい
フライト作業	<ul style="list-style-type: none"> ・ソーラーパネル上空はひらけているので GPS を捉えやすくドローンの飛行姿勢は常に安定していた。 ・もしもパネル 1 枚がまるごと異常であるかを発見する簡易的なものであれば 80m 程度高度をとって自動運転による点検が可能である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ドローン搭載の小型赤外線は温度分解能の制約により飛行高度を下げないとセル単位での異常はわかりづらい ・パネルの温度異常は冬場では発見しにくく、春・秋時では温度変化が出やすく異常を発見しやすい
天候について	雨風が激しくなければ操縦に関して特に問題はない	予定日 1 日目はドローンの安定飛行可能な風速 5m/s を超えたため、撮影作業を延期した。
飛行時間	今回 8K で高度を取ることで撮影枚数、飛行時間が短くできることを実機で確認できた	バッテリーが持つ時間内にフライトを完了させるため、飛行速度と飛行ルートが制約された。

(c). 安全性

今回のドローンによる点検を実施して確認した安全性にかかわる事項を述べる。

- ・ソーラーパネルの設置最大高さは約 1.5m で、電線やその他周囲の建造物などを考慮し高度 30m あれば安全性としては十分担保できることを確認した。
- ・さらに高度 3m まで近づいてソーラーパネルの架台下の様子など 8K を活かした細かい点検が可能であることを確認した。
- ・その他安全面での注意事項として、トンビなどの野鳥がドローンに寄ってくる問題があり、そのような場合は撮影を中止してやり過ぎ必要がある。

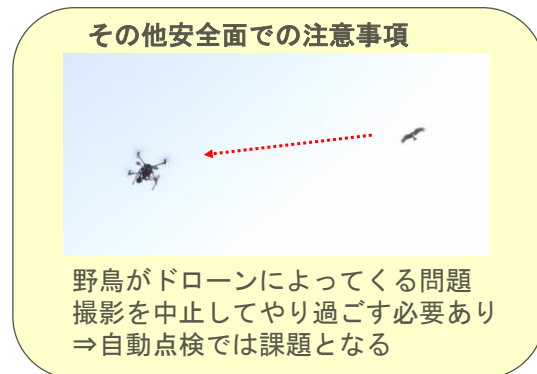


図 2.1-88 太陽光発電の安全性

■ 「確実性」の検証結果

インフラ補修箇所発見性能についての検証結果を述べる。

(1). インフラ補修箇所発見性能

<パネル点検 - パネルセル異常>

赤外線カメラ搭載ドローンにより高度 30m で移動しながらパネルを点検し、異常を発見した場合は高度を下げてホバリングしながら撮影した。4K/8K 可視カメラ搭載のドローンでは、高度 30m と 60m で移動しながらパネルを撮影した。図 2.1-89 に示すように赤外線撮影画像によりセルの異常発熱の箇所を発見検出できた。一方、4K/8K 可視撮影画像では正常にみえ、異常があるかどうかはわからない。なお、パネルのセル異常がある場合は経験的に周囲との赤外線測定による温度差が 5℃以上となる。

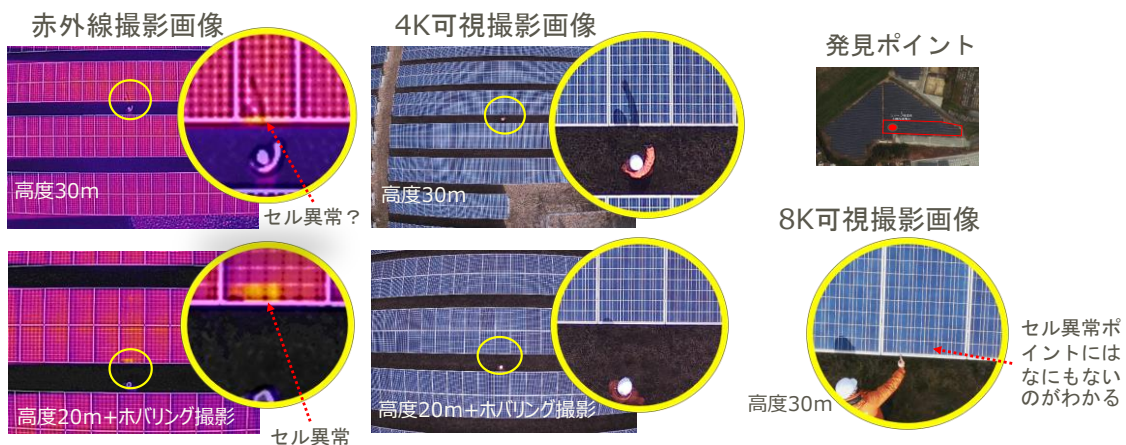


図 2.1-89 太陽光発電のパネル点検（セル異常）

<パネル点検 - パネル汚れ（鳥のフン）>

高度 30m で移動しながらパネル点検したところ、図 2.1-90 に示すように赤外線にてわずかな異常を発見したためホバリングして撮影した。4K 可視撮影画像で確認すると異物があることがわかり、8K 可視撮影画像では鳥のフンであろうことがはっきりわかる。なお、鳥のフンや軽微な汚れはホバリングしながらセンサーの温度レンジを絞ることで確認でき、経験的に赤外線画像で 2℃程度の差となる。

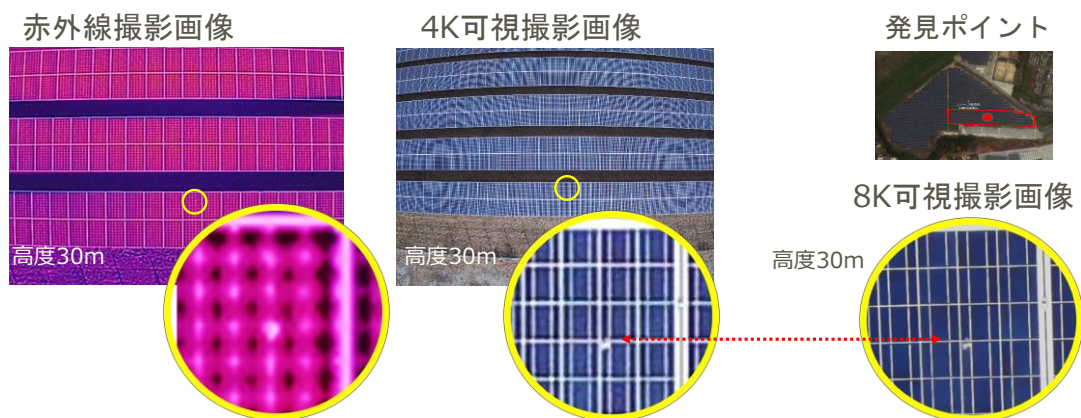


図 2.1-90 太陽光発電のパネル点検（鳥のフン）

<パネル点検 - パネル汚れ (汚れ) >

次に高度 45m で移動しながらパネル点検したところ、図 2.1-91 に示すように赤外線にてわずかな異常を発見したためホバリングして撮影した。4K 可視撮影画像では異物があることが見える。8K 可視撮影画像ではどのような汚れかどうかと汚れの範囲がはっきりわかる。

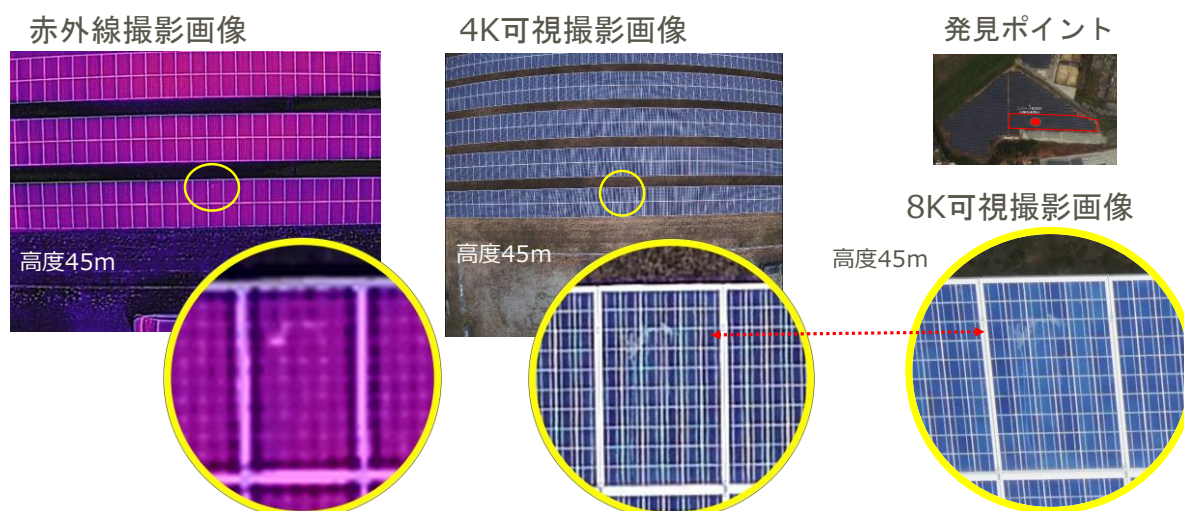


図 2.1-91 太陽光発電のパネル点検 (汚れ)

<パネル点検 - 反射による誤検出>

図 2.1-92 に示すように、赤外線による点検では、影や反射などによる温度差異常の誤検出が発生する。その際、可視画像やドローンを移動したときの反応で判別が可能である。さらに、8K のような高精細画像を同時参照すれば遠隔でも詳細な点検が可能となる。

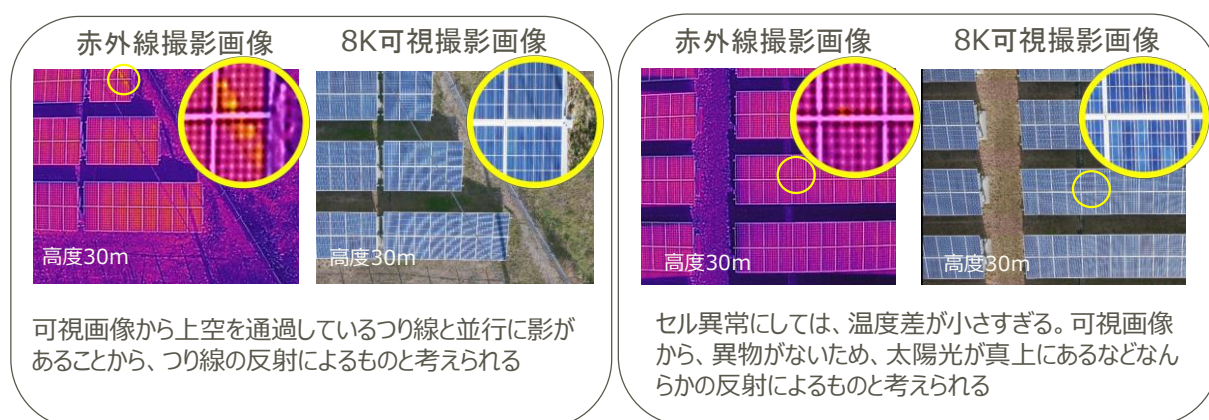


図 2.1-92 太陽光発電のパネル点検 (誤検出)

<クリップ点検 - 可視撮影による 8K/4K 比較>

パネルを架台に固定するクリップのボルトが緩んでいるとパネルが脱落する可能性があり、今回、ボルトの緩みが検出できるかどうか検証してみた。クリップとボルトにマーキングし、両者のマーキングずれから緩みを検出可能と仮定し、マーキングが見えるかどうか有効な撮影高度を比較した。

図 2.1-93 に示すように、高度 5m では 4K でもマーキングがはっきりと見えた。高度 10m では 4K ではクリップやマーキングなどが不鮮明ではあるものの、8K ではマーキングを確認できた。

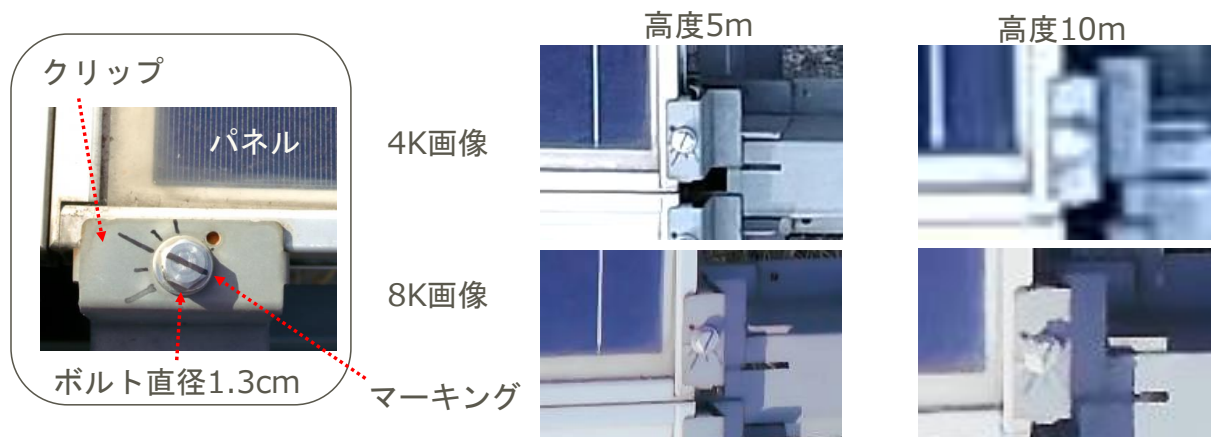


図 2.1-93 太陽光発電のパネル点検（クリップ点検）

<架台点検 - 架台下>

パネルを載せる架台下のたわみや破損、地盤沈下が起こるとパネル故障につながる。目視点検並みにドローンからの撮影で確認できるか検証してみた。パネルの架台下をのぞき込めるかどうか有効な撮影高度の比較とカメラスタビライザをマニュアルで操作し適正なカメラの仰角を確認した。図 2.1-94 に示すように、4K では高度約数mが必要でパネルに近く危ない。一方 8K の場合は、高度約 5m カメラ仰角約 20 度で、2列先の架台下を広範囲に細かく観察でき有用である。

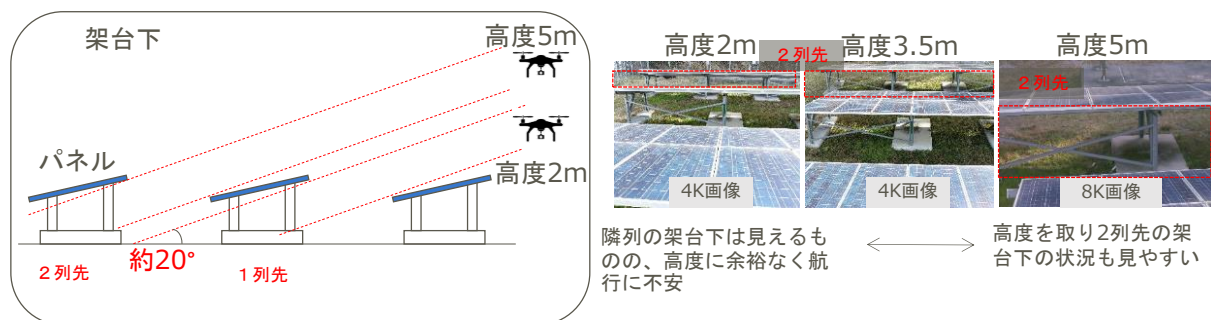


図 2.1-94 太陽光発電のパネル点検（架台下点検）

<架台点検 - 架台スペーサ>

地震や地盤沈下、季節の気温変化により生じる架台の伸縮の影響で、図 2.1-95 の左図のように架台高さの微調整用のスペーサがずれていく。特に連結架台の両端部が先にずれる傾向にあり、点検時に大きなずれを発見したときは架台をジャッキアップして位置補正する必要がある。そのため、架台下にある足元をドローンで撮影しずれ量が確認できると保全として役立つ。実際に有効な撮影高度の比較、カメラ位置を確認し、目視点検並みにできるか検証してみた。図 2.1-95 の右図のようにスペーサが架台の足および土台のコンクリートと同色系なためわかりづらいが、8K なら高度 10m でもズレ量を確認できた。

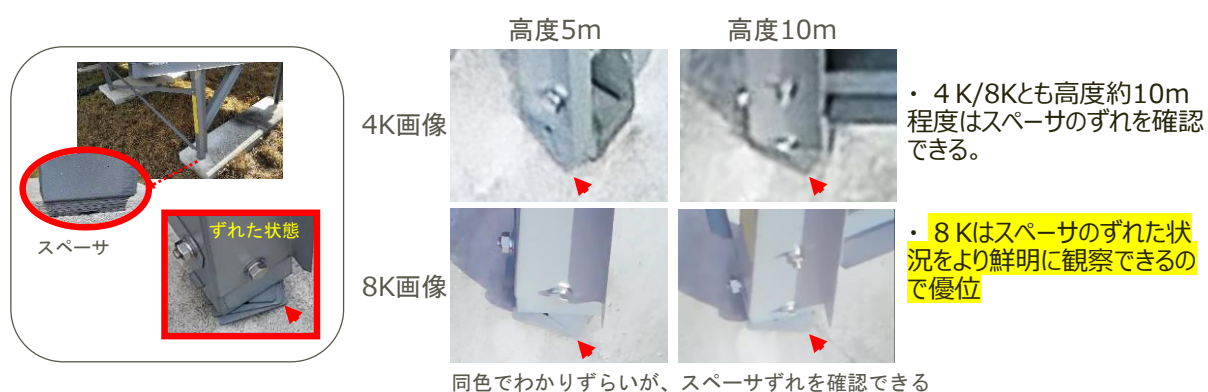


図 2.1-95 太陽光発電のパネル点検（架台スペーサ）

【まとめ】

シャープ桧垣本太陽光発電所を現場として選定し、ソーラーパネルの点検項目に沿って各種ドローン撮影による実証実験および調査検証を実施した。検討項目「効率性」「確実性」の評価項目ごとの検証結果を表 2.1-42 にまとめる。

表 2.1-42 太陽光発電の実証実験における検証結果のまとめ

検討項目	評価項目	検証結果
効率性	(a). 作業時間	<ul style="list-style-type: none"> ・ 現状の人手によるパネル点検作業対してドローンを活用することで飛行高度 30mにて 85%以上の作業時間削減が可能であることを確認した。 ・ さらに 8K では 91%以上の削減の可能性もある。
	(b). ドローン操縦容易性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 操縦容易性において、ソーラーパネル上空は開けているため GPS ロスなど発生しにくくドローン姿勢安定は容易。 ・ ただし、ドローンに搭載された小型赤外線カメラの温度分解能感度の影響により、パネル内のセル異常を詳細にみるには高度を下げる必要あり。

	(c). 安全性	<ul style="list-style-type: none"> ・パネル設置高さや周囲の障害物の様子から<u>高度30m あれば安全性としては十分担保</u>できる。 ・さらに近づいてソーラーパネルの架台下の様子など <u>8K を活かした細かい点検が可能</u>であることを確認。
確実性	(1). インフラ補修箇所発見性能	<ul style="list-style-type: none"> ・インフラ補修箇所発見性能として、<u>赤外線による補修ポイントの早期発見の優位点</u>を確認。 ・ただし取得した撮影データによる異常判定は人間による経験的な判断に頼る必要あり。 ・可視カメラによる点検も合わせることで不良状態を明確にでき、<u>8K を用いることでより点検精度を向上</u>できる。 ・クリップや架台下の点検など<u>現状自動化できてない点検項目も 8K ドローンで実用的になる</u>ことを確認。

(6) 映像の比較実験のまとめ

今回の8K映像と2K（又は4K）映像の比較による各自治体等における実証実験で検証した結果を図 2.1-96 にまとめる。作業時間において、多くのケースで自治体業務にドローンを導入することで人手に比べ80～90%の削減が可能となる反面、ドローンの操縦および飛行安全性の面で難しい状況が確認された。確実性においては、8Kを導入することで業務の精度や性能が増す事例を多々掘り起こすことができた。

8K映像比較による実証実験の検証結果		検証結果				
検討項目	評価項目	災害現場	橋梁点検	公共測量	道路スクリーニング	太陽光発電点検
効率性	(a).作業時間	人手と比べ ・林道沿いで70%削減 ・現場直行で90%削減 ・年間約7割の削減効果	・人手と比べ91%削減	・高度を倍とすることで撮影枚数を70%削減可能 ・8Kでは4Kに比べて同じ精度で50%短縮可能	・人手と比べ90%削減 ・車両と比べ50%削減 ・8Kでは高度をとること で4Kに比べて短縮可能	・人手と比べ85%削減 ・8Kでは高度をとること で91%の削減可能性
	(b).ドローン操縦容易性	8Kでは4Kより撮影範囲が広く撮影容易	橋梁側面は容易 橋下の撮影が難しい	オートパイロットにより操縦は容易	ドローンによる道路点検は非常に多く留意点あり	姿勢は安定で操縦容易 セル異常時には高度を下げる必要あり
	(c).安全性	8Kでは4Kの倍の高度で同等画質を確保できる	橋下の撮影において8Kは距離を取った撮影で優位	8Kでは精度維持しつつ4Kより高い高度で撮影可能	道路状況により安全性低くなるケースがある	高度30mあれば安全性としては十分担保
確実性	(d)～(f) (h)～(l)	(d).直上からの状況把握 (e).情報収集範囲 ※「(g).非災害時の状況と災害時の状況の重ね合わせ精度」については今回の実証実験では検証困難で未実施 (h)情報の統合度合 ・山間部におけるGPSロスによる情報損失あり ・8Kは精度保ち高度をとってGPSロス回避可	(i).インフラ補修箇所発見 ・赤外線による早期発見の優位性を確認 ・可視カメラによりさらに詳細状況を確定確認 ・8Kは4Kに対し撮影距離2倍でひび検出可能 ・解析手法に8Kを導入することで精度向上可能	(f).現場地図作成精度 (j).誤差含有度合 ・8Kは高度73mで地上画素寸法1cm理論的可能 ・静止画ではなく動画撮影でも実測3cm以下の測量誤差 ・写真測量の最も高い精度区分である5cm以内を達成可能	(k).インフラ補修箇所発見 ・ドローン撮影画像からひび検出が十分可能 ・8Kでは4Kに比べて高度が倍でも詳細に路面状況を確認可能 ・安全性診断基準のわだち揺れ量/IRIにおいては、精度不十分	(l).インフラ補修箇所発見 ・赤外線による早期発見の優位性を確認 ・8Kカメラを用いることで点検精度向上可能 ・クリップや架台下の点検など8Kで実用的に

図 2.1-96 各自治体等における実証実験検証結果のまとめ

また、今回の実証実験において解消できない問題が多々あった。それら課題とそれら対応策を将来への参考として図 2.1-97 に、詳細を表 2.1-43 にまとめた。

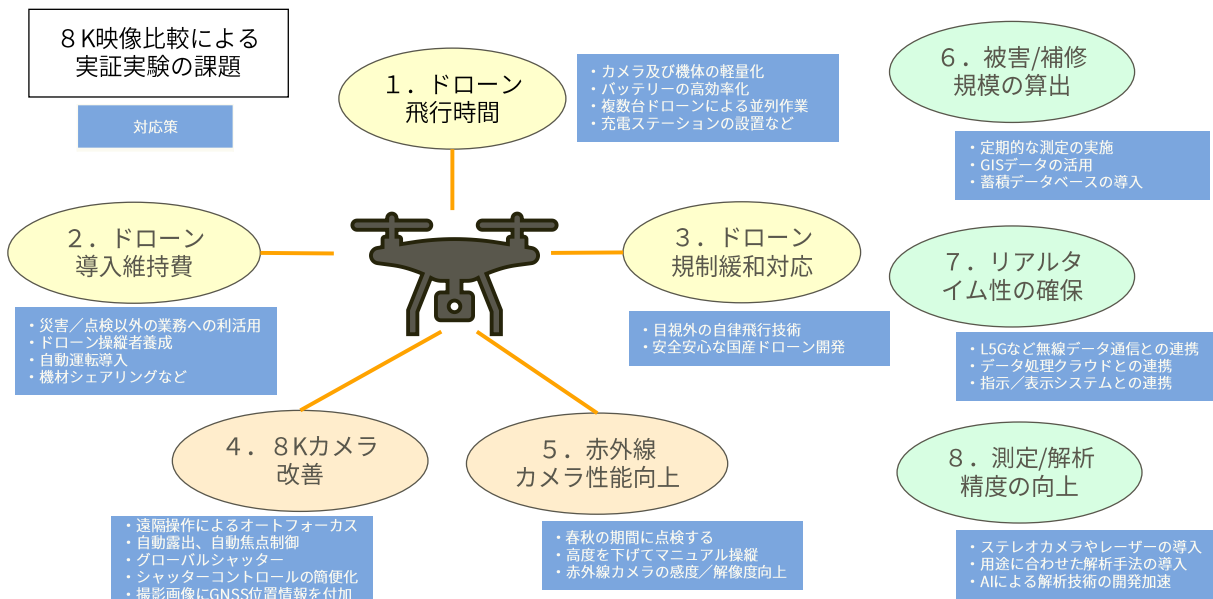


図 2.1-97 各自治体等における実証実験で問題となった課題

表 2.1-43 各自治体における実証実験で問題となった課題詳細

No.	課題名	課題内容	対応策
1	ドローン 飛行時間	ドローンのバッテリーにより最大飛行時間(現状数十分)の制限からくる作業時間・飛行範囲の制約	<ul style="list-style-type: none"> ・カメラ及び機体の軽量化 ・バッテリーの高効率化 ・複数台ドローンによる並列作業 ・充電ステーションの設置など
2	ドローン 導入維持費	災害／点検用途のみでは、ドローンの導入維持費が高すぎる。操縦者も自治体の中では人員として工面できない。	<ul style="list-style-type: none"> ・災害／点検業務以外への利活用(注意喚起、山岳遭難救助、鳥獣対策、観光促進、ICT教育など) ・ドローン操縦者の養成もしくは自動運転、機材シェアリングなど
3	ドローン 規制緩和対応	令和4年度の目視外飛行の緩和に向けた国産ドローンの準備。	<ul style="list-style-type: none"> ・目視外の自律飛行技術 ・安全安心な国産ドローン開発へ向けて各社取組中
4	8K カメラ 改善	カメラ仕様が目的に適せず精度が落ちる。	<ul style="list-style-type: none"> ・現在開発中、改善していく ・遠隔操作によるオートフォーカス・自動露出、自動焦点制御 ・ローリングシャッターよりもグローバルシャッター ・シャッターコントロールの汎用化(アプリなどによる手元コントロールを可能に) ・撮影画像にGNSS(*1)による位置情報の付加
5	赤外線カメラ 性能向上	赤外線点検は冬季に性能が発揮できない。気温に加えて悪天候あるいは夜間など、年中常時インフラ点検できることが望ましい	<ul style="list-style-type: none"> ・春秋の期間に点検する ・高度を下げてマニュアル操縦 ・ドローンに搭載する赤外線カメラの感度/解像度向上
6	被害/補修 規模の算出	災害前の測定データもしくは定期的な点検データがなく、被害・補修規模の換算が難しい。	<ul style="list-style-type: none"> ・定期的な測定の実施 ・GISデータの活用 ・既存データベースでの対応や蓄積データベースの新規導入
7	リアルタイム性 の確保	撮影データはカメラのSDカードに記録して、ドローン回収後、PCへコピー、解析しており、リアルタイム性に欠ける。	<ul style="list-style-type: none"> ・ローカル5Gとデータ処理クラウドとの連携実験を進めていく ・発見および詳細状況把握のための指示/表示システムとの連携

8	測定/解析精度の向上	写真撮影では精度数 c mが限界 また、高さ方向の検出も難しい。 ひびなど異常の誤検出の課題がある。	<ul style="list-style-type: none"> ・ステレオカメラやレーザー測量などを併用した精度向上の実証実験の実施 ・用途に合わせた解析手法の導入 ・AI による解析技術の開発加速
---	------------	--	---

(*1)GNSS(Global Navigation Satellite System / 全球測位衛星システム) : GPS、GLONASS、Galileo、みちびき (準天頂衛星システム : QZSS) 等の衛星測位システムの総称

2.2 自治体によるローカル 5G の電波利用上の課題

2.2.1 自治体の各種業務から見える現状の課題

1.1 節で取り上げた自治体の各種業務について、電波利用上の課題を検討する。ここでは自治体の各種業務を以下の5つの業務として整理する。

• 平常時の防災活動

河川、村道、林道、傾斜地などの危険個所の監視、土砂災害警戒区域の調査、道路、下水道の現状把握など。廃棄物の不法投棄による被害防止のための監視を含む。



※河川施設の写真は奈良県ウェブサイトより引用

図 2.2-1 平常時の防災活動のイメージ

• 災害発生時の現場確認、減災活動

状況の早期把握、住民の安否確認、避難所等への住民の誘導・連絡手段の確保・物資搬送手段の確保など。災害対応期間(通常の通信手段が復旧するまで)の運用を想定。

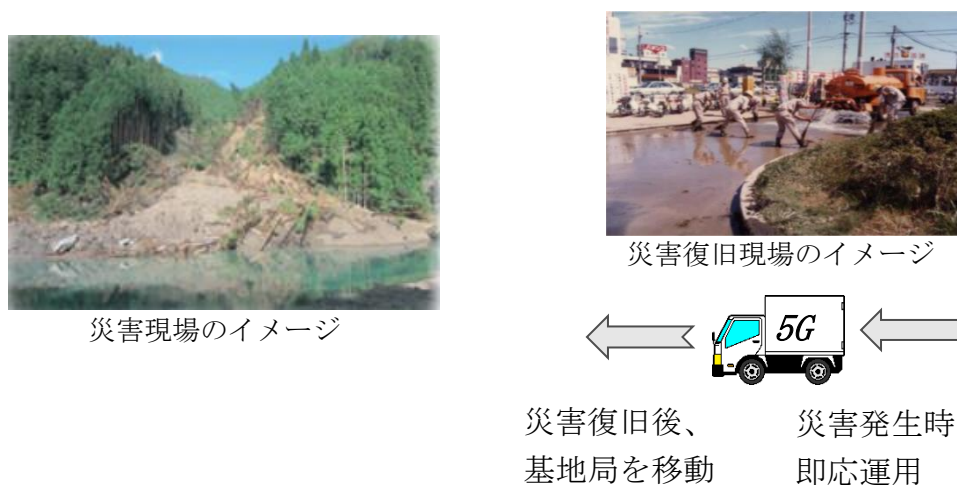


図 2.2-2 災害発生時の現場確認、減災活動のイメージ

- 観光スポットのデータ収集

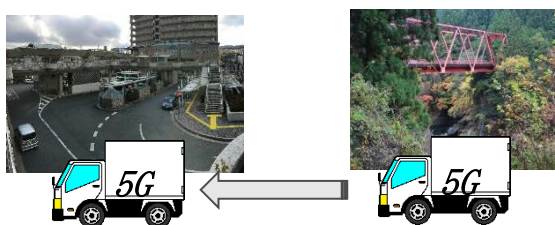
観光スポットの映像提供によるプロモーションと、観光スポット周辺の道路状況、駐車場の状況を提供することで自治体への問い合わせを減らすことを目的とする業務。



図 2.2-3 観光スポットのデータ収集イメージ

- インフラの点検業務

橋梁の改修、耐震化、道路の補修修繕、上下水道の老朽化対策、耐震化などのために行われる点検業務(対象の施設によって1回/年～1回/5年程度の頻度)。



点検終了後、次の現場に基地局を移動

図 2.2-4 インフラの点検業務のイメージ

- 農業関係業務

作物の状態確認、鳥獣害対策のための監視業務。監視対象は農地、山林、農地等を通っている道路(公道含む)など。

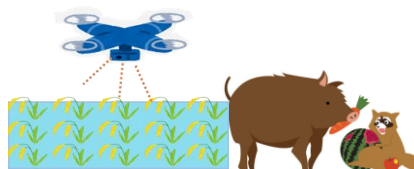


図 2.2-5 農業関係業務のイメージ

以上の5つの業務について、電波利用上の課題との関係をまとめる。

(1) 自己土地利用と他者土地利用

自治体の各種業務において、ローカル 5G の利用が想定される場所は多岐にわたる。一方、ローカル 5G は一定条件下での利用が認められており、ローカル 5G の提供範囲について条件が課せられている。以下、総務省「ローカル 5G 導入に関するガイドライン」令和 2 年版から条件について記載した部分を引用する。

(7) 提供範囲

○ ローカル 5G

ローカル 5G は、自己の建物内又は自己の土地内で、建物又は土地の所有者等（賃借権や借地権等を有し、当該建物又は土地を利用している者を含む。以下同じ。）が自ら構築することを基本とする 5G システムである。また、当該所有者等からシステム構築を依頼された者も、依頼を受けた範囲内で免許取得が可能である（以下「自己土地利用」という。）。

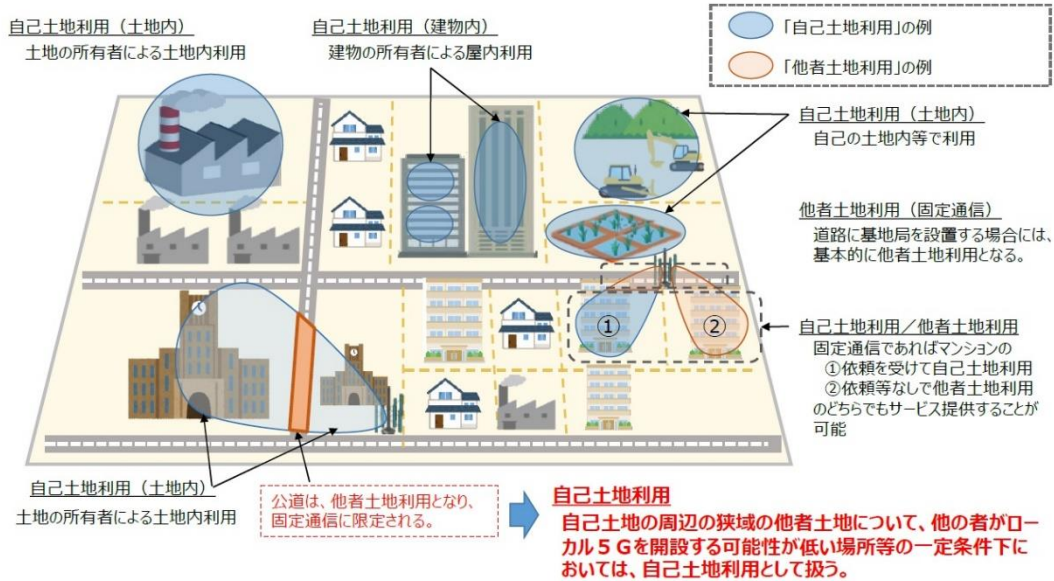
一方、上述の「自己土地利用」以外の場所、すなわち他者の建物又は土地等での利用（当該建物又は土地の所有者等からシステム構築を依頼されている場合を除く。）については、固定通信（原則として、無線局を移動させずに利用する形態）の利用のみに限定する（以下「他者土地利用」という。）。

公道はここに記載されている他者土地に含まれるため、公道にローカル 5G 基地局を設置する場合、ローカル 5G 端末装置を公道上で使用する場合どちらも固定通信に制限されることになる。自己土地利用の範囲の概要を図 2.2-6 に示す。

2-3. ローカル5Gの利用イメージ

7

- ローカル5Gの柔軟な利用を可能とするため、免許主体の範囲の考え方について、一定条件の下においては他者土地利用を自己土地利用として扱う。



※総務省 情報通信審議会 新世代モバイル通信システム委員会

「情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告概要」より抜粋

図 2.2-6 ローカル5Gの自己土地利用の範囲

自治体業務では自治体所有の敷地以外で利用が想定される用途が多く、また、移動運用が望まれる用途も多い。ドローンにローカル5G端末を搭載する場合も移動運用に含まれるため、公道上でドローンを利用する用途への利用が制限されている状態となっている。

先に例示した自治体業務について利用土地による区分で整理すると下記のようなになる。利用土地の分類は屋内利用/自己土地内利用/他者土地固定利用/他者土地移動利用とした。また、自己土地内利用/他者土地固定利用/他者土地移動利用の区分は屋外利用を意味する。

表 2.2-1 利用土地区分による分類

	利用土地区分			
	屋内利用	屋外利用		
		自己土地 内利用	他者土地 固定利用	他者土地 移動利用
防災	○	○	○	●
災害対応	○	○	○	●
観光(映像提供)	○	○	○	
観光(交通管理)		○	○	●
インフラ監視		○	○	●
点検業務		○	○	●
農業関係業務		○	○	●

※○:現行制度で運用可能/●:現行制度で運用できないもの

防災、災害対応については、建屋内、公道を含む屋外全般で利用が考えられるため全ての区分で利用がありうるとした。観光業務の映像提供については、敷地内の定点カメラに類するカメラ等の利用が主と考えられるため、屋内利用/自己土地内利用/他者土地固定利用とした。観光業務の交通管理については屋外全般の利用で、駐車場の映像や公道上の車両やドローン等による上空から撮影した情報の利用が考えられるため、自己土地内利用/他者土地固定利用/他者土地移動利用とした。インフラ監視、点検業務、農業関係業務については、自己土地内の施設、公道を含む他者土地の施設、公道上の移動利用が考えられるため、自己土地内利用/他者土地固定利用/他者土地移動利用とした。

以上をまとめると、公道を含む他者土地における移動利用が一部含まれる自治体業務の割合が多いことが分かる。

(2) 屋外利用の制限がある地域

4.7GHz 帯のローカル 5G では、公共業務用無線局との共用を図るために周波数毎に使用条件が定められており、屋外利用に制限がある地域が設定されている。28GHz 帯のローカル 5G にはこのような制限はないが、1つの基地局で通信できるエリアが 4.7GHz 帯よりも狭くなる利用できる範囲が短くなる。また、28GHz 帯を利用する場合は 4.7GHz 帯などのマイクロ波帯域を併用することが多く、その分機器のコストが増加する傾向にある。

3) 4.7GHz 帯における周波数使用の考え方

4.7GHz 帯において公共業務用無線局との共用を図るため、以下のとおり周波数毎に使用条件が定められている。ローカル5Gの使用周波数帯に応じて、公共業務用無線局との間で混信その他の妨害を与えるおそれがある地域については設置制限や無線局の諸元に制限が設けられていることから、周波数使用に際しては、留意が必要である。

① 4.6～4.8GHz の周波数帯を使用する場合

屋内での設置のみ可能である。その場合であっても、基地局の等価等方輻射電力が-20dBm/MHz 以下であって、別紙1の地域に設置されていないこと。

(中略)

② 4.8～4.9GHz の周波数帯を使用する場合

屋内及び屋外での設置が可能である。その場合であっても、基地局の等価等方輻射電力が48dBm/MHz 以下であって、以下(ア)～(イ)の使用条件を満たす必要がある。

(ア) マクロセル基地局¹を設置する場合は、別紙2の地域に設置されていないこと。

(イ) スモールセル基地局²を設置する場合（屋内に設置するものであって、等価等方輻射電力が-20dBm/MHz 以下の場合を除く。）は、別紙3の地域に設置する場合は4.6～4.8GHz における不要発射の値が-16dBm/MHz 以下となっていること。

(後略)

¹ 等価等方輻射電力が25dBm/MHz を超え48dBm/MHz 以下の無線局

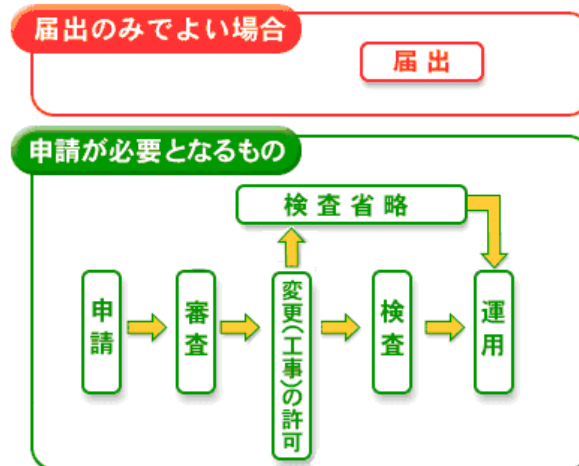
² 等価等方輻射電力が25dBm/MHz 以下の無線局

※総務省「ローカル5G導入に関するガイドライン」令和2年版より抜粋
(別表1から3は、総務省ウェブサイト参照 https://www.soumu.go.jp/main_content/000659870.pdf)

(1) 自己土地利用と他者土地利用で述べたように、自治体業務では屋外の利用が想定される。

(3) 基地局の移動の必要性

自治体業務の中には、点検業務のようにある施設における年間の利用期間が数日から数週間にとどまるものが含まれる。ローカル5Gの設備の運用コストの観点から考えると、点検業務などでローカル5Gを使用する場合などでは施設ごとに基地局を設置するのではなく、1つの基地局を移動させて複数の施設で運用することが望まれる場合がある。現在の制度では基地局の移動運用は認められておらず、基地局の設置場所などの免許条件を変更する場合、あらかじめ総務大臣の許可を得る必要がある。



※総務省ウェブサイトより引用

図 2.2-7 無線設備の変更手続き概要

なおローカル 5G では、自己土地利用の場合に届出のみで設置場所を変更できる場合が規定されている。公道などの他者土地利用の場合は通常の変更手続きが必要となる。

一方で、非常災害時には無線局の開設、無線設備の設置場所等の変更の許認可を速やかに行うための「臨機の措置」が規定されている。

変更申請手続き

1. 無線設備の設置場所等を変更する場合や、無線設備の変更の工事をしようとするときは、無線局の変更申請が必要です。
2. 技術基準適合証明を受けた無線設備に取り替えた場合など、変更の内容が軽微なもの場合は、届出による変更が可能です。
3. ローカル 5G の利用において、屋内に設置された空中線の位置、高さ又は指向方向を変更する場合であって、他者土地における電波の強度が増加しない場合については、空中線の工事設計に係る変更申請を届出とすることが可能です。なお、その場合に給電線の全部又は一部分について同様の考え方によって変更することが可能です。

※5GMF ローカル 5G 免許申請支援マニュアル 2.0 版から引用

1 臨機の措置の対象

次の各号に該当する場合は、臨機の措置を行うことができます。

(1) 震災、火災、風水害、暴動その他非常の事態が発生し、又は発生するおそれがある場合（当該非常災害による被害の復旧のための措置を実施する必要がある場合は、その措置が終了するまでの期間を含む。）において、当該期間中に限り使用するものであるとき。

(2) 通信の内容が次の一に該当するものであるとき。

ア 非常通信（新聞社、通信社、放送事業者等の報道機関が非常災害時において有線通信を利用できないか又はこれを利用することが著しく困難な場合に発する非常事態の収拾、人命の救助、災害の救援、交通通信の確保、人心の安定又は秩序の維持等に有効な新聞ニュース又は放送ニュースの通信を含む。）

イ 電波法施行規則第 37 条第 26 号から第 30 号まで若しくは第 32 号に規定する通信

ウ 非常通信に準ずる重要通信（電気通信業務用及び防災関係機関（災害対策基本法第 2 条に規定する指定行政機関、指定地方行政機関及び指定公共機関、指定地方公共機関並びに地方公共団体をいう。）の防災関係業務用の通信を含む。）

2 臨機の措置を行うことができる範囲

臨機の措置を行うことができる範囲は、すべての無線局について、次に掲げる事項です。

- (1) 予備免許及び免許の付与
- (2) 無線設備の変更の工事の許可
- (3) 無線設備の設置場所（移動するものにあつては、移動範囲）の変更の許可
（中略）

3 臨機の措置の手続き

臨機の措置の手続きは、次のとおりです。

(1) 申請は、申請者がまず口頭又は電話等迅速な方法で行い、所定の申請書等は後刻可及的速やかに提出することが必要です。

(2) 処分は、口頭又は電話等迅速な方法で行い、所定の処分通知書の交付は所定の申請書等の提出を待って遡及処理されます。

※総務省ウェブサイトより抜粋

自治体業務では、観光地の駐車場監視などのように常時ローカル 5G 設備を使用するものと、施設点検のように 1 年のうち数週間しか使用しないものが含まれる。現時点ではローカル 5G の設備費用は無視できない。そのため基地局装置を常時設置する運用が望ましいか、一時設置による臨時運用が望ましいかを分類する。

表 2.2-2 設置利用期間の分類

	設備利用期間	
	常設利用	臨時利用
防災	○	○
災害対応		○
観光(映像提供)	○	
観光(交通管理)	○	
インフラ監視	○	○
点検業務		○
農業関係業務	○	○

防災業務は河川監視のような定点監視に類するものと、大雨の後の道路、のり面確認などのような不定期に発生するものがある。災害対応は災害発生後、一定期間のみの利用となる。観光業務は観光施設、その周辺の情報の取得、提供を行うものであり、情報の取得頻度が高いことから常設利用が主となる。インフラ監視は年単位の頻度で行われる施設が多い。一例として、奈良県において行われている老朽化した橋梁設備に対する点検の点検周期が設備の状態によって1～5年としていることなどが挙げられ、臨時利用に区分した。農業関係業務についての自治体業務は作物の状態確認、鳥獣害対策のための監視業務が挙げられている。定点観測的な使われ方と被害の発生に応じた監視のどちらもありうるため常設利用、臨時利用両方に区分した。

以上をまとめると、ローカル 5G の利用が想定される自治体業務には、一時設置による臨時利用が望まれる業務の割合が多いことが分かる。

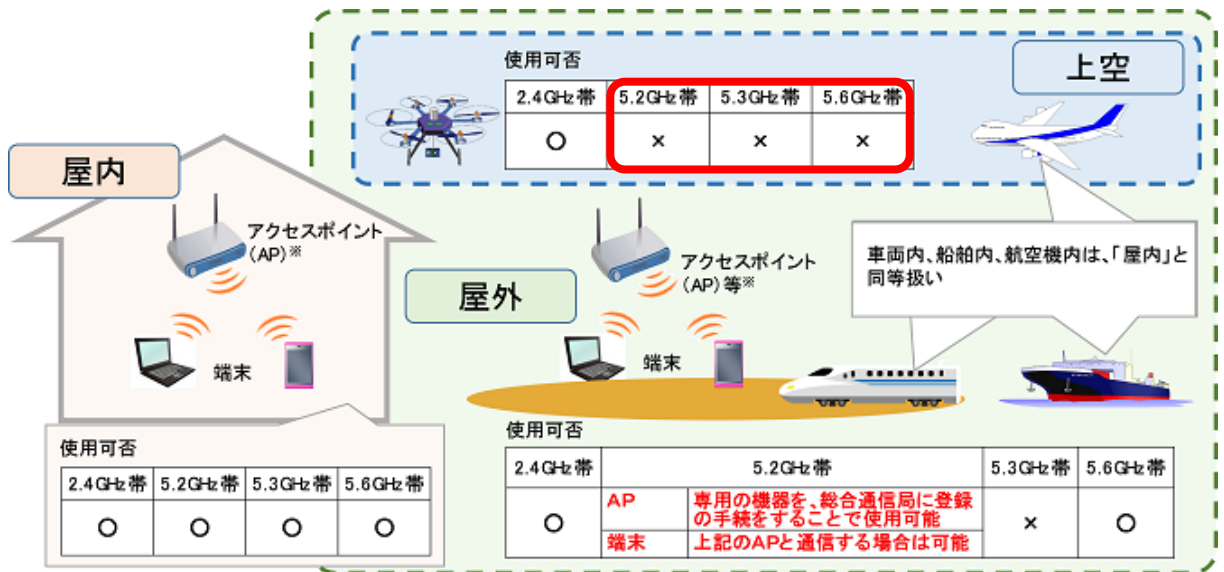
(参考)

設置が容易な無線通信システムとして無線 LAN が広く知られている。無線 LAN には屋外で利用可能な周波数帯が設定されており、2.4GHz 帯、5.2GHz 帯、5.6GHz 帯が該当する。ただし、5.2GHz 帯はアクセスポイントを登録局として運用する場合のみ屋外利用が可能であり、一部設置に制限がある地域がある。また、5.2GHz 帯、5.6GHz 帯共に上空利用は認められていない。

2.4GHz 帯は上空を含む屋外利用が可能であるが、最大信号帯域が 40MHz までであり、また利用者過多による混雑もあることから、8K 映像伝送のような高速通信には向かない。5GHz 帯 (5.2GHz 帯、5.3GHz 帯及び 5.6GHz 帯) を利用する無線 LAN は最大信号帯域が 160MHz となり高速な通信が可能であるが、1 ユーザが帯域を占有することはできず、過密地域では通信速度が担保されない。また、5GHz 帯は先述のように上空利用ができない。

ローカル 5G は免許された基地局装置により帯域を占有することが可能であり、通信品質を一定に保つことが可能である。また、(自己土地利用の範囲においては)

端末装置の上空利用も可能である。そのため、高速な通信を担保しなければならない用途に向いているといえる。



(※ 中継器を含む)

※図は総務省ウェブサイトより抜粋

図 2.2-8 無線 LAN 機器の使用場所制限の概要

(4) 運用拠点と基地局装置の設置場所

ローカル 5G ネットワークでは、役場等に設置するコアネットワークと基地局装置の間を光ファイバで接続して使用することが想定される。このコアネットワークと基地局装置の間の接続をバックホールと呼ぶ。コアネットワークと基地局装置が同一の自己土地内であるなど、コアネットワークと基地局装置の間が近ければ光ファイバの敷設の負担が問題となることは少ないが、一方でコアネットワークと基地局装置の間に他者土地がある場合、あるいはコアネットワークと基地局装置の間が十分に離れている場合など、地形的要因により光ファイバの敷設が負担となる場合が発生する。特に、災害時の通信需要に対応する場合や、過疎地の通信需要に対応する場合は光ファイバの敷設が難しいことが多い。そのため、バックホールの無線化が要求されている。



図 2.2-9 ローカル 5G ネットワーク全体のイメージ

ローカル 5G を含む 5G ネットワークでは、役所などの運用拠点に各種サーバなどを含んだコアネットワークを構築し、無線設備を備える基地局装置とコアネットワークを光ファイバで接続して運用する。運用拠点と基地局装置の設置場所が異なる場合、光ファイバの敷設がコスト、地理的要因などにより難しいことがある。そのため、以下のように運用拠点と基地局装置の設置場所による分類を行った。

表 2.2-3 基地局設置場所による分類

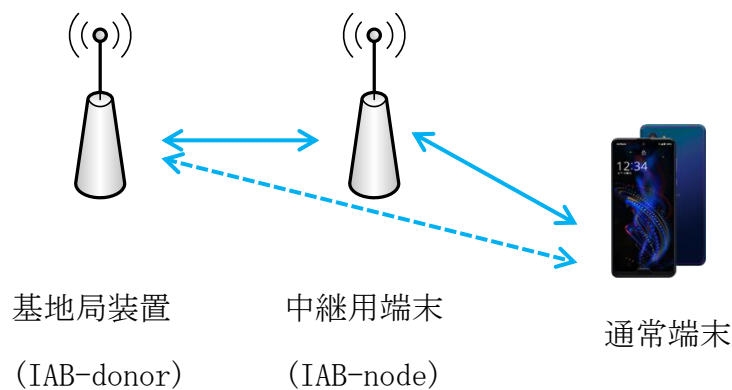
	基地局設置場所	
	運用拠点直近	運用拠点から離れた場所
防災	○	○
災害対応	○	○
観光(映像提供)	○	
観光(交通管理)	○	○
インフラ監視	○	○
点検業務	○	○
農業関係業務	○	○

観光業務の映像提供については、観光施設内にコアネットワークを構築することが可能であるため、運用拠点直近のみとしている。その他の業務については、拠点から離れた土地(公道を含む)に基地局を設置する必要があるため、どちらの場合もありうるとした。防災、災害対策の場合、山間部や災害により交通事情が悪化した場所への基地局設置が望まれる場合がある。

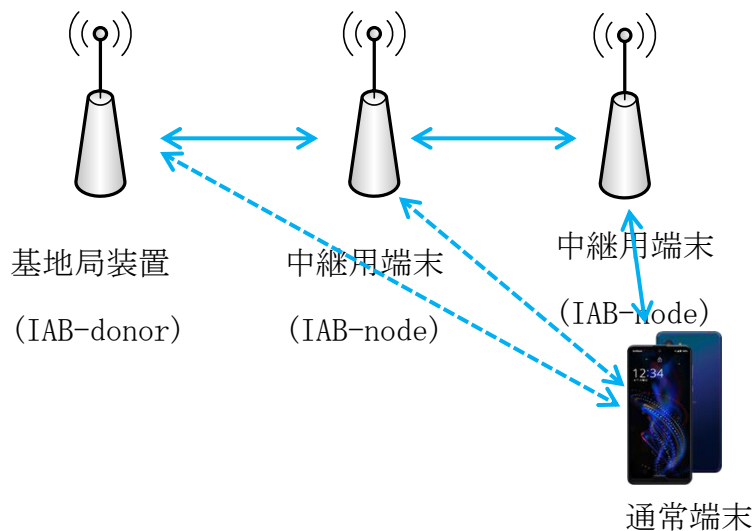
以上をまとめると、ローカル 5G を利用する自治体業務には運用拠点と離れた場所に基地局を設置することが望まれる場合がある業務が多いことが分かる。

このバックホールの無線化に使用できる技術として、IAB (Integrated Access and Backhaul) という技術が仕様化された。この IAB は 3GPP の 5G 仕様の Release-

16で仕様化された機能で、バックホールを無線化する技術である。基地局装置と中継機能を持つ特別な端末装置間で、特別な中継処理を行うことでバックホールの無線化を実現するものである。中継する端末装置を IAB-node、IAB-node と接続する基地局装置を IAB-donor と呼ぶ。IAB はシングルホップ(一段中継)のみならず、マルチホップ(多段中継)にも対応する。端末装置は IAB-donor(基地局装置)、IAB-node(中継用の端末装置)のどちらにも接続可能となる。IAB-donor と IAB-node 間の通信に使用する周波数は端末装置が使用する周波数と同じ周波数を使用してもよく、異なった周波数を使用してもよい。例として、IAB-donor と IAB-node 間の通信はより高速な 28GHz 帯を用い、端末装置は通信距離を伸ばしやすい 4.7GHz 帯を使用することも可能である。



(a) IAB (シングルホップ)



(b) IAB (マルチホップ)

図 2.2-10 IAB 機能の概要

現在、3GPP では Release-17 の仕様を策定中であるが、この中で IAB のさらなる改善が検討予定となっている。以下、改善が予定されている点を 2 つ紹介する (3GPP RP-19118 , RP-190971)。

一つ目は、Release-16 の IAB では 1 つの IAB-donor のみサポートすることとなっていることである (TS38. 300)。このことは、IAB-node として動作している端末は接続先の IAB-donor を変更できないことを意味し、IAB-node の移動が制限されている。例えば図 2. 2-11 に示したように、中継用端末が基地局装置 1 を IAB-donor とし、端末装置に接続を提供している状態において、基地局装置 2 と中継用端末間の通信の方が良好と予想される状況においても、IAB-donor として基地局装置 2 を選択できないことになる。Release-17 ではこの制限緩和が検討されている。

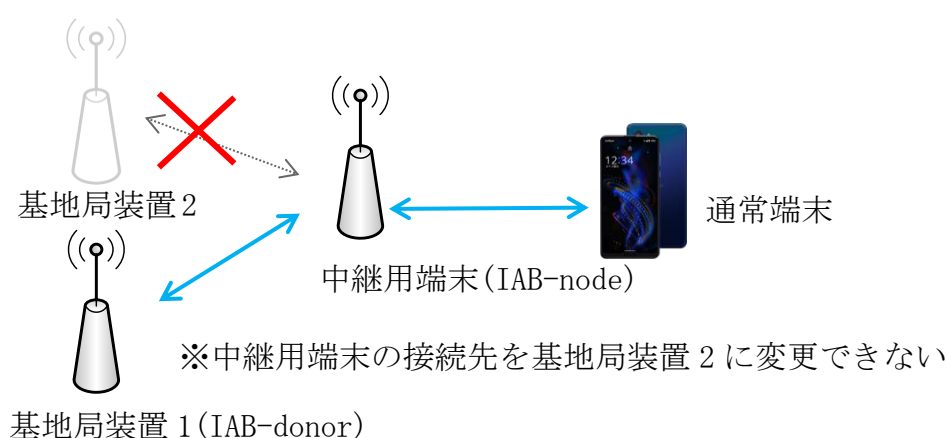


図 2. 2-11 IAB 機能に関して改善が検討されているポイント

(5) アップリンク通信

次に、ローカル 5G ネットワークで、8K 映像のような広帯域の情報を扱う場合課題を整理する。先に述べたように、ローカル 5G の自治体利用において、8K 映像のアップリンク方向の通信需要があることが示されている。

8K 映像信号は、信号フォーマットにもよるがオリジナルの映像信号の帯域が数十 Gbps～100Gbps 超の超広帯域信号である。そのため、映像伝送時には映像符号化処理による圧縮を施して使用するが、HEVC (H. 265) 方式による圧縮処理を行っている 8K 衛星放送でも約 85Mbps という十分に広帯域な信号となる。8K 映像を通信回線を使用して伝送する場合、更に通信プロトコルによるオーバーヘッドが必要となるため、100Mbps 以上の通信速度を維持することが要求される。

一方で、5G の通信速度は無線フレームの設定に依存する。現在使用されている 5G の装置では TDD (Time Division Duplex: 時分割多重) 無線フレームが使用されており 3.7GHz 帯・4.5GHz 帯の 5G では 10ms 区間の無線フレームを 20 分割したスロットをダウンリンクまたはアップリンクで使用するよう設定されている。現状、全国 5G 事業者においては、多くの場合セルラー通信のトラフィックに適しているダ

ウンリンクのスロット比率が多い無線フレームの設定として運用している。下図に示すように 3.7GHz 帯・4.5GHz 帯では 20 スロット中の 4 スロットをアップリンク用スロットとして設定して運用しており、全国 5G 事業者が用いる全ての基地局装置を同期させることで、ある基地局装置が送信するダウンリンクの信号が、異なる基地局装置に対するアップリンク信号と重ならないようになっている。この同期方式で使用される無線フレーム構成を図 2.2-12 に示す。

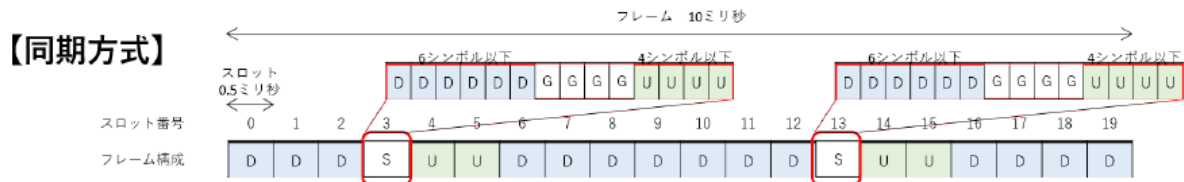


図 2.2-12 3.7GHz 帯・4.5GHz 帯で使用される同期方式の TDD 無線フレーム構成

ローカル 5G は全国 5G と異なる周波数が割り当てられているが、隣接する周波数帯に全国 5G 事業者が割り当てられている。この概要を図 2.2-13 に示す。

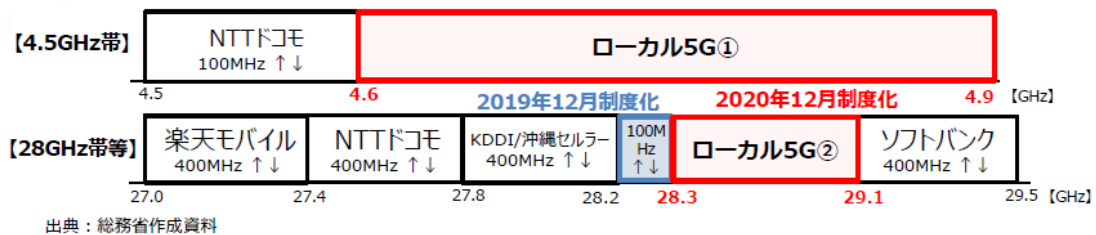


図 2.2-13 ローカル 5G の仕様周波数帯域

このようにローカル 5G と全国 5G が隣接する周波数帯を使用する場合、互いに干渉する可能性があり、新世代モバイル通信システム委員会で共用検討がされた(総務省 情報通信審議会 新世代モバイル通信システム委員会報告書)。この共用検討の中で、無線フレームの設定が異なる場合の共用検討が行われている。

アップリンクの速度は TDD 無線フレームの中で割り当てられるアップリンク用スロット数に依存する。100MHz 帯域を使用する 3.7GHz 帯・4.5GHz 帯を使用する全国 5G と 4.7GHz 帯を利用するローカル 5G では、アップリンクスロット 1 つ当たりの理論上の最大通信速度は約 23Mbps (1 ストリーム送信時) であり、アップリンクとして 4 スロット割り当て時の最大通信速度は約 92Mbps となる。ただし、実環境においては通信距離による電波の減衰、端末装置の移動などの影響による通信誤り、上位層のプロトコルのオーバーヘッドにより理論上の最大通信速度を下回る通信速度となる。

ローカル 5G においてはアップリンクを重視することが要求される場合があり、

このような場合はアップリンクスロットの割り当てを増やした無線フレームの設定が要求される。全国 5G で使用される無線フレームの設定とローカル 5G で使用される無線フレームの設定が異なる場合、または全国 5G で使用される無線フレームの設定とローカル 5G で使用される無線フレームの設定が同じとしても無線フレームが同期していない場合、全国 5G とローカル 5G の間で干渉が発生する可能性がある。共用検討の中で、全国 5G 事業者が使用している無線フレームの開始タイミングが一致し、かつダウンリンク・アップリンクの切り替えパターンが一致する基地局装置の運用方法を「同期運用」、それ以外を「非同期運用」とし、同期運用の場合は基地局間干渉や移動局間干渉(または端末装置間干渉)が発生しないとしている。また、全国 5G 事業者は同期運用を前提として全国への 5G エリア展開を進めており、また、TDD 運用において、同期運用は最も周波数利用効率が高い運用が可能となる運用方法となるとし、準同期を含めた非同期局よりも優先的に保護されることが適当としている。

この干渉検討で、事業者間で無線フレーム開始タイミングを一致させ、一部のみが異なるダウンリンク・アップリンク切り替えパターンを用いる準同期運用が検討された。準同期運用の場合、ダウンリンク・アップリンク切り替えタイミングが一致している区間は同期運用と同様に基地局間干渉や移動局間干渉は発生しないものとすることができ、ダウンリンク・アップリンク切り替えタイミングが異なる区間について干渉の影響を評価すればよいこととなる。この干渉検討では以下に示すダウンリンク・アップリンク切り替えパターンが検討された。

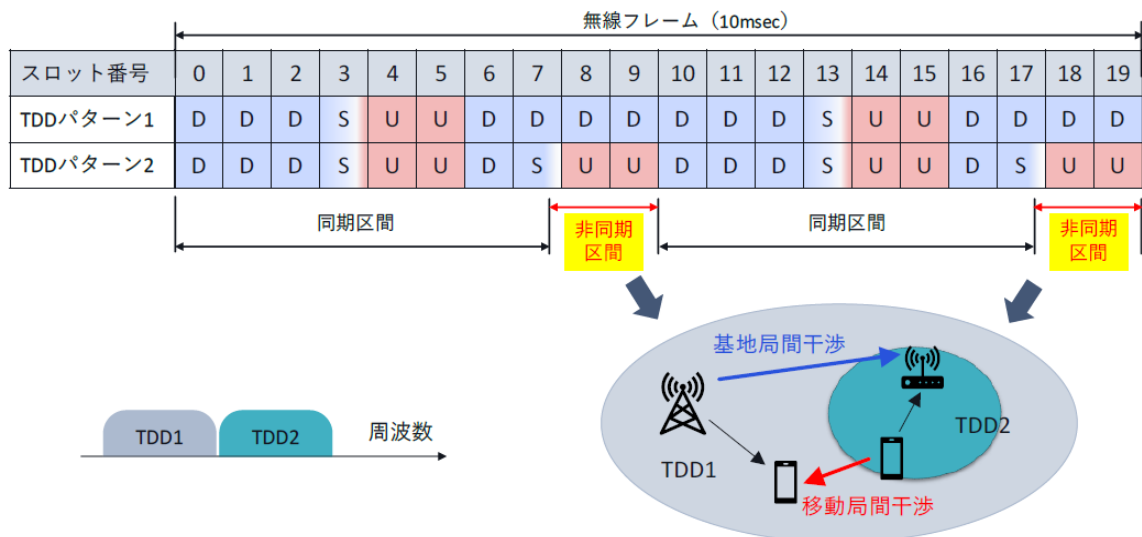


図 2.2-14 4.7GHz 帯における準同期 TDD

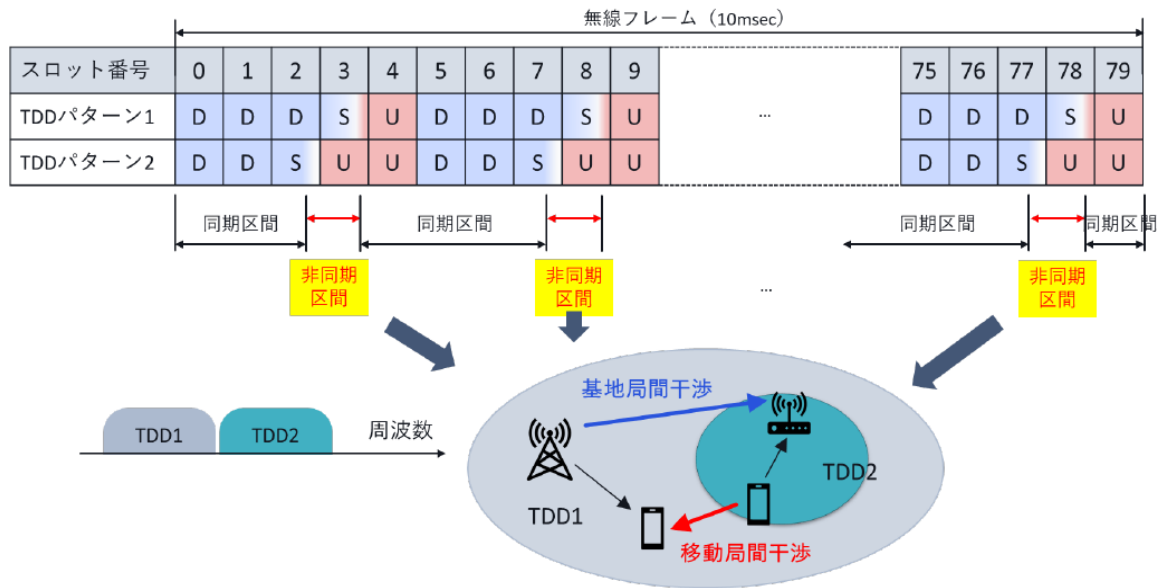


図 2.2-15 28GHz 帯における準同期 TDD

4. 7GHz 帯と 28GHz 帯のそれぞれについて、同期運用で使用されているダウンリンク・アップリンク切り替えタイミング(TDD パターン 1)と、TDD パターン 1 で設定されるアップリンク用スロットの数を倍にしたダウンリンク・アップリンク切り替えタイミング(TDD パターン 2)を設定している。ローカル 5G 事業者が TDD パターン 2 を利用する場合、TDD パターン 2 のアップリンクスロットの 50%で全国 5G からローカル 5G に対して基地局間干渉が発生しうるが、ローカル 5G 事業者が、基地局の場所を適切に選定したり、ローカル 5G エリア外からの電波を遮蔽するよう適切な措置を講じることで、基地局間干渉を緩和することが可能となるとしている。また、ローカル 5G 事業者が TDD パターン 2 を利用する場合、移動局間干渉が生じうるが、パターン 1 のダウンリンク区間の約 75%はパターン 2 でもダウンリンク区間であることから(※Sスロットもそのほとんどがダウンリンク区間であることから、ダウンリンク区間であると仮定)、実際に移動局間干渉が発生し得る区間は、全体のダウンリンク区間の最大でも約 25%となる。また、前述のように、基本的には特定のローカル 5G 移動局が特定の全国 5G 移動局に対して大きな干渉を継続して与える可能性は低いと考えられるが、ローカル 5G 事業者が、

- (1) ローカル 5G 移動局と全国 5G 移動局の間で離隔距離を確保するため、全国 5G 移動局がローカル 5G のエリア内に持ち込まれないように管理する
- (2) 送信電力制御パラメータの調整やスモールセル運用などによりローカル 5G 移動局の送信電力を低く制御する

などの処置を講ずることで、移動局間干渉の影響をさらに低減することが可能であるとしている。

また、将来的にローカル 5G の利用ニーズや標準化、および国内外の市場動向等を踏まえて、別の準同期パターンについて導入が有効と認められる場合には、準同

期 TDD パターン 2 以外の導入について検討を行うことが適当であるとしており、現時点では TDD パターン 2 のみが準同期用のダウンリンク・アップリンク切り替えタイミングとして総務省告示(図：平成 31 年総務省告示第 23 号別図第 1 号、同第 2 号)に記載されている。4.7GHz 帯の準同期用 TDD パターン 2 は、1 無線フレームに 8 つのアップリンクスロットが設定されるため理論上の最大速度は約 184Mbps となるが、先に述べたように実際の環境ではこの速度を下回る通信速度となる。特に基地局から距離が離れるセルエッジでは大幅に通信速度が低下することとなる。そのため、更なるアップリンクスロットの割り当てが可能となる TDD パターンの検討、並びに非同期運用時を含めた基地局間の干渉低減技術の検討が望まれる。

基地局間の干渉低減に使用できる技術として、3GPP では SON(Self-Organizing Network)の仕様化が行われている。SON は新しい基地局装置の展開時の設定を一部自動化するための機能の総称である。当初は物理セル ID、送信周波数、送信電力の設定機能などが LTE 用として検討され、Release-9 から自動最適化(Self-Optimization)機能として仕様化されている。

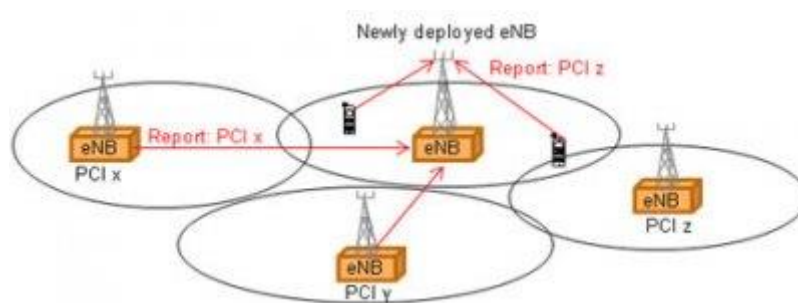


図 2.2-16 SON 機能の一例(基地局追加時の自動設定)

その後 Release の更新が進むたびに新たな機能が追加され、5G Release-17 用として以下のような検討が進められている(3GPP RP-193255)。

この作業項目 (Work Item) の目的は、SON / MDT の目的で NR のデータ収集の拡張を規定することです。この作業の具体的な目的は次のとおりです。

SON 機能のデータ収集のサポートで、CCO 機能、インターシステムインター RAT 省エネ機能、2 ステップ RACH の最適化、モビリティ拡張の最適化、Release-16 における SON/MDT 作業項目の残り (以下省略)

※MTD : Minimization of Drive Tests の略で、端末にテスト用のログを取らせる機能

※CCO : Centralized Coverage and Capacity Optimization の略で、基地局のカバレッジと収容能力を最適化する機能

※3GPP RP-193255 一部抄訳

この作業項目で検討している CCO 機能は複数の基地局の間の干渉を自動的に調整する機能である。今後、CCO 機能を含む SON 機能を複数の 5G 事業者間で使用できるようになれば、ローカル 5G 基地局の新たな設置時やローカル 5G 基地局が使用するアップリンクスロット割り当ての変更時の干渉調整に利用できることが考えられる。

自治体業務において、8K 映像のような高精細映像を撮影し、ローカル 5G の大容量アップリンクを利用することで業務が効率良く行えるものがある。

表 2.2-4 高精細映像アップリンクによる分類

	アップリンク
	8K アップリンク利用
防災	○
災害対応	○
観光(映像提供)	○
観光(交通管理)	○
インフラ監視	○
点検業務	○
農業関係業務	

今回の調査において、防災、災害対応、インフラ監視、点検業務において 8K 映像の有効性が検証されている。また、観光業務について 5G と 8K 映像を利用する検討が既に行われており(※)、ローカル 5G を用いる場合においても同様に有効とした。農業業務は防災業務に類するため、高精細映像のアップリンク伝送が有効と思

われるが、今回は鳥獣に対して有効であるかまでは検証できなかったため除外している。

※https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/rd/docomo5g/20190319_02/index.html

2.2.2 電波利用上の課題のまとめ

以上をまとめると、ローカル 5G の自治体利用については、以下の課題があるといえる。

- 運用面の課題
 - 点検業務など、基地局の年間利用時間が著しく少ないユースケースが存在する（次項の制度上の課題における「基地局装置の移動運用」が可能となれば解消される可能性がある）
 - バックホールの無線化
 - アップリンク帯域の増加
 - ・ 干渉低減技術の導入
- 制度上の課題
 - 他者土地における端末装置の移動運用
 - 基地局装置の移動運用

ローカル 5G を自治体の各種業務に適用することにより業務の効率化・高度化等を図り、自治体における DX の推進に寄与していくため、以上で示したような課題について、引き続き検討していくことが期待される。

2.3 ローカル 5G 等による 8K 映像伝送の活用の課題等の調査

ローカル 5G による自治体業務支援について、2.1 節の実証実験の実施を通じて得られた各種知見に基づいて、自治体業務におけるローカル 5G 等及び 8K 映像技術の活用について、業務効率化、業務高度化及び業務標準化の観点で整理する。

2.3.1 業務効率化

8K 映像の活用による自治体業務に掛かる業務時間の削減効果について、2.1.2 節の実証実験結果において整理されている。

はじめに効率性について、災害現場へのドローン活用によれば、実際に災害発生現場(本実証試験においては崩落現場)に赴いて現場確認を行なうのに比して、今回想定した環境においては、最大で 90%程度の削減効果が見込めることが分かった。このことから年間の作業時間の削減効果を見積もると、最大で 70%程度の作業時間の削減効果があることが分かった。

また、安全性の観点に立つと、8K 映像による上空からの撮影は高度 70m 以上からでも目的に沿った映像・画像取得が可能であり、これは 4K 映像に比して、およそ 2 倍の高度でドローン飛行を行なっても問題ないことを意味している。このことにより、解析対象部の周辺に障害物、例えば樹木等があったとしても、十分にドローンと障害物との間の離隔距離を取れることを意味しており、飛行安全性の面においても、8K 映像・画像の活用が有効であることが分かった。

次いで、確実性の観点に立つと、一例として、橋脚のひび割れの検出においては、8K 映像は、比較対象となる 5K 映像の倍の撮影距離でも 0. 数ミリのひびの検出に成功している。このことは 8K 映像の活用により、ドローンの高度を比較的高く保ち、安全性を担保しながらも、確実な検出精度を確保できることを意味している。

以上のことから、8K 映像の活用は、効率性・安全性・確実性の 3 面において、有効なアプローチであることが分かった。一方で、実証試験並びに調査研究会での議論を通して、いくつか課題があることも分かってきた。

1 つは、8K カメラ自体に改善を求める部分があることである。今回の実証試験で用いた 8K カメラは、必ずしもドローンへの搭載並びに各種自治体業務にチューニングされたものではない。例えば、8K カメラのシャッターコントロールは地上でのマニュアル操作が必要である。インフラ点検や災害現場の確認においては、撮影環境は時々刻々と変化することは当然考慮しなければならない。このことは、撮影環境に対して、撮影機材において適切なパラメータ設定を行わなければならないことを意味しており、この部分がマニュアル操作に依存してしまうことは、実際の作業従事者の機材操作への熟練度に作業の確実性が依存してしまうことに加えて、そもそも設定に要する作業時間が、8K 映像活用によって得られる効率改善効果を減少させてしまう。8K 映像による作業効率および確実性の改善を確かなものにするためにも、8K カメラの操作性の改善が今後必要になってくるものと考えられる。

次いで、ドローン飛行に対する改善要求も存在する。先に示したように、ドローン

および 8K 映像を活用する利点は、実際に現地近傍に作業員が行く必要なく、離れた位置から状況把握が可能であることや、データ取得において、対象物を映像でスクリーニングすることで解析に必要なデータを一度に取得できることにある。このことは、ドローン飛行可能時間と作業効率の改善度は比例に関係にあることを示唆している。しかし、今回用いたドローンでは飛行時間は最長でも数十分程度に制限されており、これが作業効率の改善に限界を与えてしまう可能性がある。ドローン飛行時間が制限される理由としては、搭載されるバッテリーの容量に加えて、搭載される機材の重量にも制限される。バッテリーの改善および搭載される機材重量の削減もしくは機材数の削減が今後必要になってくるものと考えられる。

2.3.2 業務高度化

先に示した 2 つの実証試験、すなわち、ドローンからの 8K 映像のライブストリーミング伝送および 8K 映像による各種解析業務のフィジビリティ確認により、ローカル 5G を活用した 8K 映像のドローンからのライブストリーミング伝送に基づいた解析業務の導入の可能性が出てきた。想定する解析ソリューションの概要図を図 2.3-1 に示す。

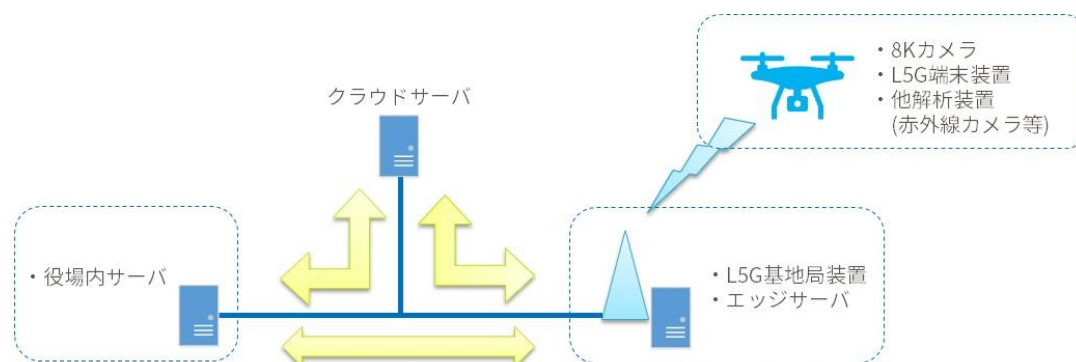


図 2.3-1 解析ソリューション概要図

想定する解析ソリューションにおいては、ドローンにおいて撮影される 8K 映像をリアルタイムに地上に伝送し、地上で取得された映像をローカル 5G 基地局近傍に設置されたエッジサーバやインターネット上のクラウドサーバ、もしくは役場内ネットワークに設置された自営サーバに何れから解析することを想定している。実証試験に結果によれば、後述する条件にも依存するがローカル 5G を活用することにより 8K 映像のような比較的高いビットレートを要求するトラフィックを安定して伝送することが可能であり、また 8K 映像を活用すれば、業務効率・安全性・確実性をそれぞれ担保した現場解析が可能である。

この解析ソリューションによれば、例えば、これまで現地にて取得した撮影データを実際に役場内ネットワークまで持ち帰り、そこから解析を行なうような従来とは異なり、現場にて取得した撮影データは、そのままリアルタイムに解析サーバまで伝送

されるから、現場からの帰還時間の間に解析結果がまとまっており、役場到着とともに、直ぐに解析結果に基づいて、今後の方針の検討を進めることも可能であり、先に示した業務効率の改善性もさらに高めることが可能である。

この解析ソリューションの実際の導入方法並びにその課題については、後の章で述べる。

2.3.3 業務標準化

様々な自治体において、ローカル 5G 等及び 8K 映像伝送の導入により、各種業務の高度化・効率化を進められるよう、これら業務内容の標準化について検討する。

一般に、自治体業務に限らず、業務効率改善に新しいシステムを導入する際には、運用の容易性が重要である。しかし、ローカル 5G、ドローン操縦、8K 映像と映像解析等、本報告書で対象とする技術は当然ながら比較的新しい技術であり、また 8K カメラ等、まだまだ使用者の熟練度に、業務精度が依存する場面が少なくないことが本調査研究を進める中で分かってきた。ローカル 5G+8K+ドローンは、業務効率改善に資する可能性がある一方で、これら全てを、本ソリューションを実際に利用する自治体が自ら運用することは現状難しいと言わざるを得ない。将来的には、これらの各種オペレーションは容易化・自動化が進むことは想定可能であるが、現状においては、ローカル 5G 等並びに 8K 映像伝送を導入した業務の標準化を検討するにあたって、一部の運用で民間企業と連携を想定して、業務標準化を進める必要があると考えられる。

民間企業との連携ポイントとして、以下が考えられる。

- ① ローカル 5G の運用
- ② ドローン及びドローンをを用いた 8K 撮影
- ③ 映像解析システム

はじめに、①ローカル 5G の運用に関しては、ローカル 5G の免許申請時点から、実際に装置を納入する装置ベンダ(もしくはネットワークベンダ)と連携して進めることが、通信エリア構築や周辺の他の 5G システム等との干渉調整を円滑に進めるためにも有効ではないかと考えられる。少なくとも導入初期においては、運用も当該ベンダがサポートする形が望ましいと考えられる。既に、5G コア装置の共用について事業化を想定して進めている事業者が登場しており、コスト削減や運用サポート面からも、民間企業との連携は有用ではないかと考えられる。

②ドローンおよび 8K 撮影や③映像解析システムにおいては、自治体が実際に所望するユースケース、そしてそのユースケースに要求する精度に基づいて、自治体自身が運用可能な範囲と、民間委託せざるを得ない範囲を切り分ける必要がある。すなわち、ローカル 5G 導入に当たっては、上記観点を整理する上でも、はじめに解析ソリューション納入をマネジメントする主体(イネーブラー)を設定し、実際の自治体業務を行なう自治体関係者との間で、コストを含めた要求条件を整理した上で、導入を進める必要があると考える。

ソリューションの導入後も、定期的に運用面における課題の洗い出しを行い、また

後述する技術面のアップデートも踏まえ、運用方法については、常にアップデートを行なう必要がある。また、新しい技術・ソリューションの導入に当たっては、単に運用方法が確立されれば良いわけではなく、実際に業務に従事する分野の関係者の中で、標準的・一般的な技術として認知される必要がある。そのためには、ソリューションの有用性を実証する一方で、例えば、国土交通省が管理する新技術情報提供システム（NETIS）のような、省庁が管理する技術管理データベースへの登録といった活動も継続的に必要と考えられる。

図 2.3-2 は体制の一例を示す概要図である。ここでマネジメントする主体は、先に示したローカル 5G 納入ベンダや 8K 映像ソリューションを提供するベンダなど、先に示した 3 つの運用観点について、広く知見を有する主体が望ましい。しかしながら、新しい技術を導入した自治体業務をすぐにイメージすることは非常に困難であり、ソリューションシステムを提供する側にとっても難しい部分がある。マネジメント主体には、各自治体の関係者に実際の自治体業務への導入イメージを想起させることが求められ、またソリューションシステムを提供する側にも、自治体業務に関するユースケースを実現するために真に必要な構成要素の明確化のための継続的な技術検証が求められる。

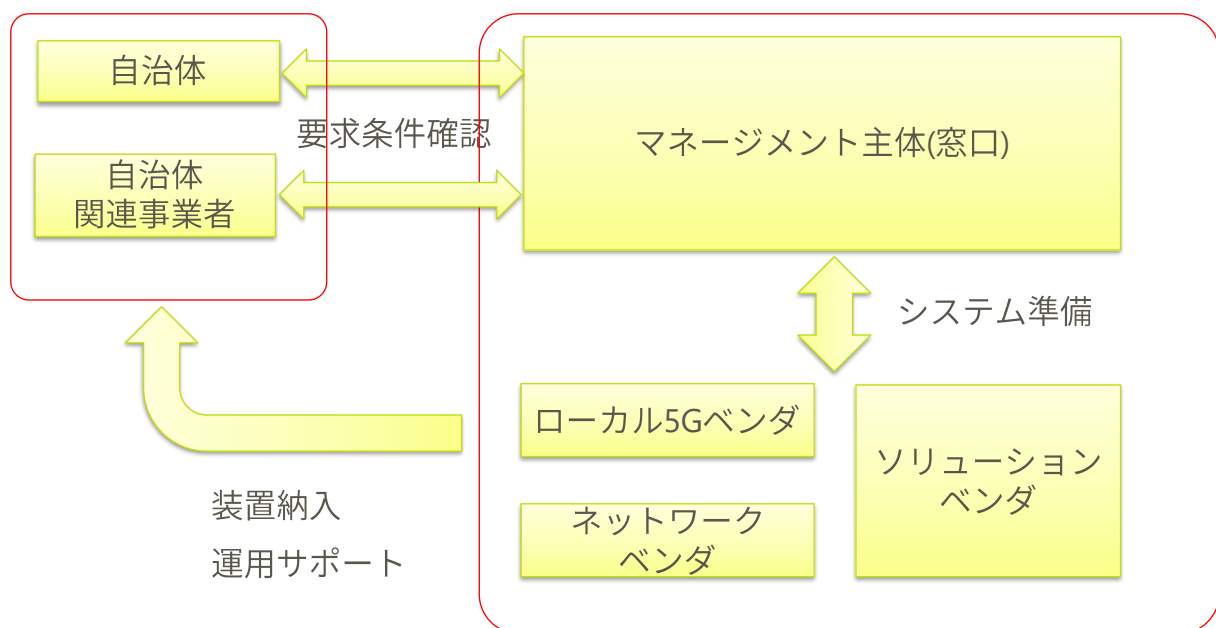


図 2.3-2 ローカル 5G 導入における体制図 一例

2.4 今後の自治体業務へのローカル 5G の普及に向けて

これまで本報告書で論じてきたローカル 5G の実際の自治体業務への導入、および先に論じた解析ソリューションの導入の考え方および想定される課題について整理するとともに、ローカル 5G の早期導入の観点を含め、今後のローカル 5G の普及に向けて検討すべき点を記載する。

ローカル 5G の導入に向けて、広く周知されている課題の 1 つに、設備導入に係るコストが挙げられる。先の章でも述べられているが、令和 3 年 3 月現在、ローカル 5G 設備一式（2 基地局、屋外設置）の場合の費用が約 1.5 億円であるが、BWA 方式での設備構築費が約 1 億円、ローカル LTE 方式での設備構築費は 1 基地局あたり数千万円と試算されている。その解決策として、製品の標準化による価格低減、自治体への財政的支援の実施、民設民営による補助金スキーム、近隣自治体でのローカル 5G 設備の共同利用による財政負担低減等が考えられているが、現状でもすべてのユースケースをカバーできずとも、一部のユースケースをカバーできる実装の可能性について述べる。

コスト増大の一員が、ローカル 5G 基地局装置からインターネットもしくは役場ネットワークまでの回線（本報告書においてバックホールと説明している回線）の準備である。先に示したようにローカル 5G は 5G システムの仕様に基づいてあり、100Mbps 以上の高いスループットを提供できるローカル無線ネットワークである。この高いスループットを背景に、8K 映像伝送も可能であることをこれまで論じてきた。しかし、8K 映像伝送に基づいたアプリケーションをローカル 5G で提供するためには、ローカル 5G 基地局装置から役場ネットワークまでも高いスループットを提供しなければならないことを意味している。通常では、100Mbps 以上の高いスループットを提供するには、光回線等の準備が必要であり、コスト上問題が大きい。

そこで、ローカル 5G 以外の既存の無線アクセス技術を見かけ上のバックホールとして活用する方法が考えられる。ここでは、既存の無線アクセス技術として国内において広く普及している第 4 世代移動通信システム（4G システム）を用いることを提案する（図 2.4-1 参照）。4G システムは、仕様上は 100Mbps 以上のスループットが達成可能な無線アクセス技術であるが、周波数を共用する以上、常に高いスループットを 1 つの端末装置が享受できるわけではなく、このことは 8K 映像を常に 4G システムを介してインターネットまで送信することは困難であることを意味している。しかしながら、例えば、先に示した解析ソリューションにおいては、8K 映像の全てを役場ネットワークまで伝送する必要は必ずしもない。例えば、ローカル 5G 基地局装置近傍に設置したエッジサーバにおいて、8K 映像に対して前処理を行い、解析に必要なデータのみを 4G システムを用いて、インターネットや役場ネットワークの解析サーバまで届けることが考えられる。このようなシステムによれば、4G システムが提供されていること、また災害時に該 4G システムが停止していないこと等の制限があるものの、ローカル 5G が提供する高いスループットを享受しつつ、バックホールの敷設に係るコストを必要としない解析ソリューションの提供が期待できる。

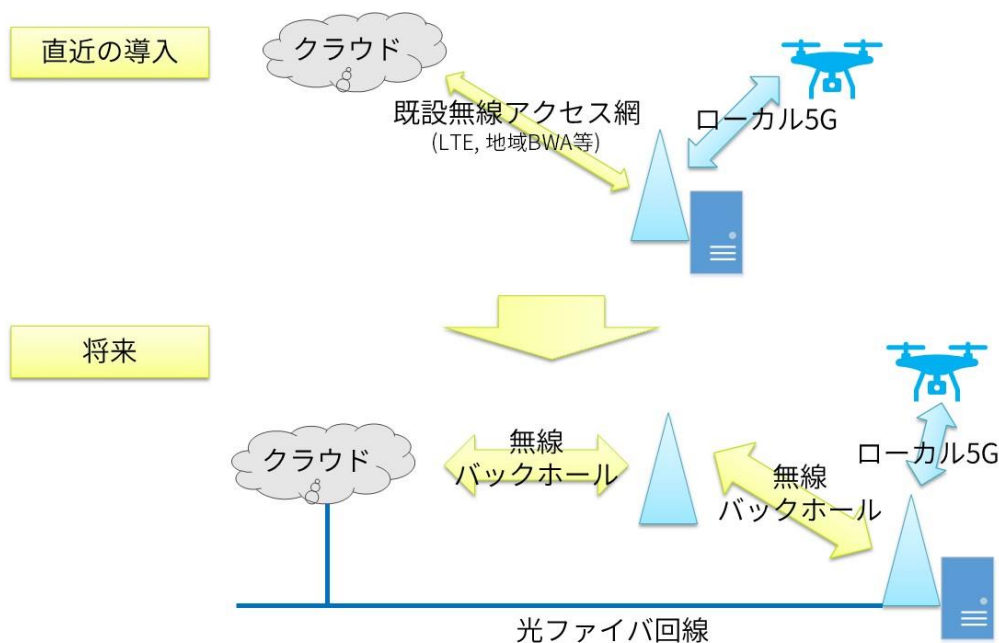


図 2.4-1 ローカル 5G の導入について

次に、ローカル 5G とドローンを用いた 8K 映像ライブ伝送においては、先の実証試験の結果によれば、その伝送距離が 40m 程度に制限されてしまっていることが課題として上げられる。このことは、ドローンと 8K 映像の活用によって得られる効率性・安全性・確実性が 70m 以上の高い高度からの撮影が可能であることを背景としていることから、この結果だけをとらえると、これまで議論してきた 8K 映像活用による利点が得られないことを意味している。しかし、ローカル 5G による 8K 映像のライブ伝送に用いた 8K 映像のビットレートを約 80Mbps に設定したことに注意する必要がある。約 80Mbps というビットレートは現在国内の 8K 衛星方法において用いられているビットレートであり、すなわち放送用途に耐え得るビットレートであると言い換えることができる。一方で、本報告書でこれまで論じてきた 8K 映像の活用ユースケースにおいては、必ずしも 80Mbps の 8K 映像を用いる必要はない。例えば、フレームレートを 10 fps (frame per second) まで落としても、一部のユースケースにおいては、十分な品質を保證でき、この場合、映像伝送への要求ビットレートも 20Mbps 以下とすることも可能である。先にも示したが、要求ビットレートの削減は、無線伝送において設定される MCS を低くしても構わないことを意味している。これにより所望受信電力を 6dB 下げることができれば、通信可能距離を 2 倍とすることが可能である(注：上空の伝搬損失が 2 乗則に従うことを仮定)。また、本実証試験では 8K 映像符号化には H. 265 を採用しているが、映像符号化に関しては、H. 265 の後継規格 H. 266 (VVC) の標準化が完了され、H. 265 に比して、さらに高効率な圧縮が可能であり、これはローカル 5G へのスループット要求条件を押し下げる効果が期待できる。ユースケースの中には、当然ながら高いフレームレートが要求されるものもあり、将来的には放送用途

の 80Mbps を超える所望ビットレートを要求するユースケースも生まれる可能性がある。そのため、先に論じた通り、ローカル 5G により得られるスループット、特に上りリンクのスループットの改善に期待するのは当然としつつも、低ビットレートでも十分なユースケースからのローカル 5G の導入を検討することも重要ではないかと考えられる。

ローカル 5G の導入にあたって、上記 2 点に加えて、以下何点か整理する。1 つはローカル 5G を利用シーンの多様化が必要と考える。先に示したように、ローカル 5G 装置自体のコストダウンや民間連携による運用負担軽減が今後必要となってくると考えられるが、それでも単一目的および局所的にローカル 5G を使う場合、導入費用および運用費用が、ローカル 5G の導入による業務コスト削減に見合わない場面が生ずる可能性はある。そのため、ローカル 5G の導入に当たっては、複数のユースケースに用いることが想定されることが望ましい。本報告書に当たっては、防災、減災、測量、インフラ点検、観光応用、見回り等、実に多様なユースケースにおいて、8K 映像の活用が業務効率改善に資する可能性があることを論じてきており、単純に考えれば、これらを 1 つのローカル 5G ネットワークに収容できれば、それだけ業務コスト削減幅が大きくなり、導入メリットの向上が期待できる。また、例えば、農業分野への応用のように、対象とする面積が大きくなれば、それだけローカル 5G 導入コストに対する業務コスト削減との損益分岐点が下がる可能性がある。多種多様、そしてスケール効果の高いユースケースへの導入から検討することが必要であり、現状の制度で導入できる分野を精査する一方で、そのハードルとなる部分を明確にする必要があると考えられる。

次に、自治体関係者がローカル 5G 導入イメージを想起するために有用と考える、実証試験の進め方について整理したい。

実証試験を進めていくにあたっては、図 2.3-2 に示すような実運用段階における実際の運用関係者が当初から参画することが望ましいと考える。実証試験においては、本報告書で示した業務改善効果も参考に、ローカル 5G 導入による効率改善を検証したい自治体業務と、目標とする要求条件・仕様を、自治体関係者から提起されることが望ましいが、先に示したように導入初期のフェーズにあるローカル 5G の自治体業務への導入イメージを今直ぐに的確に想起することは難しい。

そのため、実証試験を総括するマネジメント主体を中心に、想定運用関係者も交えた議論が必要となる。議論には、自治体関係者だけでなく、現在でも自治体業務をサポートしている関連事業者の参画も重要である。

また、実証試験では、将来において実際に運用に関わる自治体から、実証試験を行なうフィールドを提供してもらうことが重要である。これには、試験装置を設置する物理的な場所の提供に加えて、ローカル 5G 導入による効果測定に自治体関係者が参画して、その結果をフィードバックすることが非常に有用と考えるためである。

また、効果測定にあたっては、可能な限り、現在の業務環境(例えば役場内の執務室

等)にローカル 5G をコアとしたソリューションを導入することが望ましい。これは、特別なフィールドで行なう試験に比較して、導入効果の有無を、自治体関係者が、より体感できる可能性が高いためである。また、検証対象とする自治体業務・試験フィールドに基づいて、各種ベンダがシステムを準備できるため、実証目的や想定費用等を考慮しながら、実証試験機材とソリューションシステムを導入することが可能となる。加えて、自治体業務は比較的長周期で発生する業務が多いことから、短期間の導入ではなく、半年～1 年程度の長期間にわたる実証が望ましいと考える。

各種ベンダには、導入ソリューションにおいて技術的な検証を行なう一方で、実際のオペレーションを行うことになる自治体関係者のサポートを行なうとともに運用面における課題を洗い出すことも期待される。

また、実証試験のために自治体業務を停止させてはならないことと、現在の実際の手法との比較検証の必要性の観点から、現実的には、現在の手法で行なっている業務の一部をローカル 5G を用いて行なう、もしくは現在の手法で行なっている業務に合わせて並行してローカル 5G による実証も実施する必要があると考えられる。

図 2.4-2 に、ローカル 5G と 8K 映像及びドローンによるリアルタイム 8K 映像伝送をベースとした橋梁等のインフラ保守点検の実施形態を想定した、具体的な実証試験実施体制の一例を示す。各自治体と点検等受注業者の間の黒線は現在の業務における関係を表し、その他の水色の線が実証試験での連携関係を示している。図 2.4-2 では、通信映像機器・運用業者が上記のマネージメント主体となる場合を想定している。

通信映像機器・運用業者は、実際の業務・オペレーションを担う点検等受注事業者から提示される要求仕様をもとに、通信事業者及びソリューション関連ベンダ（本体制例においては、ドローン運用事業者）と連携し、実証試験システムの構築を行う。このとき、試験フィールドの提供、実証試験の効果測定への参画などの観点から、点検等受注事業者を介して議論するとともに、直接に自治体関係者と議論する必要もあると考えられる。実証試験においては、先に示した通り、通信映像機器・運用業者をはじめとする試験実施主体は、運用・オペレーションを実施し、当該ソリューションの直接のユーザとなる点検等受注事業者及び自治体関係者に対して、試験結果を報告するとともに、評価対象やオペレーション内容に関するフィードバックを受けながら、実証試験を推進していく。

十分な効果測定結果のもとに、実際業務へのシフトを想定した、通信映像機器・運用業者をはじめとする試験実施主体の持続的な連携・サポート体制の構築、実証したソリューションの横展開（周辺自治体や民間団体等）や垂直展開（他ユースケースへの応用等）等を並行して議論を行い、常に実証試験完了後の将来のビジョンを関係者で共有しながら実証試験を進め、試験実施だけに終わらず、実証試験結果が様々な応用・活用される取組が求められる。

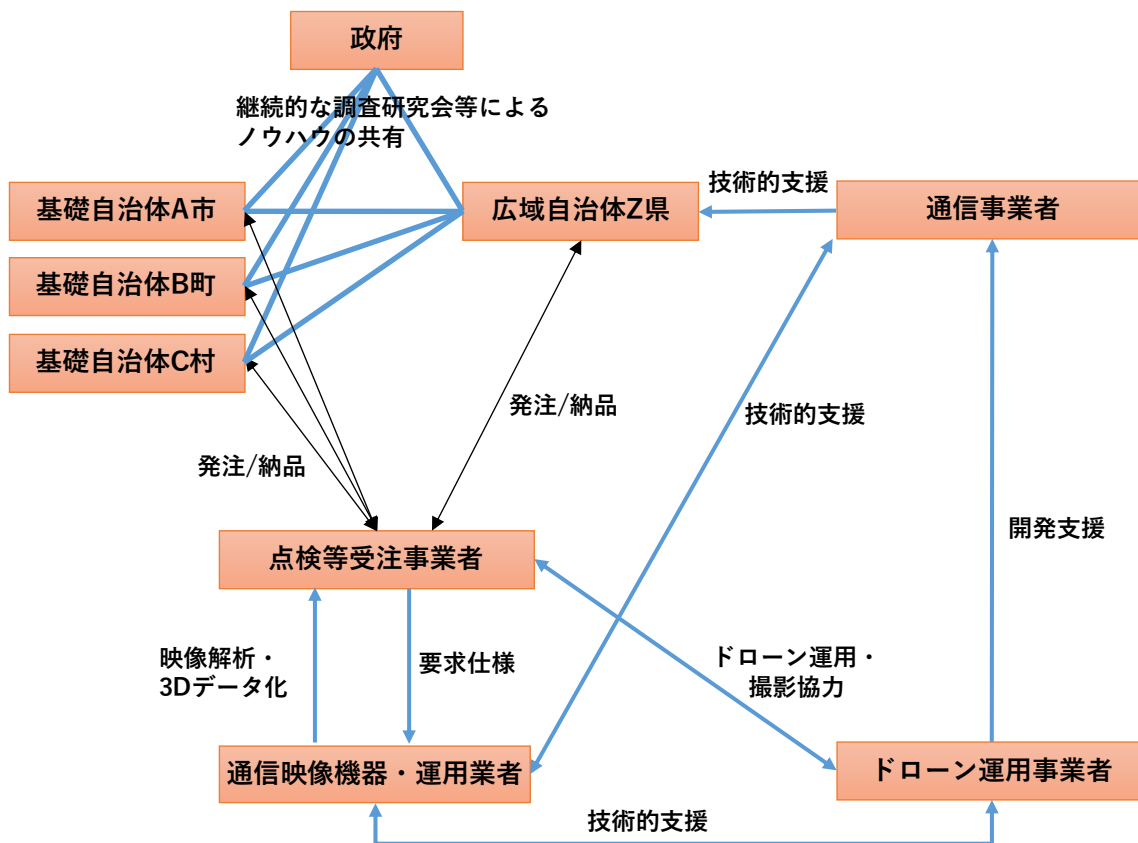


図 2.4-2 自治体業務へのローカル 5G 導入のための実証体制の具体例

最後に技術面について、ローカル 5G、ドローン、8K カメラ、そして 8K 映像解析それぞれの技術のアップデートが必要であることを指摘する。民間と連携した運用が現状は望ましいことは述べたものの、必ずしも最良とは言えないかもしれないが、やはり実際の業務を行なう自治体関係者で運用できる状態を目指す必要があると考える。運用を容易化するためにも、マニュアル操作の削減および自動化・遠隔運用化等、オペレーションに係る技術改善がまず必要ではないかと考える。そのうえで、実証試験の章でも述べてきたが、技術自体の改善、例えば、無線区間におけるスループットの改善や、映像解析精度の向上、ドローンの自動航行の導入可能範囲の拡大が必要ではないかと考える。バックホールに係るコスト削減を目指したバックホールの無線化のような比較的大規模な検証が必要な検討項目、さらにはローカル 5G の他者土地利用のような制度の拡張が必要となる可能性がある検討項目に関しては、その有効性を見極めた上での検討が必要であり、実証試験による効果立証が必要と考えられる。例えば、移動基地局やローカル 5G 無線中継の導入は、利用シーンの多様化やコスト削減(装置共用の可能性)に資する可能性があり、そのフィージビリティと有効性確認を進めるためにも、継続的な実証試験の推進が必要と考える。

IV おわりに

本調査研究では、ローカル 5G の自治体業務への活用の有効性について、8K 等の超高精細映像の利用を軸として、実際の業務に携わる奈良県内の 3 自治体の協力のもと、防災、災害時対応、インフラ設備の点検、観光、農業等をユースケースに挙げて調査検討を行った。その結果、上記のような自治体各種業務において、特にドローンから撮影した 8K 等の超高精細映像をローカル 5G の高速・大容量通信を用いて伝送することによって、必要人員や作業時間の大幅な削減、作業安全性の向上、点検精度の向上等が期待できることがわかった。これにより、ローカル 5G の自治体業務への活用について、その大きな可能性を明らかにできた。

また、現在の技術や制度においてもすぐに実現可能なソリューションが考えられることを提示した。そのような構成を用いて実際の業務現場における実証を繰り返しながら実績の積み上げと技術向上を図ることが重要である。

一方で、ローカル 5G による超高精細映像伝送の導入による効果を自治体業務で最大限に活用するためには、現状では技術面、運用面、コスト面及び制度面で多くの課題があることもわかってきた。これらの課題は、実際の自治体業務での活用ケースに密着した実証を積み重ねていくことで、1つ1つ解決していく必要がある。

上記の現在の技術や制度において実現可能なソリューションを用いて、実際の業務現場での実証を繰り返しながら、実績の積み上げと技術向上を図ることが重要であり、合わせて現状の様々な課題が克服することにより、近い将来、ローカル 5G+超高精細映像の活用によって様々な自治体業務の効率化・高度化が実現され、自治体の DX 推進のエンジンとなることを期待したい。

以上