



SEMINAR REPORT

## 森林の中からウェブ会議をしたい —UAV による LTE+Wi-Fi 中継技術の開発—



皆さん、こんにちは。鹿児島大学の寺岡と申します。私は農学部で森林や林業を研究しています。もともとは「森林資源がどれくらいあるか」や、「森林がどれくらい成長しているか」を調べるのが専門です。そういったところから ICT やデジタルデータを活用した森林調査という面で情報通信関連の方と接点を持つようになりました。

今年度、総務省の事業を受託しました。その成果の一部をご紹介します。また、森林、林業につきまして少しでもその事情や実情、課題について知っていただけましたら、今後何かのご縁がありましたときに我々の森林分野に皆さんの力を頂けるのではないかと考えております。

### 林業の実情

さて、森林からインターネットにつなぎたいということが目標になりますが、まずはその森林、林業の実情についてお話していきます。日本の国土の3分の2は「森林」という土地利用です。ところがこの森林の約半分ぐらいは携帯電話の電波がやってこないところになります。つまり、国土の3分の1は電波が届かないところと言えます。

お見せしている(図1)左のグラフは横軸が年齢で齢級を表しています。1・5・10と書いていますが、掛ける5年となりまして、「1齢級」と書いてあるところは1~5年生、「5齢級」と書いてあるところは20~25年という年齢になります。縦軸は面積です。人工林は1千万ヘクタールほどありますが、そのうちの半分が10齢級よりも年をとっている、つまり木材として十分活用できる年齢に達してきていると言えます。

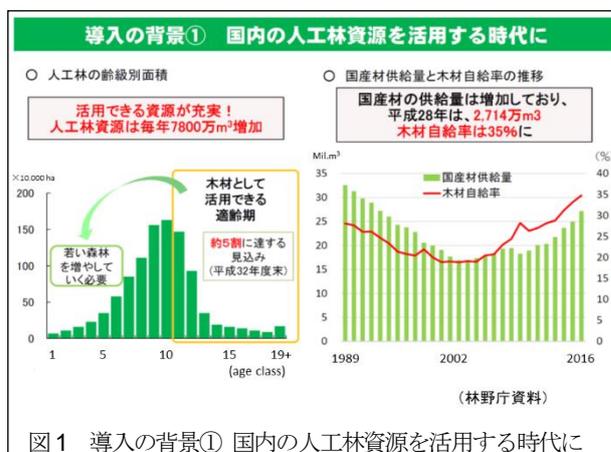


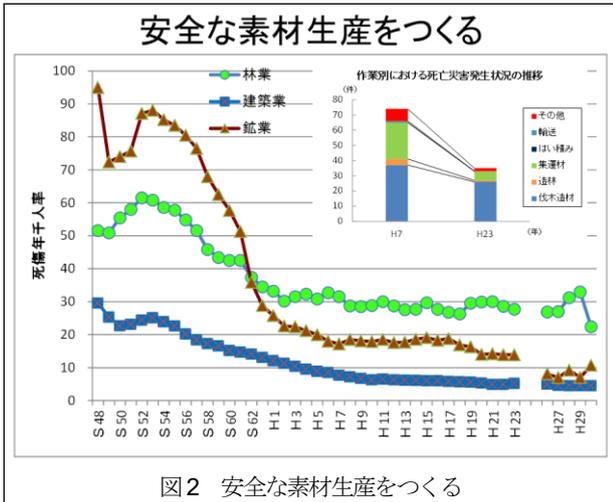
図1 導入の背景① 国内の人工林資源を活用する時代に

人工林資源は毎年7,800万m³が増加、成長しています。これは成長量なので銀行で言うところの利子に相当し、この利子分だけ使っていても元本はなくなるわけではないわけです。

右のグラフは自給率です。2016年を見ると木材自給率は約35%になっています。その後、もう少し増えましたが40%には達していません。国内からの木材供給量は2,700万m³ほどです。これは丸太の量ですので実際に伐っている量、あるいは立っている木としては、およそ3,500万m³ぐらいいなります。左のグラフでありましたように成長量が7,800万m³ですから、その半分も利用していないということになります。

小学校の教育などでは木を伐ること、山を伐ることはよくないことだというイメージを植え付けられることが多いのですが、日本で伐らなければ他の国で伐っているということです。我々の国は世界でも稀に見るほど森林資源が豊かな国ですから、これをなるべく使っていくという姿勢は、私は正しい方向だと考えています。

このグラフ(図2)は労働災害の発生状況を表していて、緑の丸が林業、茶色の三角が鉱業、青の四角が建設業です。平成に入る頃から、残念ながら林業は全産業中最も労働災害の危険性の高い産業となっています。このような不名誉な状況をどうすれば減らしていけるかということは、関連する全ての人間が取り組まなければいけない問題です。



右上のグラフは作業別にみた死亡災害件数で平成7年から平成23年の推移です。緑のところは集運材と書いていますが、倒した木や丸太を運ぶという工程で、機械化がかなり進み事故が減っています。一方、青のところは伐木造材といいまして、チェーンソーで木を伐るという工程です。この部分の事故が減っていないことがお分かりいただけると思います。

このように事故が非常に多く発生して危険性が高いにもかかわらず、携帯電話が通じないがために、木材を生産している現場から万が一のときの緊急通報ができない状態になっています。



ドイツの事例(図3)をご紹介します。左上の写真は木を集めてくる作業車です。左下に写っているオペレーターが基本的に1人で作業をしています。もしこのときに事故があったらどうするかという仕組みが、オペレーターが装着する右上の写真の機械と作業車のキャビンの中に入っています。これらの機械が30分動かないと、あるところに緊急通報が行き、そこからオペレーターの携帯電話に電話が入るようになっています。

作業車が何かの故障で動かないとか、何かの都合が悪くてじっとしているのであれば問題はないですが、電話をしても反応がなければ作業現場へ救急車が急行するという仕組みが取られています。これも携帯電話の電波が入ることが大きなアドバンテージになっているわけです。



日本の林業事業者も連絡手段として写真(図4、左)にあるような衛星携帯電話を装備しているところが少なからずあります。しかし、ご承知のとおりそれなりのコストがかかるので、これを全ての作業員が持つというわけにはいかないのが実態です。

また、最近では「GNSS (全球測位衛星システム) のRTK (リアルタイムキネマティック) 測位のために補正情報を得る」とか「電子基準点の情報を得る」ために通信の確保が大切ですので、写真(図4、右)のような衛星の情報を得る物を利用することもあります。しかし、これもかなりのコストがかかります。

**農林水産業・地域の活力創造プラン(2019年12月)**

**林業の成長産業化と森林資源の適切な管理**

<目標>

- 国産材の供給量を2025年までに4,000万㎡に増加(2009年:1,800万㎡)
- 2013年度から2020年度までの間に、毎年52万haの間伐等を実施
- CLT(直交集成板)について2024年度までに年間50万㎡程度の生産体制を構築
- 2028年までに、私有人工林に由来する林業・木材産業の付加価値生産額を倍増(2015年:2,500億円)

<展開する施策>

- ① 新たな森林管理システムの構築と木材の生産流通構造改革等
- ② CLT等の新たな製品・技術の開発・普及のスピードアップ
- ③ 木質バイオマスの利用促進等による新たな木材需要の創出
- ④ 適切な森林の整備・保全等を通じた国土保全、地球温暖化防止など森林の多面的機能の維持・向上

図5 農林水産業・地域の活力創造プラン

**林業イノベーション現場実装推進プログラム(2019年12月)**

ICT利用(スマート林業)に留まらず、林業の特性を踏まえた新技術の活用へ

データ、AI・ICT・ロボットの開発・活用    新しい品種や早生樹の技術    林業の枠を超える新産業

ICTによる生産管理    収穫50→30年へ    マテリアル利用    自動制御機七割    電気駆動トラクター

林業イノベーションにより、若者や女性にとって魅力的な成長産業へ

**林業イノベーションの展開方向(全体像)**

- ・ 記憶から、デジタル記録の森林管理へ
- ・ 経験から、ICTによる生産管理へ
- ・ 3K林業からの解放(生産)
- ・ 3K林業からの解放(造林)
- ・ 収穫50→30年へ(早く育てて収穫できる林業の実現)
- ・ 丸太オンリーからの脱却

図6 林業イノベーション現場実装推進プログラム

農林水産省は農林水産業・地域の活力創造プランの中で、「林業の成長産業化と森林資源の適切な管理」という形で林業を成長産業化させていこうと動いています。(図5)

また、林野庁も林業イノベーション現場実装推進プログラムという形で、「ICT利用に留まらず、林業の特性を踏まえた新技術の活用へ」ということを進めています。(図6)

この林業イノベーションは、記憶からデジタル記録へとか、経験からICTによる生産管理へという方向に林業を変えていこうと展開しています。

Society 5.0に向けて農林水産業、特に今日は林業の話ですけれども、通信の重要性についてご理解いただければと考えています。



図7 iコンストラクション

例えば国土交通省ではiコンストラクションというプロジェクト(図7)で建築現場でのICT技術の活用を進めています。また、農業におきましても、ロボット農機や無人でトラクターが走るシステムがかなりの実用性を持ってきています。この建設現場や農場、農地は基本的に電波が届くところです。携帯電話の電波が届くことによってさまざまなリモートコントロールが可能な状況を生み出していると言えます。

しかし、繰り返すようですけれども森林の約半分は携帯電話の電波が入らない不感地帯となっているのが現状です。

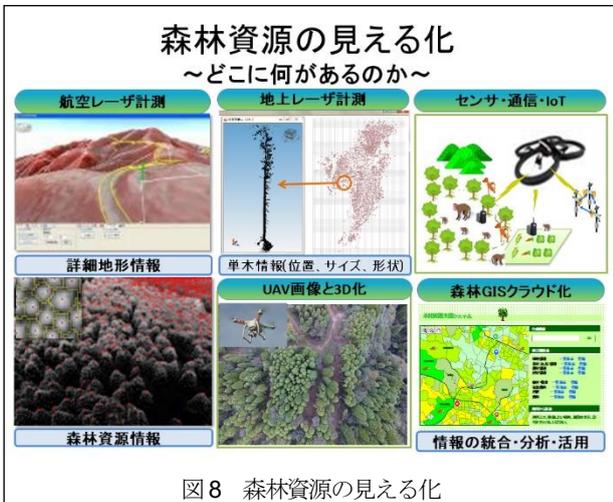


図8 森林資源の見える化

さて、森林林業におけるスマート化がどのように進んできているのかについてご紹介します。

今は航空機や地上からのレーザー計測、あるいはUAVを使った画像や映像による計測で森林資源を「見える化」する取り組みが進んでいます(図8)。それらをもとにクラウド化されたGIS(地理情報システム)の中で情報を管理し、活用していくという方向が望まれています。そこで携帯電話の電波が入らない不感地帯をどのように克服していくかが課題となっています。



図9 森林域における高度別電波強度の変化

まず、森林域における高度別の電波強度を調べました。その結果、この(図9)のように地形が邪魔をして携帯電話の電波が受信できないところでは、電波を発信するものを見通しの利く高さまで上げれば通信が確保できるのではないかとこの仮説を立て、実験に取り組みました。

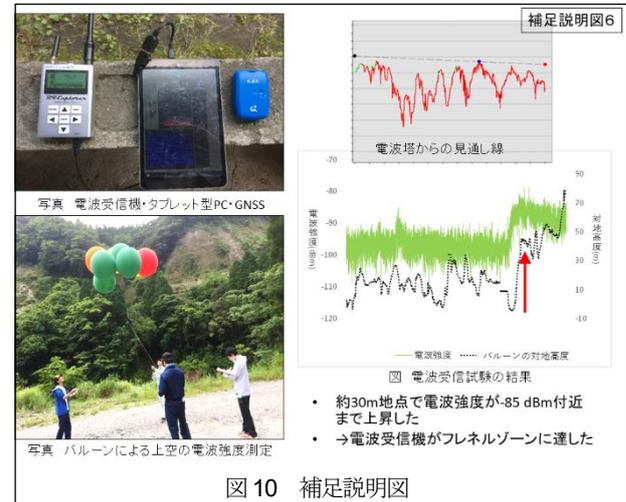


図10 補足説明図

最初に左下の写真(図10)のようなバルーンに簡易なスペクトラム・アナライザを付けて電波の受信状況を調べました。右下のグラフで赤い矢印で示していますが、ある高さまでバルーンを上げると電波強度が強くなりました。

つまり、地面では携帯電話の電波を受けることができませんが、高く上げることによって電波を受信できることが分かりました。

実証実験の概要

この電波受信試験をもとに今年度、総務省の「IoTの安心・安全かつ適正な利用環境の構築」事業で、「森林境界明確化のための高画質中継による遠隔合意形成」につきまして、鹿児島大学と森林総合研究所、アジア航測、NTTドコモ、SCAT、ICTサポート、MM総研のメンバーで取り組むこととしました。(図11)

対象地は鹿児島県垂水市にあります鹿児島大学の演習林です。この演習林は面積が3,000ヘクタールあり、その中で実証試験を行いました。(図12)

**国立大学法人鹿児島大学 森林境界明確化のための高画質中継による遠隔合意形成**

**実施団体** 鹿児島大学、(国研)森林総合研究所、アジア航測(株)、(株)NTTドコモ、(一財)テレコム先端技術研究支援センター、(株)ICTサポート、(株)MM総研  
**実施地域** 鹿児島県垂水市/鹿児島大学農学部附属高画質演習林108林班人工林

**事業概要** 森林境界明確化のためのIoT-現地立ち会いIoTにより実現する。急峻な地形と樹木により森林内は電波伝播が困難であるが、上空は電波伝播の可能性がある。上空のUAVで森林外部へ電波伝播の方法(①LTE+高速通信の通じたWi-Fi6(2.4GHz帯)と障害物に強いIEEE802.11ah(920MHz)高速通信UAVで中継し、モバイルネットワークとLTEに接続する伝送システム、②5.7GHz帯無人移動体通信伝送システム(US7: NICTワイヤレスシステム研究開発院)をUAVで中継する方法【緊急利用環境】樹木木冠を透過させ、受信電波強度やスループット計測により森林条件(名義電波伝播特性)のモデル化を行い、森林からの通信距離や通信品質などの諸条件を明確化する。

**実証内容** ①LTE+高速通信の通じたWi-Fi6(2.4GHz帯)と障害物に強いIEEE802.11ah(920MHz)高速通信UAVで中継し、モバイルネットワークとLTEに接続する伝送システム、②5.7GHz帯無人移動体通信伝送システム(US7: NICTワイヤレスシステム研究開発院)をUAVで中継する方法

**実証成果** 森林内の所有農戸行の鳥害監視画像を上空待機のUAVで森林外部へ2種類のUAVで中継した。【複数無線システム】①高速通信に準じたWi-Fi6(2.4GHz帯)と障害物に強いIEEE802.11ah(920MHz)高速通信UAVで中継し、モバイルネットワークとLTEに接続する伝送システム、②5.7GHz帯無人移動体通信伝送システム(US7: NICTワイヤレスシステム研究開発院)をUAVで中継する方法【緊急利用環境】樹木木冠を透過させ、受信電波強度やスループット計測により森林条件(名義電波伝播特性)のモデル化を行い、森林からの通信距離や通信品質などの諸条件を明確化する。

**IoTサービスの効果(KPI)** 高画質画像をUAVで中継することで、遠隔地でのIoT-現地立ち会いを実現し、境界明確化の現地立ち会いに要する作業時間を40%削減した。【合約の締結(実証期間)】 実証終了時点 境界確定必要作業時間: 2日12人・時間 境界確定必要作業時間: 1日7人・時間(約40%削減)

図11 森林境界明確化のための高画質中継による遠隔合意形成

**国立大学法人鹿児島大学 森林境界明確化のための高画質中継による遠隔合意形成**

**実証地域の基本情報**  
 地名: 鹿児島県垂水市  
 緯度: 121.23度  
 人口: 13,708人(2021年4月1日)  
 地帯特性: 大隅半島の北西部、鹿児島県に属する半島の最北端、鹿児島市と大隅半島を隔る海上上の要所

**【地域産業】** 垂水市土地利用面積 (H31.1.1)

利用種別	面積(ha)	構成比
アグリ(アグリ)の果樹・農産物	394.3	3.3
田	421.4	2.6
畑	1752.1	10.8
山林	9385.3	57.6
原野	478.5	3.0
雑草地	201.2	1.2
その他	2438.8	15.2
合計	16211.6	100.0

**【地籍調査】**  
 ①境界不明(No.11)  
 ②宅地部分(ほぼ終了)  
 ③森林部分(3000haのうち、30haしか終了していない)  
 【森林境界明確化】  
 ・ほとんどの森林境界が未確定  
 ・森林整備が実施困難

設立: 1906年  
 面積: 2,066 ha(うち人工林1,512ha)  
 標高: 100 m ~ 985 m

図12 実証地域の基本情報

森林・林業をめぐる課題のうち1つ大きなところが、森林所有者の方が自分の土地の境界が分からない、はっきりしていないという点です(図13)。どうということかといいますと、地籍調査という国が事業として行っている土地区画の調査がありまして、森林部分は45%しか終わっておりません。まだ境界の確定していないところが半分以上になります。

ただ、このような境界の確定を厳密な測量をもとに行うのを待っていても、いつまでたっても進まないのが現状ですので、林野庁は「森林境界明確化」という、もう少し簡易にした事業でこの境界をはっきりさせようということを進めています。

**■ 地域課題**  
**背景: 国内人工林資源の充実**  
 日本は資源として活用可能な「50年生」を超える人工林が多い。

**現状の課題**  
 ① **現地立ち会いが困難**  
 森林境界確認は、所有者又は代理人の現地立ち会いが必要。しかし、所有者の多くが高齢化又は相続人が遠隔地にいるなど立ち会いが困難な状況である。  
 ② **森林資源の活用が困難**  
 現地立ち会いが出来ないため、森林境界が不明確、所有者が決まらないことから、森林資源を活用出来ない。

**森林境界を明確化することで、森林資源を有効活用出来るようになる必要がある。**

**資料Ⅲ-11 森林の境界の明確化が進まない理由(複数回答)**

理由	割合(%)
自分の山がどこにあるか分からないから	64.5
市町村等による地籍調査が進まないから	45.5
高齢のため現地の立ち会いができないから	39.7
境界の明確化に費用がかかるから	38.8
隣接する所有者が分からないから	36.4
効率的に境界を明確化するための地域組織等がないから	29.8
隣接する所有者の協力が得られないから	20.7
境界を明確化する方法が分からないから	9.1
その他	19.8

注: 林業者モニターを対象とした調査結果。  
 資料: 農林水産省「森林資源の循環利用に関する意識・意向調査」(平成27(2015)年10月)

図13 地域課題

なぜかといいますと、所有者が分からない森林を伐るということはできません。また、林業生産のために道を作るときも、他人の土地に手を出すことはやってはいけないことです。そこで境界を明らかにしていくわけですが、その際に森林所有者が立ち会わなければいけないことになっています。

**資料Ⅲ-11 森林の境界の明確化が進まない理由(複数回答)**

自分の山がどこにあるか分からないから 64.5  
 市町村等による地籍調査が進まないから 45.5  
 高齢のため現地の立ち会いができないから 39.7  
 境界の明確化に費用がかかるから 38.8  
 隣接する所有者が分からないから 36.4  
 効率的に境界を明確化するための地域組織等がないから 29.8  
 隣接する所有者の協力が得られないから 20.7  
 境界を明確化する方法が分からないから 9.1  
 その他 19.8

注: 林業者モニターを対象とした調査結果。  
 資料: 農林水産省「森林資源の循環利用に関する意識・意向調査」(平成27(2015)年10月)

図14 森林の境界の明確化が進まない理由

森林の境界明確化が進まない理由として、自分の山がどこにあるか分からない、地籍調査が進まない、あるいは高齢のため現地の立ち会いができないということが挙げられています。

(図14) 農山村におられる高齢のおじいちゃん、おばあちゃんが、山の中の境界確認のためにずっと歩いて回るのは大変なことです。また、相続されている方が遠隔地に居住している場合、境界立ち合いのためだけに帰ってきてもらうことはなかなか難しいというのが現状です。

これらの解決を図るために、リモートによる境界の立ち合いはできないかと考えたわけです。

境界に関連することでは、九州の中で「誤伐・盗伐」と言われる、他人の山を伐ってしまうことが事件化しています。境界が分からず気づかなかつた誤伐という言い方も否定はできませんけれども、やはり境界がはっきりしていないことでいろいろな問題が生まれてきています。(図15)



図 15 南日本新聞朝刊 令和2年3月23日

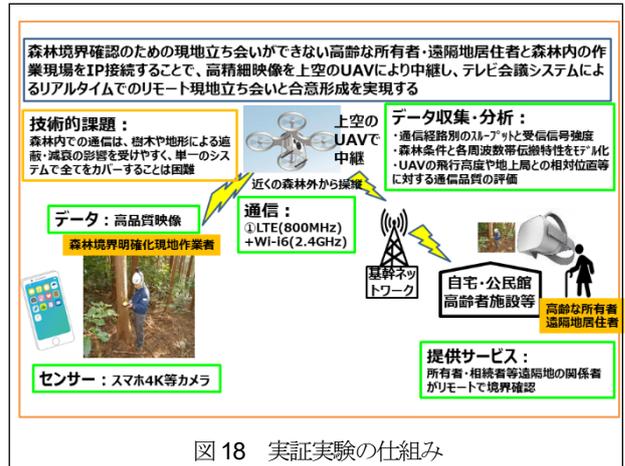


図 18 実証実験の仕組み

そこで今回の実証実験では、森林境界確認のための現地立ち会いができない高齢の所有者や遠隔地居住者と森林内の作業現場を IP 接続して高精度映像を上空の UAV により中継し、テレビ会議システムによるリアルタイムでのリモート現地立ち会いと合意形成を実現することに取り組みました。その成果についてご報告します。

技術的課題としては、森林内の通信は樹木や地形による遮断、減衰の影響を受けやすく、単一のシステムでカバーすることが困難ということです。

左下(図 18)のように森林の中を GPS 等で場所を確認し、測量していきます。その森林内の状況をカメラで映して上空の UAV で中継します。そして自宅や公民館にいる高齢者の方あるいは遠隔地に居住している方と森林内の現地の情報を送ることで、リモートの立ち会いを実現するという仕組みです。

### 1 森林境界明確化事業と地籍調査との比較

国土交通省

- 森林境界明確化事業による成果は、境界情報の保全等によりその後の地籍調査の円滑化に寄与しているが、基準点の設置等の測量方法が地籍調査と異なるため、その後の地籍調査において追加の立会や測量を実施している状況。
- 森林境界明確化事業と地籍調査との作業工程の明確な棲み分けを図った上で、測量方法及び立会等に係る作業内容水準の統一化を図ることが必要。

森林境界明確化事業 (林務局)	地籍調査
所有者が異なる筆の境界	明確にする土地境界 (同一所有者の筆の境界も調査・測量)
基準点の設置は必須でなく、基準点に基づかない簡易な測量	測量方法 (基準点の設置は必須であり、基準点に基づいた高精度な測量 < 誤差 1m 以内 >)
原則、土地所有者等が立会。外周部は片方の土地所有者の立会のみでも可。	立会方法 (原則、現地立会。立会ができない場合は、筆界表による確認の上、所有者の同意を得る必要あり。)

【森林境界明確化事業成果の活用に向けた課題】

- 測量での課題
  - 地籍調査の基準点や公共基準点に基づいた測量の実施が必要
- 立会での課題
  - 地籍調査同様、公園に基づいた調査の実施が必要
  - 境界に係る両方の土地所有者の同意が必要

林務局のみでの対応は困難なため、地籍調査の必要性がある地域については、林務部局(森林組合含む)と地籍部局の連携が必要

出典: 国土交通省資料

図 16 森林境界明確化事業と地籍調査との比較

### 山村部における効率的な地籍調査手法導入の必要性

国土交通省

林部(山村部)における地籍調査の進捗率は約45%(2017年度末時点)と、全国平均約52%と比較して遅れている。

用途	進捗率 (%)
D I D	25
非 D	54
I	24
D	46
合 計	52

【地籍調査の流れ】

- 1 住民への説明会 (調査に先立ち、住民への説明会を実施)
- 2 二筆地籍調査 (土地所有者等の立会いにより、境界等の確認)
- 3 地籍測量 (測量機で土地境界の正確な測量を実施)
- 4 地籍測定・地籍図等作成 (測量データから正確な地図を作り、図籍を測定)
- 5 成果の閲覧・修正

山村部の地籍調査の遅れの大きな要因

- 従来の地籍調査では、現地へ赴き、立会いによる境界確認や測量作業を実施。
  - 二筆地籍調査における現地立会
    - ・現地の立会には土地所有者等に大きな負担。特に高齢の土地所有者等は現地に来るのが困難。
    - ・現地の立会には、膨大な手間と時間を要する。
    - ・急峻な地形等により滑落等の危険性がある。
  - 地籍測量における現地測量作業
    - ・急峻な地形や木々等の障害により山村部での測量作業は手間や時間がかかる。
    - ・急峻な地形等により滑落等の危険性がある。
- 現地立会いや現地での測量作業が効率化されるリモートセンシングデータを活用した地籍調査手法(新手法)を導入する必要がある。

出典: 国土交通省地籍課編「建築業向け・境界明確化に関するセミナー」資料(2020.02.06)

図 17 山間部における効率的な地籍調査手法導入の必要性

国土交通省も問題意識を持たれていて、地籍調査というほどではないですが、森林境界明確化という部分で所有者だけにははっきりさせようという落とし込みになっています。(図 16)

そのためにも所有者の方に立ち会ってもらわなければいけないのですが、なかなかうまく進んでいないというのが現状です。(図 17)



図 19 実証実験内容

バルーンでの電波受信試験(図 10)で上空では LTE の電波が受けられることはわかりましたが、そこから森林の中へ電波をつないでいけるかが実験の大事な部分になります。樹木の幹や枝や葉によって空間が遮断されると電波伝搬が阻害されますが、上空にあがれば意外と隙間が空いているという予測のもとに上空からであれば電波が通じるという考え方で進めました。(図 19)

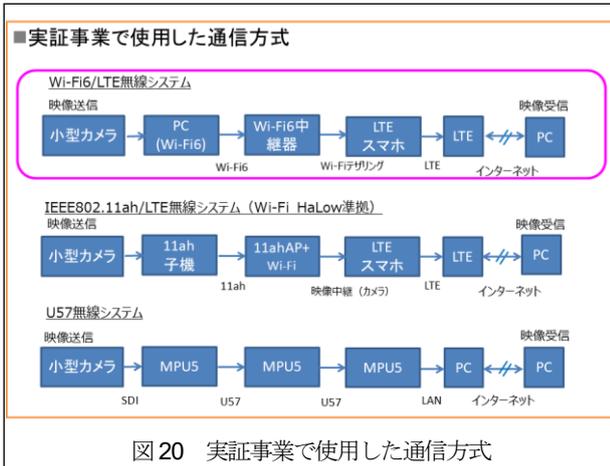


図20 実証事業で使用した通信方式

今回、総務省の事業では3種類の通信方式を実施しました(図20)。1つ目はWi-Fi6とLTE無線システム、2つ目は802.11ah、これはWi-Fi HaLowとも呼ばれる仕組みのものとLTE無線システム、3つ目は無人移動体画像伝送システムであります5.7GHzのU57無線システムです。

2つ目の802.11ahのWi-Fi HaLow準拠のものは現在国内では認可されておりません。ただ、920MHzの電波は森林においては有効でしたので、実用化が待たれるところです。

3つ目のU57は、マルチホップでの中継が可能でちゃんと映像が送れましたが、今はまだ機材が非常に高価であるという面で普及にはまだ課題が多いと感じています。

今回は最もうまくいきました1つ目のWi-Fi6とLTEの無線システムについてご紹介します。

Wi-Fi6とLTEのシステムでは、小型カメラをノート型のコンピュータにつけて、そこからWi-Fi6で上空の中継機につなぎます。その中継機とスマホがWi-Fiテザリングで結ばれて、そしてLTEにつながってインターネットに入っていくという仕組みを作りました。

詳しく描きますとこの絵(図21)になります。Wi-Fi6(802.11ax)は、2.4GHz帯と5GHz帯があります。免許は不要ですが、上空での利用は2.4GHz帯しかできないという制限もあり、2.4GHzに限って通信を行いました。

2.4GHzは理論値では1Gbps程度の伝送速度を得られるので、非常に高速な通信が可能ことから、Wi-Fi6を選んで挑戦しました。(図22)

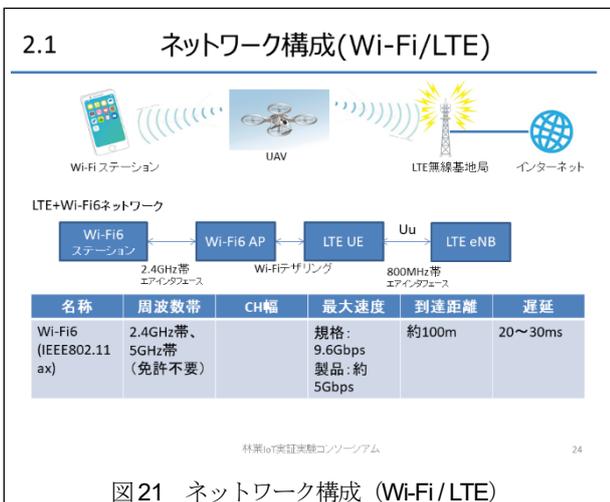


図21 ネットワーク構成 (Wi-Fi/LTE)

### 3.1 Wi-Fi 6 無線諸元

無線LAN インターフェイス	周波数帯域/チャンネル	伝送方式	伝送速度
IEEE 802.11ax	2.4GHz帯(2,400-2,484MHz): 1~13ch	OFDMA (直交周波数分割多元接続) 方式/ 搬送波数 ※屋内限定	2.4GHz帯 最大1147.1Mbps (HE40の場合) (自動フォールバック)
	[W52] 5.2GHz帯(5,150-5,250MHz): 36/40/44/48ch		
	[W53] 5.3GHz帯(5,250-5,350MHz): 52/56/60/64ch ※屋内限定		
	[W56] 5.6GHz帯(5,470-5,725MHz): 100/104/108/112/116/120/124/128/132/136/140ch		
	[HE20]242, [HE40]484, [HE80]996		
	MIMO (空間多重) 方式		

林業IoT実証実験コンソーシアム

25

図22 Wi-Fi6 無線諸元

### 3.2 実証利用機種：Wi-Fi 6 無線中継機



NETGEAR社製 AX1800 WIFI 6メッシュエクステンダー無線LAN中継機 EAX20

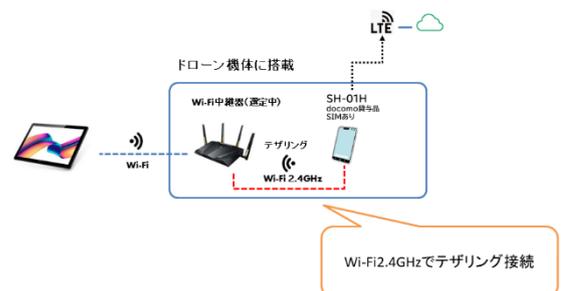
林業IoT実証実験コンソーシアム

26

図23 実証利用機種：Wi-Fi6 無線中継機

これが実際に使った無線中継機です。アンテナがたくさん入っているものではないタイプを使用しました。(図23)

### 5.3 LTE/ Wi-Fi設備接続

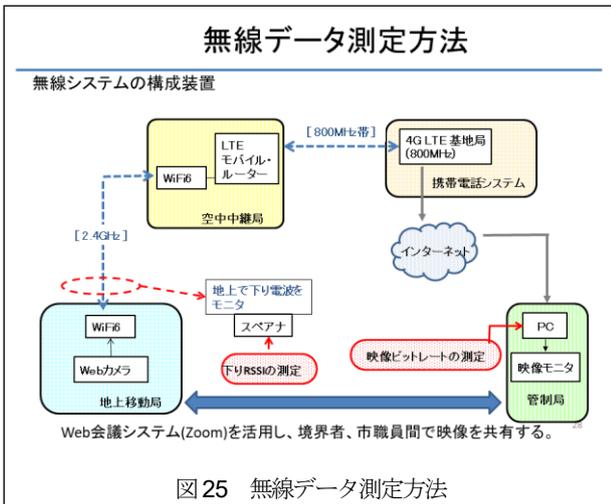


林業IoT実証実験コンソーシアム

27

図24 LTE / Wi-Fi 設備接続

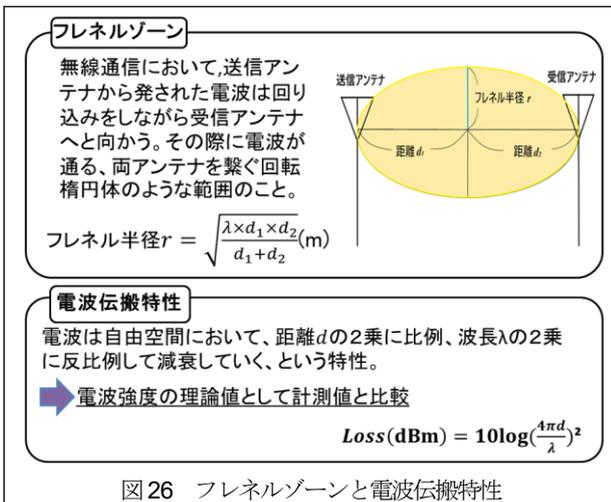
無線中継機はLTEのスマートフォンにテザリングで接続しました。携帯電話の上空利用は制限されており、現在は携帯電話の事業者しか認められていないため、今回はドコモさんの協力を得ながら実験局として実施しました。(図24)



使用しました LTE は 800MHz です。私どもが対象にしている森林地帯の携帯基地局は 800MHz が多くと推測し、これによって接続がどれぐらいできるかということを実証するのは意味があると考えました。

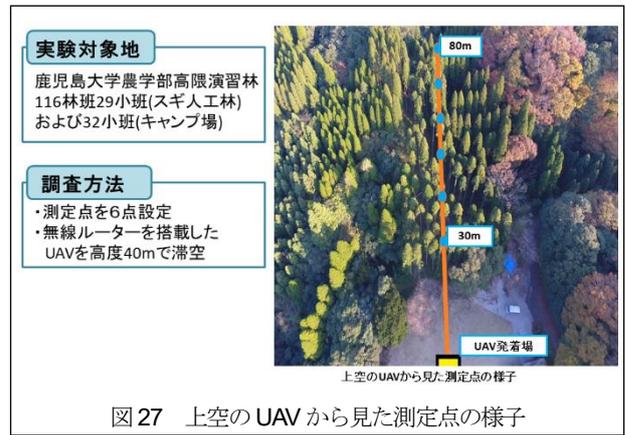
この絵(図 25)の中にあるように、左下の地上移動局でカメラを PC の Wi-Fi6 につなぎ、上空の UAV のところの中継機につないでいくのですが、地上のスペアナで UAV の中継機からの下りの電波をモニタしました。あとは管制局と書いていますが、実験では公民館等で Zoom の映像を確認していて、そこでスループットの計測もしました。

森林の中の地上移動局と、管制局が中継やインターネットを通じて結ばれることによって、この森林境界の立ち合いができることを目指したわけです。



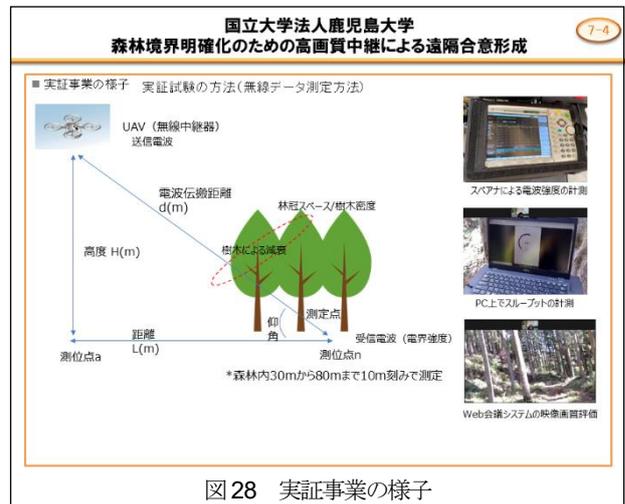
電波はこのようなフレネルゾーン、葉巻のような形である幅の広がりを持ちながら伝搬していきます。

そして電波伝搬の特性としまして、距離の二乗に反比例するという特性があります。このような電波強度の理論値と実際の電波強度の計測値を比較しながら、どれくらい通信ができていたかを計測しました。(図 26)



実験では右の写真(図 27)の一番下に黄色で囲っているところで UAV を上げました。今回使いました UAV はおよそ上空 90m まで上昇することが可能な機種です。

そして森林の中に 30m から奥に向かって 80m と書いてありますが、10m 間隔に測点を設置しました。



電波強度の計測の仕方はこちらの図(図 28)になります。UAV は実際には少し斜め上空にいるように見えます。その仰角の計測と水平距離から上空の UAV までの斜距離を求めました。地上計測点から UAV までの見通し線上でフレネルゾーンを遮断する樹木までの距離を計測しました。地上計測点から UAV 方向を撮影し、画像上でどの程度フレネル空間が遮断されているかを測りました。

電波については、スペアナによる電波強度の計測、PC 上でのスループットの計測、そしてウェブ会議システムの映像画質の 3 つの評価を行いました。

森林の中では 30~80m まで 10m 刻みで測位点 n と書いていますが、奥のほうに入っていくことで樹木による遮断の割合がさらに高くなっていくという試験設定にしました。

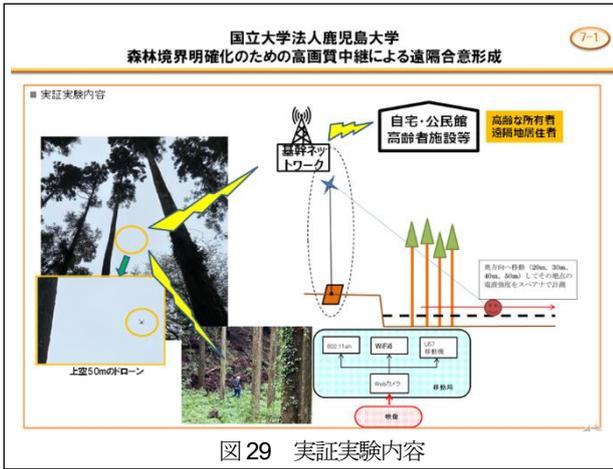


図 29 実証実験内容

樹木の幹と幹の間の黄色で囲った中にある点が UAV です。かなり遠くにあるように見えますが、これでも 100m 以内です。(図 29)

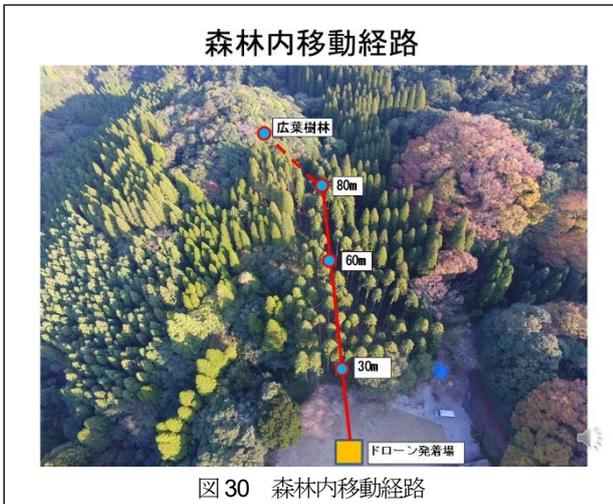


図 30 森林内移動経路

結論を申しますと、一番奥の 80m の測位点でも映像を中継することが可能でした。私どもは、60m を超えるあたりから通信は難しくなるだろうと予想していましたが、予想に反しまして一番奥まで行かしても通信は可能でした。したがって左のほうに曲がりまして、斜面に登って広葉樹林の中まで距離とともに森林のタイプを変えて試験を行いました。(図 30)

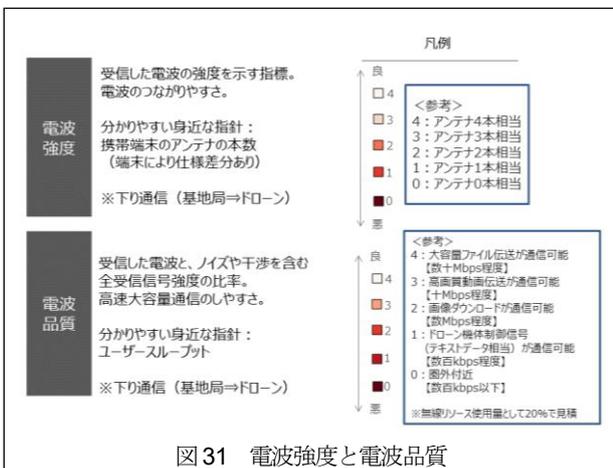


図 31 電波強度と電波品質

電波にはいわゆる電波強度と電波の品質があります。電波強度はつながりやすさで、携帯電話のアンテナの本数に相当するようなものです。そして電波の品質は、ノイズや干渉を含む信号強度の比率になりますが、分かりやすい指標としてはデータのスループットとなります。

右のほう(図 31)に書いていますけれども、数十 Mbps から数百 Kbps まで、転送するファイルや転送可能な種類によってやり方が変わってきます。

**実証現場 電波調査結果**

最寄りのLTE基地局（高峠局：800MHz、実証現場から約1.2km）から通話に支障が出るレベルの反射波が飛来していた。

測位	調査ポイント名	PCI (受信電波)	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	DL速度 (Mbps)	UL速度 (Mbps)	アンテナ本数
①	キャンプ場 (地上高)	279 (高峠局800M)	-117.50	-11.00	2.13	0.14	1~2
②	キャンプ場 (ANT高5m)	279 (高峠局800M)	-113.00	-7.00	-	-	-
③	林内 (地上高)	-	-	-	-	-	圏外
④	林内 (ANT高5m)	279 (高峠局800M)	-118.50	-12.00	-	-	-

凡例	RSRP (dBm)
圏外	< -117.5dbm未満
高空エース (圏外にて利用可能)	> -117.5dbm以上
カーコース (圏外にて利用可能)	> -105.0dbm以上
ホームエース (圏外にて利用可能)	> -100.0dbm以上
オアシスエース (圏外にて利用可能)	> -95.0dbm以上

図 32 実証現場 電波調査結果

今回の実験で UAV の発着場にしましたキャンプ場にそもそも携帯電話の電波が来ていると試験になりませんので、あらかじめ LTE 電波を測ってみました(図 32)。最寄りの基地局からこの現場までは約 1.2km ありましたが、キャンプ場の地上と地上から 5m の高さの計測結果は、いずれも携帯電話の通信は難しい状況でした。また、森林の中は通信がまずできないという状態でした。これが初期設定です。



図 33 森林内の様子

左の写真(図 33)のように森林の中に入っていくにしたがって木や枝や葉っぱの壁がだんだんとできていきます。しかし、上空のほう(図 33、中央)は比較的隙間が空いていきます。横方向には木が邪魔していても、上空では隙間が空いていくような状況もあるわけです。



図 34 実験機 1

これが今回使用した UAV です(図 34)。下段左の写真にあるように、発電機からリールに巻いてある線で給電するタイプです。この UAV は緊急着陸のために小さなバッテリーを積んでいます。基本的に飛行中はこの有線での給電が行われます。したがって 1 時間でも 2 時間でも空中に滞空することが可能です。中央の写真は操縦している状況を表しているモニターです。右側の写真は UAV を飛ばしている様子で、オペレーターとは別に線が絡んだりしないように管理を行う人間が必要になります。

ちなみに有線で電力を送っているだけではなく、光ファイバーも入っていきまして、操縦自体も有線で行います。



図 35 実験機 2

実験で使用したスマホと Wi-Fi6 中継機(無線ルータ)が白い箱に入っている様子です(図 35)。スマートフォンは認可された物で、それとテザリングで結ぶ無線ルータが入った箱を UAV に装着します。

この実験では先ほど(図 20)紹介しました 3 種類の電波に挑戦しています。Wi-Fi6+LTE の物、802.11ah 相当の通信機をつけた物、U57 の移動体ロボットの通信機をつけた物です。それぞれ UAV に積むことを想定している物ではありませんので、サイズも大きく、重量が 1kg ぐらいありました。その重量を持ち上げなければいけない UAV の力と、実は UAV は重さのバランスが大事で、今回協力してくださった会社はこの 3 種類の異なる重さの物をどのように装着して安定的な飛行をす

るかということに随分ご苦労をされたそうです。

では、UAV での中継によって Wi-Fi6 で森林内と結んで、LTE を通じた通信がどのように行われているのかを見ていただきます。



図 36 実証実験 中継の様子 1



図 37 実証実験 中継の様子 2



図 38 実証実験 中継の様子 3

(動画を流しながら説明)

Zoom の画面に発着場から UAV が上がっていくところを映しています(図 36)。画面の上の方に人が映っていますが、公民館等で立ち合いをする現場を映しています。だんだんと LTE が弱くなり Zoom の画面が小さくなりますが(図 37)、UAV が 40m まで上がると電波が確保できて、Zoom の画面も元の大きさに戻りました。

スギ人工林の 30m 測位点付近まで入ってきました。ここはもともと携帯電話の電波が入らないところですが、カメラを接続した PC を上空の UAV に Wi-Fi6 で接続して、そして LTE

からインターネットにつないでいます。その時の公民館等でのリモートの立ち合いはこのようになっています(図 38)。これをお年寄りの方あるいは相続人の方等が見ながら、「ここで境界はOKか、双方が合意するか」という話し合いをしていくこととなります。かなり鮮明な映像が得られていることがご理解いただけるかと思います。

(動画終わり)

私はこの映像を森林所有者の方5~6名、それから、森林境界について実際の作業を行う、例えば県庁の職員の方々に見ていただきながらインタビューしたところ、全員からこの映像の品質、画質で森林の境界を見分けることができるという感想を頂きました。これは大変すばらしい成果だと思います。

現実には事前にカメラで撮影してきた画像や映像を持ち帰り、公民館のような場で映しながら合意形成することに取り組まれています。その場合、「境界はここでいい」と言われても、もう一度その現場に戻って杭を打つという二度手間が発生するわけです。

リモートの立ち合いができれば、森林所有者は移動することなく合意形成、所有界を確定することができます。そして「そこでいい」と言われたらその場で杭を打つという進め方になるわけです。

(動画を流しながら説明)

さらに奥に進み、80m 測位点の先にある広葉樹の中に入っていくと、だんだんと画質が荒れてスムーズな動きをしなくなってきました。これは電波の状態が悪くなっていることを表しています。

上空がほぼ 100%樹木の葉で覆われているところでは通信ができず、Zoom が停止した状態になります。

(動画終わり)

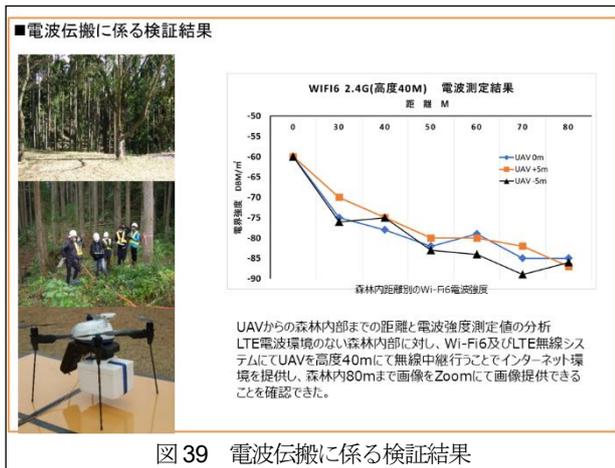


図 39 電波伝搬に係る検証結果

計測した結果についてご紹介します。高度 40m まで上げた UAV を、電波を少し変化させるために上空で左右に 5m ずつ位置を振りました。その結果が3種類の色で表しているグラフになります(図 39)。森林の中に 30~80m まで入っていったときに、電界強度がどれぐらいかを表しています。大体、-85dBm ぐらいになると通信が難しくなると言われていますが、最低限そこまでは維持ができていると確認できました。

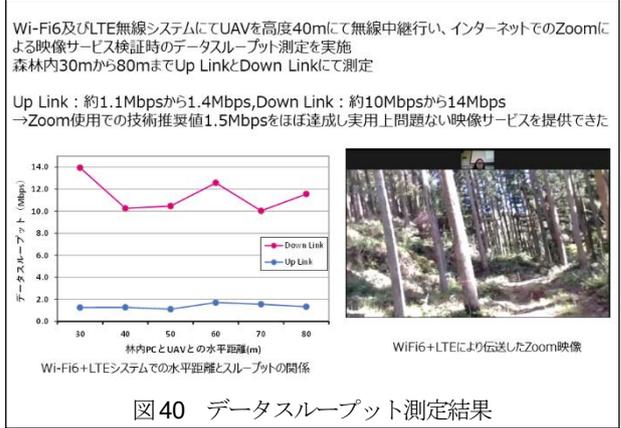


図 40 データスループット測定結果

スループットを測った結果です(図 40)。グラフの赤い線は Down Link で、およそ 10Mbps は維持できたことがわかりました。Zoom は 1.5Mbps あれば動くと言われておりますので、それは十分に達成することができました。Up Link (青い線) でも 1.1Mbps から 1.4Mbps を得ることができました。

## 9.6 データ速度と動画の解像度

### YouTubeの速度推奨

動画の解像度	持続的な速度
4K	20Mbps
HD1080p	5Mbps
HD720p	2.5Mbps
SD480p	1.1Mbps
SD360p	0.7Mbps

【引用元】 YouTubeヘルプ 動画ストリーミングに関する問題のトラブルシューティング

図 41 データ速度と動画の解像度

ちなみに YouTube でのデータ速度と動画解像度の推奨が出ています。

4K レベルは 20Mbps、ハイビジョンクラスは 5 Mbps が推奨されているので、今回の通信実験での電波の強さやデータ転送の速度は映像を送るのに十分なものであったと考えています。(図 41)

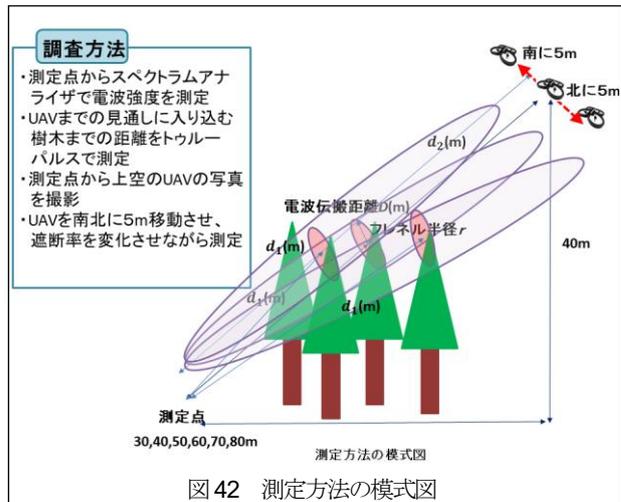


図 42 測定方法の模式図

このような形(図 42)で樹木の枝や葉、幹によって空間（フレネル半径）が塞がれていても、UAV を左右に少し振った場合、この見え方、遮断のされ方が変わります。そこでフレネル半径を樹木がどれぐらい遮断するかを写真上から計測したものを遮断率と定義しました。その遮断率と電界強度との比較を行いました。

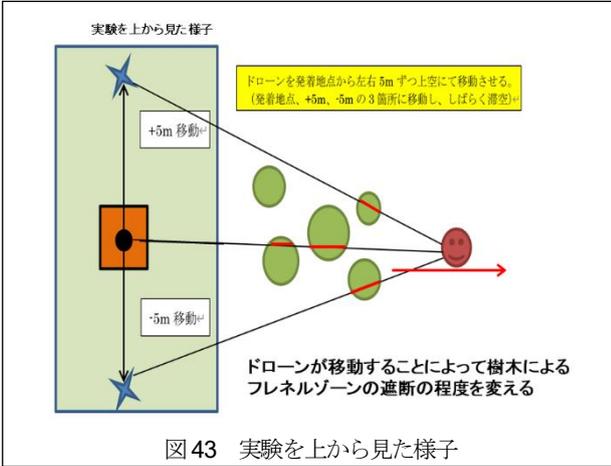


図 43 実験を上から見た様子

先ほどの絵(図 42)を上から見たところ(図 43)。左のオレンジの四角 (UAV 発着場) から左右に5m ずつ振ると、樹木に隠れる割合、遮断の程度が変わってくるということを表しています。



図 44 解析方法

フレネルゾーンから実際に上空 40m の UAV を見た様子(図 44)、黄色の点線で囲ったところに UAV があります。拡大しても本当に点にし見えませんが、UAV が左右に動くことで電波がちゃんとやってくるのが分かります。

この電波の通る範囲を距離に応じてある空間を切り出します。遮断している樹木までの距離を測り、フレネル半径に応じた空間をこの画像上に切り取るわけ。そして UAV 自体はマスクして、残りの遮断しているところを黒の形で二値化しました。これでこの空間の中をどれぐらい遮断しているかという割合を遮断率として出しました。

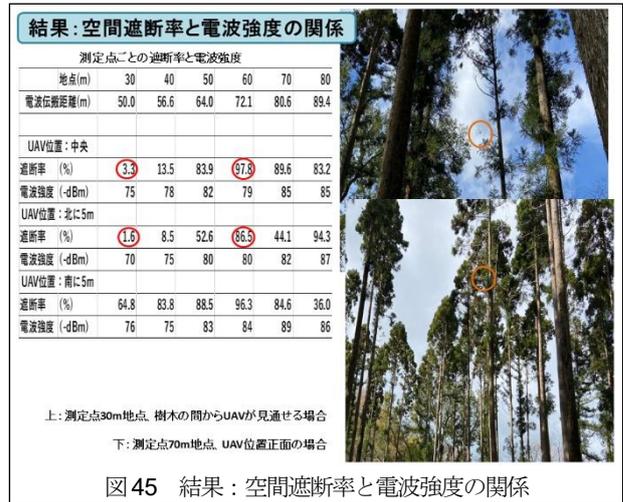


図 45 結果：空間遮断率と電波強度の関係

その結果です(図 45)。測位点 30m 付近では遮断率はほとんどありませんでした。それが 40m、50m とだんだん中に入るに従って遮断率が高くなっています。特に 60m のところでは 97.8%、ほとんど空間が隠れてしまう状態になります。しかし、電波強度を見てみると、85-dBm は何とか維持できるという値を示しました。そのため 80m の一番奥のところでも Zoom による通信が可能であったと言えます。

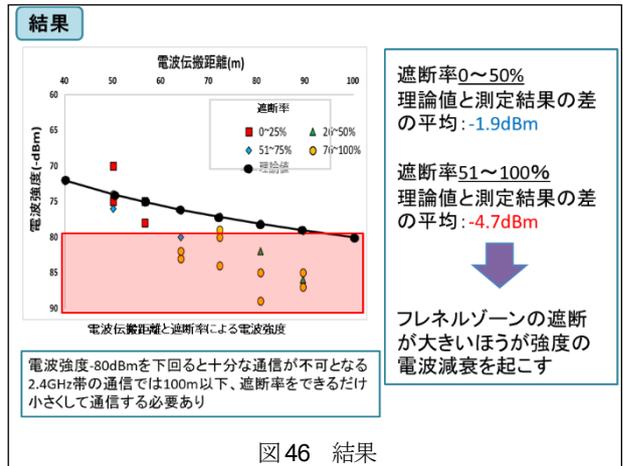


図 46 結果

これは遮断率と電波強度の関係を計測した値です(図 46)。グラフの中の黒丸と実線が電波伝搬距離に応じた理論値で、少しずつ減衰していくことが分かっています。遮断率は赤の四角が 0~25%、緑の三角が 25~50%、青のひし形が 51~75%、オレンジの丸が 75~100%を表しています。

これを見ていただくとオレンジの丸 75%以上遮断されている場合は、電波強度が理論値から大きく低下しています。51~100%の遮断率の場合は理論値より測定値が-4.7dBmほど低下していると書いていますが、フレネルゾーンの遮断率が小さければ理論値からの乖離は少ないものの、遮断率が高くなると理論値よりもずっと電波強度が弱くなることが分かりました。

-80dBm を下回ると十分な通信が難しくなることから、距離が 100m 以下ではなるべく遮断率を小さくして通信する、つまり邪魔されない空間の確保が大事だと改めて分かりました。



ことになると制御ができなくなるという問題があるからです。そこで実用化実験局という制度のもとに携帯電話のキャリア会社が免許を取得されて実証試験を展開されています。(図 50)

今はWi-Fiに近いような2.4GHzの電波を使ってUAVを操縦しているのですが、携帯電話の電波で操縦ができるになると広範囲を動かすことができます。今は操縦者からUAVを直接目視しなければいけないことになっていますが、広範囲での利用を考えた場合、携帯電話の電波を使ったUAVの飛行が便利になることから検討が進められています。(図 51)



図 52 IoT サービス実証における成果 2

今回の総務省の事業で得られた成果です(図 52)。右の上のグラフにあるのが、境界の確認をする立ち合いのときの作業量や時間です。特に森林所有者が立ち合いのために遠方からも移動してこなければいけません、そのような負荷が大幅に減ることが明らかになりました。

真ん中あたりに「②定性的な成果事例」と書いていますが、中継映像を見た7名の県庁職員全員が、「この映像で境界明確化の現地立ち合いは代替可能である」と回答されました。同じく森林所有者5名と関連団体職員1名にヒアリングをしたところ、全員から「所有境界の確認に十分な映像品質が得られている」という回答を得ることができました。

今後映像の中に「今、どこを見ているのか、どこを映しているのか」というナビゲーションと一緒に入ることでさらに良くなるのではないかとアドバイスも頂きました。そのような作り込みができれば、リモートの立ち合いもより進むのではないかと期待しています。

右の真ん中に書いてありますが、今回使用した有線のUAVはかなり特殊な機器です。市販されている大型のUAVでコストを考えると、1kgの物を持ち上げることができて、30数分飛行が可能な機体の場合、大体100万円だそうです。そこにWi-Fi6の中継機とスマホを積んで2年間で100回ほど飛ばれば、設備費は1回当たり1万円で飛ぶことができると計算できます。境界の確認において人間の作業が減ることで人件費を減らすことを考えれば、これは実用的にも経済的にも実現可能なやり方であると試算しています。

収益モデルをいろいろと考えまして、シナリオのように展開できれば所有境界明確化の作業が進展できるということを、今回の結論にしています。(図 53)

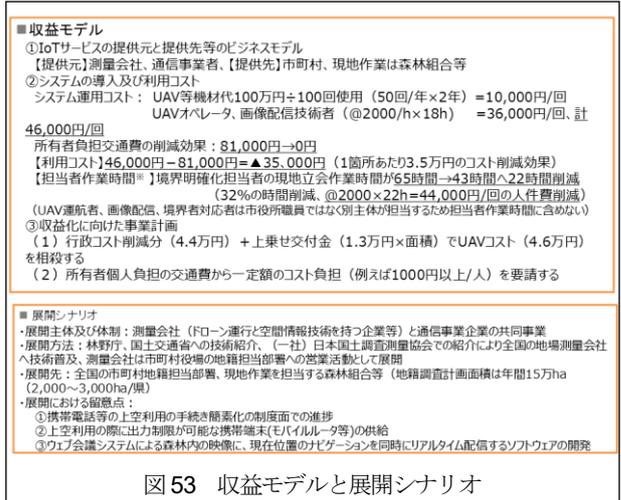


図 53 収益モデルと展開シナリオ

いずれにしても、私どもとしましては森林の中からWi-Fiで接続することができた事実は非常に大きな成果です。

### 林業のIoT化(海外の事例)

例えば森林の中で電波が通じればどのようなことができるかをご紹介します。これは小松製作所が出されているビデオ「スマート林業 in スウェーデンの森」(https://youtu.be/KUZlJgWLVew)です。

(動画を流しながら説明)

この赤い機械はハーベスタといいまして、木を伐って丸太にすることができます。どこでどのような作業をしているかモニタリングされていて、世界中でどの機械がどこで動いているかということが分かるわけです。ハーベスタには丸太のサイズや木の種類に応じた価格表が入っていて、木を伐倒して丸太にするまでを非常に能率よく行います。

だんだんと森の奥へ進んでいきます。地図上に移動履歴が表示されていますが、移動履歴と共に伐られた丸太がどこに置いてあるかということも記録されています。

伐り出したブナの大きな丸太、中ぐらいの丸太、小さな丸太、それぞれに価格表をもとにした値札がついています。このような丸太がどの位置でいつ伐られたかという情報が記録されて、電波によって送信されます。この情報は木を集めてくるフォワーダーという運搬車とも共有しています。地図上の黄色い線はフォワーダーが動いているところですが、どの位置にどのような丸太が置いてあるかが分かっていますから、目的とする丸太だけを回収していきます。

簡単に言いますと、丸太のサイズごとに売り先が違っているというイメージです。ハーベスタが伐って回り、フォワーダーが集めて回る。作業が終わったときには、どれだけの丸太が生産されたのか、そしてそれはどの場所に積んであるのかということも瞬時に分かっています。そしてその時点で丸太を買うユーザーとビジネスの取引ができているという仕組みになっています。

(動画終わり)

海外ではスマート林業という形で技術を展開していますが、やはり通信ができることが重要な基盤となっています。冒頭、私は安全性の確保、事故が発生したときの緊急通報の必要性を挙げました。林業を効率化して低コストで生産し、そして収益性の高い産業にしていく「林業の成長産業化」のためには通信があるかないかというのは非常に大きなポイントになります。



図 54 林業機械からの生産素材情報を取得・活用

先ほどご紹介したハーベスタの写真です(図 54)。左側はキャビンの中にあるシステムで生産した丸太が記録されます。左が直径、右が長さを表していて、直径 17cm、長さ 522cm の丸太を伐ったことが表示されています。オペレーターは伐る木を定めて、例えばトウヒやマツといった樹種の区別をシステムに入力します。

を考えながら丸太を作っていく仕組みです。木を 1 本倒すと同時に、その木から 100 円でも 200 円でも高い商品を作ろうとすることを目指したシステムになります。この丸太のサイズによる価格表は随時更新し、製材工場や木材を需要するところと共有されます。そして注文が入ると即座にそれを反映させて生産する、その日のうちに商品を納めることができるような取引も、通信があればできるということを意味しています。

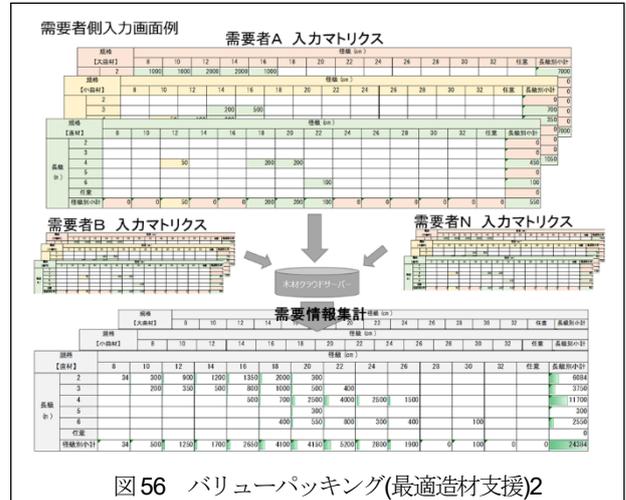


図 56 バリューパッキング(最適造材支援)2

イメージとしましては、需要者がたくさんいて、いろいろな製材工場から丸太の注文がクラウドサーバーに入って集計される。そうすると例えば「この地域で直径 20cm、長さ 4m の丸太の注文が 1,000 本入っている」ということが分かるわけです。(図 56)

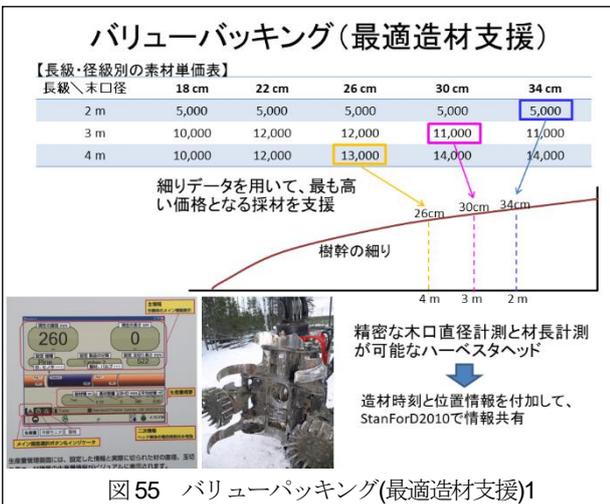


図 55 バリューパッキング(最適造材支援)1

詳しく説明しますと、木を伐るときに幹をつかんで伐採しますが、木は先に行くほど細くなります。これを我々の世界では「細り」と呼んでおります。実は丸太が一番細いほうの直径で測ります。これを「末口径」と呼んでいます。この木は 8m だったら何 cm か、7m だったら何 cm かという、この先に何 cm の末口径の丸太が取れるかということ予測するシステムが入っています。これをバリューパッキング(最適造材支援)と言っています。(図 55)

丸太の価格表が直径と長さに応じて入っているので、どのような丸太の伐り方をすれば一番高い商品ができるかということ



図 57 バリューパッキング(最適造材支援)3

その情報を森林で木材を伐採している現場に送ることによって、「今、この注文が入っているよ」と言えば、それを優先して伐り出すことが可能になります。(図 57)

残念ながら日本の林業では、「これが売れるはずだ」という見込み生産、いわゆるサプライプッシュ型の生産方式をとっています。これをマーケットイン、デマンドプル型の需要に応じた生産に変えていくと、恐らく収益性はずっと高くなると考えられます。そのためにも通信環境を整えていくことが非常に大きな課題と言えるわけです。

まとめ

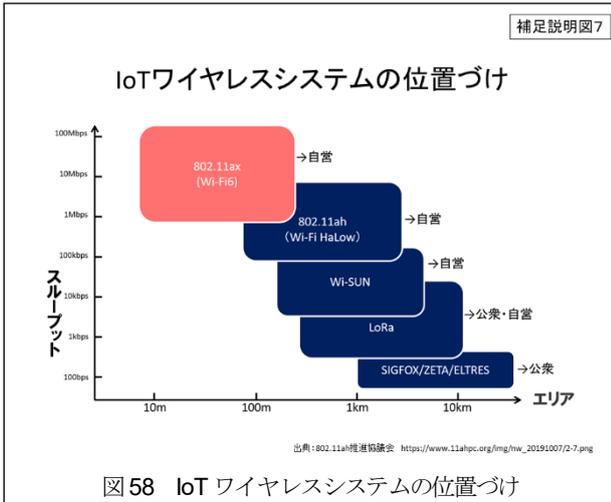


図 58 IoT ワイヤレスシステムの位置づけ

今日は私どもが総務省の事業で行いました Wi-Fi6 と LTE をつないでの通信実験のお話をしました。Wi-Fi6 は非常に速度の速い通信ができる反面、通信の距離はそれほど長くはないとされています。それに対して 920MHz の Wi-Fi HaLow、Wi-SUN、LoRa あるいは SIGFOX といった周波数、通信方式の違うものは、通信距離が長くなる反面スループット、伝送速度が落ちていくものもあります。(図 58)

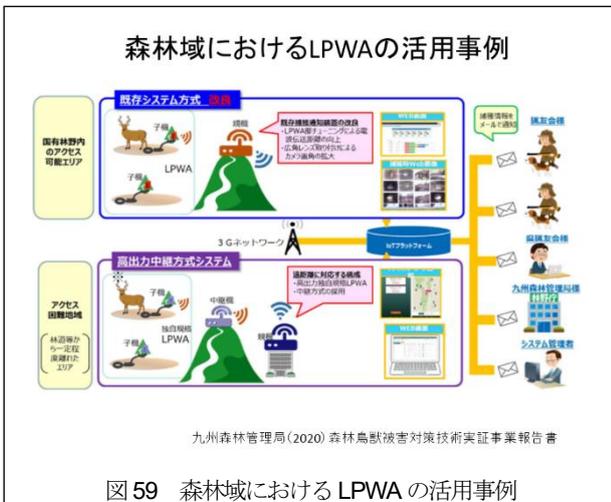


図 59 森林域における LPWA の活用事例

それぞれ電波の特性に応じた使い方が必要になってきます。例えばシカやイノシシが罠にかかったときの信号を LPWA を通じて送ることで、猟師さんが常に歩いて見て回ることなくタイムリーに罠を見に行くなどの実証が行われています(図 59)。

しかし、LPWA は通信距離を長く保つことができますが、データ量的にスループットは低いため、テレビ会議のようなものはできません。

先ほどお見せしましたように(図 47)、通信の中継機として UAV を 80m 上空に滞空させることで半径 350m の範囲内で Zoom の通信が可能であることをお話しましたが、これは、80m の塔を建てているのと同じと言えます。今回の実験に使用したシステムを仮に有線の UAV を含めて構築しようとする

と、恐らく数百万円の後半、1 千万近い費用がかかるかもしれません。しかし、80m の通信の塔を建てる場合、恐らくコストはその 10 倍以上になります。それに比べると一時的ではあれ通信ができる中継システムが構築できることは、さまざまな可能性が示されたと考えています。

**モバイルルーター(例)**

- 品名: Wi-Fi STATION SH-52A
- サイズ・質量: 約157 × 84 × 16.1mm ・約280g
- 通信速度: 5G: 受信時最大約4Gbps 送信時最大約480Mbps
- LTE: 受信時最大約1.6Gbps 送信時最大約75Mbps
- ディスプレイ: 約2.4インチTFT液晶ディスプレイ
- Wi-Fi\*: Wi-Fi 6 対応(IEEE802.11a/b/g/n/ac/ax) 同時接続可能台数: 16台
- 有線LAN: 2.5GBASE-T × 1(内蔵)
- USB: USB3.0(Type-C)
- バッテリー容量: 約4,000mAh

図 60 モバイルルーター(例)

今後、携帯電話の上空利用がだんだん緩和されてきた場合、当然、上空で出力制限、電力制限をしなければいけません、例えばこちらの Wi-Fi6 を装備したようなモバイル Wi-Fi(図 60) は 280g ですの、それほど大きくない UAV でも上空に持ち上げることが可能になると思います。

林業事業者も UAV を所持して上空から撮影していますが、そのように自分たちが持っている物でも利用できるようになれば、専門業者に依頼しなくても必要な通信を自分たちで確保できる時代が来るかもしれません。

**森林内でのQZSS測位実験**

図 61 森林内での QZSS 測位実験

今回はさらに「みちびき(準天頂衛星システム: QZSS)」の受信の試験も森林の中でを行い、樹木による遮断がどれぐらい影響するかを試しました(図 61)。「みちびき」の場合は衛星から補強情報が得られますが、ほかの GPS などの GNSS (全球測位衛星システム) の場合には電子基準点や携帯基地局からの補正情報を得るために通信が必要です。こういった上でも通信が確保できればさまざまなメリットがあると考えています。

最後になりますが、森林域の通信イメージです(図 62)。森林の中で 5m、10m の空間が空いているところは、実は道端などにあります。そのようなところで UAV を上げて、半径

100mあるいは300mぐらいまで電波が届けば、森林の中で今まで電波が届かなかったところに、電波を通じる世界を作ることができます。

安全性の確保はもちろんですし、緊急通報ができることは大きな安心になります。そして林業の生産性を向上させるためにも電波が来ることさまざまな恩恵が得られるだろうと考えています。これは林業だけではなく、例えば観光という面でも応用できるのではないかと期待ができるところです。このような世界を作ることができる可能性を今回実証できました。

関係された方々に厚くお礼を申し上げたいですし、またこの成果を広く皆様方に普及できる今回のセミナーの機会を頂きましたことを大変感謝しております。

以上で終わります。ありがとうございました。



図 62 活用イメージ