

4.4 福島県大熊町における試験

緊急時における災害対応のための拠点と、居住者や人流の集積しているエリアが離れていることは珍しくない。そのような状況におけるモニタリングネットワークの構築を行うという想定で、福島県大熊町の大熊町役場から同町内の JR 駅である大野駅方面に向けたネットワーク構築を試みることにした（図 28）。今回は単にネットワークを実際に構築するだけでなく、事前にシミュレーションによる伝搬予測とエリア設計を行い、それに基づく展開が可能かどうかの検証も行った。

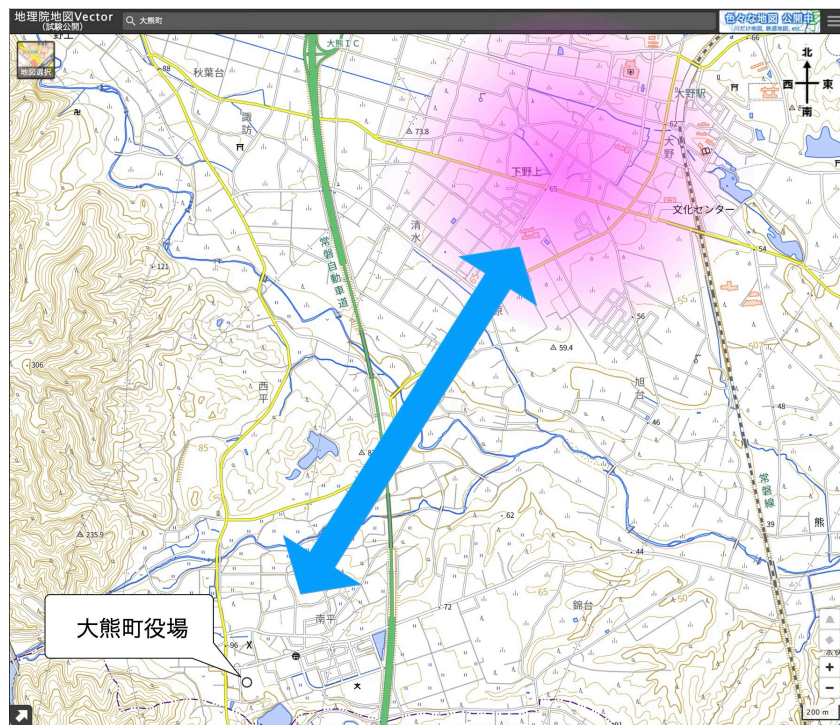


図 28 大熊町におけるモニタリングネットワーク構築の考え方。大熊町では行政機能が大川原地区の大熊町役場に整備されている一方、交通の拠点や病院、住民交流のための施設が JR 大野駅周辺に整備中である。そこで、災害時に大熊町役場から JR 大野駅付近の住民や旅行者等の置かれる状況を把握するという想定を立てた。

4.4.1 大熊町のあらまし

大熊町の地形を図 29 に示す。浜通り特有の地形の特徴である、西側にある阿武隈山地の裾野と海まで続く平坦な土地からなっているが、大熊町役場と大野駅の間中央部に熊川が通っており、熊川の流れに沿って谷状の地形が形成されている。また、常磐道が盛土ないし高架橋で縦断している。今回の想定のもとでのネットワーク展開では熊川の谷と常磐道が障害物となり得る。これらをいかに越えるかが課題となる。

4.4.2 伝搬シミュレーションと経路の設計

これまでの試験における設置箇所の決定では、現地や地図からの地形情報、奥村・秦の公式などの実環境における伝搬損失をよく表すモデルの公式などを援用しながら人が判断してきた。自営型の無線ネットワークを普及させるにあたっては、経験の少ない人でも一定の品質のエリア構築ができる方法を用意するのが望ましい。そこで、大熊町の試験においてはシミュレーションに基づくエリア設計を行い、実環境での測定結果と比較してその有効性を検証することとした。

基地局を大熊町役場屋上に設置した際の超小型 KURAMA-II の最適な設置場所を探るために現地で調査検討を行い、到達目標として指定した JR 大野駅への幹線ルートとして 2 つのルートを設定した。このルートを設定して国土地理院及び JAXA のサイトより収集した大熊町の地形や建物情報を基に、現地調査による補正情報を反映した地上モデルを作成し、解析ソフト Atoll[15] を用い電波伝搬シミュレーションを実施した。大熊町における現地調査については阪南コーポレーションと共同で、シミュレーションについては阪南コーポレーションに依頼した。シミュレーションの概要をまとめたものを表 6 に示す。

表 6 シミュレーションの概要

機器	アンテナ	スタッフ社 1019-010A	利得 3 dBi
	フィーダ	RG-58A/U	減衰: 0.56 dB/m, 長さ: 2.0 m
	無線機	Wi-SUN FAN	出力 20 mW
地理条件	標高	国土地理院	基盤地図データ
	建物高	国土地理院	基盤地図データ 低層住宅地として一律 GL+10.0 m ※現地調査による補正あり
	土地利用情報	国土地理院	基盤地図データ
	森林情報		一律 GL+15.0 m ※現地調査による補正あり 樹冠割合:95 %
	地表モデル	JAXA ALOS	全球数値 地表モデル
設置条件	Border Router	大熊町役場 災害対策機能棟	屋上:GL+8.0 m (北東角地点) アンテナ設置高 GL+10.0 m (RFL:8.0 m + アンテナ高 2.0 m)
	Router,Leaf	各地	アンテナ設置高 GL+2.0 m

今回の超小型 KURAMA-II では地上高 2 m のアンテナを使うことから、設置箇所周辺の障害物により伝搬状況に大きな違いが現れる可能性がある。現地調査では超小型 KURAMA-II の設置可能な箇所の確認、電波の伝搬に支障の出そうな地形や構造物、樹木の状況他の確認を行った。特に問題と

なったのは町役場と大野駅の間にある常磐道であった。常磐道は主にアンテナよりも十分高い盛土道として整備されており、路面より高い位置にアンテナを設置するか、高架や橋となっている部分、あるいは高速道下を通過する一般道のための暗渠に合わせた伝搬経路を設計するしかない。特に暗渠のような構造は導波管のような構造になるため、周波数や入射方向次第で大きな減衰要因となることが想定されるため、十分な調査が必要である。町役場から常磐道を越えて大野駅まで至るためには図 30 に示す箇所を通過することになるが、常磐道大川原橋下は橋の開口部が大きく通過自体に問題はないものの、図 29 にある通り周囲より低い谷へ抜ける経路となり、通過後の伝搬経路確保が困難になる。そこで、それ以外の 2 箇所について現地調査を行った（図 31）。

まず、大川原再生賃貸住宅付近の交差部について調査した。高速道の法面の兼ね合いで開口部に対する全長の比率が大きくなっており、Wi-SUN FAN 端末 2 台を通過する道路脇歩道の町役場側と反対側に置いて通信の確立が可能かどうかを確認した。両方の開口部数 m の位置に端末を置くことで通信を確立できることは確認したものの、相手方が通路を経由して目視できても通信できない場合が発生するなど、場所依存性が大きく条件設定が極めて難しいことがわかった。もう一つの県道 166 号との交差部は高速道路が県道 166 号を跨ぐ構造になっており、開口部に対する全長が短くなっている。そのため伝搬にあたっては相手方が目視できていれば概ね問題なく通信が確立できることがわかった。

このような調査を踏まえた伝搬シミュレーションにより設計した伝搬経路を図 32 に、その時のシミュレーションで得られた各地点におけるヒートマップ（地点から電波を放出した際の電界強度分布）を図 33 に示す。これまでの Wi-SUN FAN の試験結果から、 -85 dB 以上あれば良好な通信、 $-85 \sim -90$ dB で容認できる通信品質、これを下回るとキャリアセンスはできるが安定した通信が望めないとした。その上で、試験に当たって設置許可の必要な私有地等を避けながら、隣接する設置箇所との間で -90 dB 以上の電界強度の確保できる場所を選んだ。

得られた経路のうち、現在の大熊町内での道路や施設の工事の状況を勘案して、実際に機器の展開が可能な A ルートで試験を行うこととした。ここで A ルートの概要について説明する。ルート内の各設置箇所の名称は図 32 にある通りである。A ルートでは、大熊町役場前の道路を西向きに進み、おおくまーとを過ぎた大熊町復興住宅付近の中継 A-02 から北東に進み、中継 A-04 で常磐道大川原橋のかかる谷を越えて中継 A-05 に向かって県道 166 号に沿いながら常磐道下をくぐり、熊橋脇の中継 A-07 を経由してさらに県道 166 号沿いに大野駅方面へ向かっていくことになる。概ね道路に沿っていることから見通しが効きやすいと考えられるが、道路沿いの樹木の繁具合で目視の状態が大きく変わり得る中継 A-02～中継 A-04 付近、樹木の茂る山沿いの県道 166 号沿いに谷を下って再び上がる複雑な地形となる中継 A-05～中継 A-08 付近については実際にシミュレーション通りの伝搬とならない懸念がある。そこで、シミュレーションの妥当性を確認するため、事前にこれらの懸念のある箇所での伝搬状況の確認を行なった。

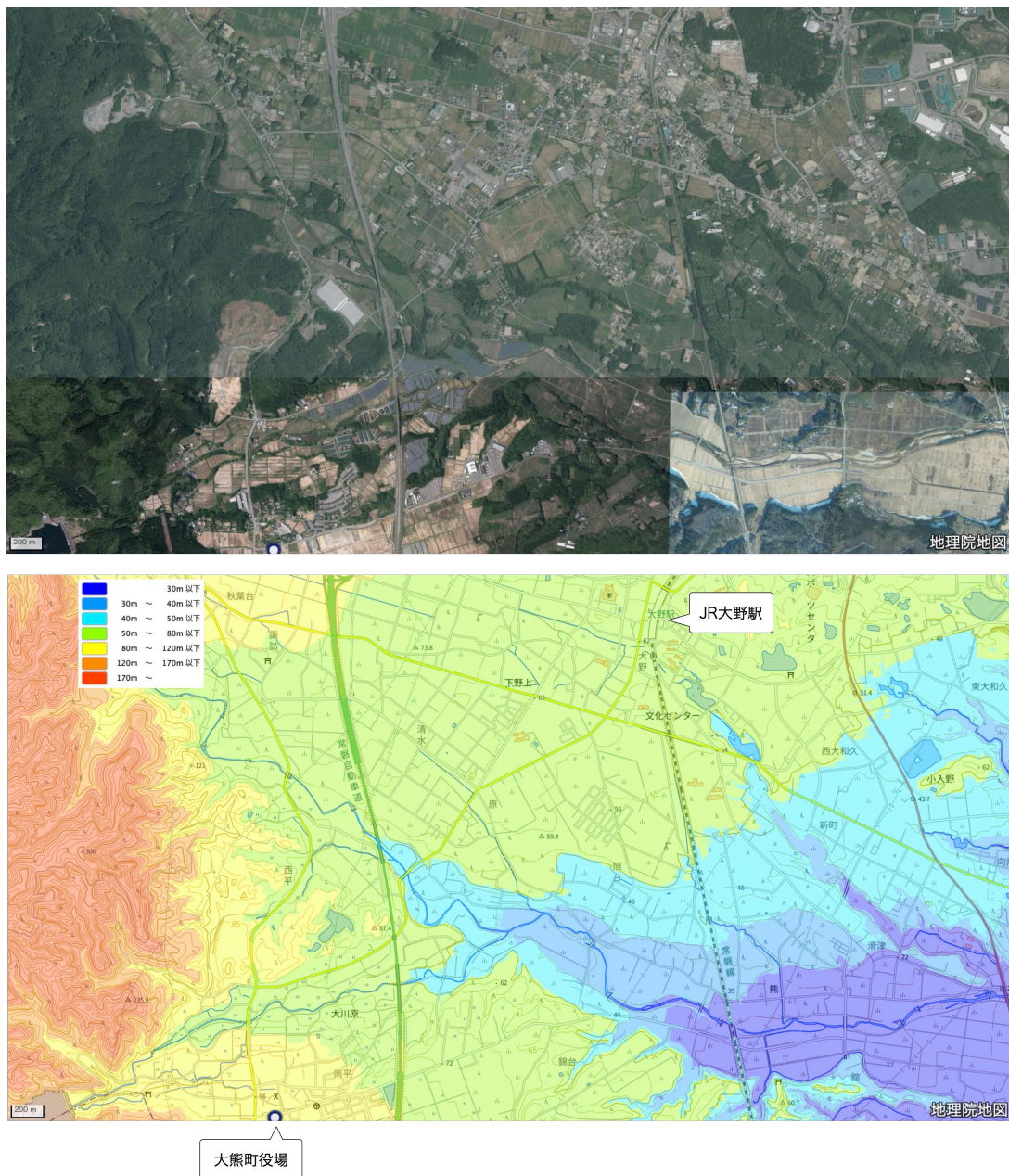


図 29 大熊町の航空写真（上）と地形の様子（下：標高に応じた着色を行なっている）。浜通り特有の地形の特徴である、西側にある阿武隈山地の裾野と海まで続く平坦な土地からなっている。大熊町役場と大野駅の間の中央部に熊川と常磐道が通っている。

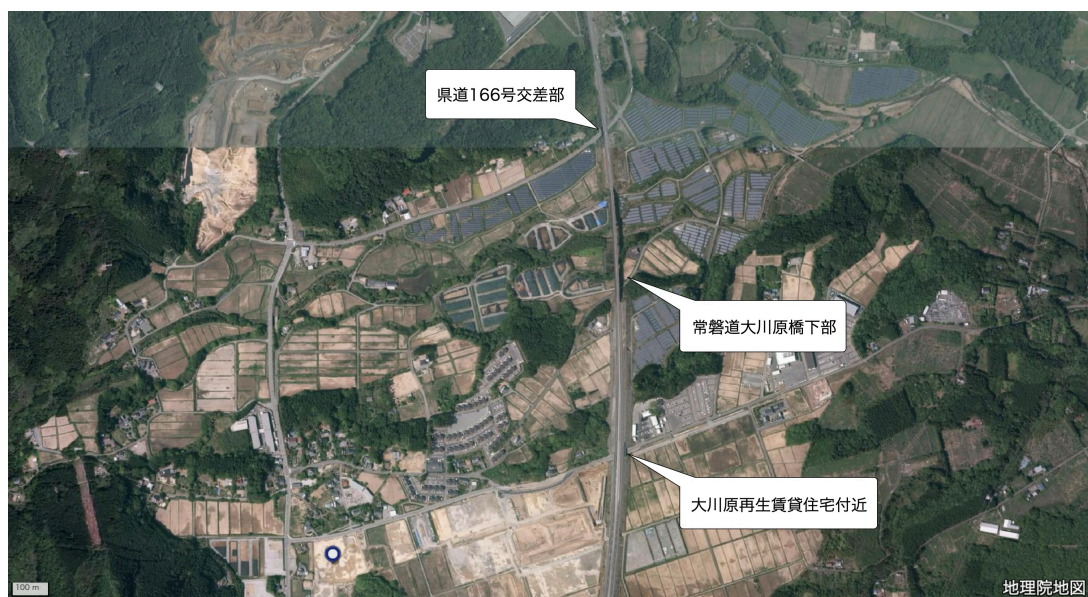


図 30 想定される伝搬経路と常磐道の交差点場所。



図 31 高速道路と交差する部分の現地調査の様子。大川原再生賃貸住宅付近の交差点（左）は開口部に対して奥行きが長く（中）、導波管のように周波数や入射方向によって通過の際の減衰に大きな違いが現れると予想され、WI-SUN FAN 端末による試験でも開口部との位置関係や開口部からの距離で大きな影響が現れた。一方県道 166 号との交差点は開口部が大きい一方奥行きが短く、実際の Wi-SUN FAN 端末を用いた通信試験でも、交差点が大きな影響を与えることはなかった。

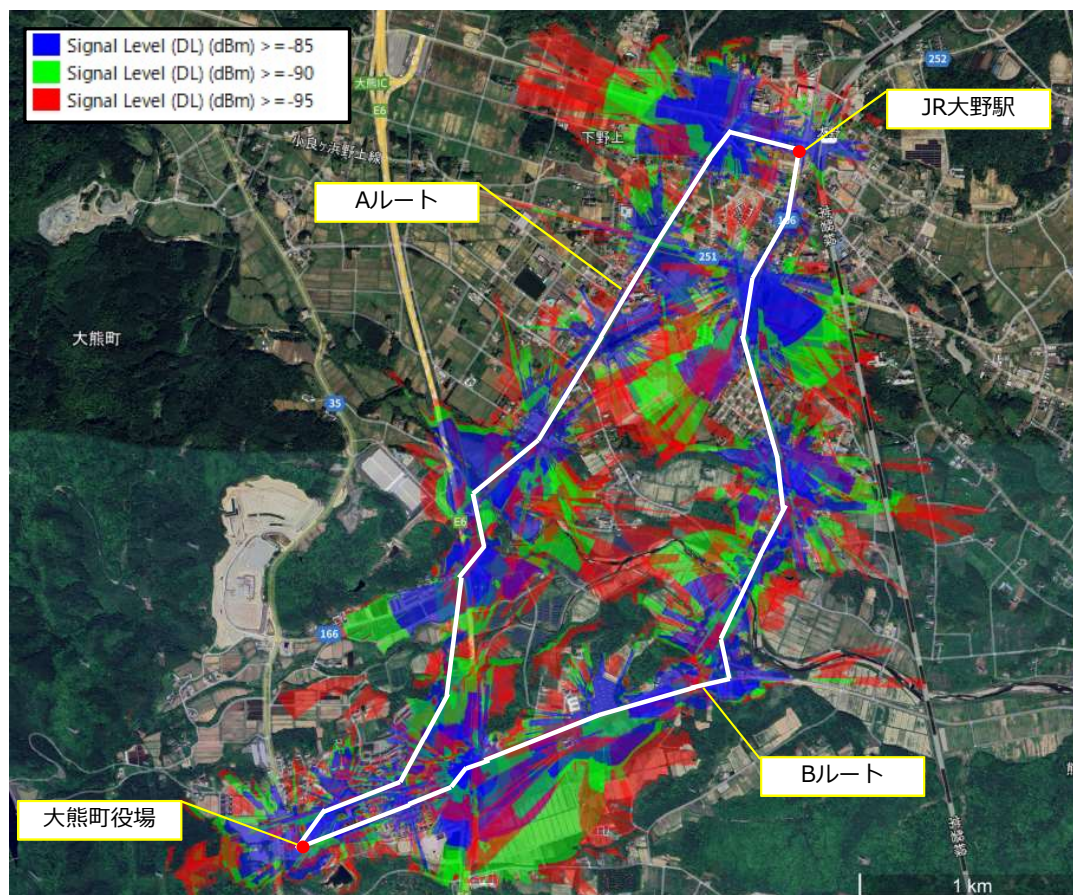


図 33 伝搬経路の設計の際に使用したヒートマップ。

4.4.3 シミュレーション結果の検証と経路の修正

シミュレーションを行なって設定した A ルートは、大熊町役場前の道路を東進し、大熊町復興住宅付近で北東に進んで県道 166 号が常磐道と交差する場所にある西平バス停で高速道路の高架下を通り、以降県道 166 号に沿っていくルートである。Wi-SUN FAN は直進性が高い 920 MHz 帯を使用していること、また LPWA としてはかなりの高速通信が可能であることから、S/N の悪化が通信の確立や品質に大きな影響を与える可能性がある。この観点で考えると、A ルートにおいて想定される問題点は主に中継 A-02～中継 A-09 の範囲におけるもので、

- 大熊町復興住宅付近以降の中継 A-02～中継 A-04 が樹木や住宅によって見通しが得られない場合が多いこと
- 中継 A-05～中継 A-06 で高架下をくぐることによる支障の可能性
- 中継 A-07 のある熊橋は谷底に近い高さにある橋であり、前後の道路も左右から樹木が覆い被さるように生えており電波の減衰が想定されること

という懸念事項がある。そこで本試験に先立ちこれらの問題点について現地確認を行うこととした。

現地確認にあたっては中継点間の 2 点間における通信で RSSI 値と LPWA 通信のデータの伝送を確認した。この時の機器構成を図 34 に、実際の様子を図 35 に示す。Border Router および Router はアンテナ直結、LPWA KURAMA-II は 1/2λ の垂直ダイポールアンテナを使用し、これをポール突端に設置して RG58A/U 2m で結んだ場合と LPWA KURAMA-II に直結した場合の 2 パターンがある。なお、アンテナ直結の場合は当日使用したヤリスのルーフ上に置いたため、ケーブル減衰分がない代わりに地上高で 1 m ほど不利となっている。RSSI 測定は Border Router から rmtcmd コマンドにより nebr を Router で実行して取得した。ネットワーク接続については Border Router 上で rplsr コマンドを実行し Live Time が適宜更新されているかどうかで判断した。

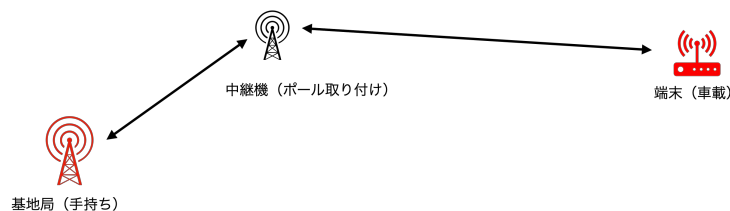


図 34 現地確認の際の構成。基地局とポールにつけた中継機を持った作業者が、車載した端末（LPWA KURAMA-II）との通信状況を確認する。



図 35 現地確認の際の様子。測定地点に停止した車（ヤリス）には先端にアンテナが取り付けられた高さ 2 m のポールが設置される。LPWA KURAMA-II のアンテナ直結の場合は車のルーフ上に置く形になる。

以下、各地点での試験結果について説明する。なおこの試験の際、概ね RSSI で -93 dB 以上であれば KURAMA-II のデータは正常に受信することができた。そのため、シミュレーションの精度が適切であれば、 -90 dB を閾値としてエリアを構築するとした阪南コーポレーションの設計方針は妥当であると考えられる。

中継 A-01～A-02 間 大熊町役場(災害対策機能棟屋上を想定)からみて最初の中継点である。図 36 の A-01-1 の位置に Router を設置し、高さ 2 m のポールにアンテナをつけた LPWA KURAMA-II を A-02 に設置した。この時 A-01-1 から見て A-02 の位置は樹木の影で目視できず RSSI 値も得られない ~ -98 dB であり、データも流れてこなかった。LPWA KURAMA-II 側が場所を変えて交差点東側の見通しが利く状態になった時 RSSI 値が -91 dB まで回復してデータが流れるようになった。これは図 36 のヒートマップが道路沿いに良好な通信を予測する一方、少しでも外れて見通しが悪くなると全く電波が届かない状況になることを示しているのと矛盾しない。このことから、当初設定位置付近にある樹木の影響によって通信できなかったと考えられた。

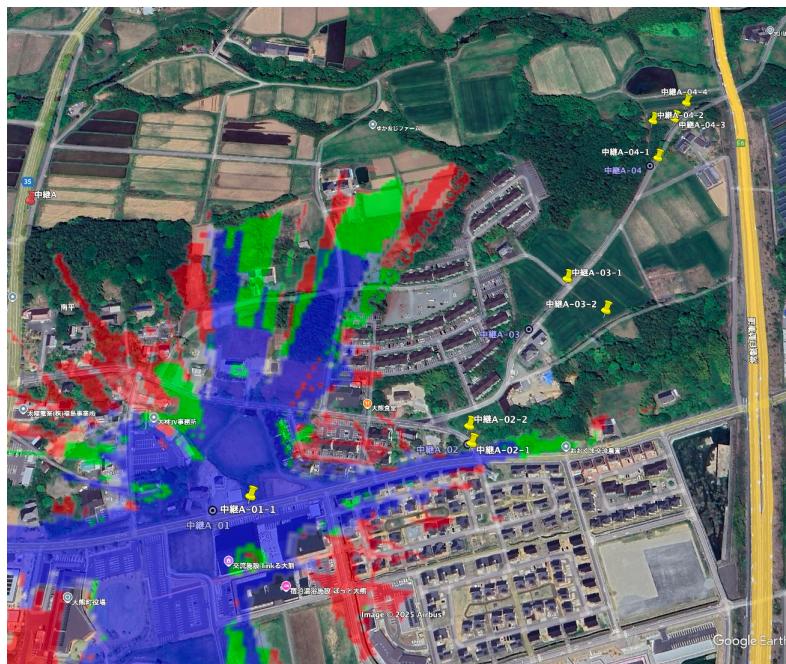


図 36 中継 A-01～A-02 の位置関係と A-01 に送信機を設置した際のヒートマップ。

中継 A-02～A-03 間 A-02 に Router、LPWA KURAMA-II については A-03 は道路を塞ぐ形になって設置ができなかったことから、A-03 - 1 に高さ 2 m のポールにアンテナをつけた LPWA KURAMA-II を設置した。A-03 付近の道路右側沿いに立つ住宅に遮られて目視はできない状

態であった。このため接続自体ができず、RSSI 値も得られなかった。その後 A-02-1、A-02-2 に Router 側を動かしたところ A-02-2 で -93 dB を一瞬記録したがその後 -95 dB 程度しか再現できず、この中継点間ではデータも流れなかった。ヒートマップを見ると A-03-1 でも良好な接続が期待できる青色になっているが、A-03 付近の道路右側沿いに立つ住宅も青色に塗りつぶされており、この家がシミュレーション上で適切に設定されていなかったためと思われる。



図 37 中継 A-02～A-03 の位置関係と A-02 に送信機を設置した際のヒートマップ。

中継 A-03～A-04 間 図 38 に位置関係とヒートマップを示す。A-03-1 に Router、A-04 に LPWA KURAMA-II を設置した。A-03-1～A-04 間は道路がわずかに北向きにカーブしており樹木が道路側に迫り出している状態になっていた。その結果 A-03-1 から A-04 を目視することはできず、RSSI 値 -97 ～ 検出不可となった。この挙動はヒートマップにおいて中継 A-04 付近の樹木によって伝搬が遮られているように見える状況ともよく一致している。そこで A-03-2 の位置に移動したところ、RSSI 値が -85 dB となって LPWA KURAMA-II からのデータも流れるようになった。A-03-2 の位置は A-02 の交差点から 200 m ほどと距離も短く、樹木の影ではあるものの概ね見通せそうな位置である。場所も確保が容易であると思われるため A-02～A-03 間については A-03-2 を使うことで通信経路が確保できる可能性がある。

中継 A-04～A-05 間 A-04 側に Router を設置、A-05 に LPWA KURAMA-II を設置した（図 39）。A-04 の位置からは樹木の枝葉により 2-5 を見通すことはできず、A-05 との接続もできなかった。しかし、道路を挟んで反対側の A-04-1 に行くと RSSI 値が得られるようになった。また、



図 38 中継 A-03～A-04 の位置関係と A-03 に送信機を設置した際のヒートマップ。

A-04 の位置から A-05 の方向に下るあぜ道及びその道沿いの畑のあぜの A-04-2、A-04-4 では RSSI 値が改善されデータも流れ始めた。また A-04-4 では A-05 が目視できたほか RSSI 値も -90 dB であり A-05 との接続も問題なかった。A-04～A-05 は谷を挟む形になっており、A-04 側はその谷に降る斜面に配置されている状態であることから、A-05 から見て基本的に見通しできる場所にあり、熊取町での試験でも見られた良い伝搬が得られる場合に類似している。これにより距離が多少離れていても樹木の影響がなければ通信が確立できるのだと考えられる(図 40)。

中継 A-05～A-06 間 高速道路の高架下を通るところで、A-05 側の LPWA KURAMA-II を西平バス停に置木、高架を挟んで反対側の 2-6 側は 2-6 が足場が悪く設置が難しかったため、A-06 付近の歩道で Router を動かした(図 41)。高架下通過後は見通しが悪い A-06-3, A-06-4 では一気に通信品質が低下した。一方見通せた場合の A-06-1, A-06-2 は良好な品質が確保できた。これは 920 MHz 帯の直進性の高さと高架下の開口部の方向に起因するものと考えられる。ヒートマップにおいても、A-06-3, A-06-4 付近には電波が届きにくいこと、また A-06-2 付近の緑色ないし赤色の電界強度の低下した部分のように高架下を通過する際に高架下の開口部方向への指向性が発生する様子が見えており、実測の状況をよく再現していると思われる。

中継 A-06～A-09 間 本来県道 166 号を沿って A-06 → A-07 → A-08 → A-09 と進む経路が想定されていたが、現地において A-06 付近から A-09 付近の道路の行き先表示板が視認できたことか

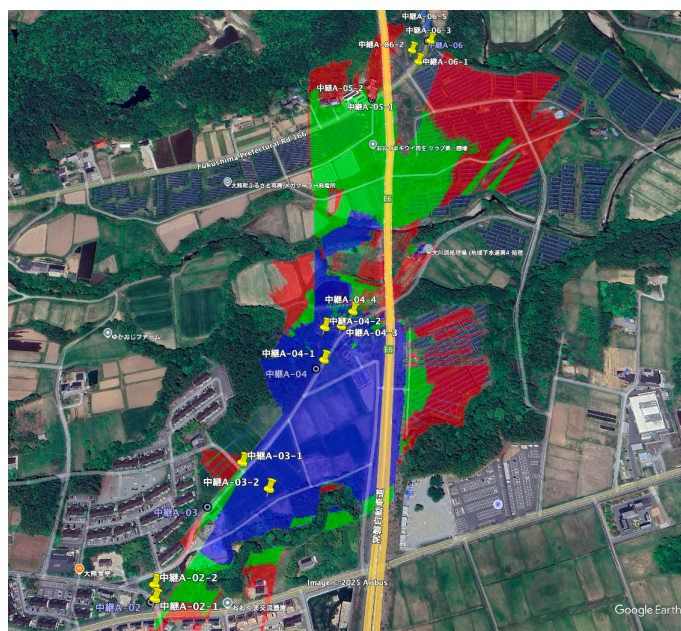


図 39 中継 A-04～A-05 の位置関係と A-04 に送信機を設置した際のヒートマップ。

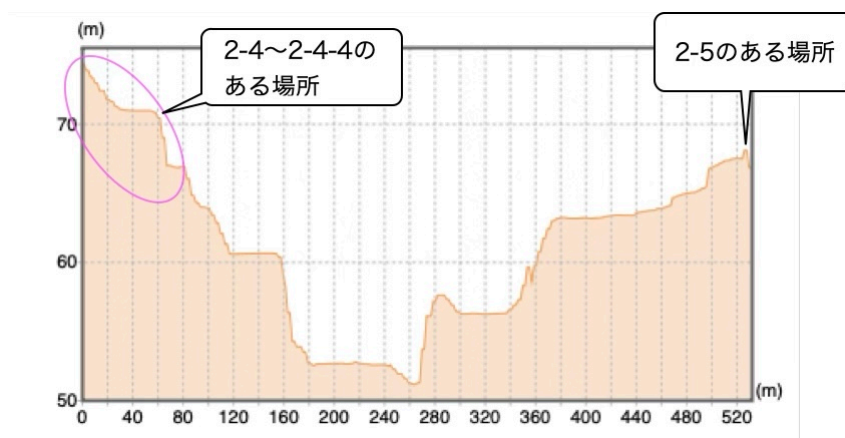


図 40 中継 A-04～A-05 を結ぶ直線での地形の断面図。

ら、A-06～A-09 の直接接続を試みた。図 42 に A-06～A-09 の位置関係および A-06 に送信機を置いた場合のヒートマップと A-07 に送信機を置いた場合のヒートマップを示す。A-09 側に LPWA KURAMA-II を置いたが、車の停車スペースの問題から A-09 に近い道路沿いの A-09-1 に車を停めてルーフ上に設置した。A-06-6 付近からは A-09-1 よりさらに北東に進んだところにある青い道路行先表示板（図 42 中の水色のピン）と思われるものが視認できていた。実際 A-06-6 で接続が確立し RSSI も -93 dB となった。A-06-6 より高い地点の A-06-5

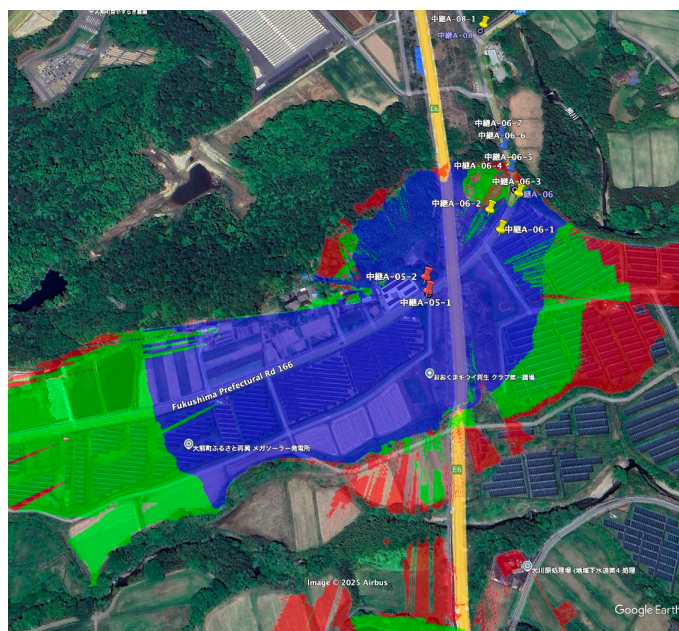


図 41 中継 A-05～A-06 の位置関係と A-05 に送信機を設置した際のヒートマップ。

ではさらに RSSI が改善したが、A-06-5 より上では A-06 側の道路脇の樹木等に遮られるためか接続が確認できなかった。ヒートマップでも A-09-1 では $-90 \sim -59$ dB を予測しており、現地での測定と一致する。この伝搬は見通しが前提のため夏季において樹木や雑草等の茂り方が変わった場合には変化が生じる可能性がある。

中継 A-08～A-09 間 A-06～A-09 で良好な接続が確認できたが、念のため A-08～A-09-1 の接続を確認した（図 43）。ヒートマップでは A-08 に送信機を置いた場合 A-09 との接続が期待できるはずだが、A-08、A-08-1 では A-09-1 の電波を受信できなかった。しかし、A-08-2 では RSSI が -93 dB となってデータも流れた。これはシミュレーションでの樹木等の影響の取り込み精度に依存するものと考えられる。

中継 A-05～A 間 A-02～A-05 間の経路設定が容易ではない状況を踏まえ、代替経路の可能性を検討するため県道 35 号（いわき浪江線）上に中継 A を設定して A-06 との間の接続試験を行った（図 44）。中継 A は図中の中継 6 から県道 35 号を北に進んだ下り坂の始まりであり、A-05 方面に非常に良い見通しを持つ（図 45）。また A-05 を視認確認可能であり、経路上は谷状の地形と太陽光発電施設のため経路を遮る樹木等がほとんどない。ただ、直線距離で 1 km あることから自由空間損失による減衰が懸念される。この状況で接続試験を行ったところ、A-05 では $-90 \sim -97$ dB と不安定であったが、道路を挟んだ反対側の歩道の A-05-2 では -83 dB と良好な値が得られた。ただし部分的にデータの伝送に失敗している可能性が見つかったため注

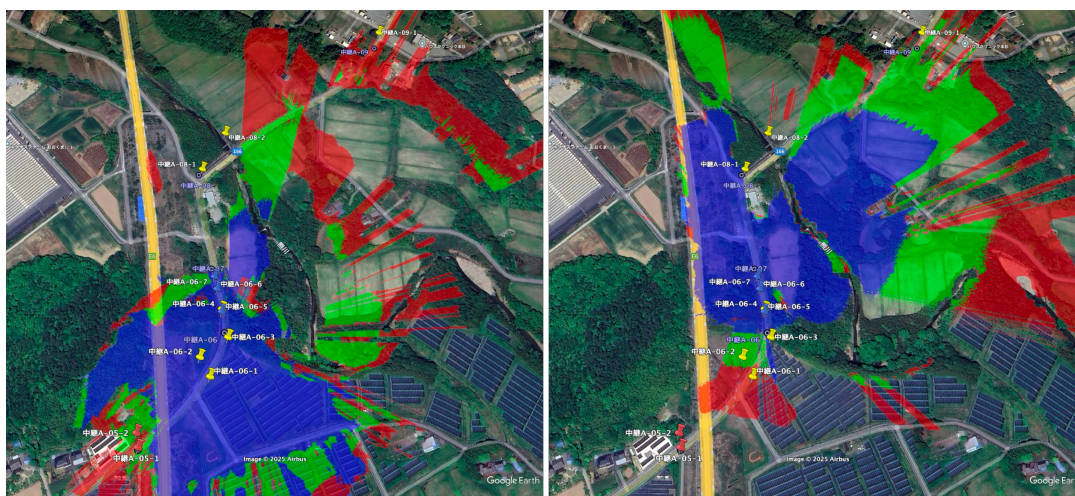


図 42 中継 A-06～A-09 の位置関係とヒートマップ。左図は A-06 に送信機を置いた場合、右図が A-07 に送信機を置いた場合のヒートマップ。A-06-6 は A-06 と A-07 の中間になるため、これらのヒートマップの中間的な様相を示すと思われる。

意が必要である。A-05 に送信機を置いた際のヒートマップからは本来接続が望めないが、現地では電波が到達している状況であった。シミュレーションでは考慮されていないと思われる A-05 付近の太陽光パネルによる反射といった効果が影響している可能性がある。

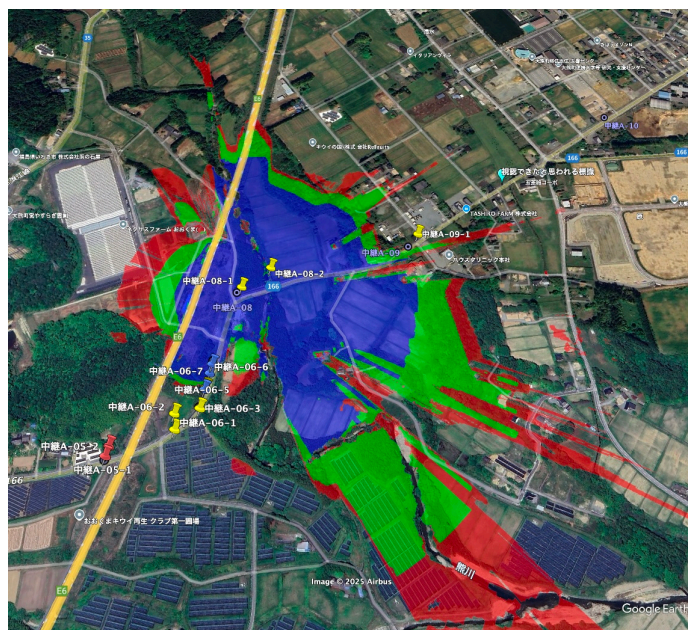


図 43 中継 A-08～A-09 の位置関係と A-08 に送信機を設置した際のヒートマップ。

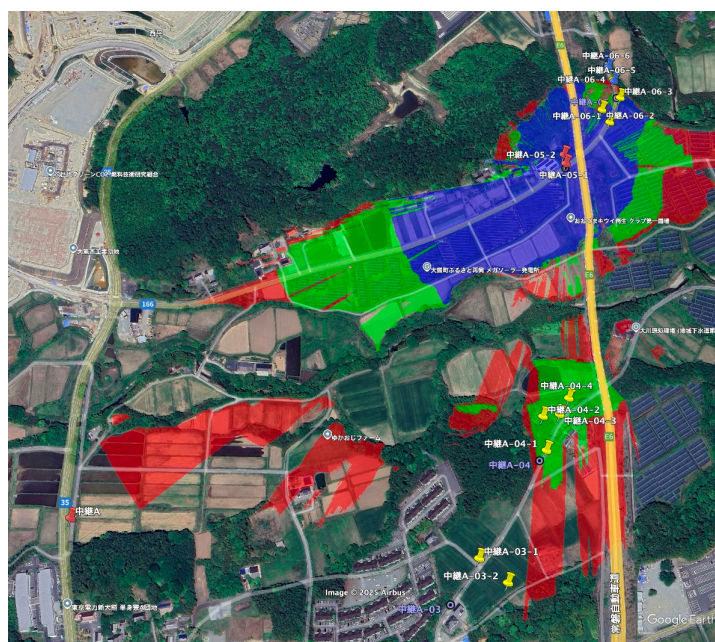


図 44 A-05～中継 A の位置関係と A-05 に送信機を設置した際のヒートマップ。



図 45 中継 A から見た A-05 方面（左）と A-05 から見た中継 A（右）。特に A-05 からは LPWA KURAMA-II を設置に向かった白のヤリスが見える。

ここまでの結果を踏まえると、シミュレーションのヒートマップは現地での実測と比較的良好一致を示している。現地での違いは、樹木や家屋の詳細など細かい現地の状況の反映の精度に依存していると考えられる。実際、シミュレーションで伝搬を想定する状況では、概ねシミュレーションの結果を踏まえながら現地の設置箇所を細かく修正することで伝搬を確立できている。その精度を踏まえた上であればエリア設計に十分活用できると考えられる。

そこで、シミュレーションと現地調査を踏まえて本実験で設定すべき経路を検討する。町役場からおおくまーと、復興住宅付近を抜けていく当初想定ルートは樹木等の障害が多く設置における場所がズレると通信確立が困難になる懸念がある。また、A-06～A-09 への直接通信が確認されたことから、熊橋付近（A-08）への設置は不要と見られる。以上を踏まえて想定したルートが図 46 である。Border Router の設置される大熊町役場の災害対策機能棟屋上から中継 6 を経由して、今回の試験で設定した中継 A を経由し A-05 に向かう。A-05 から A-06-1 → A-06-5 を経由して A-09-1 に到達したあとは当初想定通り県道 166 号沿いに延伸して大野駅方面に向かう。これにより当初想定ルートで懸念される樹木等の影響は回避できる一方、A → A-05 間の長距離伝送による不安定さがネックとなり得る。そこで A → A-05 間に予備の中継点予備 A～C を設定し、不安定な場合はこれらのいずれかに追加の設置を行うこととする。図 47 のように地形的には A、A-05 いずれとも良好な通信が想定される場所である。

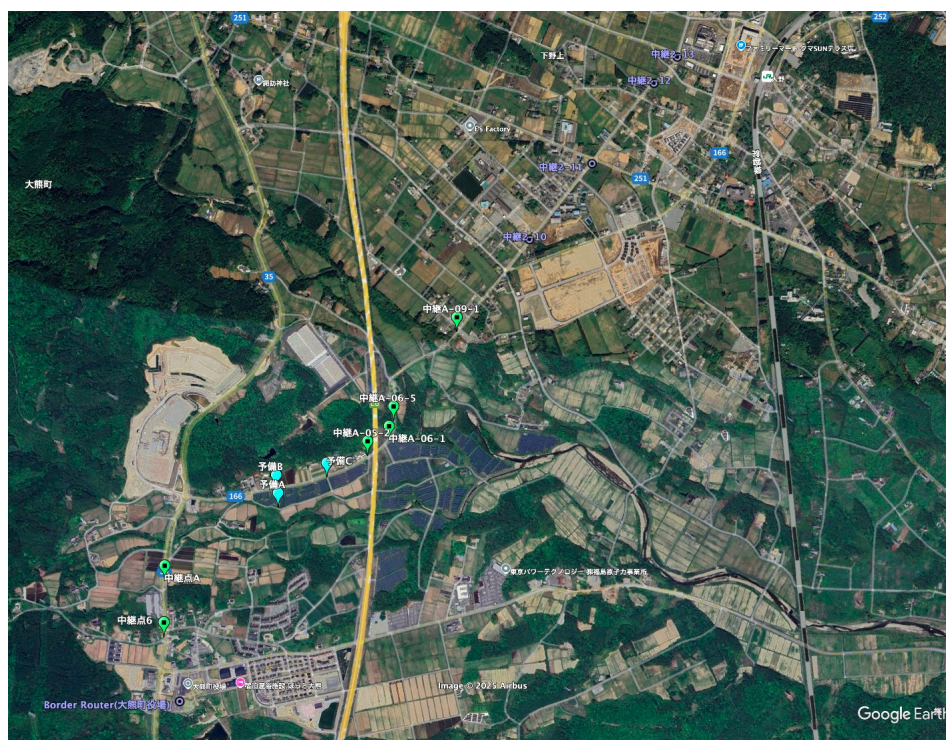


図 46 シミュレーションと現地調査を踏まえた実証試験の経路。

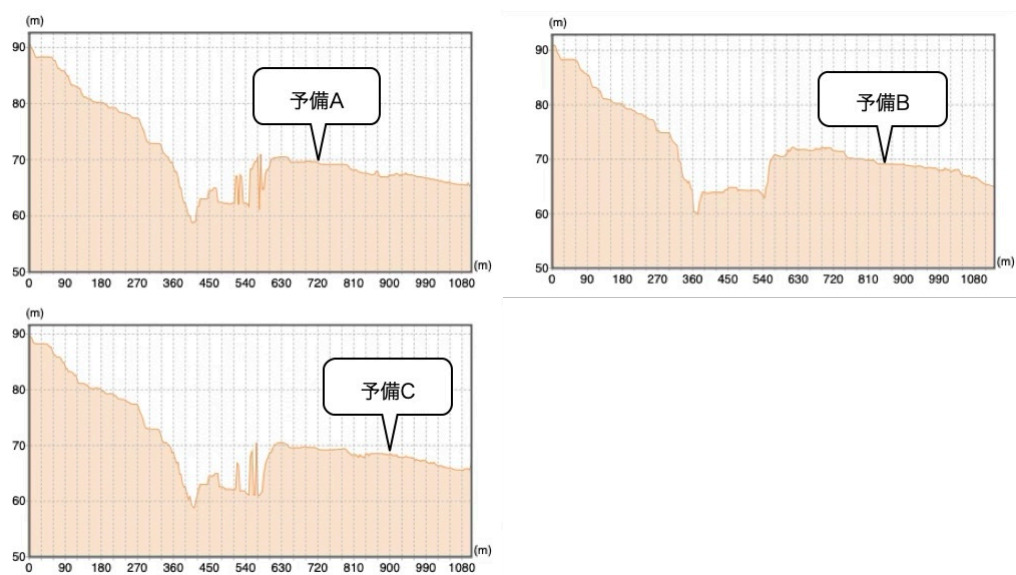


図 47 予備の中継 A~C の地形断面図。中継 A を起点とし A-05 が終点となっている。いずれも中継 A から谷を超えた側にあり、かつ A-05 より高い位置にあって伝搬条件は良いと思われる。これにより長距離伝送による不安定さの解消を試みる。

4.4.4 ネットワーク構築試験

シミュレーションと現地調査の結果から検討した経路で実際のネットワーク構築を試みた。大熊町役場駐車場に置いた車内に基地局（Border Router）を設置し、災害対策機能棟屋上に中継局（Router）を設置した（図 48）。基地局と中継局の間の接続が安定に行われることを確認した後、LPWA KURAMA-II を中継 6、中継 A に順次置きながら接続を確立した（図 49）。中継 A と A-05 の間の直接接続は不安定な可能性があること、太陽電池パネル上の伝搬を避けた方が良いと思われることから、予備 B に LPWA KURAMA-II を設置し、ここから予備 C を経由して A-05 に接続することとした。予備 B までの接続状況を図 50 に示す。基地局から中継 A の LPWA KURAMA-II の Wi-SUN FAN ボードに nebr コマンドを発出して確認した中継 6～中継 A、中継 A～予備 B の RSSI は -80 dB 台であり、見通しの良い経路ならではの良い接続状況となっていた。



図 48 災害対策機能棟屋上に設置した Router の全景（左）とアンテナ位置から中継 6 を眺めたところ（右）。中継 6 が直接視認できる位置にある。

この後予備 C を設置してネットワークを拡大しようとしたが、予備 C の端末への IP v6 アドレスの割り振りができなくなり、ネットワーク全体が不安定になった。予備 C や A-05 からの電波が中継 A に届いていることは確認できるが、一向に IP アドレスが割り振られないためデータが受信できなかった。また次第にリモートでのコマンド実行の応答速度が遅くなっていき、最終的には応答しなくなった。設置条件の変更や再起動等も試みたがうまく復帰しなかった。



図 49 典型的な LPWA KURAMA-II の設置の様子。これは予備 B に設置されたものである。

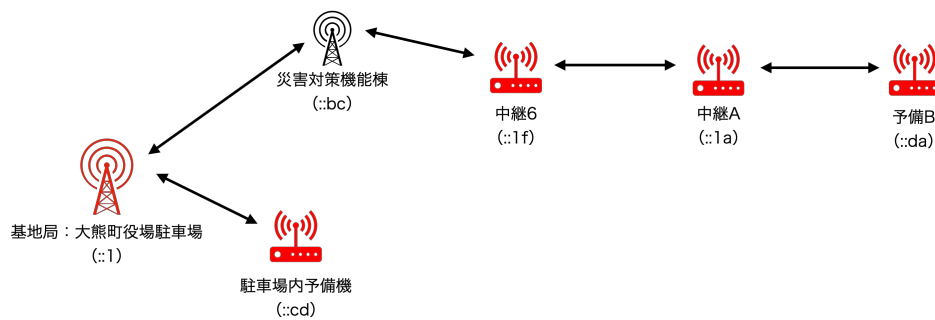
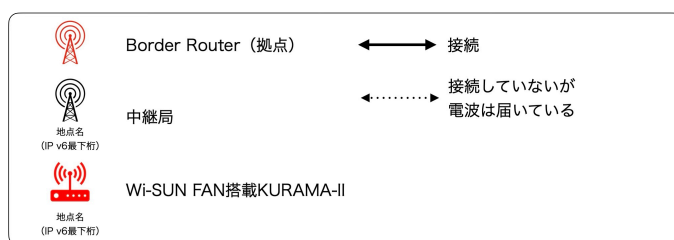


図 50 予備 B まで接続した時のネットワーク構成図。

4.5 島根県松江市における試験

4.5.1 試験のあらまし

過去の実証試験でも伝搬試験を行なった島根県松江市での再度のネットワーク構築を試みた。前年度までの試作品にあった外部アンテナ接続部が使用とともに緩む問題などを解消しており、ネットワーク構築においても熊取町で十分な実績が確認されている機材での再検証となる。

松江市での設置状況を図 51 に示す。基地局（Border Router）を原子力環境センターに、中継局を保健環境科学研究所の屋上に設置した。これは昨年度の試験と同様である。その上で昨年度の試験でも設置した生馬公民館のモニタリングポストとの接続を想定して、接続を確認しつつ昨年度の設置箇所に準じた箇所に LPWA KURAMA-II を置くこととした。



図 51 松江市における試験での設置地点と伝搬状況。緑色の点は接続が確立した地点。緑色の線は薦津町南西の LPWA KURAMA-II を古志町に移動したとき、移動中に接続が確立した範囲。橙色の点は設置したものの接続確立ができなかった点、紫色は目標とした生馬公民館 MP の位置。

4.5.2 試験の状況

まず、保健環境科学研究所から 1.3 km 程度の箇所にある薦津町南西地点付近の山裾に設置した。ここは WI-SUN FAN の最大到達距離 1 km を超えているが、過去の試験では一応保健環境科学研究所屋上の中継局と直接接続したことがあった場所である。今回も一応接続は確立してデータが断続的に流れたものの、場所により接続状況が大きく変わる不安定な挙動を見せた。山から離れることで接続が安定し始めたが RSSI 値が -90 dB 前後と安定した通信の確立には少し不安が残ったことから、古志町の佐陀川沿いに移設した。この移動の際に接続が確立した場所が図 51 の緑色の線の区域である。これは昨年度も移動中の車に搭載した LPWA KURAMA-II から接続が確認された場所と概ね一致している。移設後は RSSI で -86 dB と安定した接続が確立された。

次にこの古志町の設置箇所から佐陀川を越えて約 500 m の位置にある薦津町南に設置した LPWA KURAMA-II との接続を試みた。同時にこの古志町の設置箇所を経由した接続を想定し、古志町から 300 m と近い場所になる薦津町南西にも改めて LPWA KURAMA-II を設置した。しかし、想定に反して薦津町南は直接保健環境科学研究所屋上と直接接続し、この時の RSSI は -92 dB であった。さらに設置後 20 分程度経過した時点で、薦津町南西に設置した LPWA KURAMA-II がこの薦津町南を経由して接続を確立してデータの送信に成功した。このように想定外の経路ではあるものの、接続が確立していったことから薦津町中と薦津町北にも追加で設置して接続の確立を試みたが、薦津町南より北側との接続確立はできなかった。しかし、RSSI 値が -95 dB 以下ではあるもののこれらの地点からの電波をすべて保健環境科学研究所屋上の中継機で検出することには成功した。

4.6 試験結果についての考察

今回の事業では大阪府熊取町、福島県大熊町、島根県松江市の 3 ヶ所でネットワーク構築の試験を行なった。その結果、熊取町ではネットワークの構築がうまくいった一方、大熊町と松江市では想定した通りのネットワークの構築ができなかった。この理由について検討する。

4.6.1 電波の伝搬について

まず、電波の伝搬状況について比較する。いずれの地域でも数百 m~1 km 程度の距離の電波の到達が確認されており、また条件によっては 1 km を超えた伝搬を確認した場合もある。概ね Wi-SUN FAN で想定されている到達距離を実現していると見られる。その一方、熊取町や大熊町では見通しが効かない場合に伝搬距離が大幅に短くなる場合が確認された。これは Wi-SUN FAN が使用する 920 MHz 帯の特徴である強い直進性を反映していると考えられる。事前のシミュレーションや実証試験が行えない場合、ネットワーク構築においては設置地点間の見通しが効くかどうかを設置箇所決定の目安にすることで良好な結果が得られる可能性が高い。

大熊町で行なったシミュレーションと現地での実測による検証の比較では、シミュレーションの予測が現地での伝搬状況とよく一致することがわかった。あらかじめネットワークの設計を行える場合は、伝搬シミュレーションの結果に基づく設置箇所決定を行うことが望ましい。また、シミュレー

ションと現地での実測とのずれが発生した箇所では、概ね樹木の茂り方や家屋の形状等に左右されており、地形が要因と考えられるずれは見られなかった。今回のシミュレーションでは樹木について高さを一律 15 m 高、樹木の枝や葉が茂っている部分の割合である樹冠割合を 95% と設定している。今回の大熊町の試験では道路沿いの伝搬経路を想定しているため、単純に樹木の枝葉の密度よりも、樹木の枝葉が道路にどれだけ覆い被さるかといったようなことが影響として想定される。このような樹木の茂り方や家屋の状況などをよく確認してシミュレーションに反映させることでより精度の高いものとなると期待される。

以上から、電波の到達の問題については概ね事前把握や現地での推定が可能であり、状況に応じた対応ができると考えられる。

4.6.2 ネットワーク構築の際の安定性について

今回の 3 ヶ所の異なる条件での試験の結果明らかになったのはネットワーク安定性の問題である。熊取町では概ね想定通りのネットワークが構築されている一方、大熊町や松江市では当初計画のネットワーク構築途中に接続ができなくなるなどの現象により構築を終えることができなかった。電波の到達距離については大きな違いが見られない以上、単純な電波の到達距離以外の要因により想定通りのネットワーク構築に至らなかったと考えられる。

ここで、熊取町のネットワークと大熊町や松江市のネットワークの挙動の違いについて詳しく見ることにする。大熊町で確立できたネットワークの構造は、図 23 のような構造であり、第一研究棟屋上に設置されている中継機から 3 方向に経路が展開されている。また、各経路相互の距離が比較的離れていること、研究所周辺の地形の形状から考えて他の経路の機材との間で電波の伝搬が望めない状況となっている。

一方大熊町でネットワークの接続が不安定になったのは、予備 B から次の地点に接続させようとした時以降である。この時、例えば予備 B の次の地点である予備 C は中継 A に対して電波が届くと見込まれる場所であり、予備 C が中継 A と直接つながる可能性があった（図 52）。そうなった場合、予備 C が予備 B と中継 A のどちらに接続するかが直ちには決定できず、新たに設置してもいつまでもネットワークに登録されない状況に陥ったと見られる。松江市でも古志町や薦津町南西、薦津町南は保健環境科学研究所に直接接続できる状態であった。また薦津町中や薦津町北についても保健環境科学研究所屋上と接続はできなかったものの電波を検出することはできた状況であり、大熊町での接続不安定な状況と似ている。

さらに、熊取町の朝代西 4 丁目方面への経路において、最寄りの気象観測棟を経由せずに第一研究棟屋上との直接接続が成立していること、松江市においても古志町を経由せず保健環境科学研究所屋上と接続しようとしており、薦津町南西はすぐ近くに隣接する薦津町南を設置した後 20 分ほど経過した後に薦津町南を経由して保健環境科学研究所と接続した。これらの挙動は、上流側の電波が受信できる状況であれば多少不利な条件であってもより基地局に近い上流側との接続を試みようとしていると考えることで理解できる。薦津町南西は保健環境科学研究所と不安定な接続が見られた箇所であり、そのすぐ近くの薦津町南に新たな LPWA KURAMA-II が設置されたとしても保健環境科学研究所との接続を試みて続けていたと見られる。そして 20 分間の試行で接続が確立できないと判断し、

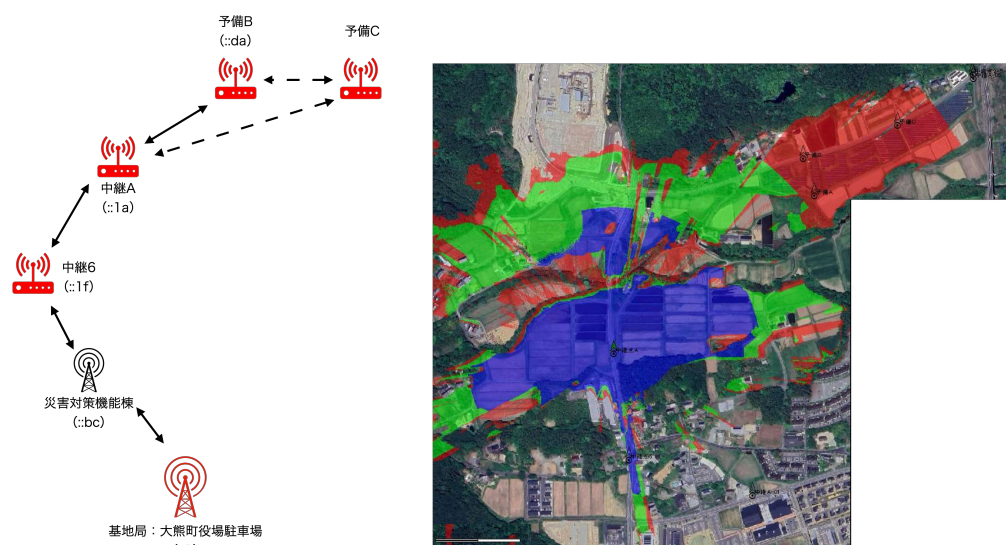


図 52 大熊町でネットワーク接続が不安定になった時のネットワーク構成（左）と、別途行なった中継 A に送信機を置いた場合の伝搬シミュレーション（右）。予備 C に設置すると、予備 C は近隣で強いがネットワークでは最下流の予備 B の電波と、遠方だがネットワークでは上流の中継 A の電波の両方が受信できたと考えられる。伝搬シミュレーションでも予備 B と予備 C いずれも $-90 \sim -95$ dB の範囲に入っており、同程度の強さの中継 A の電波を受信していたと考えられる。

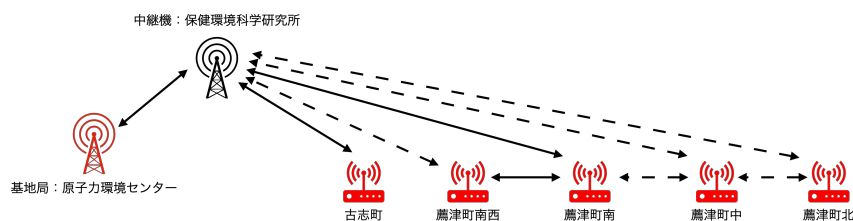


図 53 松江市でネットワーク接続が不安定になった時のネットワーク構成。今回設置した全ての地点で保健環境科学研究所の中継機の電波は一応届いていた状態とみられる。薦津町南に設置して 20 分ほどで薦津町南西と接続が確立した後、比較的近距离の薦津町南～薦津町中、薦津町中～薦津町北はお互いの電波が届いていたと思われるが、通信確立できない強さであるものの一応検出できたより上流の保健環境科学研究所の電波との接続を試み続けていたと思われる。

近隣で良好な通信のできる薦津町南との接続に変更したと推定される。薦津町中及び薦津町北についても同様で、比較的近距离の薦津町南～薦津町中、薦津町中～薦津町北はお互いの電波が届いていたと思われるが、通信確立できない強さであるものの一応検出できたより上流の保健環境科学研究所の電波との接続を試み続けていたと思われる（図 53）。

このように、熊取町、大熊町、松江市の状況を合わせて考えると、同一の地点に複数の経路で接続できる場合にネットワークを広げて行こうとした時に接続が安定しなくなっているように見られる。

熊取町の和田 MP 方面への場合、第一研究棟からの電波は野田歩道橋のある頂で遮られていること、野田歩道橋から和田 MP が見通せなかったこと、和田 MP から野田交差点が直接見通せない位置にあったことなど、接続確立にあたり大熊町や松江市のようなより上流側との直接の接続試行が発生しない状況であったことが安定な接続確立に繋がったと見られる。

4.6.3 安定したネットワーク構築の方法

ここまでの検討で、複数の地点と通信が確立しやすい状況が起きるとネットワークの接続確立が難しくなると見られることがわかった。Wi-SUN FAN では、規格上、通常は設定なしでもネットワークが構築されるとされている。しかし、机上等の同一の電波圏内でメッシュネットワークの構成試験を行う場合を想定した機能で、あらかじめネットワーク構成に合わせて基地局となる Border Router や中継局となる Router、通信端末である Leaf という各ノードがどのノードと経由して接続するかを設定することができる。その場合、上流側の Router に接続を認める Router や Leaf の mac アドレスを指定することになる。ネットワーク展開がうまくいかなかった大熊町や松江市の場合、この接続先指定を活用することで無駄な試行を避けて安定なネットワーク構築ができる可能性が高い。ただし、このフィルタリング機能を使うと、機材の設置箇所が固定されてしまうことになるので注意が必要である。

一方松江市の薦津町南西が 20 分後に接続を確立したように、複数の地点と通信が確立しやすい状況であったとしても、長時間放置することでいくつかの経路を試行して最適な経路が確立される可能性がある。今回のネットワーク構築の試験は迅速な展開をイメージしたため、設置後直ちに適切な経路選択を終え、ネットワークに接続して稼働することを想定したものであったため、通信モジュールが経路決定のための試行を行うための時間を想定していなかった。バックアップ回線として活用する場合などは、あらかじめ設置して稼働させ、十分な時間を経て最適な経路を確立させた後、その状態で定常的に通信を維持させておくことも可能と考えられる。

以上から、今後は、

- 接続先制限による経路の明確化で迅速な確立ができるかの試験
- Wi-SUN FAN 端末がどの程度の時間で安定した経路を選んでネットワークが安定化するかの試験

を試みる必要があると考えられる。

5 線量評価に使用する計算法の検証及び課題の抽出

国内で使用されている環境放射線の線量評価の方法には、サーベイメータや KURAMA-II で採用されている G(E) 関数法 [16] や、自治体の固定モニタリングポストで採用されているレスポンスマトリックス法 [18] といった方法がある。これらについては長年にわたって運用され多くの知見やデータも蓄積されている一方、開発されてからすでに長い年月が経っており、開発当時に比べて著しく進歩した検出器や計測手法、コンピュータなどの技術革新に十分対応できていない。例えば、技術革新により新しい優れた性能を持つシンチレータの登場が想定されるが、現在自治体が保有する NaI(Tl) 検出器を想定したレスポンスマトリックス法の解析ソフトは、必要なレスポンスマトリックスが入手できないことから対応ができない状況にある。また、新しい検出器を採用した際に、これまでの蓄積データや解釈との整合性も問題となる。

このような問題を認識し、対処する方法を検討するための課題抽出を試みた。また、今回の事業において G(E) 関数法で使用する G(E) 関数の作成プログラムの近代化を行なった。

5.1 線量評価における検出器等の課題に関する意見交換の実施

線量評価法に関する今後の対応については一朝一夕で解決できないことから、2024 年 7 月にモニタリング機器を開発、運用する実務者 5 名での意見交換を行なった。それぞれの所属等を離れた純粋に技術の見地からの意見交換であり、意見交換の場限りとするデータや情報開示や発言も多数あったことから議論における詳細は報告書には記載しない。意見交換の場では、将来より優れた性能の検出器に更新した際の測定の継続性を実現に必要な技術開発、例えば異なる検出器間の相互変換を実現するような関数を定める必要性が挙げられている。その他、レスポンスマトリックス法による線量率評価の結果に関する意見交換が行われた。また、線量評価において行われる検出器のシミュレーションの精度の適正化や妥当性について検討が必要であるとする意見もあった。一例として、G(E) 関数法における G(E) 関数決定に使うシミュレーションでは、使用する検出器のシンチレータの形状や材質だけでなく、パッケージや回路基板上の部品の材質などを含む非常に細かい構造や材質まで考慮した精密なシミュレーションが行われることが多い。その一方で、例えば線量換算に用いる係数などに含まれると考えられる系統誤差を明示的に取り込まないで評価や決定が行われることが多い。このような明示的でなかった系統誤差とシミュレーションの精度のバランスがどうなっているのかを評価すべきという意見があった。もしシミュレーションにおける精度の要求が高くない場合、シンチレータの形状とサイズだけで決まった G(E) 関数をカタログ的に使用できるようになり、実用的な精度を損なうことなく検出器の開発や利用が容易になる可能性がある。

5.2 G(E) 関数作成プログラムの近代化

G(E) 関数法は、シンチレーション検出器のようにエネルギースペクトルの得られる検出器について、手間のかかるスペクトル解析をすることなく直接的に線量を求めることができることから、線量

を求める実用的な手法として広く使われている。G(E) 関数は、使用する検出器のレスポンスと線量換算係数から計算することができ、用いる線量換算係数によって、周辺線量当量率 (Sv/h) や空気吸収線量率 (Gy/h) などが得られる。森内らによる FORTRAN77 で作成された G(E) 関数を数値として得る計算プログラムがあり、これを改良したものが JAEA で使われている [17]。しかし、実数型変数は単精度と倍精度の 2 種混合であったり、改定の都度、計算実行に不要な部分がコメント文になって残ったままであり、また、計算に不要なデータの inputs が求められる状態であるなど一般利用に適していない状態である。

そこで、本事業においてプログラムコードを点検してこれらを解消するとともに Fortran90/95 に書き換えた。実数型変数は Fortran 90/95 で利用可能になった 4 倍精度に統一することで計算精度の向上も行なった。このプログラムコードは報告書 CD-R に同梱している。2025 年 3 月現在日本原子力学会和文誌に投稿中であり、掲載が決定され次第プログラムファイルを web 上で公開することになっている。

6 今回の事業のまとめ

今回の研究では、無人航空機への搭載が可能なシングルボードコンピュータベースの超小型 KURAMA-II の改良を進めた。GNSS add-on の採用による測位能力の大幅な向上を実現したほか、開発された超小型 KURAMA-II の消費電力が 0.9W 程度であることを確認した。併せて過去の委託事業の成果に基づく 3 mm 角 CsI(Tl) を搭載した C12137 シリーズの性能評価を行い、100 mGy/h 以上に対応できる能力があることを確認した。

大阪府熊取町、福島県大熊町、島根県松江市で Wi-SUN FAN によるモニタリングネットワーク構築試験を行なった。3つの地域での実施により、ネットワーク構築の際に検討すべきネットワーク安定性に関する知見が得られた。特に大熊町の試験においては事前のシミュレーションとその妥当性について現地試験により確認し、計画的なネットワーク構築検討に有効であることを確認した。今後はネットワーク展開～安定化に関する試験で、ネットワーク構築のノウハウをさらに蓄積する必要がある。

また、線量評価に関わる諸問題について専門家を集めて意見交換を行なった他、現在 G(E) 関数法決定に使われている Fortran 77 ベースのプログラムを Fortran 90/95 用に移植し、精度や信頼性向上のためのコードの見直しと修正を行なった。

7 謝辞

この研究において、環境放射線モニタリング機器の改良にあたっては、S2 ファクトリー株式会社、ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社および浜松ホトニクス株式会社の協力をいただきました。検出器の照射試験においては JAEA 核燃料サイクル研究所の施設利用と同研究所の星氏の協力をいただきました。大熊町でのメッシュネットワーク関係の試験では大熊町役場櫻井氏、志賀氏、長谷川氏、松江市のメッシュネットワーク試験では島根県原子力環境センター 田中氏他センター職員の方々のご協力をいただきました。また G(E) 関数作成プログラムの近代化に際し、JAEA 津田氏に JAEA で使用されているコードに関する助言をいただきました。また Fortran 90/95 への移植と評価については京都大学大久保氏に協力いただきました。深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 浜松ホトニクス, 放射線検出モジュール C12137, <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/radiation-sensor/radiation-detection-module/C12137.html>
- [2] ソニーセミコンダクターソリューションズ, 2024 年 4 月 8 日プレスリリース, <https://www.atpress.ne.jp/news/390778>
- [3] ソニーセミコンダクターソリューションズ, , Spresense - エッジコンピューティングを低消費電力で, <https://developer.sony.com/ja/develop/spresense/>
- [4] ソニーセミコンダクターソリューションズ, Spresense GNSS アドオンボード, <https://developer.sony.com/ja/spresense/products/gnss-add-on-board>
- [5] Analog Devices, MAX3421E, <https://www.analog.com/jp/products/max3421e.html>
- [6] 谷垣実, 令和 5 年度 原子力規制庁原子力施設等防災対策等委託費事業「無人航空機へ搭載する LPWA 等を活用した環境放射線モニタリング機器の実現可能性検証」成果報告書, 2024 年 3 月
- [7] 日新システムズ https://www.co-nss.co.jp/iot/wisun/wsf-products/#wsnf_usb
- [8] ローム, Wi-SUN モジュール, <https://www.rohm.co.jp/products/wireless-communication/specified-low-power-radio-modules>
- [9] ソニーセミコンダクターソリューションズ, 2025 年 2 月 26 日プレスリリース, <https://developer.sony.com/ja/posts/spresense-imu-add-on-board-on-sale>
- [10] 令和 3 年度 令和 3 年度 原子力規制庁放射線安全規制研究戦略的推進事業「環境放射線モニタリングに適した半導体受光素子ベースの検出器の開発」成果報告書, 2022 年 3 月
- [11] 谷垣実, 令和元年度 原子力規制庁放射線安全規制研究戦略的推進事業「発災直後の面的な放射線モニタリング体制のための技術的研究」成果報告書, 2020 年 3 月
- [12] 谷垣実, 令和 2 年度 原子力規制庁放射線安全規制研究戦略的推進事業「発災直後の面的な放射線モニタリング体制のための技術的研究」成果報告書, 2021 年 3 月
- [13] 谷垣実, 令和 4 年度 原子力規制庁放射性物質測定調査委託費「CsI 検出器及び LPWA を活用した環境放射線モニタリング機器の実現可能性調査」成果報告書, 2023 年 3 月
- [14] 朝日新聞, 2024 年 2 月 28 日, <https://www.asahi.com/articles/ASS2W6VJHS25PTIB00Y.html>
- [15] Atoll overview, Forsk S.A.S., <https://www.forsk.com/atoll-overview>
- [16] 森内 茂, スペクトル-線量変換演算子による線量評価法とその演算子の決定, JAERI 1209 (1971).
- [17] 津田修一, private communication
- [18] S. Minato, M. Kawano, Journal of Nuclear Science and Technology, **7** (1970) 401-406.