

令和3年4月10日

調査研究成果報告書

調査研究課題名 「森林内 LPWA 環境可視化システムの調査研究」

調査研究代表者：高知工業高等専門学校 岩崎洋平

調査研究期間：令和2年7月17日 ～ 令和3年3月31日

1. 調査研究目的

国土のおよそ7割が森林である我が国において、林業は重要な一次産業の1つである。近年、IoT・ICT技術の林業分野への導入が進んでおり、これらの技術を用いることで、広範囲の土壌や地形・環境に関するデータの収集が可能となってきた。これらのデータ収集は、森林内部に設置したセンサデバイスから、無線通信技術（4Gなどの携帯電話通信網、Wi-Fi、ZigBee、LPWA）が使用して行うため、その通信（電波）環境が特に重要となる。しかし、森林内部は屋外とはいえ、遮蔽物が多くその通信環境は不安定である。また、特に険しい起伏を持つ山間部の森林においては、データの収集そのものが困難であるという問題がある。

そこで、本調査研究では、農業や林業などの一次産業やIoTに関わる無線通信技術の1つとして注目を集めているLPWAに着目し、森林内のLPWA電波特性を推定することを目指し、森林内の電波環境（電波の透過強度）を可視化するシステムを構築する。

2. 調査研究の実施体制

- ・システムの構築・実験・実地検証担当
高知工業高等専門学校 准教授 岩崎洋平
- ・システムの評価担当
高知工業高等専門学校 客員教授 今井一雅

3. 調査研究の概要

本研究では、森林内の電波強度（および各種情報）を測定するセンサデバイスおよびセンサデバイスから情報を収集するデータ収集デバイスの開発を行う。センサデバイスを森林内に配置し、データ収集デバイスを徒歩やバルーン・ドローンなどに搭載、両デバイス間での電波強度を測定し、森林内の電波状況（森林内を透過する電波強度）を取得する。得られた電波強度情報をもとに、森林内の電波状況を可視化するシステムを構築する。可視化には、各種物理量の3次元表現に適しているボクセルモデルを利用し、これに得られた電波強度情報をマッピングする。（図1）

このボクセルモデルを利用することで、データ収集用ドローンの飛行計画にセンサの位置情報（GPSなど）に加えて、どこまでセンサへ接近すれば良いかという点も含めることができ、より効率的なデータ収集が可能となる。また、本調査研究で得られたデータを基に森林内のLPWA通信環境推定モデルを構築することで、効率的なLPWA通信ネットワークの導入を検討することが可能になると考えている。その結果、既に導入されているLPWA通

信ネットワークの効率化および林業など1次産業分野でのさらなるLPWA導入の促進が期待される。

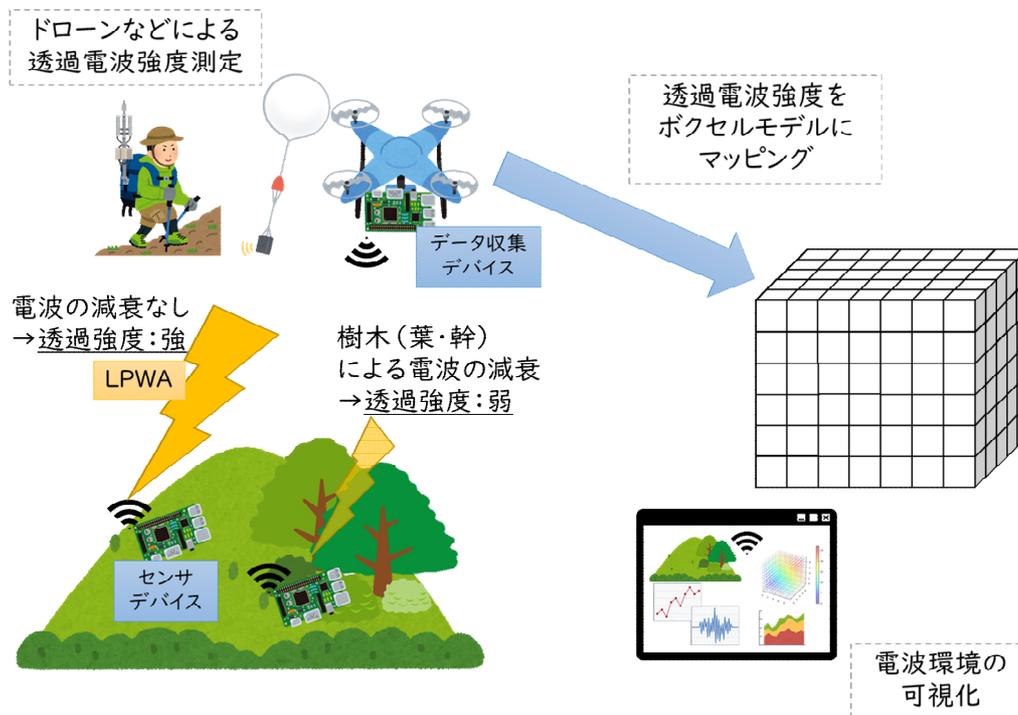


図 1 研究概要図

4. 調査研究の項目について

① センサデバイスおよびデータ収集デバイスの研究開発

センサデバイスの中心として、小型のシングルボードコンピュータである RaspberryPi Zero WH を位置づけ、その特徴（ローコスト・小型・小電力）を活かして、いくつかのセンサを簡単に接続できるものを開発する。無線通信には、LPWA の1つであり、デバイス間でのプライベート通信が可能である LoRa (Private LoRa) を使用する。また、センサデバイスからデータを収集するデバイスも同様に RaspberryPi Zero WH を中心とし、その特徴を活かして、バルーンやドローンに搭載可能なデータ収集デバイスも開発する。

② 電波環境測定システムの研究開発

センサデバイスとデータ収集デバイス間で、センサ情報および電波強度をリアルタイムに通信し、蓄積する電波環境測定システムを開発する。RaspberryPi Zero WH では、Debian 系の Linux で環境構築ができるため、Python を用いたデータ収集プログラムと MySQL や PHP を用いた動的データベースサーバによるデータ蓄積システムを構築する予定である。

③ 森林内における電波環境の調査研究

高知県香美市佐岡地区の金峯神社周辺あるいは高知県長岡郡大豊町の山林に開発したセンサデバイス (9 台) を設置し、バルーンやドローンに搭載したデータ収集デバイス (1 台) を用いて、電波環境の測定を行う。電波環境は、センサデバイスから発信される電波の上空方向への透過強度を指標として測定する。調査研究エリアをカバーするように、センサ

デバイスの設置場所を変更しながら、測定実験を実施する。

④電波環境ボクセルモデルの構築と可視化の実証実験

測定した電波環境のパラメータを測定点に対応するボクセルに付与する。その後、空間的補間法などを用い、全ボクセルにおける情報をシミュレーションすることで森林内の電波環境ボクセルモデルを構築し、3D表示やヒートマップによる可視化システムを開発する。モデル構築プログラムおよび可視化プログラムについては、Python を用いる予定である。また、ボクセルモデルの各種 GIS 情報や森林のボクセルモデル（森林の表面形状、内部構造、地盤形状）と合わせて可視化することも検討するために、ボクセルサイズの変更や各種属性情報を保持可能なデータ構造とする。

5. 調査研究の実施状況と結果について

①② 8月～11月：デバイスおよび電波環境測定システムの開発

高知工業高等専門学校において、センサデバイス9セットおよびデータ収集デバイス1セットを開発した。

センサデバイス×9セット（図2）

実際に森林内に配置するデバイスとして開発した。本デバイスは、1秒ごとに位置情報（緯度・経度・海拔高さ・ジオイド高さ）を取得する。データ収集デバイスと通信が確立した時に RSSI（電波強度）を測定し、位置情報と合わせて送信する。

なお、現時点では省電力化のため各種センサは未搭載とし、モバイルバッテリーで10時間程度稼働することが可能である。



図2 センサデバイス

データ収集デバイス×1セット（図3）

徒歩での移動やバルーン・ドローンへ搭載し移動することを前提として開発した。本デバイスでは、最大16個のセンサデバイスと通信が可能である。各センサデバイスとは16秒ごとに通信を行い、送られてくる位置情報およびRSSIを記録する。また、合わせて、自機の位置情報も記録する。

データ処理のことも考え RaspberryPi4 を用いて構築し、システム開発時のデバッグおよび実際にデータを取得する際のモニタリングに使用できる5インチモニタを搭載している。バルーンやドローンに搭載するときにはモニタを外し、軽量化および稼働時間の延長も可能である。



図 3 データ収集デバイス

以上のセンサデバイスおよびデータ収集デバイスを用いて、電波環境（RSSI）測定システムを開発した（図 4）。



図 4 電波環境（RSSI）測定システム

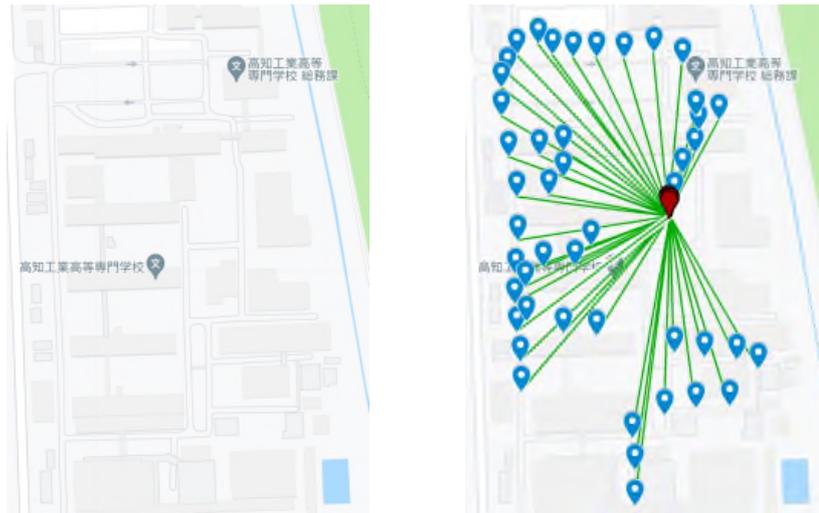
制御用 RaspberryPi と 9 台のセンサデバイスを Wi-Fi で接続し、初期設定などを行う。センサデバイスとデータ収集デバイスは LPWA で通信し、リアルタイムでデータ取得および通信状況のリアルタイムモニタリングが可能であることを確認した。

加えて、データ取得の確認および予備検討を行うために、取得したデータ（CSV）を KML（Keyhole Markup Language）データに変換するソフトウェアも作成した。このソフトウェアを使用することで、Google Map および Google Earth を用いてデータの取得状況を可視化することが可能となった。

③ 11 月～12 月：電波環境測定システムによる測定実験

高知工業高等専門学校敷地において予備実験（2020 年 11 月 11 日）を実施した。実施エリアは東経 133.6799～133.6815、北緯 33.54708～33.54941、高さ（海拔）5.5[m]～6.8[m]、160[m]×360[m]×1.3[m]のエリアで、46 の地点で RSSI を測定した。

測定エリアと測定結果を Google Map 上で表示したものを図 5 に示す。



(a) 実施エリア

(b) 測定結果

図 5 測定予備実験（高知高専，Google Map に表示）

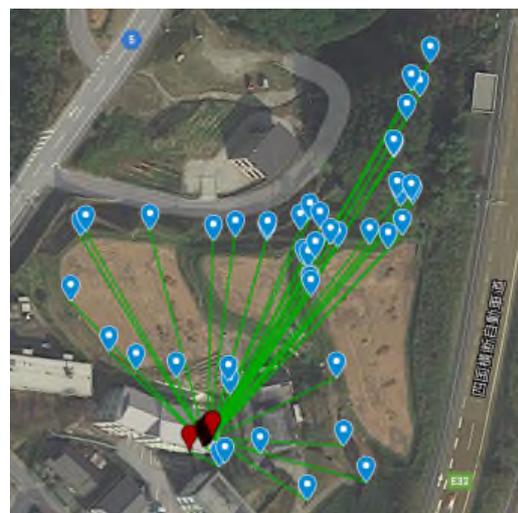
コロナ禍のため、1 人でも調査可能な高知県長岡郡大豊町の山林において徒歩による測定実験（2020 年 11 月 29 日，2020 年 12 月 5 日）を実施した。ここでは，11 月 29 日の測定結果を示す。

実施エリアは東経 133.6590～133.6601，北緯 33.77208～33.77320，高さ（海拔）261.7[m]～279.9[m]，115[m]×160[m]×18.2[m]のエリアで，44 の地点で RSSI を測定した。

測定エリアと測定結果を Google Map および Google Earth 上で表示したものを図 6 に示す。



(a) 実施エリア



(b) 測定結果 (Google Map)



(c) 測定結果 (Google Earth)

図 6 測定予備実験 (大豊町, Google Map, GoogleEarth に表示)

以上の実験より, 本システムにおいて, センサデバイスとデータ収集デバイスの間で通信が確実に行われ, データ (電波強度) の記録が可能であることが確認できた。

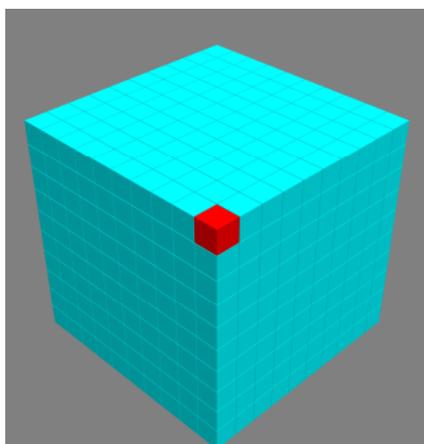
また, 作成したソフトウェアにより, Google Map 上でデータの取得状況を分かりやすく確認できることも実証できた。

④ 11月～1月: ボクセルモデル構築および可視化ソフトウェアの開発

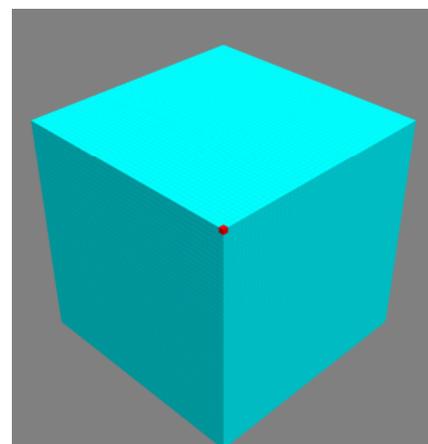
ボクセルとは, ボリューム (Volume) とピクセル (pixel: 2次元画像における最小単位) を合わせた造語であり, 3次元物体の表現において最小単位として立方体を用いるものである。このボクセルはコンピュータグラフィックスの分野や医療分野において用いられているが, 近年, 森林において各種情報を統合して蓄積・分析するためにも使用されている⁽¹⁾⁽²⁾。

そこで, 本研究では, これらの研究結果の情報も合わせて森林内の電波状況を可視化できるように同じくボクセルモデルを構築した。

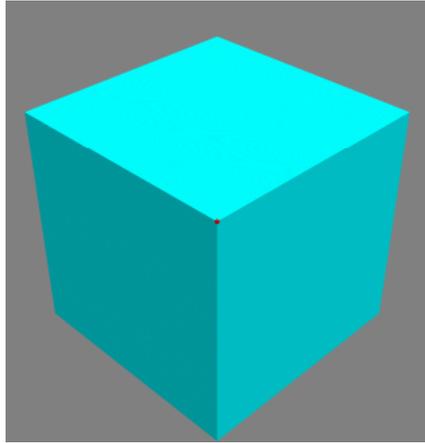
対象領域を $10 \times 10 \times 10$ 分割, $50 \times 50 \times 50$ 分割, 100×100 分割 \times 100 分割した例を図 7 に示す。赤く表示されているボクセルには, この後のシミュレーションのため, あらかじめ RSSI 値として 255 を設定している。



(a) $10 \times 10 \times 10$ ボクセル



(b) $50 \times 50 \times 50$ ボクセル



(c) 100×100×100 ボクセル

図 7 ボクセルモデル

空間的補間法（今回はボクセル間のユークリッド距離に応じて減衰すると仮定）を用い、全ボクセル（全対象領域）における電波強度をシミュレーションし、マッピングを行った(図 8)。ボクセルの色は赤 255→青 0 としてヒートマップの形式で表示している。

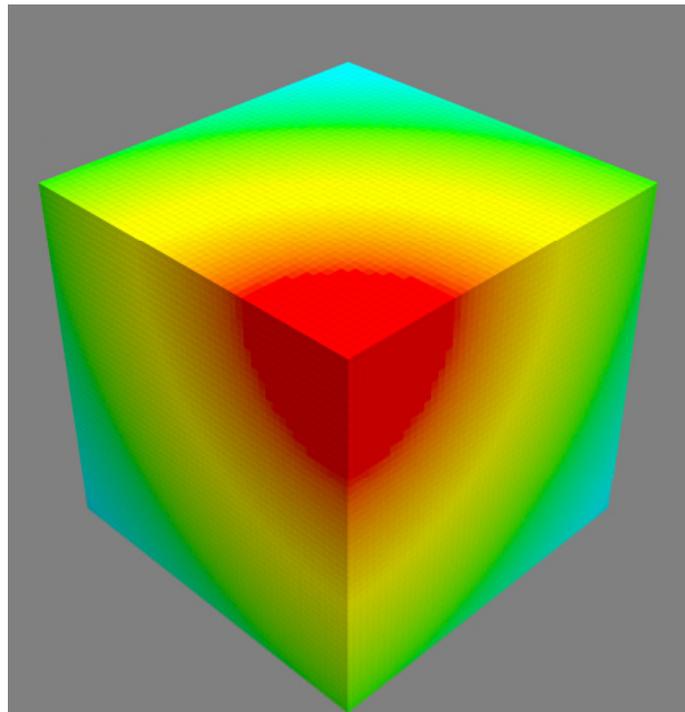
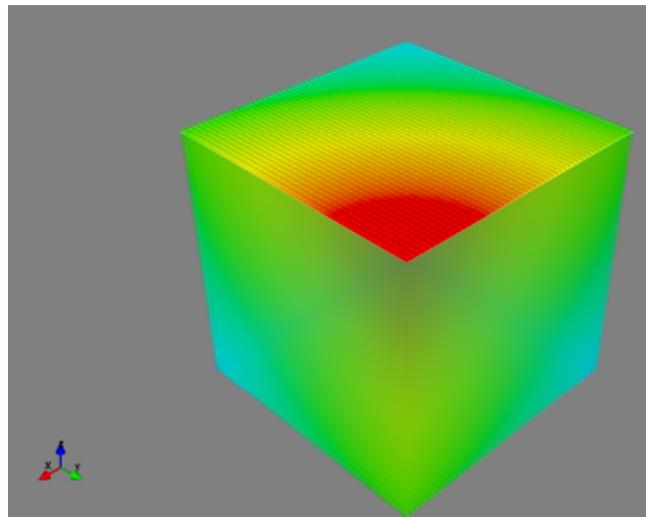


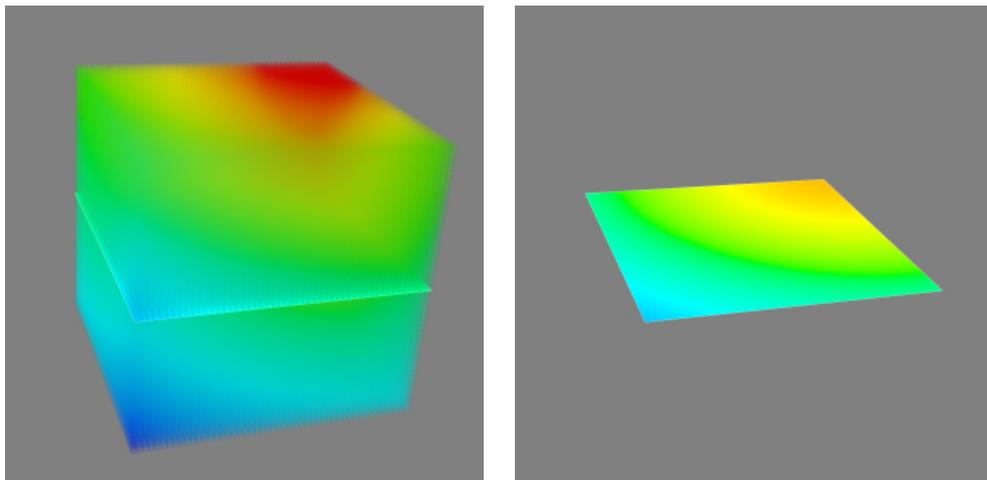
図 8 ボクセルモデル(50×50×50)へのマッピング例

また、ボクセルモデルの各種 GIS 情報や森林のボクセルモデル（森林の表面形状、内部構造、地盤形状）と合わせて可視化することも検討するために、ボクセルサイズの変更や各種属性情報を追加・保持可能なデータ構造とした。

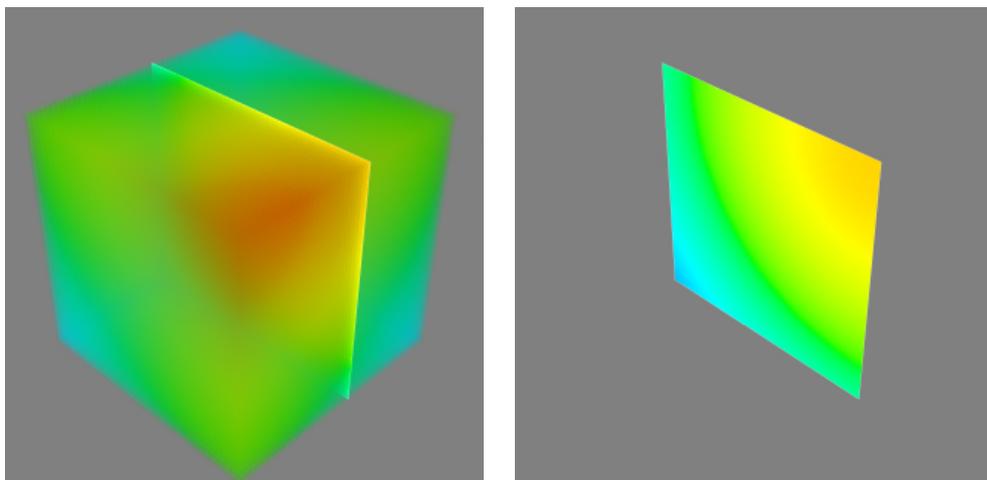
構築したボクセルモデルを評価検討あるいは解析を行うために 3D 表示での操作や断面ごとのヒートマップ表示を可能とする可視化ソフトウェアを開発した (図 9)。



(a) ボクセルを透過表示し, Z 軸最大の面の情報を表示



(b) Z 軸方向に回転し Z 軸中間の面の情報を表示



(c) X 軸中間の面の情報を表示

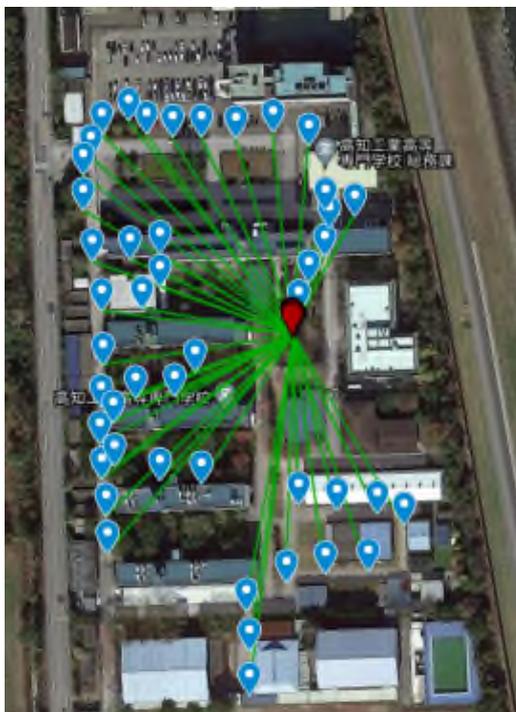
図 9 ボクセルモデル可視化システム

④ 1月～2月：測定したデータによるボクセルモデルを構築・可視化の実証実験

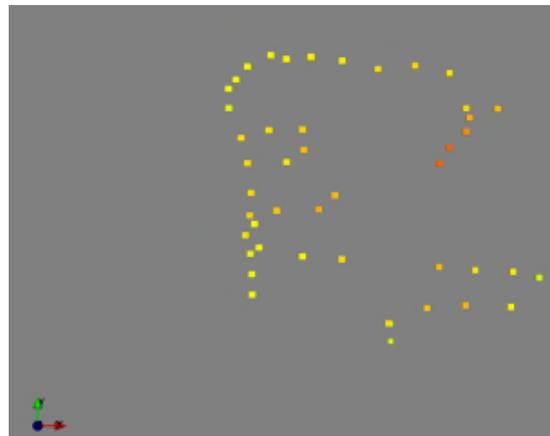
10月（高知高専）・11月（大豊町）において計測したLPWAの電波強度（RSSI）情報からボクセルモデルを構築し、可視化ソフトウェアを用いた可視化を行った。

まず、測定エリアをX軸＝経度、Y軸＝緯度、Z軸＝高さとして、ボクセルモデルを構築した。なお、それぞれの軸について値を正規化し、0から1の間の値となるようにしている。このボクセルモデル内の測定点に相当するボクセルに計測されたRSSI値を割り当て、空間的補間法（今回はボクセル間のユークリッド距離に応じて減衰すると仮定）を用い、全ボクセル（全測定エリア）における電波強度をシミュレーションし、マッピングを行った。このモデルを測定点の数だけ構築し、最終的なボクセルモデルを構築する。今回の実験では、最も理想的な状況として、各測定点ボクセルモデルの最大の値を取るよう設定した。

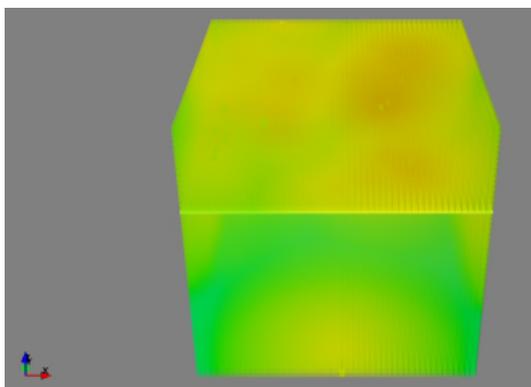
以下に、実際の測定データから構築した最終ボクセルモデルを図10および図11に示す。



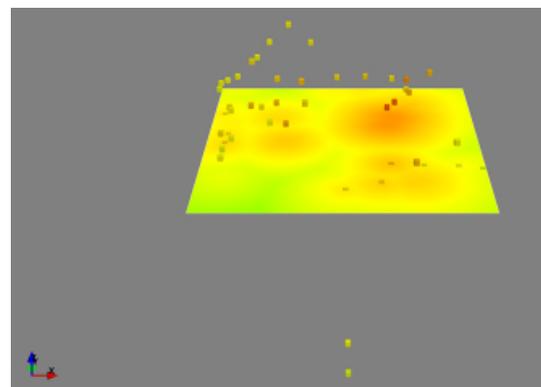
(a) 測定エリア (Google Map)



(b) 測定点ボクセルモデル



(c) 最終ボクセルモデル

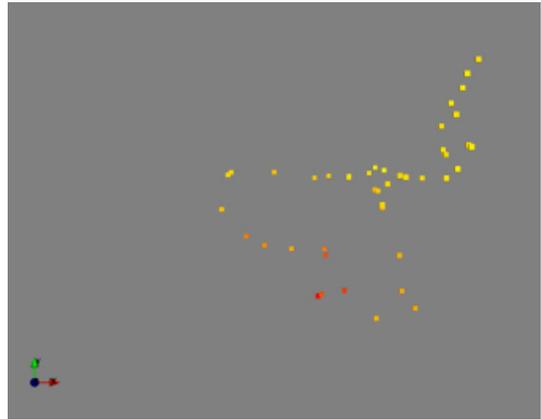


(d) 断面ヒートマップ表示

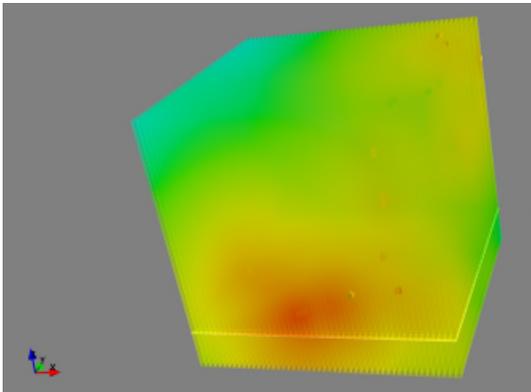
図 10 高知高専のLPWA環境



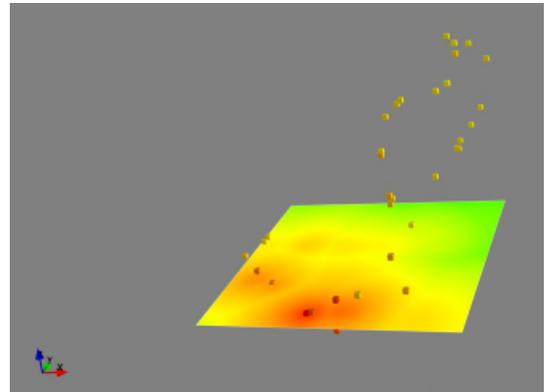
(a) 測定エリア (Google Map)



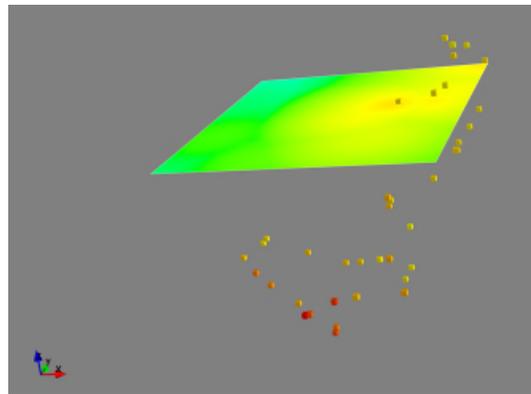
(b) 測定点ボクセルモデル



(c) 最終ボクセルモデル



(d) 断面ヒートマップ表示 1



(e) 断面ヒートマップ表示 2

図 11 山林 (大豊町) の LPWA 環境

6. まとめと今後の展望

本研究では、農業や林業などの一次産業や IoT に関わる無線通信技術の 1 つとして注目を集めている LPWA に着目し、森林内の電波環境（電波の透過強度）を可視化するシステムを構築した。このシステムは、電波環境（電波強度：RSSI）を測定するシステムと測定された RSSI 値を可視化するシステムから構成されている。

電波環境を測定するシステムのために、センサ情報を送信するセンサデバイスおよびセンサデバイスから送られてくるデータを収集しつつその通信の電波強度を測定するデータ収集デバイスを開発した。また、データ取得の確認および予備検討を行うために、取得したデータ（CSV）を KML（Keyhole Markup Language）データに変換し、Google Map や Google Earth 上に表示するソフトウェアも作成した。2 地点での測定実験を実施し、リアルタイムでデータ取得および通信状況のリアルタイムモニタリングが可能であることを確認した。

開発したシステムにより測定された RSSI 値を可視化するシステムとして、測定結果を 3 次元ボクセルデータとして表示し、RSSI 値をヒートマップ表示する可視化システムも構築した。このシステムにおいても実際の測定データを可視化し、様々な解析や評価検討を行うことができることを確認した。

今後の展望としては、今年度実現できなかったドローンやバルーンによる上空方向への透過電波強度の測定をし、より空間的に電波環境を可視化することが挙げられる。さらに、ボクセルモデルに RSSI 以外の属性値（各種 GIS 情報や森林のボクセルモデル（森林の表面形状、内部構造、地盤形状））を付加し、電波を減衰させる要因について、検討することも必要であると考えられる。本研究で構築したボクセルモデルは、ボクセルサイズの変更や各種属性情報を追加・保持が容易に可能であるため、すでに取得されているデータも付加していきたい。また、ボクセルモデルとしたことにより、十分な数のデータを集めることができれば、機械学習やディープラーニングの手法で、電波環境を推定することも可能になると考えている。

参考文献

- (1) 藤原 匠, 高木 方隆, ボクセルモデルを用いた森林における太陽光反射シミュレーション, 写真測量とリモートセンシング, 2019, 58 巻, 4 号, p. 184-195
- (2) 高木 方隆, 古沢 浩, 松岡 真如, 本田 理恵, アグロフォレストリーのための統合ボクセルモデルの構築, 2017~2020 年度科学研究費補助金研究(17H01933) 成果報告書.