

令和 5 年度
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

京都大学 谷垣 実

2024 年 3 月 7 日

目次

1	概要	4
2	研究目標	6
3	低消費電力の CPU と MPPC を受光素子とするシンチレーション検出器を用いた環境放射線モニタリング機器の試作	7
3.1	背景	7
3.2	試作した機器のあらまし	7
3.3	Spresense ベース KURAMA-II の活用例	11
3.4	考察とまとめ	12
4	メッシュ型 LPWA によるモニタリング機器の機動的な展開試験	14
4.1	背景	14
4.2	実施内容	14
4.3	Wi-SUN FAN の通信距離の確認	14
4.4	Wi-SUN FAN によるモニタリングネットワークの確立試験	15
4.5	試験結果についての考察	18
4.6	放射線モニタリング情報共有・公表システムへの送信	21
4.7	まとめ	22
5	既存のモニタリングポストからの測定データの LPWA による伝送可能性の検討	25
5.1	背景	25
5.2	実施内容	25
5.3	モニタリングデータ取得方法の検討	26
5.4	試作した通信アダプタの概要	26
5.5	試作した通信アダプタによる実証試験	27
5.6	まとめ	28
6	LPWA の現実の利用状況と実環境下での通信試験	31
6.1	背景	31
6.2	実施内容	31
6.3	電波利用状況調査	31
6.4	通信試験	40
6.5	まとめと考察	44
7	今回の事業のまとめ	46

1 概要

東京電力福島第一原子力発電所事故やその後発生した大規模な自然災害に伴い、原子力災害発生時の放射線や放射性物質のモニタリングに係る技術や体制についての様々な課題が明らかとなってきた。

原子力防災のために整備される放射線モニタリング機器では、これまでより災害時の運用も想定して堅牢性や信頼性を確保するべく入念に検討・用意されていた。電源や通信においても、自家発電機や大容量バッテリーによる電源の確保や、地上回線および衛星回線を用いた通信経路の多重化により、測定やデータ収集の継続性を確保することとなっていた。

しかし、東京電力福島第一原子力発電所事故では電力、通信、交通をはじめとした社会インフラ自体の甚大な破壊が発生し、堅牢性や信頼性を担保する前提のネットワークや電源、移動手段などのインフラ群が深刻な機能不全に陥った。その結果、事故前に想定していたような放出源情報の収集や分布状況確認のためのモニタリング活動が展開できなかった。その後の北海道胆振東部地震においても全道のブラックアウトが発生し、固定モニタリングポストのうち 11 局が無停電電源の枯渇で 3～4 時間で測定を停止した。通信にも深刻な影響が発生しており、NTT の地上固定回線の交換局や各社携帯回線の基地局の非常用電源が枯渇し、道内の一部の地域では実際に地上の通信ネットワークを喪失した。幸いにもモニタリングポストのデータ収集への影響はなかったものの、復電に時間を要した場合にはモニタリングの継続に重大な支障をきたしかねない状況であった。

これらの状況を受け、原子力規制庁では通信経路の多重化や衛星通信を利用可能な可搬型モニタリングポストの整備などの対策を進めていた。しかし、2024 年 1 月 1 日の能登半島地震では輪島および七尾方面のモニタリングポスト最大 18 台が欠測となる事態となった。欠測となったモニタリングポストは 1 台を除き正常に稼働していたが、被災や電力枯渇による通信経路の機能不全によりデータを送ることができなかったことが原因であった。このような通信経路は民間事業者によって維持管理されており、社会的責任や使命を持って事業者が最善の努力をしてくれているものの、復旧はあくまで事業者任せになってしまうことも問題である。加えてこのような事態を想定して整備された衛星通信を装備した可搬型モニタリングポストも実際の展開には時間を要しており、例えば馬渡局での可搬型モニタリングポストの稼働は地震発生後一週間経過していた。これは被災による交通網の寸断が深刻であり、自動車運搬が必須の重量物である衛星通信対応可搬型モニタリングポストの設置が思うように行かなかったためと考えられる。

東日本大震災では地震発生後 1 週間以内に過酷事象が発生しており、災害発生時のモニタリング機能の回復、代替手段などによる実質的な維持がいかに速やかに行われるかが重要であることは関係者に強く認識されているものの、そのための効果的な手法が十分に整えられているとは言い難いのが現状である。

これまでの原子力規制庁委託研究において、発災直後に迅速な展開が可能なモニタリング体制に必要な技術検討を行ってきており、そこでは容易に携行・設置ができ、無人航空機などにも簡便に搭載できるような極めて小さい放射線モニタリング機器の実現に必要な技術要素（シングルボードコン

ピュータや半導体受光素子ベースの放射線検出器）や、放射線モニタリング機器を展開した際に必要となるデータ収集のためのネットワーク技術（メッシュ型 LPWA ネットワーク）の検討を行っており、これらの実用化が強く求められている。

本事業では、無人航空機へ搭載するなどの機動的な展開が可能な小型環境放射線モニタリング機器を試作するとともに、実際に地域に展開した小型環境放射線モニタリング機器によって構成された自律的なメッシュ型 LPWA による放射線モニタリングの実証試験、既存モニタリングポストの LPWA 対応のためのアダプタの試作と検証を行った。

2 研究目標

CsI と MPPC を用いるシンチレーション検出器及び LPWA を組み合わせた環境放射線モニタリング機器に関する実現可能性の検証を行うため、以下の内容について取り組んだ

1. LPWA 対応環境放射線モニタリング機器の試作
 - 無人航空機等への搭載を想定した大型素子 CsI(Tl) 検出器に対応
 - 環境放射線モニタリングに適した LPWA 規格への対応と通信距離の最大化ほかの伝送特性の検討
 - 放射線モニタリング情報共有・公表システムへのデータ伝送確認
2. 既存のモニタリングポストからの測定データの LPWA による伝送可能性の検討
3. LPWA 通信の現実的な利用状況を想定されるパターンごとに調査と通信試験

3 低消費電力の CPU と MPPC を受光素子とするシンチレーション検出器を用いた環境放射線モニタリング機器の試作

3.1 背景

近年の半導体技術と光計測市場の進展と拡大により、光電子増倍管のような増幅効果を持つ半導体受光素子である APD(Avalanche Photo Diode) や MPPC(Multi Pixel Photon Counter) が安価に広く普及しており、これを放射線計測に応用することで、複雑な外部機構を必要としない小型軽量、振動や衝撃にも強く使い勝手の良い検出器が実用化されている。これまでも走行サーベイシステムである KURAMA-II をはじめ、可搬型モニタリングポストや固定モニタリングポストに採用が進んでいる。

この使い勝手の良い検出器をさらに普及させるためには、より多彩な活用が可能となるように小型化、軽量化、低消費電力化を進める必要がある。過去の規制庁事業では、CsI(Tl) シンチレータと MPPC を組み合わせた小型放射線検出器である浜松ホトニクス社 C12137[1] のアナログ系部分を取り出した検出モジュールを試作、これをソニーセミコンダクタソリューションズのシングルボードコンピュータである Spresense[2] と組み合わせることで、バッテリーおよび通信機能込みで手のひらサイズまで小型化した超小型 KURAMA-II を試作している。しかし、浜松ホトニクスからは様々なシンチレータのサイズや形状の C12137 が販売されており、このような検出器を目的に応じて選択して利用できる方が良い。例えば、ドローンへ搭載して一定の高度から測定する場合、ドローンの積載可能重量の範囲内で大型の検出器を搭載することが望まれる。

また、能登半島地震においても問題になった被災による通信途絶が原因の欠測への対応策として、自営型のメッシュネットワークによるモニタリングの維持や展開をより強力に推し進める必要がある。これまでの委託事業でも ZETA[3] によるメッシュネットワークの確立と Spresense ベースの超小型 KURAMA-II の展開の試みを行い、良好な成果を得ている。しかし ZETA の場合、中継機と通信端末が別であり、測定端末以外に中継機を別途設置する必要があること、さらに 30 秒ごとに 50bytes 程度の通信しか行えないため、モニタリングポストからのスペクトルデータの送出に制約があることが課題である。

そこで、今回は C12137 シリーズの検出器を差し替えて利用可能な放射線計測システムとしての Spresense ベース超小型 KURAMA-II の開発や LTE 通信への対応や安定化を進めるとともに、これまでの規制庁事業で有望とされながら対応ができていなかった Wi-SUN FAN への対応を行うこととした。

3.2 試作した機器のあらまし

基本的なハードウェアの構成は、昨年度の規制庁委託事業で試作して良好な結果を得た Sony のシングルボードコンピュータである Spresense に USB インターフェイスとしての USB Host add-on

表 1 Wi-SUN FAN 通信モジュール BP35C5 のスペック

項目	内容
無線規格	ARIB STD-T108, FCC Part 15C 準拠
無線周波数	920 MHz 帯
変調方式	2 値 GFSK
データレート	ARIB STD-T108:50 kbps, 100 kbps, 150 kbps,300 kbps FCC Part 15C:50 kbps, 150 kbps,300 kbps
伝送電力	20 mW, 10 mW, 1 mW
受信感度	-105 dBm (TYP.) (50 kbps, BER < 0.1 %) -98 dBm (TYP.) (150 kbps, BER < 0.1 %)
周波数偏差	± 20 ppm 以下
消費電流 (VDD=3.3 V, データレート 50 kbps)	40 mA (TYP.) [送信 20 mW 出力] 20 mA (TYP.) [受信]
HOST インターフェース	UART(115,200 bps), GPIO

基板を搭載したものとなる。昨年度の規制庁事業では LTE 通信への対応を想定し、Spresense 用の LTE 拡張ボードを使用していた。今回の試作ではこの基板に搭載された LTE 通信モジュールを活用して LTE Cat. M[4] 通信を行えるようにしたほか、LTE 拡張ボードが搭載する汎用シリアルポートを活用した外部の Wi-SUN FAN 基板と接続しての通信も行えるようにした。なお、LTE Cat. M および Wi-SUN FAN はいわゆる LPWA 通信に分類されるが、LTE Cat. M は事業会社が展開した LTE ネットワーク規格のサブセットとして規定されている規格であり、事業者の展開する基地局へ接続するスター型のネットワーク構成となる。一方 Wi-SUN FAN はメッシュ型のネットワークを構成可能であり、基地局も含め自ら設置可能で自営網を構築可能な規格である。

今回の試作機器の構成概要を図 1 に示す。今回の放射線計測部分は昨年度の規制庁事業で開発したもので、USB ホストコントローラ MAX3421E[5] を搭載した Spresense 用 add-on ボードとして実装した基板から浜松ホトニクス社 C12137 シリーズの検出器を制御してデータを取得するものであり、測定能力についても同一である。LTE 拡張ボードは LTE Cat. M 通信に対応した Sony の Spresense 純正ボードであり、nano SIM スロットと micro SD カードスロットを搭載している。Wi-SUN FAN 通信には日新システムズ社の Wi-SUN FAN 搭載 USB 基板 [6] を使用した。この基板は無線部分としてはローム社の Wi-SUN FAN モジュールである BP35C5[7] を使用しており、これに USB および UART インターフェースを付加したものとなる。無線部分である BP35C5 のスペックを表 1 に示す。

実際に試作した環境放射線モニタリング機器の外観及び内部の様子を図 2 に示す。昨年度の事業で開発した LTE 拡張ボード上に Spresense 本体と USB add-on を乗せた部分と、今回新たに追加した Wi-SUN FAN 基板とから構成されている。LTE 通信のみで良い場合は、昨年度同様 LTE 拡張

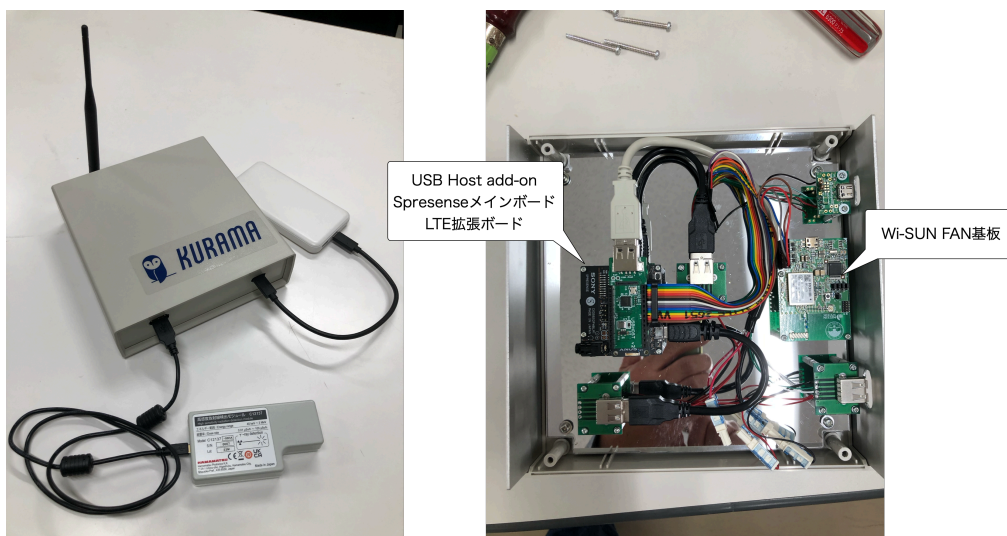


図2 今回試作の超小型 KURAMA-II の外観（左）。給電およびデバッグ時のシリアル接続にも使う USB-C ポートと、高計数率型 C12137 シリーズを接続するための USB-A ポートが用意されている。背面には Wi-SUN FAN ボード用のアンテナ端子が用意されている。今回試作の超小型 KURAMA-II の内部（右）。昨年度の事業で製作したものと共通である LTE 拡張ボード、Spresense 本体、USB Host add-on がスタックされている部分と、今年度追加となった Wi-SUN FAN 基板、そのほか内部の電源分配用の USB 配線のための基板から構成されている。試作品のため組み換えや配線変更が容易なように余裕を持って配置されている。

WebServices による通信を行うこととした（図3）。Wi-SUN FAN ネットワークでは tcps コマンドを使って Border Router ヘデータを送信することになる。

今回の製作においては SubCore 1 の担当する C12137 とのデータ通信の安定性改善が引き続き大きな問題となった。昨年度は Spresense が 6 つの CPU コアによる並列処理が可能なことを利用し、SubCore 1 を USB 通信専用として MAX3421E の制御と USB 通信のみに特化することで解決した。今回は LTE 拡張ボードを使用した LTE Cat. M 通信や Wi-SUN FAN 基板と接続して通信制御やデータ送信を行う必要があるため、LTE 通信や UART 通信による割り込みや負荷が増大し、再び MainCore の動作に影響を与える可能性がある。そこで新たに SubCore 2 を Wi-SUN FAN 通信専用コアとして使用することとした。この結果、Main Core での処理が放射線データと Spresense の仕様上 MainCore でしか使用できない GPS 測位のみとなり、全体の安定性が向上した。なお、LTE Cat. M 通信については Spresense の技術的な制約で MainCore による制御が必要となっており、現在は送信頻度を調整することで対応しているが、将来的に SubCore での制御が可能にできるかの検

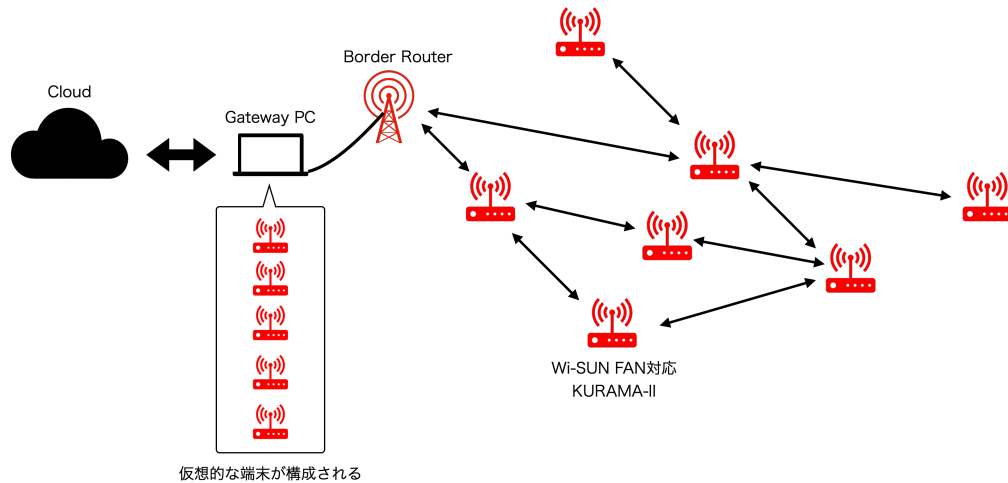


図3 Wi-SUN FAN 搭載超小型 KURAMA-II のネットワーク構成。展開された KURAMA-II が Wi-SUN FAN の IP v6 ベースのメッシュネットワークを構成し、測定データを TCP 通信で基地局である Border Router に送る。Border Router はシリアル通信で接続された PC に受信データを送る。PC 上には展開した端末分の仮想 KURAMA-II 端末が構築されており、仮想端末が取得したデータを通常の KURAMA-II と同じ WebServices によりクラウドへ送信する。これにより Wi-SUN FAN ネットワークの外部からの隔離と従来の KURAMA のデータ収集スキームとの互換性を確保している。

討を進めている。

現時点での Spresense ベースの超小型 KURAMA-II のスペックを表2にまとめる。

3.3 Spresense ベース KURAMA-II の活用例

試作された Spresense ベースの KURAMA-II の実用化に向けた動きも始まっている。既存の LTE 網を利用する LTE Cat. M 通信対応 Spresense ベース超小型 KURAMA-II は原子力規制庁と JAEA によりドローンへの搭載と運用についての試験が続いている。一例として、令和5年度原子力総合防災訓練で初めて取り入れられた無人航空機によるモニタリング活動での採用が挙げられる。訓練の2日目である2023年10月28日、柏崎刈羽原発付近において、無人航空機、無人ヘリと共にドローンに搭載された Spresense ベースの超小型 KURAMA-II が空間線量率のモニタリングが行われた(図4)。検出器には C12137-00 型が使用された。この時、Spresense ベースの小型 KURAMA-II は測定デー

表 2 Spresense ベースの超小型 KURAMA-II のスペック

項目	内容
CPU	CXD5602
対応通信	LTE Cat. M および Wi-SUN FAN 1.0
通信プロトコル	(LTE) HTTP over SSL/TLS (Wi-SUN FAN) TCP ベースの独自プロトコル
測定間隔	1 sec 以上
データ送信間隔	測定間隔 × 20 (20 点ごとに一括送信)
電源	5 V (USB-C 給電・デバッグ用シリアルポートと兼用)
消費電流	0.2 A (typ.)
対応検出器	高計数率対応型 C12137 シリーズ (G(E) 関数は SD カードに記録)

タを LTE 回線で送信しており、KURAMA 用のサーバでマッピング状態が可視化されるとともに測定データも共有された (図 5)。Spresense ベースの KURAMA-II では Spresense に搭載された一般的な L1 波を利用した 1 周波タイプの GPS を使用してマッピングを行っており、高度については水平方向の精度に比べ 1.5 ～ 2 倍精度が悪化し数 m 程度の誤差が出るとされる。また高度は WGS84 のジオイド面からの高さとなるため、一般的に現地の地表面からの高度とは一致しない。今後のドローン搭載における測定においては、KURAMA-II 自身の測位能力の向上だけでなく、ドローン側の測位情報の活用などの検討も必要と思われる。

なお、携帯回線は陸上移動局としての免許及び型式認定が行われており、有人無人を問わず飛行体に搭載して通信を行うと航空移動局となるため電波法に違反することとなる。拡大するドローン等での通信需要に対応するため、総務省は事前に日時と場所を指定して携帯通信事業者の許可を得ることで上空での使用を可能とする制度 [8] を設けており、通信事業者からこれに対応した各種プラン [9] [10] が提供されている。携帯通信を活用する放射線計測システムを飛行体に搭載する場合はこれらのプランの利用と事前の必要な手続きを行なった上での利用が求められる。

Wi-SUN FAN 対応の Spresense ベース KURAMA-II については本事業内で実証試験を行なったので、章をあらためて報告する。

3.4 考察とまとめ

昨年度の事業で試作した Spresense ベースの KURAMA-II について、動作の安定性を向上させるとともに LTE Cat. M や Wi-SUN FAN への対応を行なった。この成果をもとに実際のユーザによる実際の活用に向けての取り組みも進んでいる。今後はユーザの活用の取り組みを支援するための開発や改良を継続するとともに、機材の普及に向けた量産化などへの取り組みを継続したい。



図 4 令和 5 年度原子力総合防災訓練において、無人航空機によるモニタリング活動が

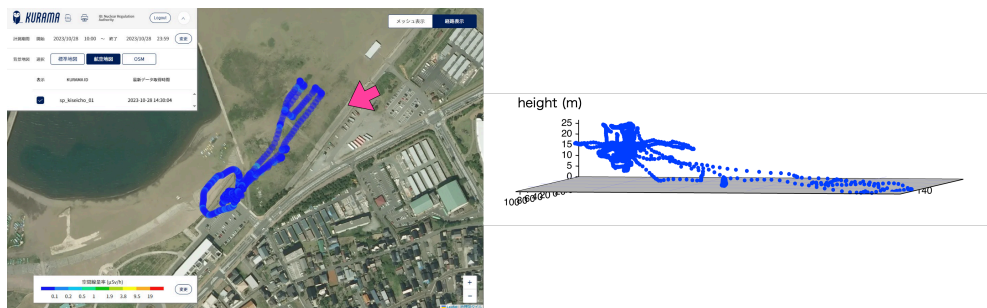


図 5 ドローン搭載 Spresense ベース KURAMA-II の測定結果（左）と測位データを 3 次元プロットして左図矢印方向から眺めたもの（右）。

4 メッシュ型 LPWA によるモニタリング機器の機動的な展開試験

4.1 背景

東日本大震災や能登半島地震のような大規模な災害の場合、被災状況に応じて既設モニタリングポストを稼働させるのに必要な電力、通信のインフラだけでなく、モニタリングポスト自体の機能不全が起きることは十分想定される。能登半島地震においても石川県旭町局や富山県上余川局のようにモニタリングポスト設置地点の基礎部分に大きな影響が出ている。このような場合、代替のモニタリング機器の展開が必要であるが、先に述べた通り交通網が甚大な被害を受けた輪島・穴水・七尾地域で従来の可搬型モニタリングポストを運搬して設置することは大きな困難が伴う。

このような状況においては、過去の放射線安全規制研究戦略的推進事業で検討した発災直後の面的な放射線モニタリングの展開という考え方が有効になる。今回の事業で開発しているドローンへの搭載を想定した Spresense ベースの超小型 KURAMA-II はまさにそのような目的に用いるのに適したデバイスであり、昨年度の委託事業で試験したメッシュ型 LPWA である Wi-SUN FAN を活用して面的な放射線モニタリングの展開を試みることにした。

4.2 実施内容

昨年度実施した Wi-SUN FAN の運用試験と同じ場所（島根県原子力環境センター付近）において、Wi-SUN FAN 搭載 Spresense ベースの超小型 KURAMA-II を展開してメッシュ型ネットワークを構築し測定データを収集する試みを行った。この試験にあたり、Wi-SUN FAN の 1 ホップあたりの通信距離の確認を行い、それを踏まえて Wi-SUN FAN 搭載 Spresense ベースの超小型 KURAMA-II の展開を行った。試験の際の基本的なネットワーク構成は図 3 の通りで、Gateway PC および Border Router を島根県原子力環境センターに置き、隣接する島根県保健環境科学研究所の屋上に中継局を設置した（図 6）。中継局の機材は昨年度の試験で用いたものと同じ IoT ゲートウェイ [11] である。IoT ゲートウェイの仕様を表 3 にまとめる。

4.3 Wi-SUN FAN の通信距離の確認

今回の試験にあたり、最初に Wi-SUN FAN の通信距離を確認するための試験を行なった。昨年度の事業では、地上に展開した中継局同士では 800 ～ 900 m 程度の通信が限界ということがわかっていることから、今回は拠点で想定される比較的地面高のある中継局と地上の局との間の到達距離を調べることにした。Wi-SUN FAN 搭載 Spresense ベースの超小型 KURAMA-II 1 台を島根県保健環境科学研究所周辺 2 km 程度の範囲で移動させ、各地からの接続状況を確認した。結果を図 7 に示す。Wi-SUN FAN の公称到達距離である 1 km を越えて 1.3 km の範囲までは到達していることが確認されただけでなく、接続時は KURAMA-II からのデータが受信されており、さらに地点間を移動中の車内からも通信が確立していることがわかった。この時の RSSI 値は概ね -80 dBm ～ 95 dBm で

表 3 IoT ゲートウェイの主な仕様

処理	CPU Core	ARM Cortex-A7
	CPU Clock	MAX:900 MHz
	Cache	32 kB(命令) / 32 kB(Date) / 128 kB(L2)
メモリ	RAM	ARM Cortex-A7
	ROM	MAX:900 MHz
無線	Wi-Fi	Dual-Band 802.11 ac/a/b/g/n
	Bluetooth	Bluetooth 5
	Wi-SUN	Wi-SUN FAN (ROHM BP35C5)
インターフェース	USB	USB2.0 Type-A
		USBType-C(給電)
	SW	タクトスイッチ ×3
		スライドスイッチ ×1
	LED	2 色 LED(赤/緑) ×5
OS		Linux 5.4
入力電源		DC4.8 ~ 5.25 V (1.5A)
保証環境	動作時	0 ~ +40°C, 25 ~ 85 % (結露なきこと)
	保管時	-10 ~ +50°C, 25 ~ 85 % (結露なきこと)
外形サイズ		69 × 115 mm (突起物を除く)

あった。なお、移動する車中からの接続成功は Wi-SUN FAN が走行サーバイ等に利用できるという意味ではないことに注意が必要である。これは、Wi-SUN FAN では本格的な移動体通信で必須となるデータフローを切断せずに接続先の中継局や基地局を切り替えるハンドオーバー機能を持っていないため、今回は保健環境科学研究所屋上の中継局とつながる範囲で移動しながらのデータ通信ができたに過ぎないからである。

今回確認された到達距離は 1.3 km 程度であり、昨年度の委託事業のときの 800 ~ 900 m 程度に比べて長くなっている。これは昨年度の委託事業では双方のアンテナが地上高 2 m 程度の位置にあったのに対し、今回は一方のアンテナが保健環境科学研究所屋上の 20 m 程度の高さにあったためと考えられる。直接波と地面での反射波を考慮する 2 波モデルによる計算を行うと、図 8 の通りとなり、アンテナの地上高が上がったことで大きな改善が期待できることがわかる。

4.4 Wi-SUN FAN によるモニタリングネットワークの確立試験

ここまでで各中継局間で期待できる到達距離の目安が得られたことから、この結果を踏まえて Wi-SUN FAN 搭載 Spresense ベースの超小型 KURAMA-II の展開と Wi-SUN FAN によるメッシュネットワークの構築の試験を行なった。基本的なネットワーク構築の方針は以下の通りとした。



図 6 島根県保健環境科学研究所屋上に設置された中継局。地上高は約 20 m で、この中継局がメッシュネットワークの事実上の起点となる。

- 拠点は原子力環境センターとし、ここの室内に Gateway PC と Border Router を設置する
- 保健環境科学研究所の屋上に中継局を設置し、ここをメッシュネットワークの実質的な起点とする
- 保健環境科学研究所の屋上と原子力環境センター室内との直接通信は不安定になる可能性があるため、原子力環境センターのベランダに中継局を 1 つ置く
- 通信距離の確認の際に保健環境科学研究所の中継局と接続が確認できた場所に最初の KURAMA-II を置く