



図7 保健環境科学研究所と接続が確認された地点。接続確立時は KURAMA-II の線量率データも送信されていた。

- その後は概ね 500 m の距離を目安に KURAMA-II を展開して面的なカバーを行いつつ、保健環境科学研究所北北東 2 km ほどの場所にある生馬公民館の既設モニタリングポスト位置まで到達を目指す。
- 接続確立は KURAMA-II の GPS つきデータが拠点で受信され、KURAMA-II サーバのマップ上に表示されることとした

以上の条件のもと、2月26～27日にかけ、中継局や KURAMA-II の細かい設置条件等を調整しながら試験を行なった。典型的な KURAMA-II および中継局の設置状況を図9、10に示す。また、中継局や KURAMA-II などの設置状況と KURAMA-II からのデータの受信状況を図11に示す。保健環境科学研究所から 2 km 以上離れており見通しも効かない生馬公民館に設置した KURAMA-II からのデータが届いてサーバ上に表示された一方、見通しがよく通信が確立されると期待された古墳の丘古曾志公園や浜佐田町付近の KURAMA-II との通信が確立できなかった。また、26日には稼働が確認されていて展開された KURAMA-II 等と接続していたはずの屋上の中継局が、27日に再起動した際に通信ができなくなるトラブルがあり、代替の中継局を屋上に建てることで試験を継続する状況となった。そのほか、KURAMA-II も前日夜の動作試験では正常に稼働していたものが、実際に展開された際に稼働しなくなるトラブルが多発した。

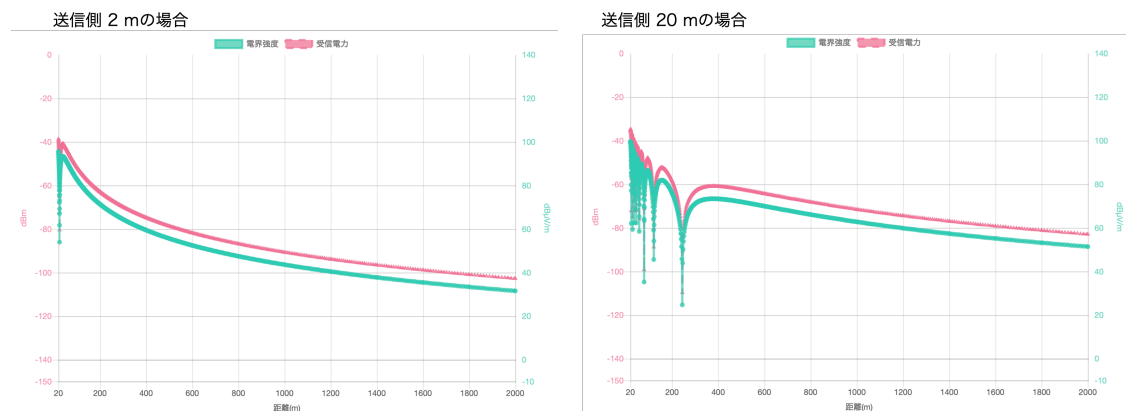


図 8 受信電力に対するアンテナの地上高の違いの影響 [12]。送信アンテナの地上高が 2 m の場合 (左) では 1 ～ 1.2 km 程度で受信モジュールの受信限界とされる -98 dBm に近くなるが、20 m になると 2 km 以上でも -80 dBm 程度と十分余裕がある。

4.5 試験結果についての考察

今回の結果について考察する。まず Wi-SUN FAN のメッシュネットワーク構築状況についてデータを収集したところ、27 日の試験終了時には図 12 のような構成となっていることがわかった。このことから、KURAMA-II からのデータ送信は行われていないものの、Wi-SUN FAN としてはメッシュネットワークを構成していたと見られること、また不調だった中継機も試験中に中継機能を回復していることがわかった。また、26 日と 27 日では Wi-SUN FAN のネットワーク構成の状況が異なっていることもわかった。原因としては、2 月 26 日の試験終了後、機器の盗難等を避ける理由から一旦機器を停止させた後回収し、27 日朝に再び設置して電源を再投入したことが原因として考えられる。Wi-SUN FAN は通信が確立した後の状況の変化には迅速に対応しており、今回の試験中もわずかな位置の変化や近隣の機器追加が起きるたびに最適化するべく動的にネットワークの構成が変わっていく様子が確認できた。しかし、長時間ネットワーク全体を停止させた場合は最初からネットワー



図9 試験中に設置された Wi-SUN FAN 対応 Spresense ベース超小型 KURAMA-II。本体は高さ 40 cm 程度の台の上に置き、5000 mAh のモバイルバッテリーで稼働させた。アンテナについては、この画像のように $1/2\lambda$ の垂直アンテナを 2 m 程度の高さまで上げている場合と、本体に $1/2\lambda$ の垂直アンテナを直結して地上高 0.5 m 程度で設置している場合がある。

クの構築を始めることとなるため、1 日目と 2 日目で近隣の機器を発見するタイミングが変わってしまい、1 日目と異なる経路の通信を行ったり、見つかるはずの機器が見つからないためネットワークへの接続に時間を要した可能性がある。

また KURAMA-II がデータをうまく送信しなかった個体が続出した原因についても考察する。挙動が不安定な KURAMA-II の点検を行なったところ、KURAMA-II を製作する際に Spresense の EP-ROM に添付されるべき遮光テープが添付されていないことが判明した。この遮光テープが貼付



図 10 試験中に設置された中継局。

されていない場合、太陽光の当たる場所や強い光の下などでは誤動作の原因となる旨の注意喚起がなされており、使用前に貼付することが求められている。今回は筐体内に組み込まれており内部に直接光が当たらないものの、USB ポート付近は余裕を持たせた穴が開けてあり、この部分から差し込んだ日光による影響の可能性が高い。製造された KURAMA-II は実証試験の前日を含め繰り返し動作試験を行っていたが、全て正常に動作していた。しかし、動作試験は屋内あるいは屋外でも夜間に行われており、EP-ROM 部分の遮光が問題であったと考えると矛盾しない。

なお、ボードの EP-ROM 部分の遮光については、基板の取り外しと再装着が必要なものの、当該 EP-ROM 部分に遮光シールを貼付することで容易に対策できる。そのため、遮光をした上であら



図 11 試験において Wi-SUN FAN 機器が設置された地点。緑丸が拠点となる原子力環境センター、旗印が中継局（Wi-SUN FAN 機能のみ）、赤丸が Wi-SUN FAN 対応 KURAMA-II の設置箇所。赤の二重丸の各地点は実際に KURAMA-II からのデータがサーバのマップ上に表示された地点。

ためてネットワーク試験を実施する予定である。

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

緊急時に Wi-SUN FAN 対応超小型 KURAMA-II を機動的に展開する場合、新たに独自の情報共有システムを立ち上げるのではなく、既存のモニタリング体制と互換性を維持して運用できることが望ましい。そこでメッシュネットワークによるモニタリング試験の後の 3 月 6 日午前に Wi-SUN FAN 対応超小型 KURAMA-II で取得したデータを放射線モニタリング情報共有・公表システム (RAMIS)[15] へ送信する試験を行なった。

送信にあたっての KURAMA 側の構成は図 3 のままで、KURAMA 側のサーバに RAMIS 仕様でのデータ送信機能を付加してデータ送信を行う事とした。試験時の機器の様子を図 13 にしめす。2 月 26 ～ 27 日の試験で発覚した遮光不良に対処した KURAMA-II を原子力環境センター敷地内の屋外に設置し、標準的な測定間隔である 1 秒ごとの測定を行った。このデータは Wi-SUN FAN ネットワークで原子力環境センター屋内の Border Router に向けて送信される。Border Router が受信したデータは Gateway PC に渡され、Gateway PC からインターネットを経由して KURAMA サーバへデータを送信している。KURAMA-II からの 1 秒単位でデータは KURAMA サーバ側で 1 分値に変換して RAMIS の仕様でデータを送信した。最終的なデータ取得状況は RAMIS の Web

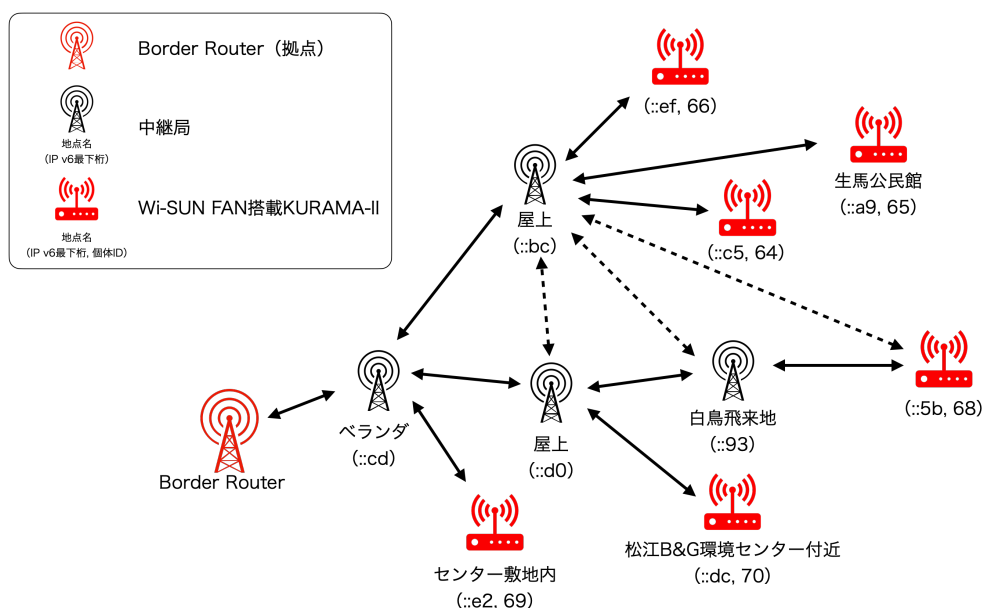


図 12 試験終了時の Wi-SUN FAN のネットワーク構成。設置地点名の書かれていない KURAMA-II は場所を変えながら設置したもの。点線は当初通信経路として使用していたが、Wi-SUN FAN の通信経路の最適化機能やネットワークの再立ち上げに伴う接続変更が起きたもの。

ページで確認できるため、Gateway PC 上で別途ブラウザを起動し、KURAMA サーバのマップページと RAMIS Web ページを表示してデータ取得状況を監視した。RAMIS Web サイトには試験用に割り振られた名称および箇所が表示された（図 14）。表示位置は Spresense の GPS の精度に依存するが、地図上表示は概ね設置箇所と $\pm 2 \sim 3$ m 程度の範囲で一致していた。線量率についても KURAMA-II の測定結果を換算したものがそのまま表示された。

4.7 まとめ

島根県原子力環境センター付近の地域において、Wi-SUN FAN のメッシュネットワークを構築して超小型 KURAMA-II による放射線モニタリングデータの収集を行った。事前の通信試験では、保健環境科学研究所屋上にある地上高 20 m の中継局と地上の KURAMA-II との間で概ね 1.3 km 程度の通信が可能であることを確認した。また、2 月 26 ～ 27 日に実施した試験では保健環境科学研究所屋上と生馬公民館の約 2 km の間での通信確立にも成功するとともに、地域内に展開した中継局および KURAMA-II がメッシュネットワークを構築していたことも確認した。ただし、ネットワークについては時間をかけて安定化していく状況が確認できており、今回の 2 月 26 ～ 27 日の試験のように、1 日めの試験後一旦機材を撤収し、翌日再設置するような方法は取るべきではないと考えられる。

KURAMA-II 端末の不調については概ね原因が特定できており容易に対処可能であるため、後日

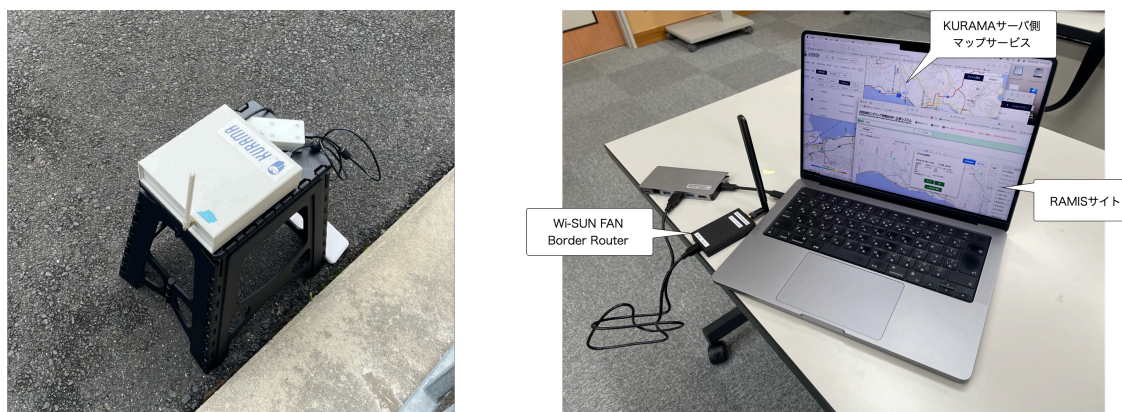


図 13 RAMIS へのデータ送信試験の様子。原子力環境センター敷地内屋外に設置した KURAMA-II（左）と原子力環境センター屋内に設置された Border Router と Gateway PC（右）。KURAMA-II から Wi-SUN FAN ネットワークで送信されたデータは、原子力環境センター屋内の Border Router で受信され、Gateway PC からインターネットを経由して KURAMA サーバへデータを送信している。KURAMA-II からは 1 秒単位でデータが送信されているため、KURAMA サーバ側で 1 分値に変換して RAMIS の仕様でデータを送信した。Gateway PC 上では別途ブラウザを起動しており、そこに KURAMA サーバで受信したデータと RAMIS Web サイト側で表示されたデータを表示した。

に遮光不良に対処した超小型 KURAMA-II を使用して Wi-SUN FAN ネットワーク経由でデータ収集を行った。そして、このデータを RAMIS に送信する試験を行い成功した。今回の試験のために割り振られた RAMIS への登録情報に基づく可搬型モニタリングポストとして認識され、KURAMA-II の測定結果に基づいた数値が表示されることを確認した。これにより、緊急時に Wi-SUN FAN を活用して機動的なモニタリングを行う場合でも、RAMIS を使って収集される他のモニタリング機器との協調した監視業務が実施できる事となる。

今後は、上記の Wi-SUN FAN のネットワーク特性を踏まえながら継続的にメッシュネットワークによるモニタリング試験を行い、その運用方法についての知見を蓄積していく予定である。

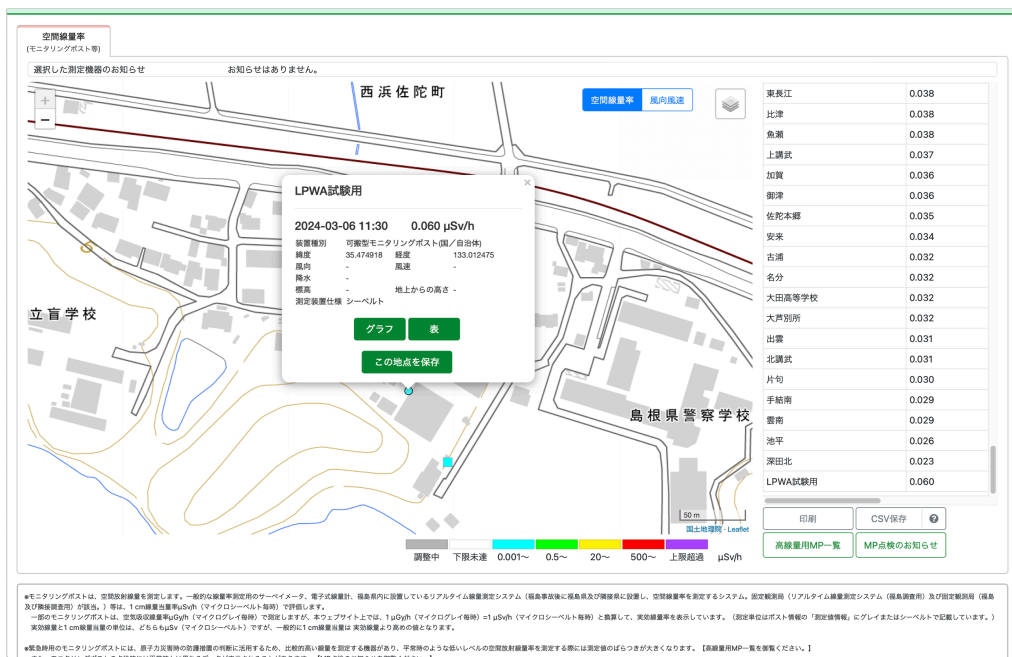
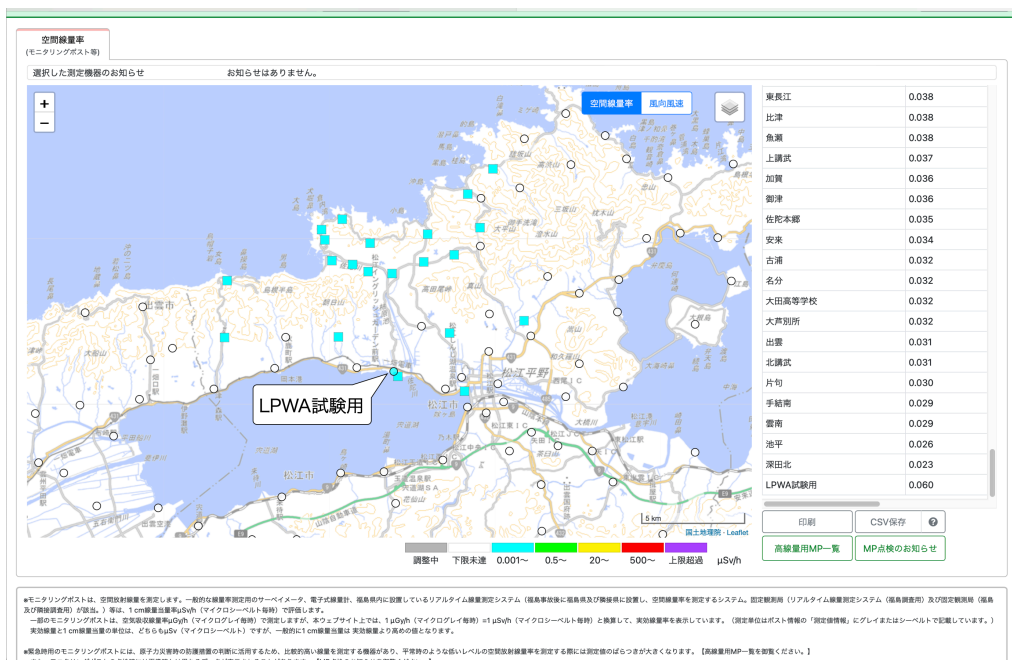


図 14 RAMIS が受信したデータを RAMIS Web ページ上で表示したもの（上）。試験用に割り当てられた「LPWA 試験用」という名称の可搬型モニタリングポストとして表示されている。さらに、拡大すると詳細な設置箇所は原子力環境センター敷地内となっていることがわかる（下）。

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

5.1 背景

放射線モニタリングにおいては、測定機能だけでなく測定データを送るための通信経路の維持も重要である。通信経路の問題は東日本大震災や胆振東部地震においても認知されており、原子力規制庁においても通信経路の多重化の対策が進められていた。多くの場合、通信経路の多重化では地上固定回線、携帯回線、衛星回線が選択肢とされ、これらの組み合わせが整備されている。この選択肢は通信事業者によって維持管理されており、平常時においては安定した稼働が実現している。また、いずれかの回線の機器が点検や故障で機能しない場合も別経路による通信が確保される状態が確立している。

しかしこれは平常時の運用であり、緊急事は状況が変わってくる。能登半島地震では輪島・穴水・七尾地域のモニタリングポスト最大 18 基が欠測となった。その後の調査の結果、欠測となったほとんどのモニタリングポストが正常に機能していた一方、モニタリングポストから通信経路が被災により途絶したためにデータが途絶したことが欠測の理由だということがわかっている。モニタリングポストの多くが携帯回線と固定回線の併用で通信多重化を実現していたが、携帯回線も端末～基地局間は無線であっても、多くの場合基地局から先は NTT 等の地上回線に依存している。そのため地域の停電等が長期化して地上設備が運用できなくなると携帯回線経由の通信も途絶することになる。当然衛星回線が整備されればこのようなトラブルは回避できる。しかし、衛星通信の消費電力は大きく、地上設備の電力が確保できない状況での運用継続には大きな困難が伴う。能登半島地震でも衛星通信に対応した可搬型モニタリングポストを欠測地点に設置してモニタリングが継続された。しかし、可搬型モニタリングポストは 1 基で数十 kg の重量があり、さらにその大半が衛星通信を維持するために必要なバッテリーである。交通網が甚大な被害を受けた輪島・穴水・七尾地域でこのような重量物を輸送して設置するために大きな困難があったことは想像に難くない。

今回のような状況下でもモニタリングを継続するためには、他の通信経路と共通の弱点を持たない別の通信手段がバックアップ回線として提供されること、また既設の通信網の被災の際に迅速かつ機動的に展開できる簡便な手法を確保しておくことが必要である。これまでの委託事業においてメッシュ型 LPWA は迅速かつ機動的に展開できる有力な補完ネットワークとなり得ることを示しており、このネットワークが今回のような事態において活用されることが望ましい。

5.2 実施内容

通信経路の被災時に機動的に展開できると期待されるメッシュ型 LPWA の既設モニタリングポストへの適用可能性を検証した。具体的には、既設のモニタリングポストの行う放射線計測そのもののへ影響を与えることなくそのモニタリングデータを取得する方法の検討、さらにそのデータを LPWA

回線を経由して送出するアダプタの試作とその動作試験を行った。

5.3 モニタリングデータ取得方法の検討

まず大前提として、緊急時に稼働中のモニタリングポストのデータそのものを毀損することは避けなければならない。また、本来の通信回線が復帰した場合は通常の通信形態に戻ることもなるため、放射線計測および主たる通信経路への介入は避けなくてはならない。また既設のモニタリングポストは各社が独自の技術・仕様に基づいて製作しているため、メーカーに関わらず共通のフォーマットやコネクタ形状でのデータの受け取りができるとは考えにくい。特にコネクタの取り合いは緊急時には重大な問題となり得る。東電事故の際もコネクタ不一致が原因で電源ケーブルの接続ができないという問題が発生しているが、現場でコネクタの交換などを行うことは極めて難しい。

一方固定局においては、記録目的のためのデータレコーダが稼働しており、データレコーダ向けに放射線計測で得られた線量率をアナログ電圧に換算したものが出力されている。この電圧出力を読み取る限りは放射線計測や既存の通信回線で送られるデータそのものへの影響はない。アナログ電圧の読み取り自体も、たとえばテスターやオシロスコープでの測定と同様に十分な高インピーダンス入力の AD 変換器を用いれば、記録計への影響を与えることなく実現できる。電圧そのものはモニタリングポストが測定した線量率を換算したものであり、その換算方法は電圧と線量率の関係は開示されており、簡単な換算式で線量率を得ることができる。また、データレコーダ側は一般的に端子台で取り合いをしていることから、コネクタ不一致の問題もなくなる。

以上を考慮し、データレコーダ向けのアナログ電圧出力を読み取って LPWA ネットワークで送出することとした。

5.4 試作した通信アダプタの概要

試作した通信アダプタの構成図を図 15 に示す。基本的には Sony Spresense とメッシュ型 LPWA 通信規格である ZETA を組み合わせたものである。特に ZETA は通信モジュールが Spresense 用 add-on ボードとして提供されており [16]、非常にコンパクトにまとめることができる。アナログ電圧は Spresense の LTE 拡張ボードのアナログ入力端子を利用した。LTE 拡張ボードを利用しているため LTE 経由でもデータ送出は可能であるが、消費電力等の問題から LTE 機能を停止させている。

この通信アダプタの Spresense には 2 つのアナログ入力に対応可能なプログラムが実装されている。1 つは仮数を表す電圧と指数を表す電圧をそれぞれ出力する様式、もう 1 つは線量率の数値をそのまま電圧値として出力する様式である。いずれも島根県で実際に採用されている出力方式である。Spresense は入力電圧を線量率に換算し、その結果を ZETA add-on 経由で送信することになる。

実際に製作したアダプタ試作機の様子を図 16 に示す。アナログ入力は BNC コネクタで受け取ることとし、必要に応じて各種ケーブルや端子を選べるようにした。装置の電源は USB バスパワーで供給されるが、Spresense および ZETA add-on ボードの消費電力が非常に小さいため、通常のモバイルバッテリーでは負荷なしと判定され給電停止となるため注意が必要である。

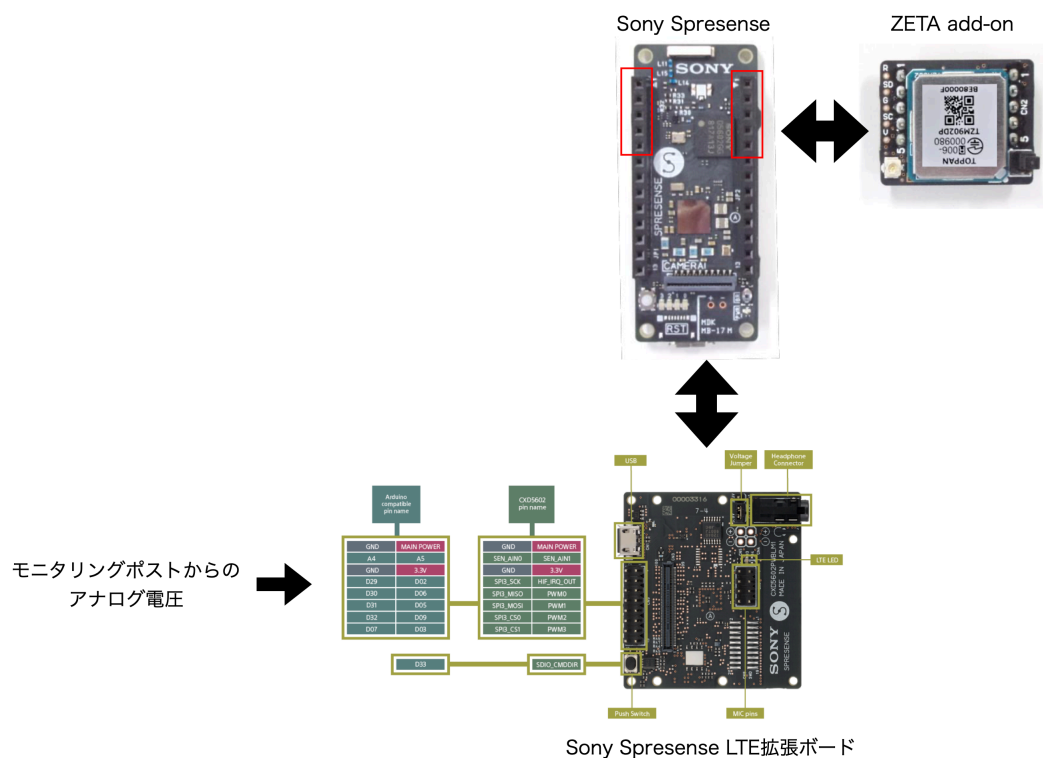


図 15 試作した通信アダプタの構成図。Spresense 本体と LTE 拡張ボードおよび ZETA モジュール間はそれぞれ専用のコネクタで直結されており配線は不要である。

5.5 試作した通信アダプタによる実証試験

実際に製作した通信アダプタ試作機を島根県の西浜佐陀局に接続し、読み取ったデータを ZETA で送信し、RAMIS に公開されている測定値（10 分間隔）と比較する試みを行った。西浜佐陀局においては、記録計向けに出力されるアナログ電圧は、放射線計測部で測定された線量率の nGy/h 単位の数値に対応している。具体的には得られた線量率を nGy/h 単位で指数表記し、その仮数を表す電圧と指数を表す電圧がそれぞれ 0~10 V の直流電圧として連続的に出力している。例えば 0.5 μ Gy/h の場合、仮数を表す電圧として 5.0 V、指数を表す電圧として 10^{-9} (nGy/h) の 10^2 倍としてその指数の 2.0 V が出力される。通信アダプタ試作機はこれを読み取ることになる。

図 17 は実際の接続の様子である。通信アダプタの接続については、記録計の入力端子台に読み出し用の導線を追加し、これにミノムシクリップ-BNC ケーブルを用いて接続した。通信アダプタの取り付け自体はドライバー 1 本で可能であり、かつ原子力防災上の重要設備であるモニタリング機器本体には一切手を加えていない。このため、アダプタの付加にともなう RAMIS に送信されているデータへの影響は一切発生しない。

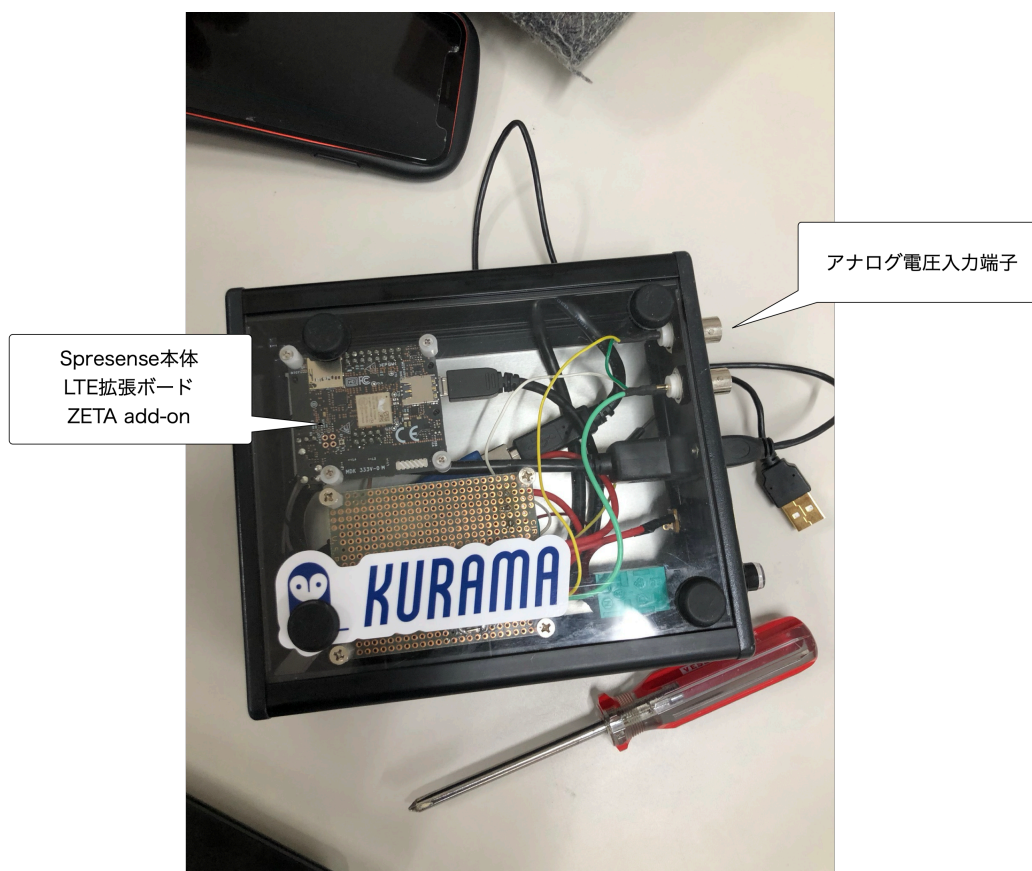


図 16 通信アダプタの試作機。アナログ電圧は BNC コネクタから入力する。電源は USB パス
パワーで供給される。

送信されたデータは島根県原子力環境センターに設置された ZETA AP を経由してサーバに送られた。試験当日の測定結果と RAMIS によって公開されているモニタリングポスト測定値を比較したものを図 18 に示す。RAMIS に公開された測定値は 10 分間の平均値であり、通信アダプタ試作機は RAMIS の測定値の間隔より十分短い 11 秒サンプリングを行っているが、通信アダプタ試作機が測定した 11 秒ごとの値は前後の RAMIS で公開されている測定値と矛盾しない。また、通信アダプタ試作機側のサンプリングに伴う値のずれは RAMIS の測定値の間隔程度の時間平均をとることで十分無視でき、かつ得られた平均値は前後の RAMIS に公開された測定値とよく一致している。

5.6 まとめ

このようなアダプタは構成的にも非常に単純であり、信頼性の高い安価なモジュール等を組み合わせることで容易に製造可能である。これは放射線そのものを計測して線量率に換算しているのではなく、モニタリングポストの放射線計測部が確定させた値に基づく直流電圧を取得しているためである

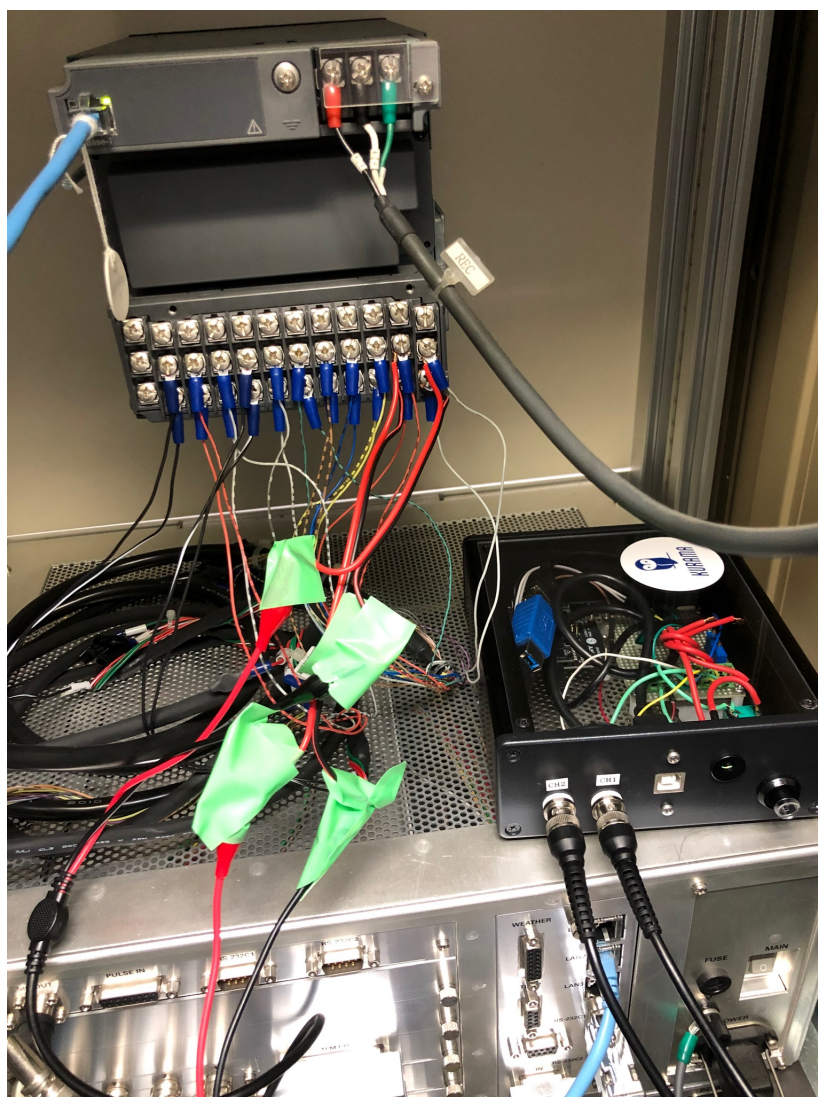


図 17 西浜佐陀局に取り付けられた通信アダプタの試作機。記録計の入力端子台に短い導線を取り付け、それをミノムシクリップ-BNC ケーブルと接続して試作機と接続した。

こと、直流アナログ電圧を読み取るというシンプルな手法であり、ノイズ耐性の低い機器や部品を使う必要がないためである。放射線計測に無関係の部分への接続となるため、各社が独自仕様で設計している重要な放射線計測装置の動作に与える影響もないことから、緊急時においても安全に取り付け作業が可能となる。

なお、今回は Spresense の add-on として提供されている ZETA を活用したが、他の通信手段への対応も可能である。例えば LTE 通信への対応は、今回アナログ電圧読み取り用インターフェースとして使用している LTE 拡張ボードの通信機能を活用して読み取りデータを送信するように設定変更

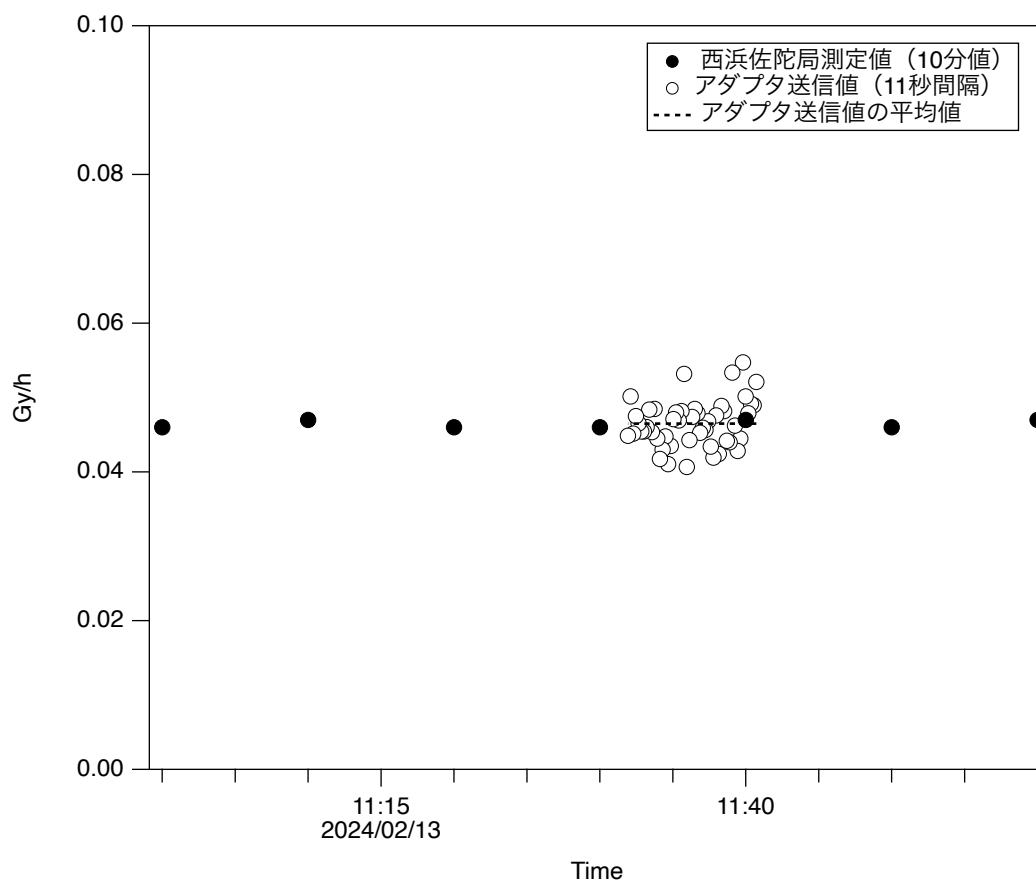


図 18 RAMIS で公開されている西浜佐陀局の線量率測定値と通信アダプタ試作機がサーバに送った線量率の値、およびこの試験中に送られてきた通信アダプタ試作機からの値の時間平均値。RAMIS は 10 分間の平均値、通信アダプタ試作機の測定周期は 11 秒ごとのアナログ値を取得したもの。

すれば良い。Spresense の add-on には他の LPWA 規格や Wi-Fi、Bluetooth、Ethernet ほかの通信インターフェースが安価に提供されている。これらを活用して各種通信規格に対応した通信アダプタを製作することは容易である。

交通網が寸断されるような甚大な被害が発生している場合、そもそも可搬型モニタリングポストのような重量物運搬が困難な状況に陥ることが想定される。このような安価な通信アダプタを固定局に各種用意することで、資機材の運搬を伴わない形で現地入りして健全性を確認し、その時点で有効な通信手段のアダプタを選択することで迅速な通信の回復が期待できる。

6 LPWA の現実の利用状況と実環境下での通信試験

6.1 背景

これまでの委託事業での研究により、簡便かつ機動的な展開の可能なメッシュ型 LPWA によるモニタリングネットワーク構築の有効性が明らかになっている。その一方で現実の環境では各種 LPWA 規格が活用されており、これらと同じ周波数帯を使うことによる混信や輻輳といった問題が発生することが想定される。

そこで、複数の LPWA 規格や利用者が共存するような現実環境の典型的な周波数利用状況を調査して LPWA 通信への影響を評価するための基礎情報を収集するとともに、典型的な環境下での通信試験を行い、影響を評価することとした。

6.2 実施内容

通信規格として既設モニタリングポスト間を結ぶのに適していると考えられる LPWA 規格である ZETA を想定し、ZETA による通信への影響を推定するために必要な 920 MHz 帯の周波数利用状況等を調査した。モデル地域として「都心部」「住宅地」「モニタリングポスト設置地域」「同一規格の普及地域」の 4 つの地域を選定し、それぞれについて 920 MHz 帯および ZETA の使用する周波数帯における電波利用状況調査を行った。またこれらの結果を踏まえて ZETA における通信試験を行った。

6.3 電波利用状況調査

6.3.1 調査方法

後述する各地点において、スペクトラムアナライザを用い、920.500MHz～928.100MHz（以下 920MHz ①）と ZETA が汎用する周波数帯である 920.700MHz～922.500MHz（920MHz 帯②）を対象として、それぞれ 5 分間隔で 5 回測定を実施した。これは LPWA の中でも公衆網での使用実績がある Sigfox[18] の利用状況の検知を想定している。使用機材を用いて取得したデータは測定時間中の周波数帯のピーク最大値を記録し、USB メモリを用いて静止画データ（png 方式）として保存した。調査地域として東京都心部および多摩地区・神奈川県横須賀市・静岡県袋井市を設定した。東京都内は典型的な人口密集地・商業地・郊外住宅区域・郊外商業地として、横須賀市は原子力艦停泊地点としてモニタリングポストの設置されている地域として、静岡県袋井市は ZETA の通信機器が地域で多数運用されている同一規格の競合する地域として選定した。

6.3.2 結果：東京都心部

駅や繁華街が多いこともあり、920MHz ①では総じて多くのノイズの発生が認められた（図 19）。920MHz 帯②については ZETA 機器の設置が明らかである地区においては ZETA 由来と思われる電波の発信も認められた。また全体的にノイズレベルも - 90dbm に達する地域地域もあり、全般的に

電波の発信頻度が高いと考えられる（図 20）。

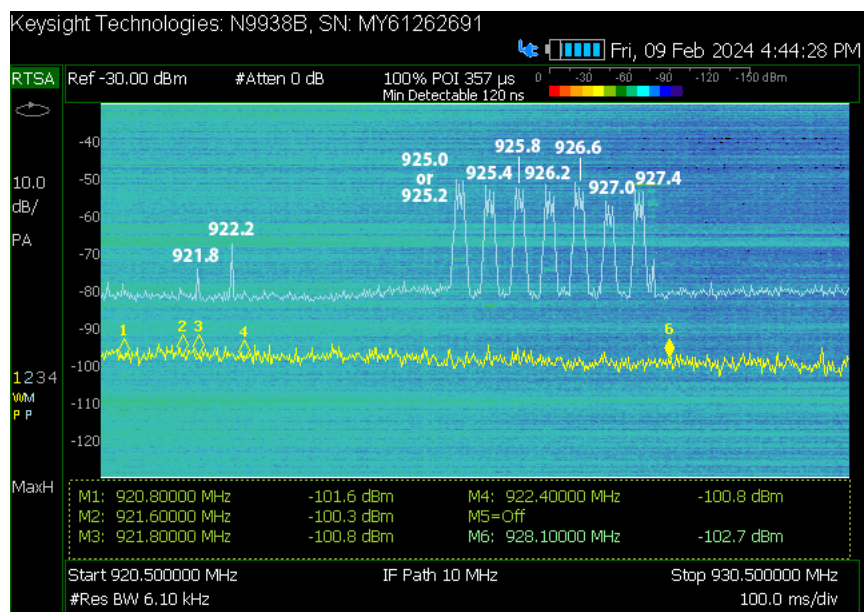


図 19 都心部の 920 MHz 帯①の周波数スペクトルの状況。高いノイズレベルが観測された。

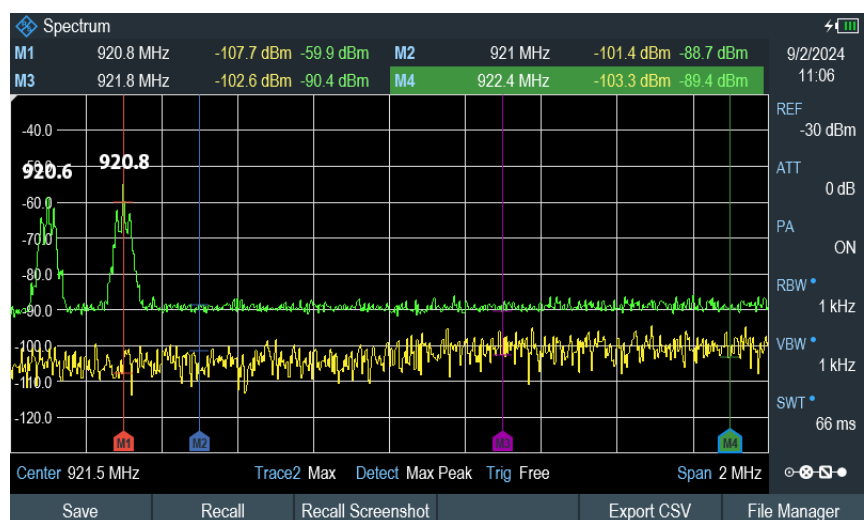


図 20 都心部の 920 MHz 帯②の周波数スペクトルの状況。高い発信頻度や高いノイズレベルが観測された。