

令和元年度  
原子力規制庁 放射線対策委託費  
(放射線安全規制研究戦略的推進事業費)

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

研究代表者：京都大学 谷垣 実

2020年3月16日

## 目次

1	概要	1
2	背景	2
3	研究目標	5
3.1	研究の内容	5
3.2	想定される活用・従来のモニタリング機器との関係	5
4	研究体制と遂行状況	8
4.1	実施体制	8
4.2	研究の年次計画	8
4.3	研究実施状況	9
4.4	研究成果の公表	10
5	可搬型モニタリングポスト	11
5.1	可搬型モニタリングポストのあらまし	11
5.1.1	全体の構成	11
5.1.2	放射線検出器	13
5.2	可搬型モニタリングポストの実証試験	15
5.2.1	富岡町圃場内での試験	15
5.2.2	楡葉町内での試験	18
5.3	まとめと次年度の目標	20
6	自律型データネットワークの構築技術の開発	21
6.1	ネットワーク技術の動向	21
6.2	主な LPWA 規格	22
6.3	ZETA 規格のあらまし	25
6.4	ZETA の実証試験	25
6.4.1	都市部におけるエリア展開	25
6.4.2	既設モニタリングネットワークの補完	28
6.4.3	考察	35
7	超小型 KURAMA-II	36
7.1	超小型 KURAMA-II の設計方針	36
7.2	超小型 KURAMA-II 用検出器の開発	38
7.3	超小型 KURAMA-II での放射線計測用アルゴリズムの開発	40
8	本年度の事業のまとめ	44

## 1 概要

大規模原子力災害時においては、ヨウ素 131 のような短寿命核種を含む放射性物質による広域汚染と多数の汚染・傷病者が発生する。そのため、発災直後から迅速かつ面的なモニタリングを実現し、汚染等の分布状況に基づいたより優先度の高い集団や地域から防護措置や被曝医療のリソースを投入する必要があるが、重すぎて人による携行ができず、また特殊な電源規格により事実上商用電源なしには継続稼働が困難な可搬型モニタリングポストや、線量率の計測のみで短寿命核種の情報を取得できないサーバイメータをはじめとする従来のモニタリング資機材ではその実現は困難である。

そこで、東電福島第一原子力発電所事故で実績ある KURAMA-II の技術を活用し、小型軽量で人が携行でき連続稼働時間が長くスペクトルデータの取得可能な可搬モニタリングポスト、シングルボードコンピュータベースのモバイルバッテリーで動作する超小型 KURAMA-II を開発する。同時に IoT 分野の活用と相まって技術進展の著しい LPWA (Low Power Wide Area network) による自律的に構成されるメッシュネットワークを活用したデータ通信を活用し、この研究で開発したモニタリングポストや超小型 KURAMA-II と組み合わせることで、大規模災害時の面的なモニタリング展開の困難の一つである通信手段の確保の問題の解決を図る。さらに、実環境や校正施設を活用してこれらの技術要素の特性を評価し、それらを踏まえて災害時の面的なモニタリングのあり方に関する検討を行う。また、超小型 KURAMA-II については、その製作方法やソフトウェアのオープンソース化を試み、国民の原子力防災への関心や理解を深めることを目指す。

本研究の成果を活用することで、発災直後から迅速かつ容易に面的なモニタリングを展開することが可能となり、防護措置や被曝医療のリソース投入が最適化されるようになり、国民の安全と安心に大きく貢献することができる。

## 2 背景

東電福島第一原子力発電所事故のような大規模災害では放射性物質による広域の汚染と大量の汚染・傷病者が発生し、過酷な環境下で限られた人や資機材により状況を把握し必要な防護措置や被ばく医療処置をとる困難な状況となる [1]。特にヨウ素 131 等の短寿命核種を考えれば、発災後 10 日間程度の間優先度を判断しながら迅速かつ適切な防護措置や被ばく医療処置が必要で、その判断基準として面的な汚染状況等の分布把握は必須である。

これまでもその重要性は認識されており、緊急時環境線量情報予測システム (SPEEDI)[2] で、放射性物質の環境中への放出量及び事故の起きた施設周辺の気象観測データから大気中での放射性物質の拡散挙動を計算し、放射性物質の空気中濃度及び人の被曝線量が予測されることとなっていた。また、予め最適化された定点観測のための固定式モニタリングポスト、機動的な展開を目的とした可搬型モニタリングポストやモニタリングカー、サーベイメータ等の整備が進められ、SPEEDI の予測の確認や実際の状況とのズレがあった場合の把握や必要な修正を行うことで、的確かつ信頼性の高い放射性物質の空気中濃度及び人の被曝線量の分布状況が提供されることとなっていた。この時の各種測定器は堅牢性や信頼性を確保するべく入念に検討・用意され、電源の多重化や地上回線および衛星回線で多重化されたネットワークで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。

この結果、電力や通信、交通のインフラに甚大な被害が発生した東電福島第一原子力発電所事故では、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つた。たとえば、事故直後におけるヨウ素 131 他の短寿命核種等の分布については、事故直後からのデータを基に放出方向や量の評価が報告されている [3] が、地域における詳細な分布については 2011 年 6 月の文科省が実施した調査を待つ必要があり [4]、この測定機会の損失で住民の甲状腺被曝量の推定などに大きな禍根を残すこととなった。

東電福島第一原子力発電所事故での反省を踏まえ、2014 年には緊急時においても積極的なモニタリング活動を展開して実測データを収集して対応を進める方針が示され [5]、緊急時には可搬型モニタリングポスト、モニタリングカー、サーベイメータなどが機動的に展開されることとなっている (図 1)。そのため、これらのモニタリング機器やその運用の方法が重要な課題となっている。

しかしながら、2019 年の北海道胆振東部地震において発生した北海道全域の停電 [6] では、固定モニタリングポスト 11 局が停電後無停電電源により測定を継続したものの 3～4 時間で測定を停止した [7]。またこの地震による停電は単なる電力喪失だけでなく、地上固定回線の交換局や携帯回線の基地局の非常用電源の枯渇も発生させており、道内の一部の地域ではネットワークの喪失が実際に発生した。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。

このような問題がある背景には、従来の可搬型モニタリングポストは高価であり重量が大きく運搬が困難であること、また特殊なバッテリーを装備していて事実上商用電源前提の運用となってしまうと迅速で機動的な運用ができないこと、モニタリングポストに装備される通信回線は通常固定回線か携帯回線単独で多重化が進んでいないこと、また多重化されている場合でもバックアップ回線は衛星回線であり、通信確立のための設置条件がシビアであり、加えて衛星の回線容量による他の緊急通信との輻輳という問題がある。さらに規制事務所のサーベイメータ等の資機材は空間線量率測定に最適化されており、ヨウ素 131 のような短寿命核種情報をリアルタイムに収集することができないことが挙げられる (図 2)。



図1 既存のモニタリング機器の位置付け。発災時には可搬型モニタリングポスト、モニタリングカー、サーベイメータが機動的に展開されることになっている。

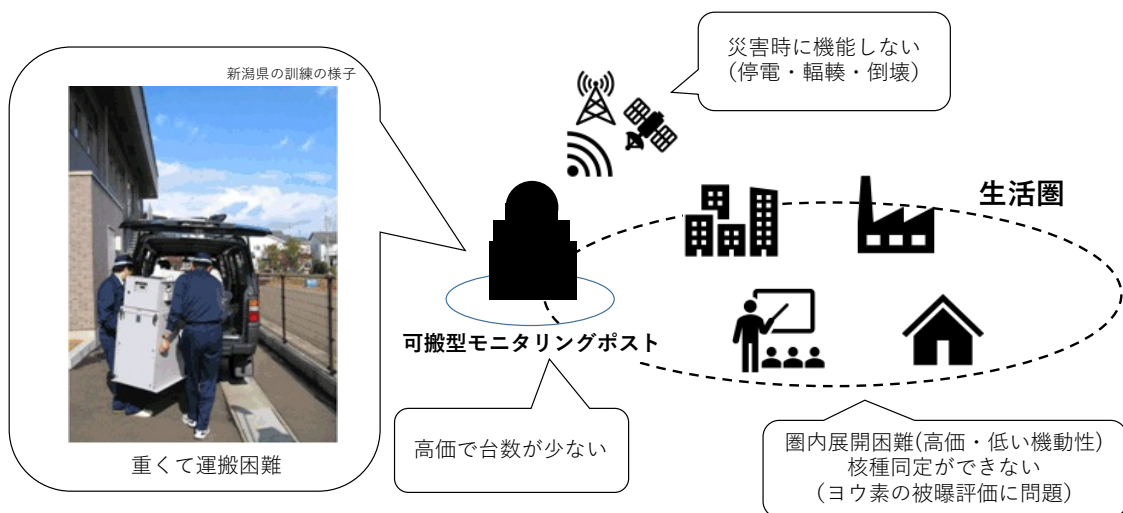


図2 既存のモニタリング体制の問題点

京都大学複合原子力科学研究所では、東電福島第一原子力発電所事故以降 GPS 運動型放射線自動計測システム KURAMA[8] とその発展系である KURAMA-II[9] を開発している。この KURAMA/KURAMA-II は操作のほとんど不要な端末を自動車等に搭載して対象地域に大規模に展開し、これらからのデータをクラウド経由でリアルタイムに収集するシステムで、東電福島第一原子力発電所の事故における機動的かつ柔軟な面的モニタリングの実現を目指したものである。特に KURAMA-II は、完全自動測定や CsI(Tl) 検出器によるスペクトルデータの取得も実現し、2011 年 6 月以降現在まで福島県を中心とする東日本一帯における大規模な走行サーベイ調査や福島県内の路線バスによる連続的な生活圏モニタリングなどで多数の調査活動での実績を通じ、その能力と信頼性が高く評価されているシステムである。

この KURAMA-II の能力は現在の発災直後のモニタリングの枠組みの欠点を補うものであり、KURAMA-II の様々な成果や知見を元に発災直後のモニタリング機器や手法を開発することで、緊急時のモニタリング活

動の質を向上し防護措置や被曝医療のリソースの的確な投入が実現できると考えられる。

## 3 研究目標

### 3.1 研究の内容

東電福島第一原子力発電所事故のような大規模原子力災害時における防護措置や被曝医療のリソースの投入と対応には、詳細かつ面的な放射線モニタリングの結果に基づく確かな判断が必要となる。そこで、想定外事象下でも迅速かつ面的に展開でき、線量率やヨウ素 131 のような短寿命核種に関する詳細なモニタリングが可能な体制を実現するべく、以下のようなモニタリング技術開発に取り組む（図 3）。

#### 人が携行可能な可搬モニタリングポストの開発

東電福島第一原子力発電所の事故後のモニタリング活動で高い信頼性と実績を誇る KURAMA-II をベースに、人が携行可能な小型軽量で 10 日間程度稼働でき、線量率だけでなくスペクトルデータの取得も可能な可搬モニタリングポストを開発し、その性能評価を行うとともに運用方法についての検討を行う。

#### 自律型データネットワークの構築技術の開発

近年技術革新の著しい LPWA(Low Power Wide Area Network) 技術の動向について調査し、緊急時のモニタリングポスト等を結ぶために利用可能な LPWA 規格の有力候補を選定し、実証試験を行って運用方法について検討するとともに、可搬型モニタリングポストや超小型 KURAMA への実装を行う。

#### 超小型 KURAMA-II の開発

緊急時の機動性や面密度の確保を極限まで追求した、低消費電力・手のひらサイズかつ線量率およびスペクトルデータの取得も可能で、従来のサーベイメータ等に比べて十分安価な超小型 KURAMA-II を開発する。近年の IoT 技術の進展により低価格で高性能なシングルボードコンピュータが数多く登場していることから、既存の KURAMA-II の成果をこのようなシングルボードコンピュータに移植する。同時に従来の KURAMA-II で採用する CsI 検出器と同等の放射線計測特性を持ちつつもシングルボードに最適化することでコストを抑えた CsI 検出器を開発して実装し、上の自律型ネットワーク等と組み合わせる。超小型 KURAMA-II のソフトウェアなどはオープンソース化を検討して、可能な範囲で広く公開して国民に活用してもらうことを目指す。

### 3.2 想定される活用・従来のモニタリング機器との関係

従来整備されてきたモニタリング機器は、機動性や電源や通信が喪失した際のデータ収集の継続性等について問題があるものの、機器自体の堅牢性や信頼性は高い。今回の研究で開発される各技術により従来のモニタリング機器を完全に置き換えるのではなく、従来の可搬型モニタリングポスト等と協調しながら機動性や測定地点数などを補い、活動に大きな制約が発生する緊急時においても迅速かつ面的にきめ細かな線量率やスペクトルデータの収集を実現する。このようにして測定機会の損失を最小限に食い止めつつ、この後に計画される本格的なモニタリング活動までのリードタイムを確保することができる（図 4）。

原子力災害で特に重要な発災直後における放射線モニタリングについて、従来のモニタリングの枠組みを補完する技術や手法が提供され、特に短寿命核種等の測定機会の損失を最小限に食い止めることができる。例えば周辺住民のヨウ素被曝量については、発災直後の迅速かつ面的なモニタリングが必須であり、東電事故でも禍根の残るところとなっている。今回整備する可搬型モニタリングポスト型と超小型の KURAMA-II のスペ

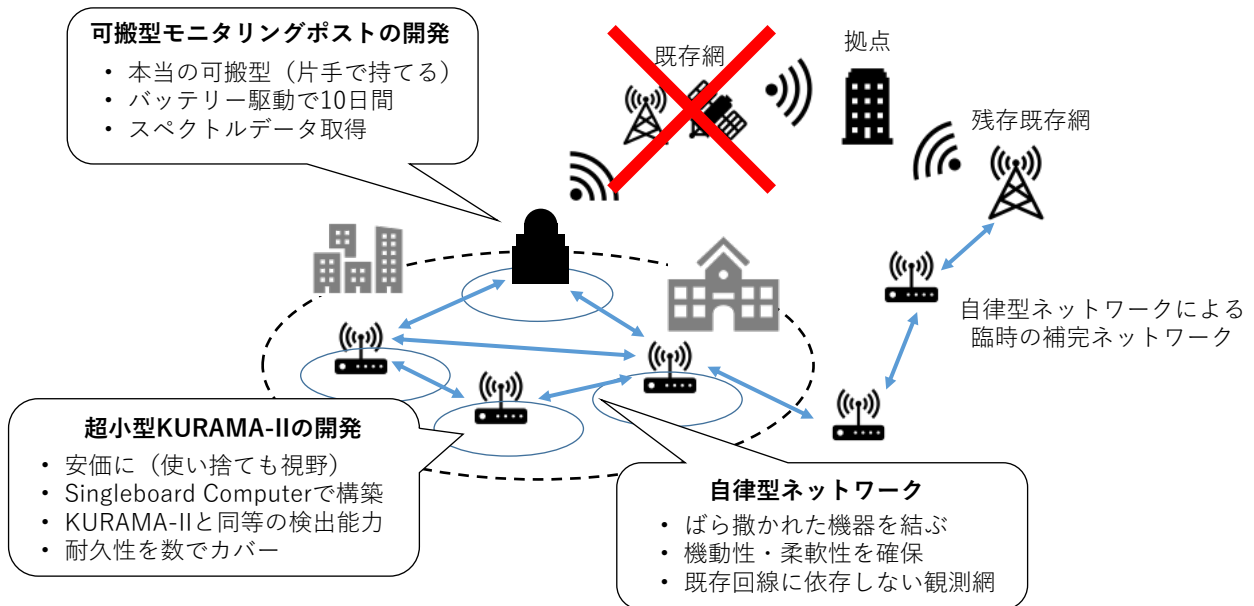


図3 今回の研究目標。KURAMA-IIの開発成果をもとに、緊急時にも容易に展開できる高い機動性を持ったモニタリング機器とそれらを結ぶ高い柔軟性を持った自律型ネットワークを開発する。

クトルデータの収集機能は、従来の可搬型モニタリングポストやサーベイメータでは得られなかった放出各種に関する情報を与えるものであり、信頼性は高いものの面的な展開の困難な試料サンプリングによる精密測定を補完し、対象地域内の事故由来放射性核種の分布状況や住民の被曝状況の把握の上で有効なツールとなるものである。

低廉な超小型 KURAMA-II は放射線教育の教材としても有効と考えられる。そこで、製作方法や使用方法をオープンソース化し、放射線教育の教材や教育方法の研究など国民の放射線やモニタリング活動への関心や

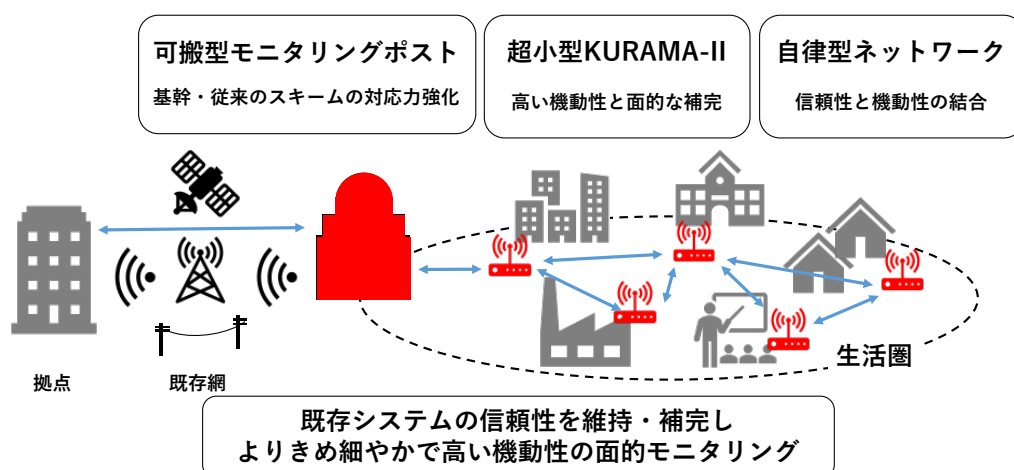


図4 今回の研究成果と従来のモニタリングの関係。既存のモニタリング体制の持つ問題点や弱点を補完するとともに、緊急時におけるモニタリングの選択肢を広げるものである。



理解を深め、公的機関の実施するモニタリング活動の妥当性や合理性への理解や信頼の醸成に役立てる。

## 4 研究体制と遂行状況

### 4.1 実施体制

令和元年度の研究実施体制は谷垣実（京都大学・助教）のもと、以下の研究協力者と研究参加者によって実施された（表 1, 2, 図 5）。研究協力者と研究参加者はこれまで KURAMA-II 関連の研究開発に従事してきた実績のある者から構成されている。

表 1 研究協力者

氏名	参加内容	所属機関及び現在の専門	所属機関での職名
花井浩之	ワンボードコンピュータプログラミング ネットワークやクラウド構築・維持管理 コンピュータプログラミング	株式会社 S2 ファクトリー	代表取締役
松浦隆弘	可搬型モニタリングポスト他の 試作機的设计・製作	株式会社松浦電弘社	代表取締役社長

表 2 研究参加者

氏名	参加内容	所属機関及び現在の専門	所属機関での職名
奥村良	各種試作機の開発・調整および現地試験補助	京都大学 複合原子力科学研究所	技術職員
吉永尚生	各種試作機の開発・調整および現地試験補助	京都大学 複合原子力科学研究所	技術職員
吉野泰史	各種試作機の開発・調整および現地試験補助	京都大学 複合原子力科学研究所	技術職員

### 4.2 研究の年次計画

本研究は 2 カ年計画で取り組む。まず初年度は可搬型モニタリングポストおよび超小型 KURAMA-II の設計・製作を中心に進め、製作が完了次第それぞれの実証試験を順次開始する。自律型ネットワーク技術については、初年度に通信技術の動向調査を実施し、有力な通信規格を選定の上実証試験の開始を目指す。2 年目は実証試験を実施しながら、2 年目の第三四半期を目処に可搬型モニタリングポストと超小型 KURAMA-II と自律型ネットワーク技術を統合しての試験を実施する。

これらの開発に付随して、超小型 KURAMA-II のために最適化された安価な CsI 検出機の開発を進める。また、超小型 KURAMA-II のソフトウェアについてオープンソース化の検討を行い、可能な範囲で開発成果を開示し、環境放射線や放射線計測に関する一般国民の関心や理解の向上を目指す。

### 4.3 研究実施状況

原子力規制庁のプログラムオフィサー (PO) およびプログラムオフィサー補佐 (PO 補佐) へ適時 (概ね1～2ヶ月に1回) にメールでの報告を行った。また、研究開始時の6月と12月に PO および PO 補佐と面談し、研究計画着手や年度内成果の取りまとめに関する指導と助言を受けた。

研究代表者の所属する京都大学複合原子力科学研究所でも、12月に所長による研究進捗状況の確認が行われた。また研究所の財務掛および契約管理掛とも緊密に連絡を取り、経費の執行状況の確認と執行方法や調達した物品等の管理、事務手続きに関する確認や指導を受けた。研究代表者の所属する研究室においても、所属研究室の教授が研究進捗状況や研究費の執行状況を把握しており、必要な指導や助言を受けた。

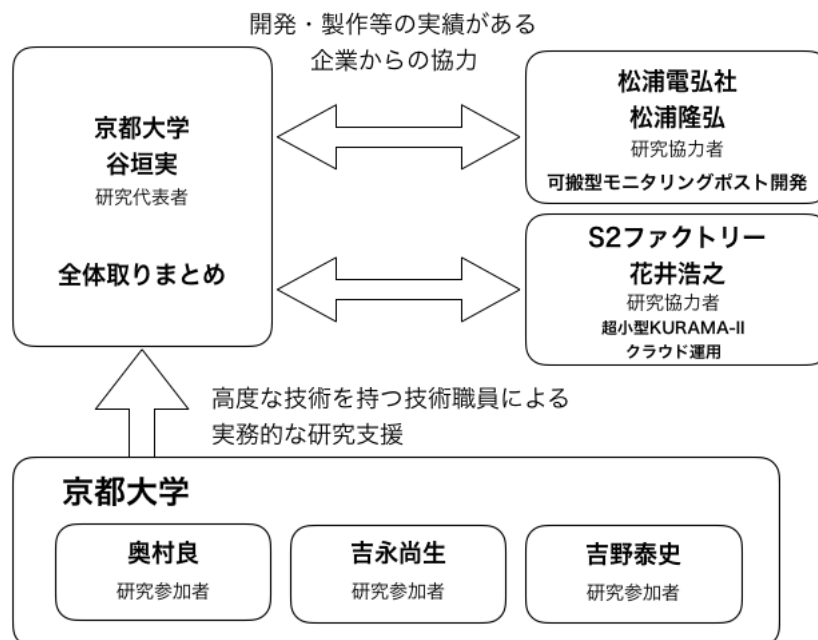


図5 研究体制図

実施項目	担当者* (所属機関)	令和元年度				令和2年度				
		第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	
目標：KURAMA-II をベースにした小型軽量なモニタリング機器の開発と災害時の運用方法の確立										
自律型可搬モニタリングポストの開発	谷垣実 (京都大学) 松浦隆弘 (松浦電弘社)	基本設計		製作		現地試験 (季節ごとに2週間程度) および各種特性試験				
						現地試験・特性試験に基づく不具合修正・最適化作業				
自律型ネットワークの構築技術の研究	谷垣実 (京都大学) 奥村良 (京都大学)	実施体制構築		各種通信規格の調査		試験用端末試作		ネットワーク単独試験		モニタリングポスト等との組み合わせ試験
超小型 KURAMA-II の開発	谷垣実 (京都大学) 花井浩之 (S2ファクトリー) 奥村良 (京都大学)	実施体制構築		KURAMA-II ソフトウェア移植作業				超小型 KURAMA-II 単体試験		ネットワークとの組み合わせ試験
						簡素で廉価な CsI 検出器の試作				
上記開発研究に使用する関連計測技術の調査、研究開発における成果発表および取りまとめ	谷垣実 (京都大学)	ICALEPCS2019 に参加し、計測制御技術の調査及び進捗状況発表				PCaPAC2020 で計測制御技術の調査及び進捗状況発表				
						超小型 KURAMA-II の製作方法やソフトウェアのオープンソース化				
						結果取りまとめ 論文執筆				

図 6 研究の年次計画

#### 4.4 研究成果の公表

本年度の研究成果については、随時国内外の学会等での発表を行なった。国際会議が 1 件、国内学会・研究会が 2 件、一般向け講演が 1 件である。

##### 国際会議での発表

M. Tanigaki, “Current Status of KURAMA-II”, to be published on the proceedings of The 17th Biennial International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS 2019), New York, United States, 5-11 Oct. 2019.

##### 学会発表

谷垣 実, “福島における放射性物質分布調査 (2) KURAMA-II の展開と開発の現状と今後”, 日本原子力学会 2019 年秋の大会, 富山大学, 2019 年 9 月 11-13 日

##### 一般向け講演

谷垣 実, “福島を見守る「目」～GPS 連動型放射線自動計測システム KURAMA について～”, アトムサイエンスフェア講演会, 熊取交流センター, 大阪府熊取町, 2019 年 10 月 19 日

##### 研究会講演

谷垣 実, “KURAMA の現状”, 第 7 回 原発事故被災地域における放射線量マッピングシステムの技術開発・運用とデータ解析に関する研究会及び第 416 回生存圏研究所シンポジウム「第 9 回東日本大震災以降の福島県の現状及び支援の取り組みについて」(合同開催), 京都アカデミアフォーラム, 東京都千代田区, 2019 年 12 月 11-12 日

## 5 可搬型モニタリングポスト

### 5.1 可搬型モニタリングポストのあらまし

#### 5.1.1 全体の構成

今回の可搬型モニタリングポストの機器構成図を図7に示す。測定部分については車載型 KURAMA-II[9]の構成を踏襲していて、コントローラとなる組み込みコンピュータに検出器、GPS、通信モジュールが接続された形となっている。コントローラとしては、National Instruments 社の組み込みコントローラ CompactRIO シリーズ [10] の cRIO-9064 を採用した。CompactRIO は高性能な CPU と FPGA と拡張スロットが小型で堅牢な筐体の実装されたコントローラである。OS として NI Linux Realtime を搭載しており、グラフィカルなプログラミング言語である LabVIEW で簡単に高度な機器制御のソフトウェアを開発することができる。CompactRIO は機器組み込みや劣悪な環境を想定して高い耐環境性や堅牢性を備えていることが特徴で、屋外の厳しい環境での使用が想定される可搬型モニタリングポストでの使用に適している。

この CompactRIO には GPS 受信機と放射線検出器が USB バスで接続されている。C12137 からは 100 ms ごとに波高データが送られ、これを線量率に換算したり、受信機からの時刻及び測位情報でタグづけし、線量率データおよびスペクトルデータとして LTE モジュールからサーバに送信するとともに、データを内部の不揮発メモリで保持する。

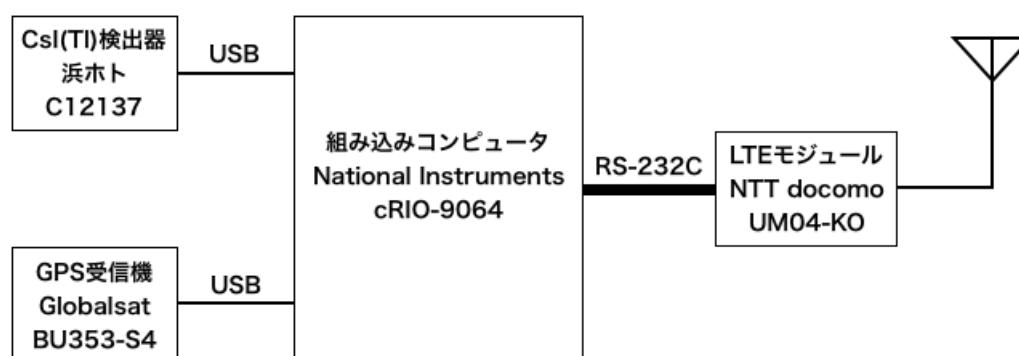


図7 可搬型モニタリングポストのブロックダイアグラム

表3 主な仕様

電源	12 V DC
重量	約 4 kg
寸法	280 mm × 150 mm × 300 mm (足および取手を含まず)
検出器	C12137 (浜松ホトニクス)
データ通信	TCP/IP over LTE

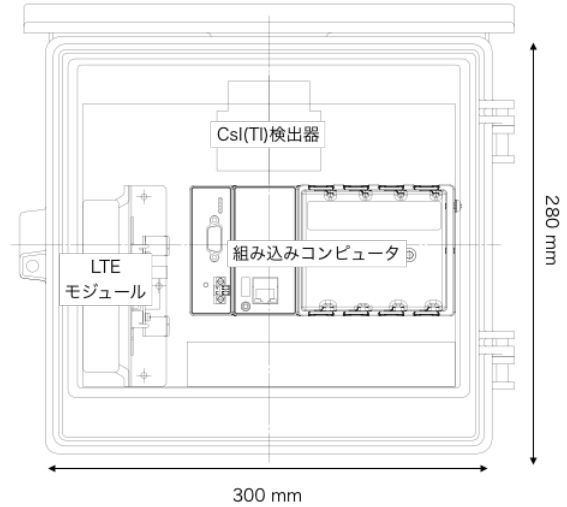


図8 今回開発した可搬型モニタリングポストの内部の様子。

取得したデータの送信のための通信には従来の KURAMA-II は SEA 社の 3G/GPS モジュールを使用していたが、消費電力が大きいことが課題になっていた。そこで、今回の可搬型モニタリングポストでは長期間の稼働が必要なことから、より消費電力の少ない組み込み機器用 LTE モジュールを採用した。従来の KURAMA-II では 550 Wh の蓄電池で 20 時間程度の稼働時間だったものを、通信モジュールの低消費電力化で同容量の蓄電池で 55 時間まで伸ばすことに成功した。また、この組み込み機器用 LTE モジュールは RS-232C 接続で AT コマンド制御で使用するが、自律型ネットワークのモジュールでは一般的にシリアル接続で AT コマンド制御による通信が行われるため、これらのネットワークを使用する際の対応が容易になるという利点もある。

可搬型モニタリングポストでは耐環境性も問題とされ、屋外での風雨に耐えられる必要がある。そこで筐体には屋外設置の分電盤収納に使われる防水の樹脂ボックスを採用している。また、内部の機器配置では検出器の方向依存性を最小限に抑えるため検出器の下側に機材を配置することとした (図 8)。KURAMA-II を持ち運びや設置しやすさを考慮してスタンドを装着しており、従来のモニタリングポストに比べて著しい小型軽量化を達成している。



図9 (左) 従来の可搬型モニタリングポストの運搬の様子(新潟県 原子力防災訓練 Web ページより [13])  
 (右) 今回開発した可搬型モニタリングポスト試作機。片手で容易に運べる小型軽量化を実現している。

### 5.1.2 放射線検出器

放射線検出器に CsI(Tl) 検出器である浜松ホトニクス C12137 シリーズ [11] を採用した。この検出器は CsI(Tl) シンチレータと MPPC (multi-pixel photon counter) を内蔵した  $\gamma$  線検出器である。MPPC は電子雪崩による信号増倍効果を持つ APD(Avalanche Photo Diode) を面的に配列した受光素子で、高い光検出効率と信号対ノイズ比を実現した素子である。シンチレーション光の検出に MPPC を採用したことで、大型で機械的強度の低い光電子増倍管が不要となり、また MPPC のバイアス電圧も数十 V で良いことから大幅な小型軽量化と耐久性の向上に成功し、信号処理回路や AD 変換回路までがコンパクトな筐体に収められている。ADC で変換された波高データは内蔵マイコンにより USB で 100 ms ごとに出力され、電源供給も USB バスパワーで行われる。C12137 シリーズの内部構成図を図 10 に示す。

C12137 シリーズは目的に応じて  $3.3 \text{ cm}^3 \sim 240 \text{ cm}^3$  の結晶サイズのものを用意されているが、結晶サイズにかかわらず電気的には完全互換であり、同一ソフトウェアで検出器からの波高データを処理することができる。KURAMA-II では周辺線量当量率等を  $G(E)$  関数法で算出している [12] が、この C12137 シリーズの互換性により、結晶に応じた  $G(E)$  関数に入れ替えるだけで同一のソフトウェアのまま様々な目的に応じた測定が可能になる。

さらに KURAMA-II では、使用する C12137 の内蔵マイコンのアルゴリズムに京都大学と浜松ホトニクスで共同開発したアルゴリズムを実装した、いわゆる高計数率対応タイプのもを採用し、一般に市販されている C12137 シリーズで発生する内部マイコンの処理の遅延に伴う数え落としを防いでいる。この数え落としは、実環境中での線量率測定に影響を与える。もともと無機シンチレータは原子番号の大きな元素で構成されているが、実環境では散乱などで発生する低エネルギー成分の寄与も大きい。その結果シンチレータのカウンタあたりの線量率への寄与の小さい低エネルギー成分の計数が高くなり、従来の C12137 では線量率が低いのに数え落としが発生することがあった。このため、浜ホトからも一般向け製品において「低エネルギー放射

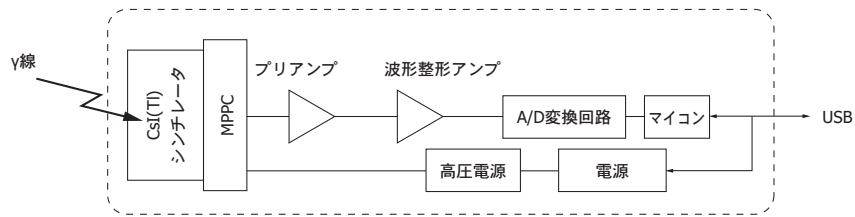


図 10 C12137 の内部構成図 [11]。MPPC からの出力信号をプリアンプと波形整形アンプで整形した後 AD 変換し、得られた波高データをマイコンが USB Raw 通信で外部に出力する。内部の回路は MPPC 用高圧電源も含めすべて USB バスパワーで賄われる。

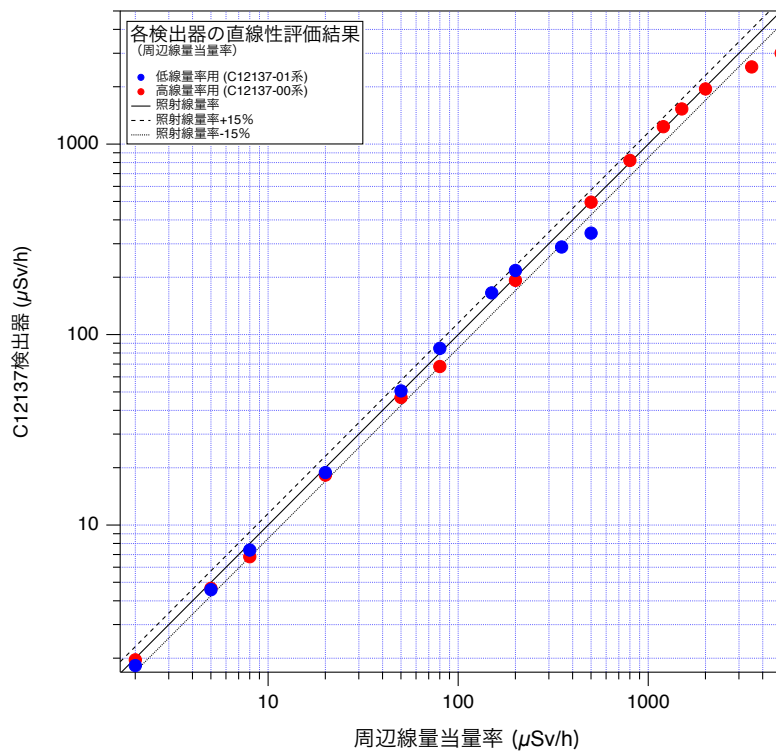


図 11 改良型 C12137 シリーズのダイナミックレンジ。JAEA 核サ研の所有する  $^{137}\text{Cs}$  線源による校正場で照射した。市販される C12137-00 は公称  $100 \mu\text{Sv/h}$  まで、C12137-01 は公称  $10 \mu\text{Sv/h}$  まで計測可能となっているが、アルゴリズム改良で大幅に測定可能範囲が広がっており、C12137-00 タイプでは  $2 \text{ mSv/h}$  まで到達する。

線が支配的な環境放射線を検出する場合、最大測定値が  $1/3 \sim 1/2$  程度になります」との注意喚起が行われている [11]。京大と浜ホトが開発したアルゴリズムを採用した高計数率対応タイプではこの欠点が克服されている。この結果、一般向け C12137 でみられた実環境での数え落としがなくなっただけでなく、ダイナミックレンジの大幅な拡大を実現している (図 11)。今回の可搬型モニタリングポストでもこのアルゴリズムを採用した C12137 を使用する。



## 5.2 可搬型モニタリングポストの実証試験

試作したモニタリングポストを用い、浜通りの2地点で周辺線量当量率及び波高スペクトルの測定試験を行なった。なお、今回の実証試験では比較的線量率の低い地域で実施しているため、検出器の結晶サイズがC12137-00の $3.4\text{ cm}^3$ より大きな $36\text{ cm}^3$ のC12137-01を採用している。また、5.1.2で説明した通り、今回の検出器は高計数率対応タイプにしている。

### 5.2.1 富岡町圃場内での試験

富岡町内にある圃場において圃場内および周辺での測定試験を行なった。この圃場は環境省による除染が行われ、表土を5 cm程度剥いだ上で剥離した土壌分を補填するために客土が投入された。営農再開に向け所有者による耕起が行われているが、放射性セシウムの残留する土は下層に客土は表面側に偏った状態になっている。



図 12 圃場内での測定の様子。



図 13 (富岡町内における可搬型モニタリングポスト試験の試験地点。内蔵 GPS で取得した 3 秒毎の測位座標のため  $\pm 2.5$  m 程度の変動がある。

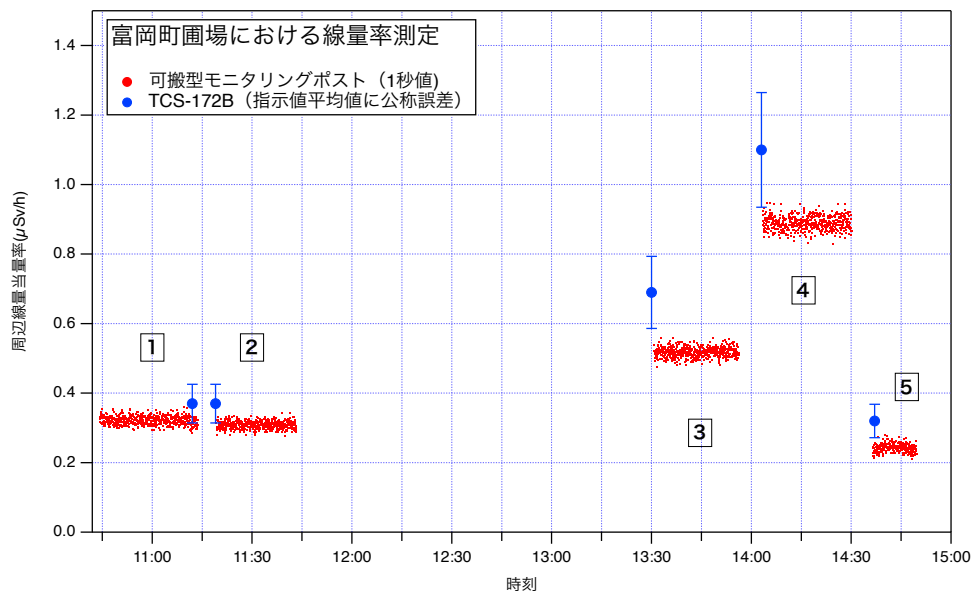


図 14 試作した可搬型モニタリングポストの測定結果 (赤点) と TCS-172B による同じ地点での高さ 1 m での周辺線量当量率 (青)。TCS-172B の測定値の誤差はデジタル指示値の誤差の公称値。各番号は図 14 の場所に対応。

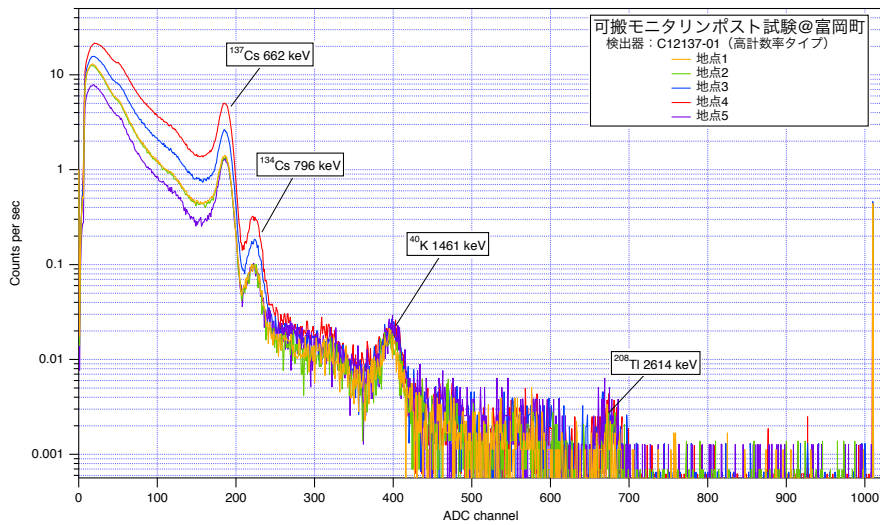


図 15 (試作した可搬型モニタリングポストによる波高スペクトルデータ。

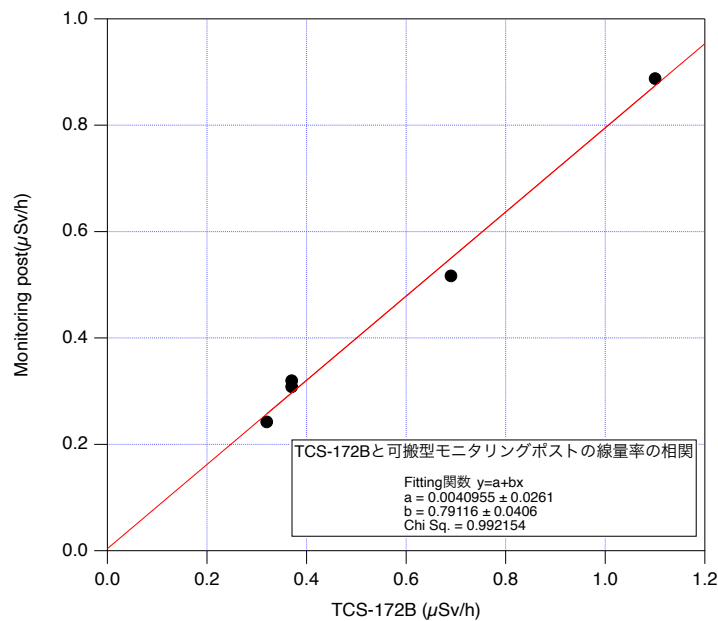


図 16 TCS-172B と可搬型モニタリングポストの指示値の相関。原点を通る直線によく一致することがわかる。

この圃場とその周辺において可搬型モニタリングポストを検出器の高さが約 1 m となるように設置して測定し、同時に TCS-172B による周辺線量当量率を測定した。測定の様子を図 12 に、測定地点と測定結果を図 14 に示す。また可搬型モニタリングポストで取得した波高スペクトルデータを図 15 に示す。このスペクトルから場所によらず天然核種の量はあまり変わらない一方、人工核種の  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  の光電ピークの高さに比例して線量率が変わっていることがわかる。全体として可搬型モニタリングポストの周辺線量率の測定値の方が低い値となっている。そこで、TCS-172B と可搬型モニタリングポストの測定値について相関を取っ

たところ、誤差の範囲で原点を通る傾き 0.8 の直線となった（図 16）。このことから可搬型モニタリングポストは TCS-172B に比べて 20% 低い値であることがわかった。両者はそれぞれ  $^{137}\text{Cs}$  単色線源で定期点検時（TCS-172B）ないし出荷時（可搬型モニタリングポスト）に指示値が校正されていることから単純な指示値のズレとは考えにくく、環境中における低エネルギー側のエネルギーレスポンスの差による可能性がある。次年度の事業で可搬型モニタリングポストの校正場での特性試験を計画しており、その結果を得た上でスペクトルデータから再評価を試みる計画である。

### 5.2.2 檜葉町内での試験

もう一つの試験として、檜葉町内にあるリアルタイム線量計の脇での測定を約 4 時間試みた。このリアルタイム線量計は富士電機製で、概ね  $0.10 \sim 0.11 \mu\text{Sv/h}$  を示していた。測定値は原子力規制庁の web ページから公開されている。可搬型モニタリングポストの設置にあたってはその場所の管理者の指示のもととなったため、例えばリアルタイム線量計に近づきすぎると必ずしも周辺線量当量率のモニタリングに適しているとは言えない。しかし、実際の設置にあたってこのような制約を受ける場合もあると考えられることから、そのまま測定することとした。



図 17 既設のリアルタイム線量計付近に設置した可搬型モニタリングポスト。設置方法は設置場所の管理者の指示にしたがっており、必ずしも放射線計測に最適化されているわけではないことに注意。

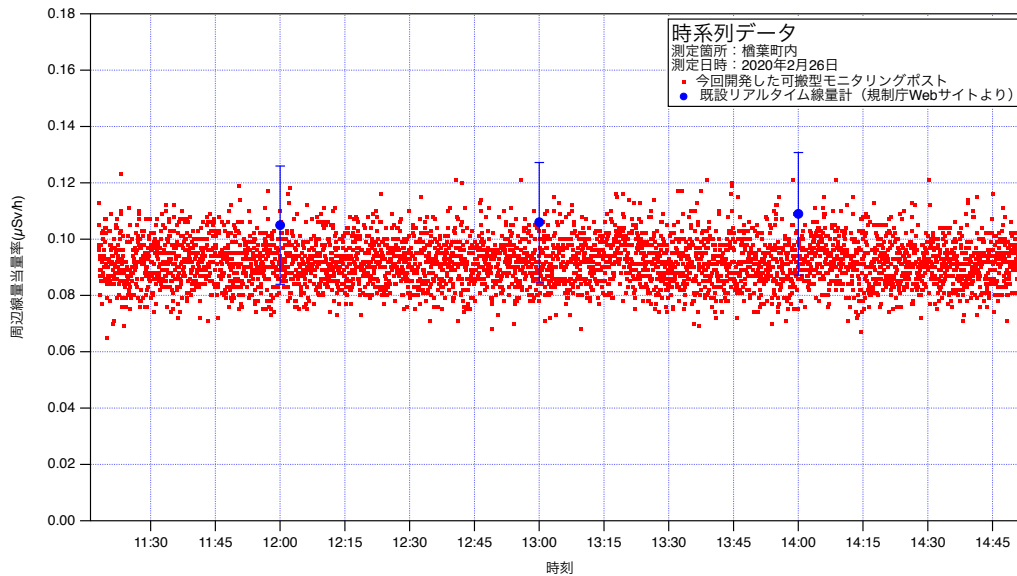


図 18 可搬型モニタリングポストの 3 秒値とリアルタイム線量計の 1 時間値。

設置の様子を図 17 に、可搬型モニタリングポストで測定した周辺線量当量率の 3 秒ごとの値の経時変化と、規制庁から公開されているリアルタイム線量計の 1 時間値を図 17 に示す。概ねまた、測定期間中の 3 秒値の分布をヒストグラムにしたものが図 19 で、3 秒値の中心値が  $0.092\mu\text{Sv/h}$ 、分布の幅は  $\pm 0.009\mu\text{Sv/h}$  ( $1\sigma$ ) であり、リアルタイム線量計と誤差の範囲で一致していると言える。

また、この測定中積算した波高スペクトルと、5.2.1 で測定した富岡町の地点 1 での波高スペクトルを比較した (図 20)。天然核種の支配的な領域となる概ね 1 MeV 以上ではほとんど違いがない一方、1 MeV 未満で

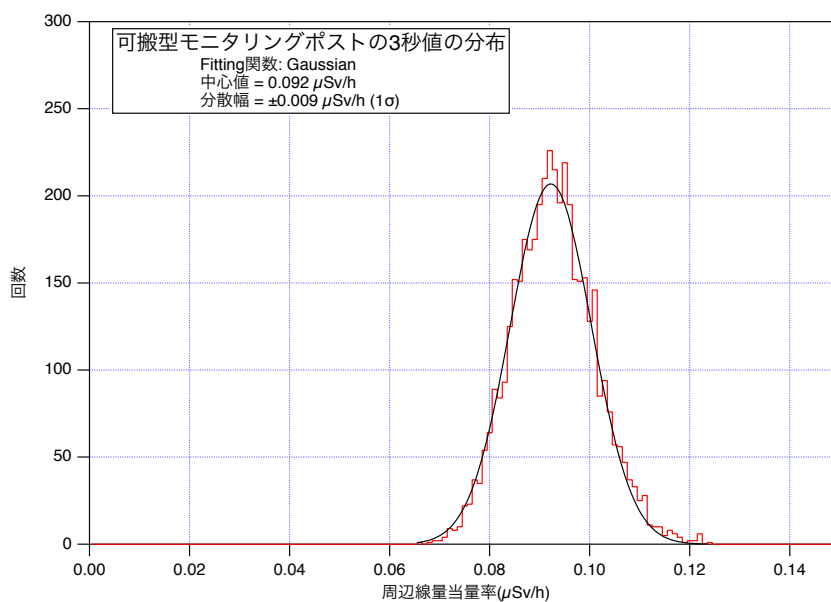


図 19 測定期間中の可搬型モニタリングポストの 3 秒値の分布。おおよそ  $\pm 10\%$  の幅となっている。

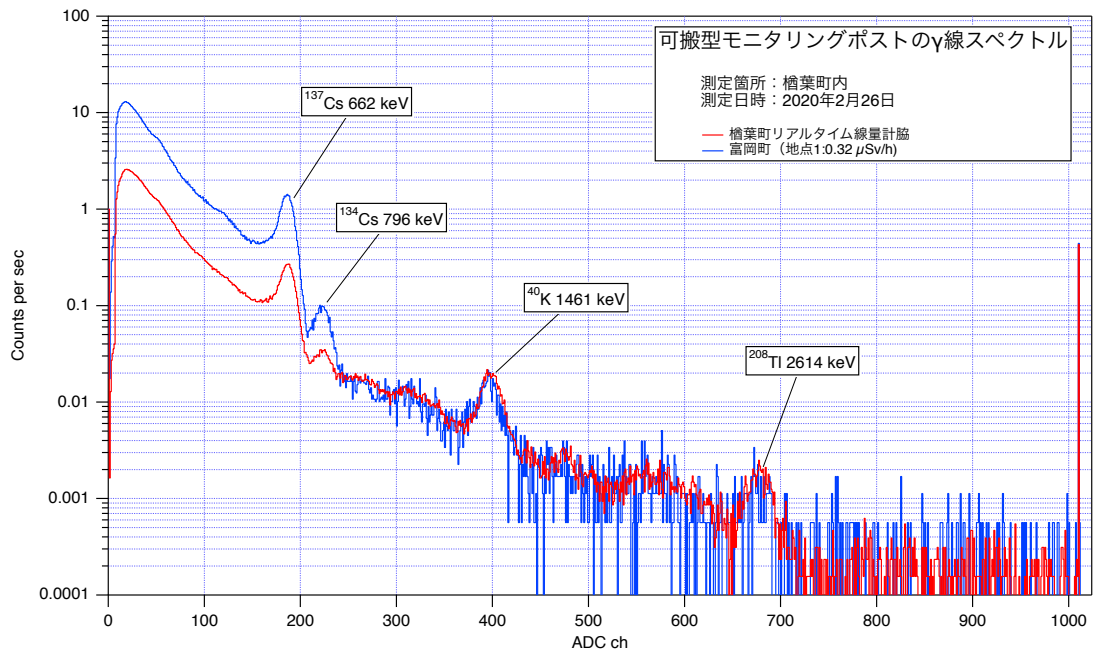


図 20 測定期間中の波高スペクトル。比較のため富岡町圃場の地点 1 の波高スペクトルも示してある。天然核種の影響が主体となる概ね 1 MeV 以上の領域ではほとんど変わらないものの、事故由来である放射性セシウムの量が異なっており、この違いが周辺線量率当量の違いとして現れているのがわかる。

は放射性セシウムに由来する差が見える。これがそれぞれの地点の線量率の違いとなって現れていることがわかる。

### 5.3 まとめと次年度の目標

KURAMA-II をベースに、片手で持てる重量 4 kg と小型軽量でスペクトルデータも取得可能な可搬型モニタリングポストを製作した。従来の KURAMA-II の通信部分を見直し、低消費電力の組み込み機器用通信モジュールを採用したことで低消費電力化を実現し、従来の 2 倍の稼働時間の 55 時間 (500Wh 電池の場合) を達成した。また、通信を AT コマンドのシリアル制御で行うようにしたことで、同様に AT コマンド制御で使用する自律型ネットワーク用モジュールへの対応を可能にした。製作完了後の本年度の試験では、簡便かつ機動的にモニタリングポストを設置測定することができた。しかし、サーベイメータに対して 2 割低い線量率を示す場合があった。

次年度の目標としては、よりの確な内部の電力制御の見直しによる稼働時間延長、標準場を利用した放射線検出器としての特性評価の実施、耐環境性のより本格的な評価、実環境での様々な条件での運用とその結果の評価をおこない、それを踏まえた運用方法の検討を進める。

## 6 自律型データネットワークの構築技術の開発

### 6.1 ネットワーク技術の動向

近年注目を集める IoT (Internet of Things) は、世の中のあらゆるものをネットワークで結び、相互の情報のやり取りや制御、連携により、より高度な機能やサービスを実現するという考え方である。最近の半導体技術やネットワーク技術の進展によりセンサーやデバイスといった機器、通信インフラ、クラウドサービスの高性能化、低価格化が進んだことで、幅広い分野で導入が進んでいる。

ネットワーク技術は IoT の中で重要な要素であり、コンピュータや携帯電話などの従来のネットワーク対応機器を超えてあらゆるものに実装する場合、電力や通信可能な範囲、また伝送可能なデータ量が問題になる。例えば、遠隔手術のような用途ではリアルタイム性や高精細な映像を送るための通信速度や容量が求められる。一方、水道メータの監視のような用途になると、データの伝送量は小さくて良いものの、良好な通信環境も期待できず電池交換もメータ交換の数年～10年に1回程度になるような端末を広域に展開することになる。

このような様々な特性を持つ利用目的や利用環境に応じ、様々な通信規格が開発提唱されている。LPWA(Low Power Wide Area network) は、低速・低消費電力&広域・遠距離通信を担う通信技術である(図21)。その特徴として

- 比較的高い周波数(概ね GHz 帯)を使ってアンテナも含めた小型化を実現
- 比較的遅い通信速度(数十 bps～数百 kbs)ながらも km オーダーの到達距離を実現
- 送受信や通信モジュール内のきめ細かい電力管理による低消費電力を実現

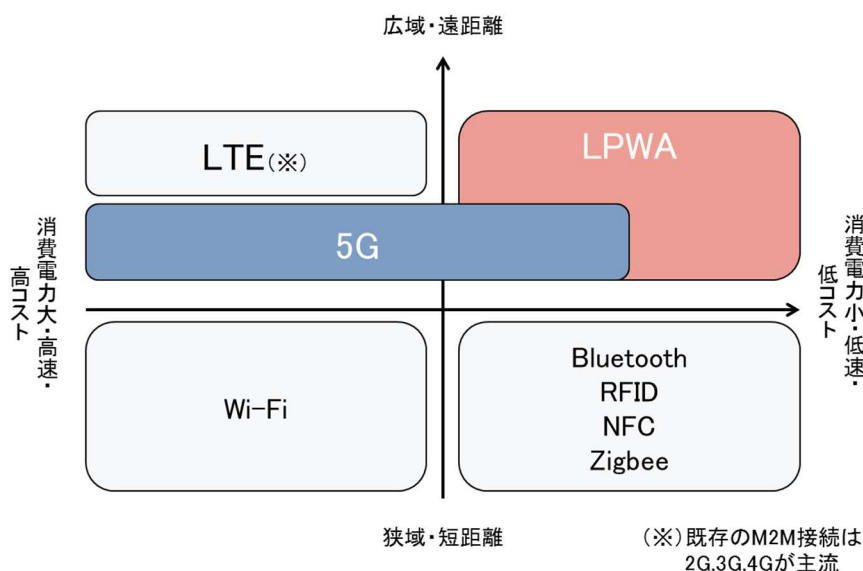


図 21 様々な通信規格の中における LPWA の位置づけ。比較的数据量が少ないセンサ等を大量・広域に展開し、継続的にデータ収集するような用途に適している。図は総務省「第4次産業革命における産業構造分析とIoT・AI等の進展に係る現状及び課題に関する調査研究」報告書(三菱総研作成)より引用。

が挙げられる。

これらの特徴を持つ LPWA は、既存の電力・通信インフラが必ずしも機能するとは限らない緊急時において、迅速かつ広範囲に計測データ収集ネットワークを構築する必要のある放射線モニタリングのためのネットワークとしても望ましいものである。そこで、緊急時の放射線モニタリングのためのネットワークとしての観点から LPWA の主な規格やその特徴について調査を行なった。

## 6.2 主な LPWA 規格

緊急時における放射線モニタリング活動では、既存インフラが部分的あるいは広範囲にわたって被害を受けてしまうことを想定しなくてはならない。そのため、災害時に事業者によるネットワーク構築を待つことなく展開できることが望ましい。また、残存する既存ネットワークへの結節点となる基地局の設置が思うようにいかない場合を想定しなくてはならない。基地局に直接接続するスター型のネットワークでは、エリア拡大のたびに既存ネットワークの復旧も必要となってしまう。そのため、機器間でのデータの転送や中継局による拡大が可能なメッシュ型のネットワークが構築できる規格が望ましい。また、福島におけるモニタリングポスト等の設置状況を参考にする場合、数百 m 程度の間隔で設置される可能性があり、その距離においても今回の研究開発でベースとなる KURAMA-II 程度のデータ転送量（数百 bps 程度）を確保できることが望ましい。以上の観点から、現在国内で比較的普及していると思われる規格について特徴をまとめたものが図 22 である。また、特に国内で普及している、あるいは国内外で大規模な採用実績があるとみられる規格についてまとめたものが表 4 である。

これらの規格の中で普及で先行しているのは Sigfox[14] と LoRaWAN[15] で、ZETA[16] および Wi-SUN FAN[17] は後発の規格である。この 4 つの規格はすべて免許不要であり、同じ免許不要の周波数帯である 2.4GHz に比べて電波伝搬的にも通信の混雑の面でも有利な 920 MHz 帯を使用しているため、設置や使用の

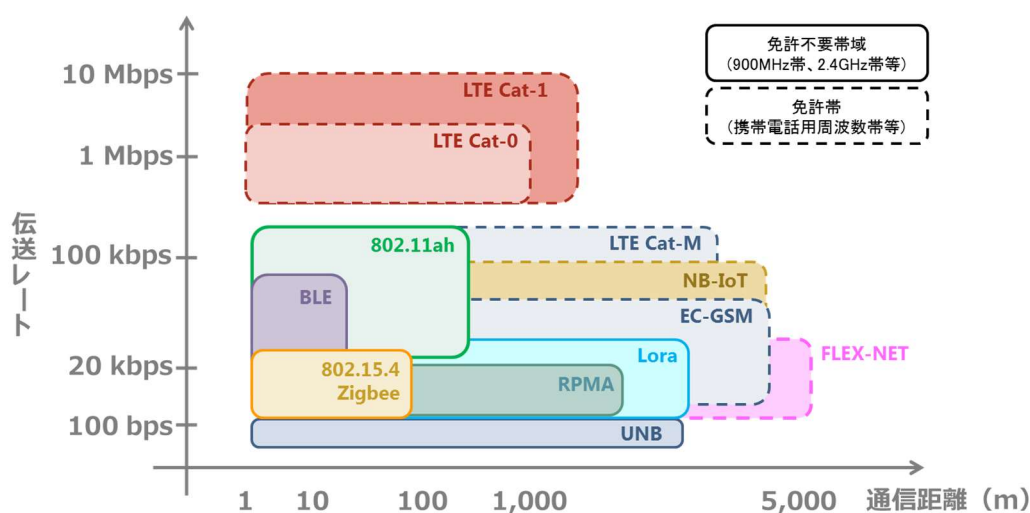


図 22 LPWA の主な規格の位置づけを速度と到達距離から整理したもの。図は総務省「第 4 次産業革命における産業構造分析と IoT・AI 等の進展に係る現状及び課題に関する調査研究」報告書（三菱総研作成）より引用。



表 4 主な LPWA の仕様。Up、Down はそれぞれ基地局向きの上り通信、基地局から端末への下り通信を指す。

規格名	使用周波数 (日本)	通信速度	ネットワーク形態	自営網構築
Sigfox	920 MHz	100/600 bps (Up/Down)	スター型	不可
LoRaWAN		250 bps ~ 50 kbps		可能
Wi-Fi HaLow		150 kbps ~		
Wi-SUN FAN		50 kbps ~ 600 kbps	メッシュ型	
ZETA		0.1 ~ 100 kbps		
LTE Cat. M	携帯	0.3 ~ 1 Mbps	スター型	不可
NB-IoT		62/21 kbps (Up/Down)		

制約が少ない。一方 LTE Cat. M[18] や NB-IoT[18] は従来の携帯回線規格である LTE の中に規定されるもので、インフラとしてすでに津々浦々に普及している携帯事業者の基地局を利用できる反面、免許が必要となり設置や使用に制約がある。なお Sigfox は各国ごとに 1 事業者が独占的に基地局網を提供し、ユーザはその事業者と契約することで世界中の基地局にアクセスすることができる。日本の場合、Sigfox は京セラ系の会社が事業者として基地局ネットワークを展開している。

ここでネットワーク形態について比較する。主な LPWA 規格ではスター型ないしメッシュ型の形態を取っており、Sigfox や LoRaWAN、LTE Cat. M や NB-IoT がスター型ネットワークを構築するのに対し、ZETA および Wi-SUN FAN はメッシュ型ネットワークが構築できる規格である。このスター型とメッシュ型のネットワークがどのようなものであるかを示したのが図 23 である。スター型では、既存回線やデータセンターとの橋渡しとなる基地局が端末を直接収容するため、中継による遅延等が発生しない反面、既存回線と接続できる場所にしか基地局を設置できない。メッシュ型では端末がメッシュ状のネットワークを構成しており、条件の良い経路を選択しながら中継されて基地局に到達する。そのため、既存回線へのアクセスが難しくスター型のネットワークでは展開が困難な場所でもエリア展開が容易になる反面、多段中継による遅延などの問題も発生する。

緊急時には災害の直接的・間接的影響で既存回線へのアクセスが困難な状況が多発すると考えられることか

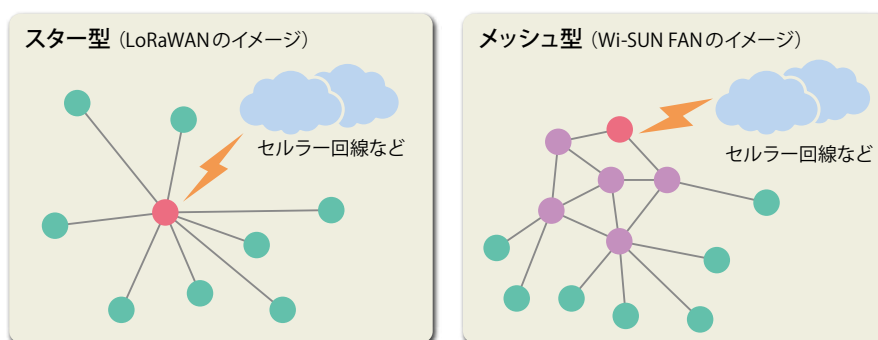


図 23 スター型とメッシュ型のネットワーク形態のイメージ図 [19]。スター型では、既存回線との橋渡しとなる基地局が端末を直接収容し、メッシュ型では端末がメッシュ状のネットワークを構成する。

ら、スター型よりメッシュ型のネットワークが構成できる方が望ましいと考えられる。これらを踏まえ、今回の研究では通信規格として ZETA および Wi-SUN FAN を有力候補として選定した。

ZETA は到達距離も見通しで 2~10 km であり、4 段までの中継や端末や中継器が動的に最適な通信経路を選択するなど、柔軟なネットワーク構築が可能な規格である。すでに一般利用のための製品が流通しており、例えば携帯電話の圏外である山奥の養殖施設の監視業務 [20] や、上海で数万局を展開しての市内の公共インフラの IoT 化の実績もある。しかしながら都市部で十分な通信距離を確保する場合、低速通信をせざるを得ず、1 回あたり 49 bytes、30 秒ごとの送信しかできない。このため、線量率データ程度であれば送信可能だが、KURAMA-II のようにスペクトルデータを含む数百 bytes/sec のデータをそのまま送信するのは困難という欠点がある。

一方 Wi-SUN FAN は見通しで 500 m、20 段までの中継や動的に最適な通信経路選択機能を持ち、加えて最大 300 kbps の TCP/UDP 通信をサポートしていることから、従来の KURAMA-II の通信方式をそのまま使用できる可能性がある。また、京都大学が権利を保有する大学発の規格でもある。一方、実用化という面では、Wi-SUN 規格の中の Wi-SUN HAN(Home Area Network) は国内のスマート電力計に採用され圧倒的なシェアをもつものの、Wi-SUN FAN については評価用の端末が限定的に提供され、いくつかの実証試験が行われている程度である。一般向けの製品は 2020 年度に入ってからと見られているため、直ちに試験や採用を計画することは難しい。

以上を踏まえ、本年度は実用化が進む ZETA について評価を行い、LPWA の特性についての理解を深めることとした。

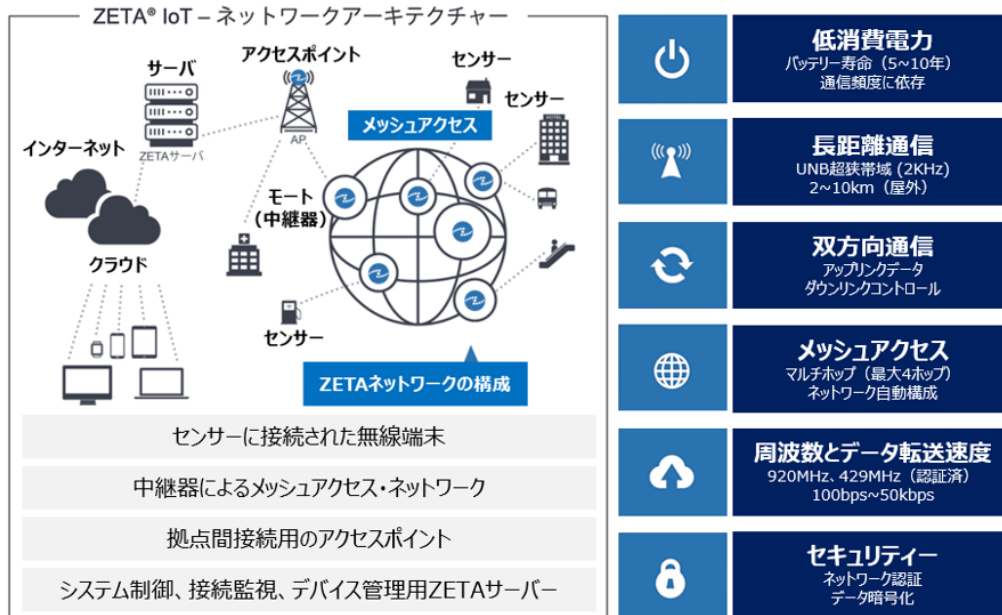


図 24 ZETA の概要 [21]。メッシュ構造の中継機ネットワークに端末がアクセスし、混信に強く周波数資源が有効に利用できる狭帯域双方向通信を行うことが特徴である。最適な通信経路を動的に選択するため、通信環境の変化に対しても安定した通信を確立できる。

### 6.3 ZETA 規格のあらまし

ZETA とは、ZiFiSense 社が開発した免許の不要な LPWA 規格である (図 24)。ZETA の大きな特徴は約 0.6 ~ 2 kHz という超狭帯域通信を行うことで、周波数帯域を有効に利用する多チャンネルでの通信が可能である。これにより混雑した周波数帯域でも通信の確立がしやすくなる利点がある。また、基地局と端末の間に 4 段までの中継器の設置が可能で、中継器による同士がメッシュネットワークを構成することが可能であり、通信距離は最大 10~20 km (見通し距離) とすることができる。加えて、各端末や中継器が通信環境の変化に応じて動的に最適な通信経路を選択することが可能であり、端末と基地局の間で安定な通信が可能となる。また消費電力が非常に小さいことが特徴であり、中継機や端末自体は乾電池で数年間稼働が可能である。ZETA の電力消費の低さを生かし、30 分に 1 回のデータ送信であれば単三電池 4 本で連続 1 年間稼働可能な ZETA 搭載 AI カメラが開発されている。

### 6.4 ZETA の実証試験

緊急時の放射線モニタリング活動は、オフィス街、住宅地、農地、山間部など様々な状況での展開が想定されるため、自立型ネットワークにはそれぞれの環境で相応のネットワークが構築できることが求められる。そこで、ZETA によるネットワーク構築の実証試験を行うこととした。

#### 6.4.1 都市部におけるエリア展開

ZETA Alliance のメンバーである凸版印刷が東京都内に所有する基地局を用い、基地局付近の市街地を移動する試作端末からアクセスを試みる形で市街地における伝搬試験を行った。この時の試験方法のあらましを図 25 に示す。また試験の際に使った中継局と試験用端末を図 26 に示す。

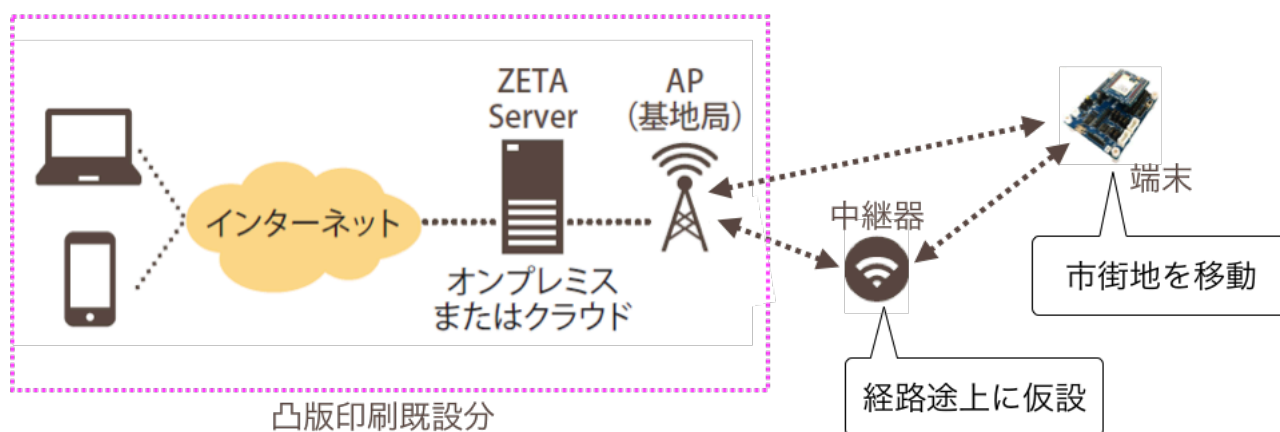


図 25 通信試験の概要。凸版印刷が既設の基地局に市街地を移動する端末からアクセスする。経路途上に中継器を設置し、通信経路の動的な選択もできるようにする。

試験用端末は超小型 KURAMA-II のプロトタイプを使用した。超小型 KURAMA-II のシリアル出力を ZETA の評価用端末に接続し、シリアル通信で ZETA 端末を制御した。超小型 KURAMA-II では、30 秒ごとに内蔵 GPS で取得した時刻と位置情報、および乱数で発生させた擬似的な線量率データを含む約 30 バイ

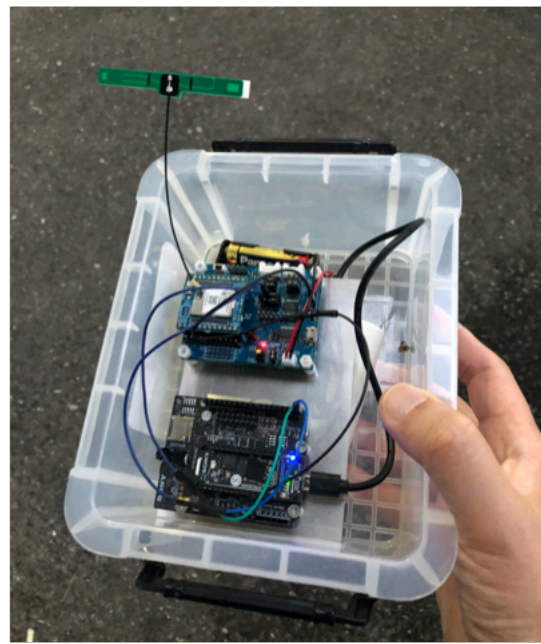


図 26 ZETA 中継器 (左) と ZETA 評価用端末と超小型 KURAMA-II プロトタイプを組み合わせた試験用端末 (右)。いずれも電池駆動が可能で小型軽量である。

ト程度のバイナリデータを生成し、AT コマンドで送出した。ZETA 試験端末は、受け取ったデータをサーバへ送るが、無線通信ができなかった時のデータのバッファリング、通信時の様々なエラー処理や適切な通信経路の選択等は ZETA 端末が自動的に行うこととなっており、この部分が適切に行われるかも実証試験で評価する点となる。中継器は凸版印刷が所有するもので、電源である乾電池も含め小型軽量にパッケージされており、内蔵する乾電池で数年間の動作が可能である。中継を始めるにあたって中継器の操作は一切不要なため、必要な場所に持参しておくだけで直ちに機能させることができる。

実際の試験結果のあらましを図 27 に示す。試験を行った地域は三田駅の海側の地域で、凸版印刷芝浦ビル 10 階の南東方面窓脇に設置された基地局と、人が携行する試作端末とで 30 秒間隔で直接通信を行い、その状況を監視しながら移動した。一帯は概ね数階～10 階建程度のビルやマンションが密集しており、道路方向には見通しが比較的良いが角を曲がるとビル影に入ってしまう典型的な市街地である。まず試験端末を持った人がなぎさ通りを南東方向に進み、南東方向に約 1 km 離れた芝浦南ふ頭公園付近 (図中 A 地点) まで移動した。この間通信は途絶することはなく、ZETA サーバに送信したデータが記録されることを確認した。これは、なぎさ通りに沿っている間は通りに障害物がなく、またなぎさ通りも緩やかに曲がる通りで両脇に立つ建物が電波の反射板となり、基地局との間を結ぶダクト内を電波が伝わるような形になったためであると考えられる。このことは、地図上の B 地点より北方向に進むと、30 m ほど進んだビル陰で通信が途絶したことからも明らかである。

この通信が途絶した状態で B 地点に中継器を持った人が立ったところ (図 28) 自動的に通信が回復した。ZETA サーバに送られるデータから、試験端末の ZETA モジュールが中継器を自動で選択して基地局と通信を確立していたことがわかった。また、途絶中のデータは通信回復後順次送信されたため、途絶によるデータの欠落はなかった。このあと移動を継続し、図中水色の範囲 (約 200 m 四方) の路上で接続が可能となった

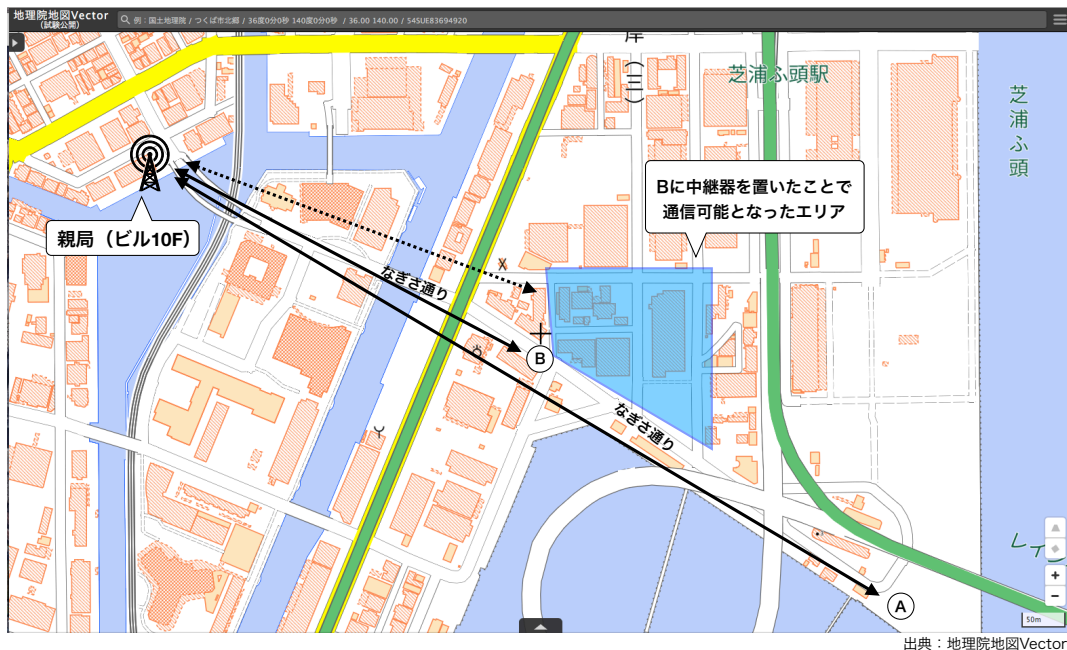


図 27 市街地における試験結果。黒実線の矢印は通信が成立したことを、黒点線は通信が確立できなかったことを示す。青で示されている区域では、B 地点においたデータが中継器を経由していることがサーバ側で確認されたエリアである。



図 28 地図中 B 地点に置かれた中継局。人が高さ 1 m 強の高さにアンテナを手を持って立っている。

ことがわかった。この中継局の設置にあたっては、緊急時などの展開の際に計画的に設置できないことを考慮し、特に持ち方や立っている場所については規定せずに交差点付近で持ちやすい形で持ってもらうこととした。そのためアンテナの位置や高さが不規則に変動し電解強度も不安定になるが、試験中に通信状態が大きく変化することはなく、データの欠損はなかった。

以上より、通信条件をきめ細かく調整しなくとも市街地で 200 m 程度間隔で通信を確立できること、また

適切な条件を選べば市街地でも 1 km 程度の通信は容易に実現できることが確認できた。

#### 6.4.2 既設モニタリングネットワークの補完

今回の自律ネットワークは、既存のモニタリング機器を結ぶネットワークが失われた中で、既存のモニタリングポストや簡易型モニタリングポストほかモニタリング地点として定められている地点間、あるいはそれよりきめ細かく設置されることになるモニタリング機器（今回の研究で開発している可搬型モニタリングポスト、超小型 KURAMA-II など）間で通信を確立してデータを収集する能力を求められる。すなわち、現在モニタリング体制として構築されている既存のモニタリングポストや簡易型モニタリングポスト間でのネットワーク確立が可能かどうかの一つの目安となる。

今回、島根県原子力環境センターの協力のもと、同センター周辺に設置されているモニタリングポストおよび簡易モニタリングポストの各地点と原子力環境センターの間において ZETA によるネットワーク構築の実証試験を行った。島根県地域防災計画（原子力災害対策編）[22] で定められている平常時ないし緊急時のモニタリング地点は図 29 のようになっており、概ね数百 m から数 km ごとにモニタリング地点が置かれていることがわかる。

今回の試験では、松江市郊外にある原子力環境センターを起点に、その周辺のモニタリングポストおよび簡易モニタリングポスト設置各地点および、防災拠点としての島根県庁を結ぶ通信が可能かどうかの試験を行った。各地点の位置関係を図 30 に示す。

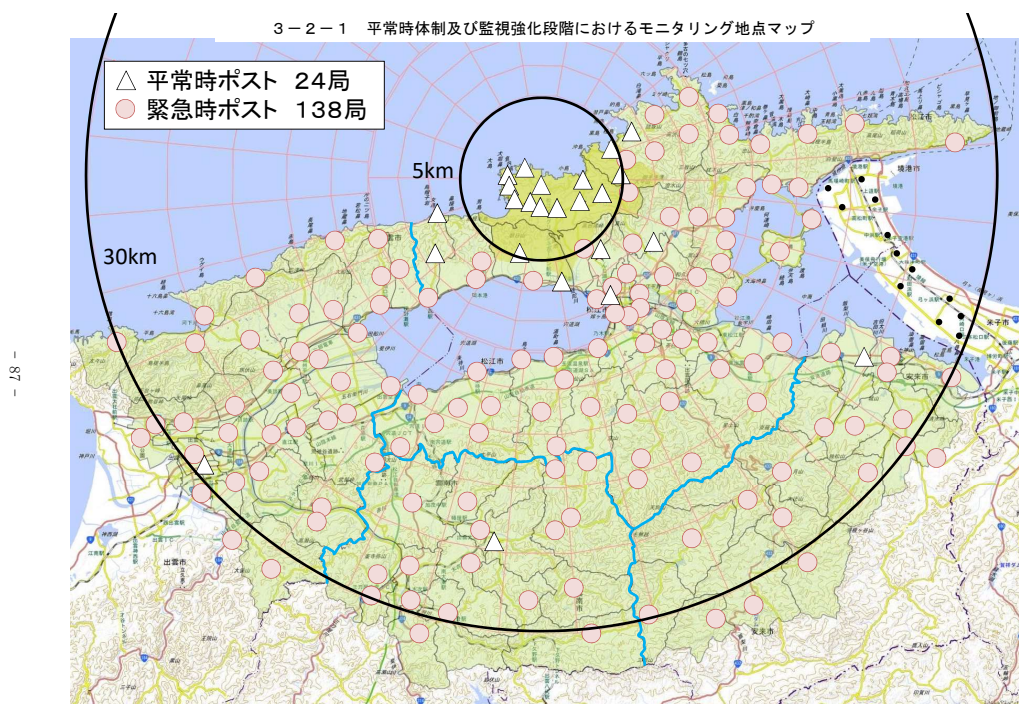


図 29 島根県地域防災計画に定められた平常時および監視強化段階におけるモニタリング地点マップ [22]。人口集積地を中心に概ね数百 m ～ 数 km 程度に設置されている。

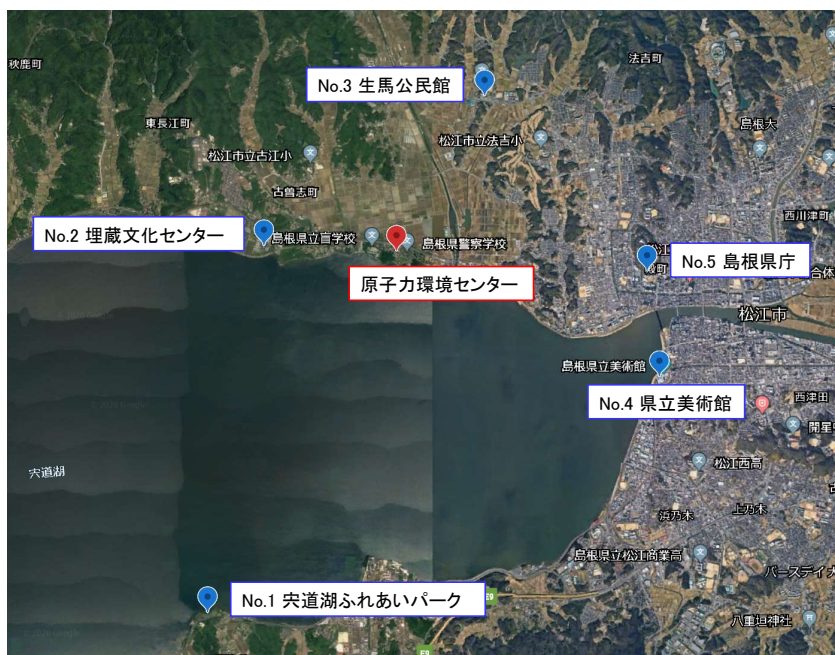


図 30 島根県原子力環境センターとその周辺のモニタリングポストの位置関係。同センターを拠点とし、これらの地点との間のネットワーク構築を試みた。



図 31 (左) 基地局の設置箇所。島根県原子力環境センター北東側には 5 階建の島根県保健環境科学研究所がある。地図画像は国土地理院地図を使用。(右) 屋上に設置された基地局とアンテナの様子。高さ 3 m にアンテナが設置されている。



図 32 埋蔵文化センターの端末、および中継局と島根県原子力環境センターの基地局との位置関係および経路上の高度図（上）。



図 33 埋蔵文化センターに設置された端末（左）および経路上に設置された中継局（右）。中継局は市街地の試験で使用したものと同一である。



基地局を島根県原子力環境センター（2階建）の屋上南側の隅に設置した。屋上床面から高さ3 m程度の場所に空中線利得+2.14dBiの無指向性アンテナを設置した。これは ZETA が区分される免許不要な特定小電力無線で許される最大利得である。設置の様子を図31に示す。各モニタリング地点に設置される端末は空中線利得0 dBiの無指向性アンテナを装備しており、送信出力は20 mWである。中継機は図26に示したものと同じで、アンテナは基地局と同じ空中線利得+2.14dBiの無指向性アンテナである。また ZETA の受信感度は-130 dBmである。

まず、図30のNo.2「島根県埋蔵文化センター」に設置されている簡易モニタリングポストとの通信確立試験を行った。原子力環境センターおよび埋蔵文化センターは国道431号線から少し入った場所にあり、直線距離は約1.7 kmで途中に高さ数十メートルの小さな山があつて直接見通すことはできない。この時の通信経路の概要を図32に、端末および中継機の設置状況を図33に示す。なお中継機の場所からも基地局および端末を直接見通すことはできない。

この端末←→中継機←→基地局の配置で通信を確立することに成功した。ZETA では端末と基地局間の伝送経路とその伝送経路での電界強度を確認することが可能であり、それによれば、確かに端末と基地局の間は中継機によって結ばれており、電界強度は端末←→中継機間で概ね-98～-125 dBm、中継機←→基地局間で-117～-127 dBmと、受信感度-130 dBm（+アンテナの利得）に比べて十分余裕のある電界強度が得られた。なお、中継機からも基地局が見えなかったことから、見通し距離で基地局との間を結ぶように国道沿いにもう2箇所中継機を配置していたが、中継機自身が最適な通信経路を判断した結果これらの中継機は使われなかった。このように、事前想定と実際の状況が異なる場合でも最適条件が自動的に選択されることは、十分な伝送経路の検討ができない緊急時の機器配置には有効な機能だと考えられる。

以降同様の試験をNo. 3～6の各地点と基地局との間で行った。いずれの場合も端末や中継機の電源投入のみで安定した通信を容易に確立することができた。埋蔵文化センターを含めた結果の概要を表5に、各地点での経路や設置状況等を図34～39に示す。

表5 接続試験の結果。アップリンクは端末→基地局向きの通信、ダウンリンクは基地局→端末向きの通信。上下段ある場合は上段が基地局←→中継機、下段が中継機←→端末の値。

地点名	センターとの直線距離 (km)	機器間距離 (km)	アップリンク (dBm)	ダウンリンク (dBm)
No. 2 埋蔵文化センター	1.75	0.35	-117～-127	-119～-124
		1.5	-101～-125	-98～-120
No. 3 生馬公民館	2.56	1.27	-111～-114	-112～-117
		1.51	-105～-117	-99～-109
No. 4 県立美術館	3.98	3.98	-115～-127	-113～-124
No. 5 県庁	3.50	3.98	-113～-124	-106～-119
		1.46	-88～116	-88～-117
No. 6 ふれあいパーク (展望台)	5.49	5.49	-108～-123	-95～-121
No. 6 ふれあいパーク (モニタリングポスト)	5.48	5.48	-117～-129	-112～-125
No. 2 埋蔵文化センター (No. 6 経由)	1.75	5.49	-106～-122	-97～-117
		5.0	-117～-129	-117～-129
No. 2 埋蔵文化センター (No. 6 モニタリングポスト経由)	1.75	5.03	-101～-118	-84～-113
		5.48	-117～-128	-114～-125