

令和6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

2025年3月12日

目次

1	概要	3
2	研究目標	5
3	無人航空機への搭載を想定した環境放射線モニタリング機器の試作	6
3.1	背景	6
3.2	試作した機器のあらまし	6
3.3	GNSS add-on の評価	12
3.4	消費電力の評価	15
3.5	高線量率に対応した検出器の検証	16
3.6	考察とまとめ	18
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	21
4.1	背景	21
4.2	実施内容	21
4.3	大阪府熊取町における試験	21
4.4	福島県大熊町における試験	41
4.5	島根県松江市における試験	63
4.6	試験結果についての考察	64
5	線量評価に使用する計算法の検証及び課題の抽出	68
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	68
5.2	G(E) 関数作成プログラムの近代化	68
6	今回の事業のまとめ	70
7	謝辞	71

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（うち 1 台は環境放射能水準調査用ポストで防護措置には用いられないことになっている）が欠測となる事態となった。またこの欠測状態が完全に回復するまでに 1 ヶ月程度かかることとなった。

その後の調査により、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判明した。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が問題である。さらに、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にも課題があった。欠測の状況が判明してからの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、重量的に自動車による運搬となる衛星通信対応可搬型モニタリングポストを人力で運搬せざるを得ない状況が多発して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 週間以内に原子炉の過酷事象が発生している。そのため、災害発生時のモニタリング機能の実質的な維持には、被災箇所の回復や代替手段がいかに速やかに展開できるかが重要である。このことは関係者に強く認識されているものの、そのためにとりえる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、原子力規制庁の委託研究では、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た。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）の検討を行ってきており、これらの実用化が強く求められている。

そこで本事業では、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の能力を向上させるとともに、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検証を行った。併せて放射線モニタリングで必要となる線量評価に関する課題抽出や、線量評価で使われる $G(E)$ 関数の導出プログラムの近代化を行なった。

2 研究目標

本事業では、無人航空機等へ搭載する機器として、小型軽量であるヨウ化セシウム (CsI) と MPPC を用いるシンチレーション検出器及び低消費電力かつ長距離通信が可能となる無線通信技術 (LPWA, Low Power Wide Area) を組み合わせた環境放射線モニタリング機器の実現可能性を検証を行うため、以下の内容について取り組む。

1. 無人航空機への搭載を想定した環境放射線モニタリング機器の試作
 - 測位能力の向上を含めた機能向上
 - 高線量率に対応した検出器の検証
2. LPWA によるモニタリングネットワークの構築
 - 10 台程度のモニタリング機器を用いたモニタリング機器の展開及び通信の試験
 - LPWA によるモニタリングネットワーク設計に関する検証
3. 線量評価に使用する計算法の検証及び課題の抽出
 - 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
 - G(E) 関数作成プログラムの近代化

3 無人航空機への搭載を想定し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、走行サーベイスシステムである KURAMA-II をはじめ、各種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。過去の規制庁事業においても、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] をベースとして、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適用可能な検出器の開発を行っており、すでに浜松ホトニクス社の製品として実用化されている。

また、このように実用化が進む 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を有効に活用するには、これらの検出器と組み合わせて使用可能な小型軽量の放射線計測システムも必要である。特に原子力規制庁では、能登半島地震のように複雑な地形かつ交通網が寸断された場合のモニタリング機器展開において、ドローンに搭載した超小型モニタリングデバイスの展開も想定している。このような場合、ドローンの限られたペイロードの中でバッテリーや検出器の効率も考慮したモニタリング機器を用意する必要がある。

そこで、これまでの原子力規制庁事業において開発を進めてきた、C12137 シリーズの検出器を差し替えて利用可能な超小型 KURAMA-II の機能向上に取り組んだ。このシステムはすでに令和 5 年度の国の総合防災訓練でドローンに搭載して実際に使用されてその有用性が確認されているものの、一連の開発や運用の中で現状の GNSS 機能では測位能力が不十分であると思われる場合が確認されている。そこで、超小型 KURAMA-II に外付け GNSS を採用することとして測位能力の向上を試みた。また、GNSS が活用できない場所での測定も可能とするための測位技術として慣性航法装置の導入を検討をしていたところ、廉価で小型であるにもかかわらず、従来の航空機などに搭載される 100 万円クラスの慣性航法装置に遜色ない能力を持つ IMU (Inertial Measurement Unit) が Sony から供給されるという発表があった [2]。本事業においてこの IMU の超小型 KURAMA-II への搭載と検証を試みる予定であったが、実際に発売されたのが 2025 年 2 月 28 日であったため搭載と検証は断念した。

3.2 試作した機器のあらまし

今回の試作機器の構成概要を図 1 に示す。主要部分は昨年度の規制庁事業で開発したものと同一の Spresense[3] ベースの超小型 KURAMA-II であり、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、放射線計測データを取得する。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。Spresense ベースの超小型 KURAMA-II のスペックを表 1 にまとめる。

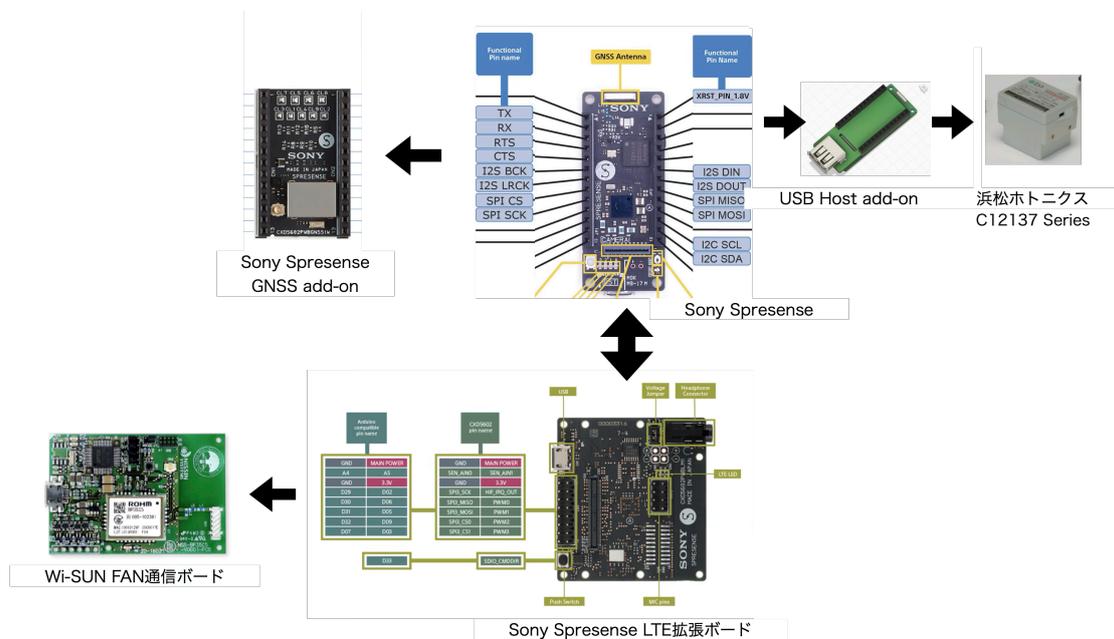


図 1 今回試作する Spresense を用いた Wi-SUN FAN 対応放射線計測システムの構成。GNSS add-on は Spresense メインボードの add-on 用拡張端子経由で接続しており、同じく add-on 用拡張端子で接続されている USB Host Controller add-on の上に重ねて装着する。LTE 通信では LTE 拡張ボードの LTE Cat. M 通信機能を使用する。Wi-SUN FAN 使用の際は LTE 拡張ボードの LTE Cat. M 通信機能を起動させず、LTE 拡張ボードの DI/O に外部の汎用 Wi-SUN FAN 基板を接続している。

表 1 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)

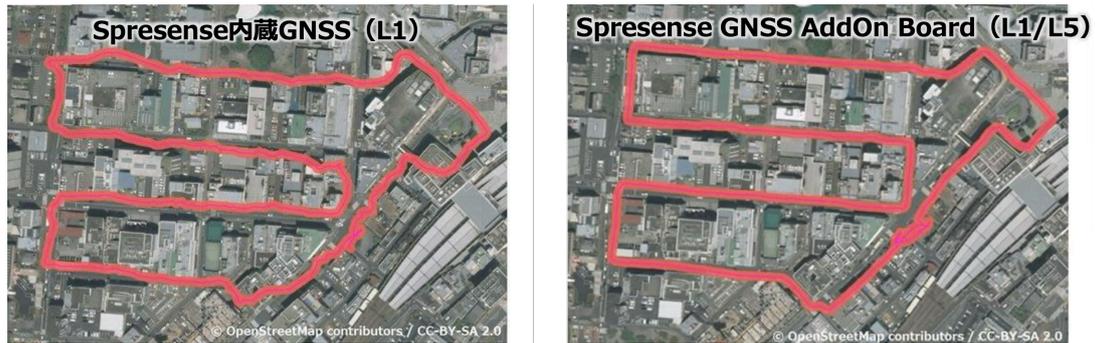


図2 Sony からのプレスリリース資料に掲載されている従来の内蔵 GNSS との比較。一般にマルチパスなどで測位が乱れやすい市街地においても、従来の内蔵 GNSS（左側）に比べ GNSS add-on（右側）の方が安定した測位を実現していることがわかる。

今回は測位能力の向上のため Sony の Spresense 純正 add-on ボードである GNSS add-on[4] を装着している。この GNSS add-on は、L1 帯 (1575.42MHz) に加え、L5 帯 (1176.45MHz) の信号受信にも対応したデュアルバンド測位が可能で、適合した外部アクティブアンテナを使用することで高い感度と安定した測位を実現している。この GNSS add-on が対応した L5 帯信号では、GNSS 衛星と受信機の距離測定に使用する信号の単位が従来の L1 帯信号に比べ 10 倍細かくなっており、測位精度の向上が期待できる。また衛星からの送信電力も増加されているので測位の安定性の向上も期待できる (図 2)。この GNSS add-on 及び使用したアクティブアンテナのスペックをそれぞれ表 2、3 に示す。

今年度主に GNSS add-on 検証のために実際に試作した Spresense ベースの超小型 KURAMA-II の外観を図 3 に示す。昨年度の事業で開発した LTE 拡張ボード上の Spresense 本体のもつ add-on 用拡張ポートに USB Host コントローラ搭載 add-on が接続されたものに、今回新たに評価のための GNSS add-on 評価用が追加された。そのほかの機器構成は昨年度のものとは変わらない。なお、GNSS add-on と USB Host コントローラ搭載 add-on は add-on 用拡張ポートを共有しており、それぞれの使用する端子が競合することのないように USB Host コントローラ側の修正が行われている。

表 2 GNSS add-on のスペック [4]

型名	CXD5602PWBGNSS1W
サイズ	33.0 mm x 20.6 mm
対応周波数	L1/L5
IO 電圧	DC 1.8V
アンテナ	外部アンテナ
アンテナコネクタ	U.FL
制御インターフェース	I2C:2pin, 割り込み:1pin
GNSS 受信 LSI	CXD5610GF
測位衛星システム	GPS(L1C/A,L5), GLONASS(L1OF), BeiDou(B1I,B1C,B2a), Galileo(E1 CBOC,E5a), QZSS(L1C/A,L1S,L5), SBAS(L1),NavIC(L5)
GNSS 受信感度	コールドスタート時:-149dBm ホットスタート時:-165dBm トラッキング時:-167dBm
初期位置算出時間	コールドスタート時：約 24 秒 ホットスタート時：約 1 秒 (オープンスカイ時。受信環境によって大きく変化)



図 3 今回試作した GNSS add-on 搭載超小型 KURAMA-II。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 がスタックされた本体部分に、さらに今年度追加となった GNSS add-on 基板がスタックされている。