

令和 6 年度原子力規制庁委託成果報告書

令和 6 年度原子力施設等防災対策委託費

(実運用を想定した LPWA によるモニタリングポスト
間通信の導入試験) 事業

島根県

令和 7 年 3 月

目次

1. 緒言	1
2. 令和 6 年度の業務概要	2
3. 既設モニタリングポストへの設置とテレメータシステムへのデータ転送方法 ...	3
3.1 LPWA 通信の規格	3
3.2 ZETA ネットワーク構築のための電波シミュレーション	3
3.3 ZETA のデータ転送量	6
3.4 既設モニタリングポストへの設置	7
3.5 テレメータシステムへの接続	16
4. 予備調査	17
4.1 ZETA 機器の設置場所	17
4.2 ZETA 通信の通信可能距離	18
4.3 ZETA 通信の安定性の試験結果	19
4.4 予備調査のまとめ	21
5. 実運用を想定した LPWA によるモニタリングポスト間通信の導入試験	22
5.1 設置前の現地調査	22
5.2 ZETA 機器の設置場所	22
5.3 ZETA 機器の設置作業	25
5.4 調査結果	35
5.4.1 通信結果	35
5.4.2 秋鹿公民館の通信不良	37
5.4.3 送信時間の検討	38
5.4.4 ZETA Mote（中継器）専用バッテリーの寿命	39
5.5 LPWA によるモニタリングポスト間通信の評価	40
6. 安定した運用に向けた課題	42
6.1 同軸ケーブルによる減衰	42
6.2 ZETA Mote（中継器）の設置場所	44
6.3 ZETA GW の通信頻度	45
6.4 ZETA Mote（中継器）の故障	45
6.5 ZETA AP の故障	46
7. まとめ	47

1. 緒言

島根県（以下「県」という。）では国の原子力災害対策指針に基づき、島根原子力発電所周辺 30 km 圏内に空間線量率を連続測定するモニタリングポストを 162 局整備しており（図 1）、災害時などの緊急時に備えて、通信設備の多重化を行っている。県は、通信設備の主回線に有線回線もしくは携帯回線、副回線として衛星回線を整備している。衛星回線は災害時に強いといわれているが、通信料金が高額などのデメリットがある。

令和 6 年能登半島地震では、主に通信関係の不具合により測定した放射線量をテレメータシステム上に送信できず、測定結果を確認することができない状況が一部地域のモニタリングポストにおいて発生した。このような事象においては、通信の早急な改善が望まれており、通信事業者に依存しない独自の通信回線網を構築する必要がある。

これらの課題を解決する上で LPWA（Low Power Wide Area）は有効な通信手段となることが期待されている。本事業では、LPWA を用いたモニタリングポストの導入に向け、実際に県が原子力施設周辺に整備しているモニタリングポストを用いて大規模な導入試験を行うことで、実環境における最適な配置方法や長期安定性の評価など実運用にあたり必要な知見を収集し、導入に当たっての基礎資料とすることを目的とする。

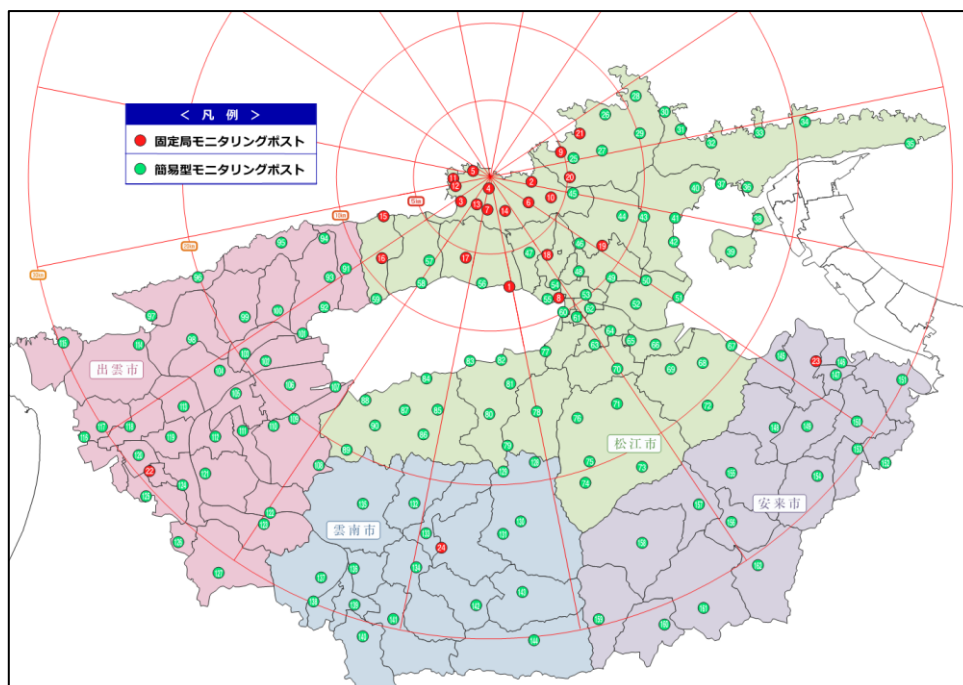


図 1 モニタリングポスト一覧

2. 令和6年度の業務概要

(1) 既設モニタリングポストへの設置とテレメータシステムへのデータ転送方法の確立

- ZETA（後述）ネットワーク構築のための電波シミュレーションの結果から、ZETA 機器を配置するエリアを選定した。
- モニタリングポストの測定値が ZETA でデータ転送できるように軽量化フォーマットを開発した。
- 既設のモニタリングポストに ZETA 機器を整備する方法を検討し、実際に設置を行った。
- ZETA で転送されたファイルをテレメータシステムに登録するシステムを整備した。

(2) 予備調査の実施

- 4 地点のモニタリングポストに ZETA 機器を整備した。
- ZETA 通信の通信可能距離及び通信の安定性について評価した。

(3) 実運用を想定した LPWA によるモニタリングポスト間通信の導入試験

- 設置場所の事前調査を行い、中継器局や衛星基地局の設置場所を検討した。
- 実際に ZETA 機器を整備し、ZETA 通信できるか評価した。
- 送信時間の検討によって、26 地点中 19 地点で良好な通信結果が得られた。

(4) 安定した運用に向けた課題の抽出

- ZETA 機器で使用する同軸ケーブルの最適な中継器局の配置について検討した。
- 機器の故障原因の調査を行った。

3. 既設モニタリングポストへの設置とテレメータシステムへのデータ転送方法

LPWA と既設のモニタの 22 局を用いて通信ネットワークを構成し、モニタリングポストから県環境放射線情報システム（テレメータシステム）までのデータ転送を調査した。また、予備試験として、令和 5 年度放射線監視等交付金によって整備した機器を使用して評価を行った。

3.1 LPWA 通信の規格

LPWA 通信の規格は ZETA（ZiFiSence 社製）を選定した。ZETA を選んだ理由は、メッシュ型の独自のネットワークを作成できる点で、発信機が自動で送信先を選択してデータ転送を行うため、機器の障害があった場合でもユーザが予備機で復旧させることができる。また、通信機器も小型で中継器（最大 4 段まで）を使用すれば数十キロまで通信が可能な点も環境放射線モニタリングに適している。ZETA サーバはクラウドタイプと実機によるオンプレミスタイプの 2 種類あるが、通信事業者に依存しない独自の通信回線網の構築を目的にしているため、オンプレミスのサーバを導入した。

3.2 ZETA ネットワーク構築のための電波シミュレーション

LPWA 通信機器を整備する上での課題の一つに通信可能な距離がある。ZETA の送信距離は市街地で 2～10 km であり、それ以上の距離で通信を行う場合は、間に中継器を設置する必要がある。既設のモニタリングポスト間で最適な機器の設置場所を検討するために、凸版印刷株式会社に電波シミュレーションを依頼した。電波シミュレーションは以下の条件で実施した。

① 電波シミュレーション全体に関する条件

a) ZETA 基地局設置想定

- 設置候補地点 : 既設モニタリングポスト全 162 地点
- 本体 : モニタリングポスト隣に設置
- アンテナ : モニタリングポスト隣の自立柱 4m 地点に設置

b) ZETA 中継器設置想定

- 設置候補地点① : 電柱、既設モニタリングポスト全 162 地点
- 本体 : 4m 地点に設置
- アンテナ : 4m 地点に設置
- 設置候補地点② : 防災無線
- 本体 : 10m 地点に設置
- アンテナ : 10m 地点に設置
- 設置候補地点③ : 県・市施設屋上（表 3-1 参照）

本体 : 表 3-1 参照

アンテナ : 表 3-1 参照

c) その他

ZETA 導入候補モニタリングポスト 125 地点を対象にシミュレーションを実施する。

中継数：中継器 3 個迄

ZETA 基地局の数は可能な限り少なくなるようにシミュレーションを行う。

ZETA 基地局、ZETA 中継器は相互に RSSI 値が-115dBm 以上の時に接続確立できるものとする。

ZETA 中継器同士の接続は、RSSI 値が最も大きい経路を選択して接続する。

② ZETA 基地局に関する条件

アンテナ : 無指向、最大利得 3dBi

アンテナポート数：1

送信出力 : 13dBm (20mW)

雑音指数 : 6dBm

中心周波数 : 920.6MHz (帯域幅 2kHz)

③ ZETA 中継器に関する条件

アンテナ : 無指向、最大利得 3dBi

アンテナポート数：1

送信出力 : 13dBm (20mW)

雑音指数 : 6dBm

中心周波数 : 920.6MHz (帯域幅 2kHz)

④ シミュレーション方法

計算モデル : Aster (レイトレーシング)

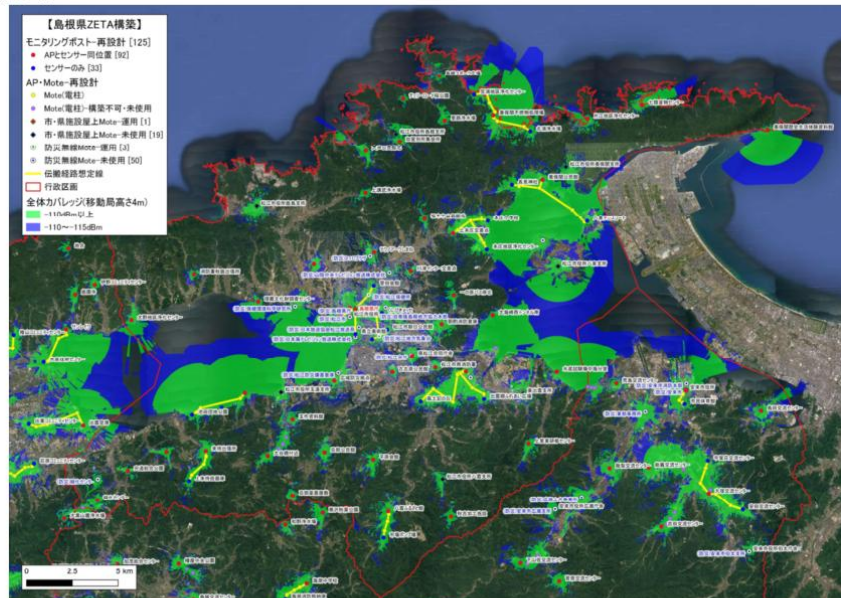
RSSI 値閾値 : -115dBm

シミュレーションの結果を図 3-1 に示す。宍道湖・中海の湖周辺は建物等による遮蔽が少なく、見通しがよいため通信距離が長く、モニタリングポスト間でも十分に ZETA 通信を行うことが可能だとわかった。また、市街地周辺では、施設屋上の高い場所に中継器を設置すればより広範囲のモニタリングポストに ZETA を導入することができると考えられる。

表 3-1 ZETA 中継器設置候補地点（県・市施設屋上）

名称	緯度	経度	建物高 (m)	アンテナ高 (m)	高さ不明分 (階数×5m)
島根県庁	35.47191666	133.0516944	27	31	
出雲市役所	35.36705	132.754578	25	29	
雲南市役所	35.287735	132.900894	25	29	5階
安来市役所	35.43034	133.250244	25	29	5階
安来市役所伯太庁舎	35.350574	133.287094	10	14	2階
出雲市役所佐田支所	35.244701	132.711639	10	14	2階
出雲市役所平田支所	35.434982	132.822144	15	19	3階
出雲市役所多伎支所	35.285091	132.625214	10	14	2階
松江市役所	35.467972	133.048508	20	24	
出雲市役所湖陵支所	35.322559	132.675247	15	19	3階
出雲市役所斐川行政センター	35.393456	132.84259	10	14	2階
松江市役所鹿島支所	35.523239	132.993057	15	19	3階
出雲市役所大社支所	35.39072	132.685516	10	14	2階
松江市役所八束支所	35.492077	133.174088	15	19	3階
安来市役所広瀬庁舎	35.372292	133.170776	15	19	3階
東出雲支所	35.429531	133.152374	15	19	3階
松江市役所玉湯支所	35.431225	133.006668	10	14	2階
松江市役所島根支所	35.557938	133.077332	10	14	2階
松江市役所美保関支所	35.540852	133.179398	10	14	2階
松江市役所八雲支所	35.387711	133.103394	10	14	2階

<松江市地域>



© TOPPAN PRINTING CO., LTD.

11

図 3-1 電波シミュレーションの結果

3.3 ZETA のデータ転送量

ZETA の 1 回あたりのデータ転送量は 50 Byte 以下となっている。県が整備しているモニタリングポストの測定値のデータ量は約 10 KB でテレメータシステムに転送しているため、ZETA 等で送信することは難しい。1 つの測定値を複数回に分割して送信することも可能だが、通信の安定性の観点から 1 度に全てのデータを転送することが望ましい。

県では将来の LPWA 導入も考慮し、衛星回線用として、測定値のデータが 50 Byte 以下になる軽量化フォーマットを開発した。電子線量計が設置してあるモニタリングポストについては、製造会社である応用光研工業株式会社によって以下の条件で通信ファイルが生成されるようにシングルボードコンピュータの「Raspberry Pi」の設置を依頼した。また、応用光研工業株式会社以外の測定器については、県が「Raspberry Pi」(図 3-2) を用いて、このフォーマットのファイル作成プログラムを作成し、LPWA 通信用の通信ファイルを作成した。

① 通信ファイル作成方法

- 測定器の 2 分値を 1 時間分 (データ数 30 個) の csv ファイルから局番、時間 (分)、測定値、欠測情報を抽出
- データを 2 進数にバイナリ変換
- ファイルの名前を測定値の日時に対応する 2 バイト文字で保存

② ファイルフォーマット

- 局番 : 10 bit で 1～1000 で表す
- データ時刻 : 2 分毎を 5 bit で 0～29 で表す
(例) 00 分 → 0、02 分 → 1、・・・ 58 分 → 29
- データ : 正時を基準に最新から遡って 30 個分 (1 時間分) を表 3-2 の内容で計 360 bit (30×12) で表す (小数点以下の値は四捨五入する)

表 3-2 データ内容

項目	bit 数
測定値の整数部 ($aa \times 10^b$ nGy/h の aa 部分)	7
測定値の指数部 ($aa \times 10^b$ nGy/h の b 部分)	3
感雨	1
欠測	1

欠測内容・その他 : 7 bit で表す

ファイルの名前 : 日時を A～Z、0～9 で表す

(例) 2 日 13 時 → BA、8 日 8 時 → E5、30 日 10 時 → TV

データサイズ : 382 bit (約 48 Byte)



図 3-2 Raspberry Pi

3.4 既設モニタリングポストへの設置

シミュレーション結果及び通信ファイルの作成を踏まえて、図 3-3 のデータ転送方式で既設モニタリングポストから ZETA 通信を行った。通信距離の関係で ZETA サーバエッジまで ZETA 通信が届かない地点については、ZETA AP (基地局) と ZETA サーバエッジ間の通信に既設の衛星回線 (スカパーJSAT、ExBird) を用いた。整備した ZETA 通信機器は LAN-ZETA-GW (発信機、図 3-4)、ZETA AP (図 3-5)、ZETA Mote (中継器、図 3-6) 及び ZETA サーバエッジ (図 3-7) とした。ZETA 通信機器の設置場所の概要を図 3-8 に示す。

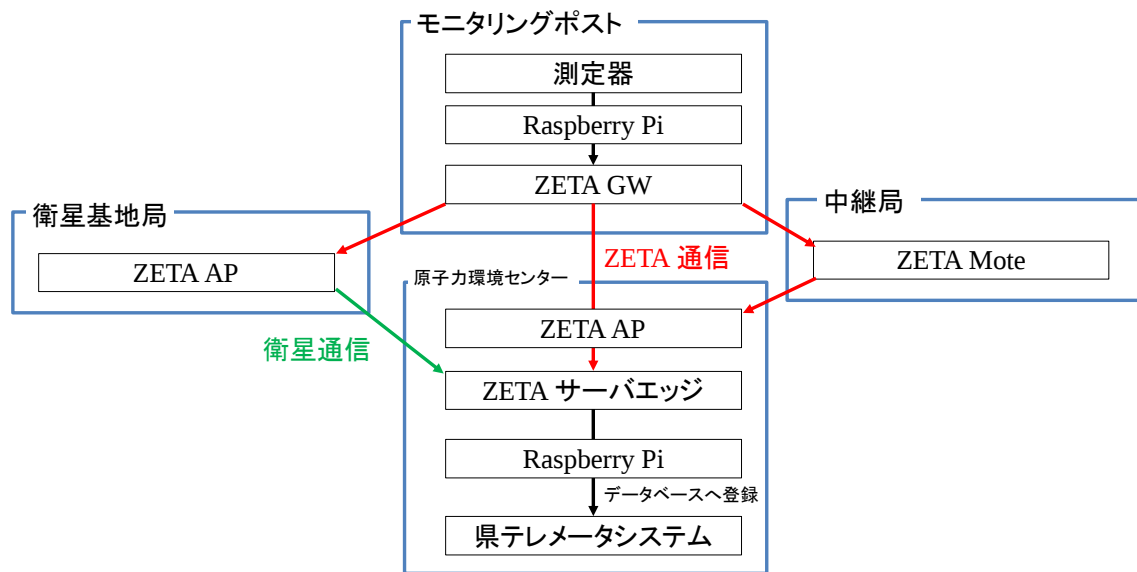


図 3-3 ZETA 通信方法



図 3-4 LAN-ZETA-GW



図 3-5 ZETA AP



図 3-6 ZETA Mote



図 3-7 ZETA サーバエッジ

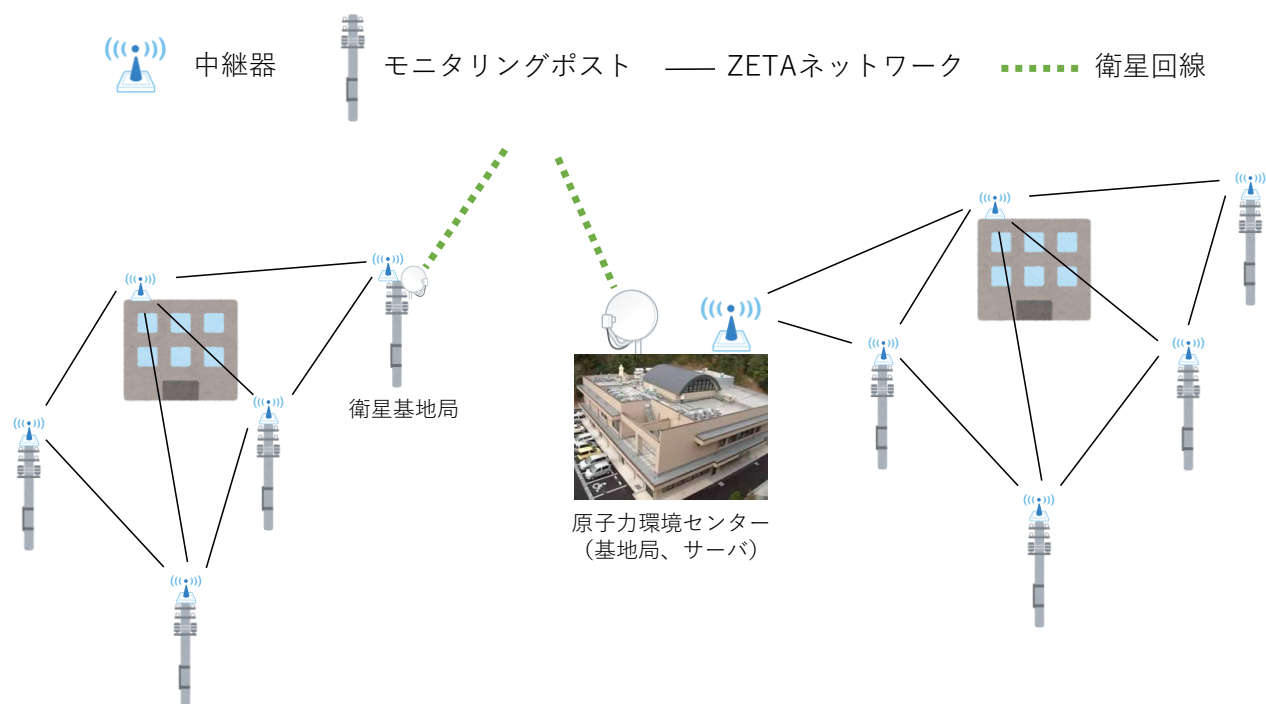


図 3-8 ZETA 通信機器の整備概要

電子線量計を設置しているモニタリングポストの ZETA GW の設置場所は図 3-9 のように防水機器収納ボックス内に設置した。電源は測定機にある USB 給電 (5V 1.0A) から配線した (図 3-10)。また、今後の ZETA ネットワーク構築を考慮して、モニタリングポストには ZETA Mote も併設した。ZETA Mote は専用のバッテリー (図 3-11) で動作するタイプを設置した。アンテナの位置はシミュレーションの条件より、アンテナ高が 4m 以上になるように設置した (図 3-12、3-13)。

局舎設置型のモニタリングポストについては、サーバラック内に ZETA GW 及び Raspberry Pi を設置し (図 3-14)、アンテナを屋上の手すりに固定した (図 3-15)。



図 3-9 ZETA 通信機器の設置の様子

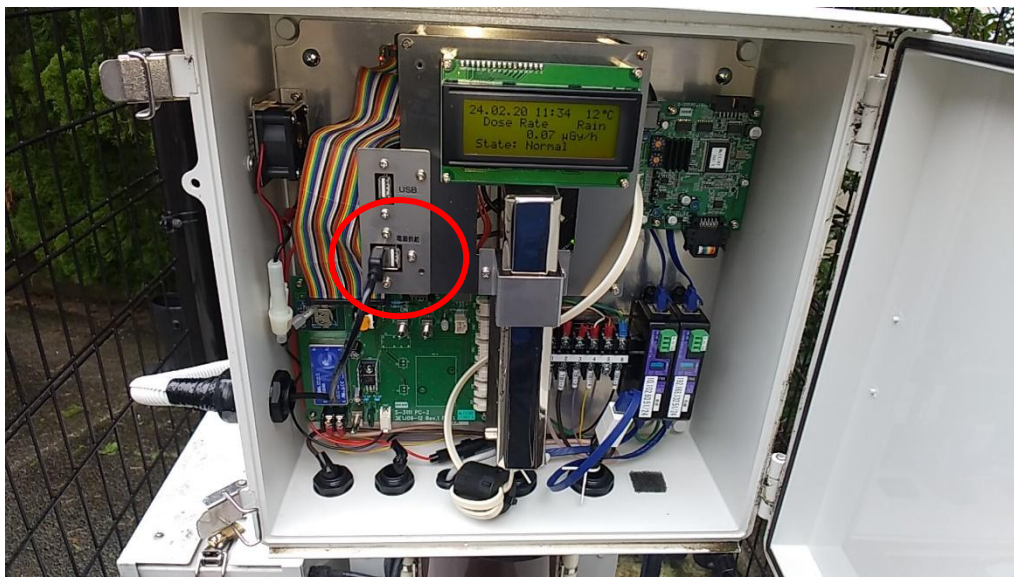


図 3-10 ZETA GW の給電先



図 3-11 ZETA Mote 専用バッテリー



図 3-12 アンテナ取り付け位置



図 3-13 アンテナ取り付け位置



図 3-14 ZETA 通信機器の設置



図 3-15 ZETA 通信機器アンテナの設置

電波シミュレーションの結果よりさらに広範囲のモニタリングポストで通信ができるように ZETA AP は高所で見通しの良い場所を選定した。ZETA AP の一つを県原子力環境センターの隣にある県保健環境科学研究所（7 階建）に設置し（図 3-16）、アンテナを屋上に設置した（図 3-17）。ZETA AP と原子力環境センターの ZETA サーバエッジ間の通信は光ケーブル及び有線 LAN で行った。

衛星基地局については、モニタリングポストに ZETA GW と同じ条件で設置した（図 3-18、3-19）。衛星基地局でも通信範囲を拡大するため、近くの建物（県立青少年の家（以下「サンレイク」という。））の屋上に ZETA Mote とアンテナを取り付けた（図 3-20、3-21）。

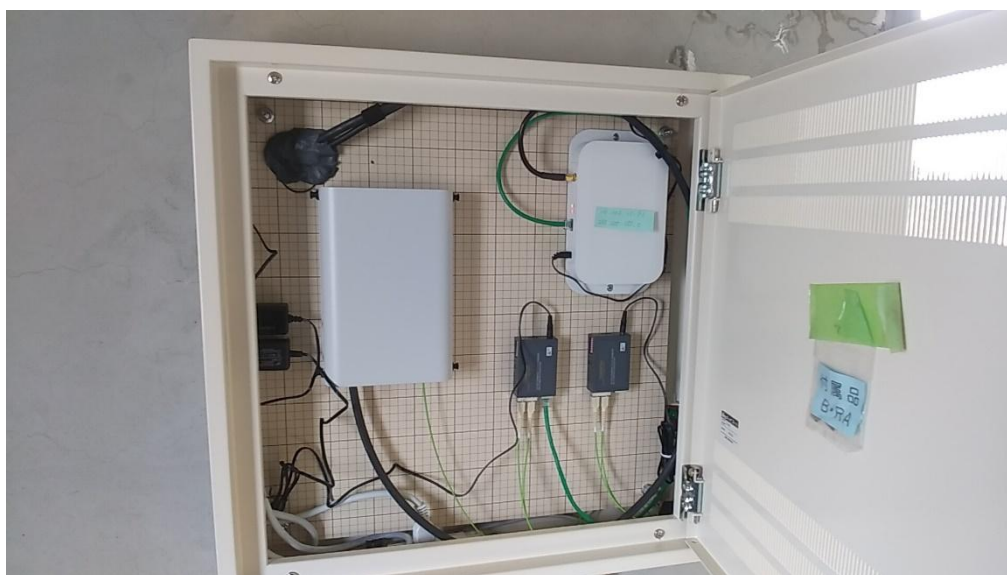


図 3-16 ZETA AP の設置の様子（県保健環境科学研究所）



図 3-17 ZETA AP のアンテナの取り付け場所（県保健環境科学研究所）



図 3-18 ZETA AP の設置の様子



図 3-19 ZETA AP のアンテナの設置場所

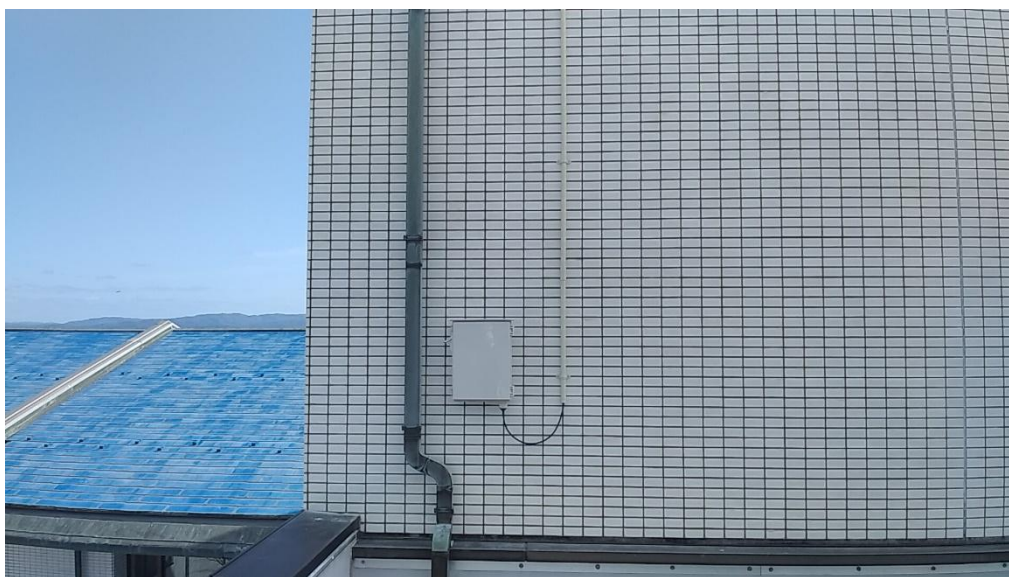


図 3-20 ZETA Mote の設置場所（サンレイク）



図 3-21 アンテナの設置場所（サンレイク）

3.5 テレメータシステムへの接続

ZETA サーバエッジへ登録されたデータは、FTP-GET でデータ収集を行った。そのあと、通信ファイル作成の逆の手順で csv ファイルの作成を行った。これらの作業は Raspberry Pi もしくは VMware Workstation の仮想マシンでプログラムを作成し、自動で行うように設定した。また、衛星回線などの他の回線と比較を行うために、テレメータシステム内に仮のデータベースを作成し、LPWA 通信で得られた測定値等のデータ登録を行った。県テレメータシステムを含むネットワーク概要を図 3-22 に示す。

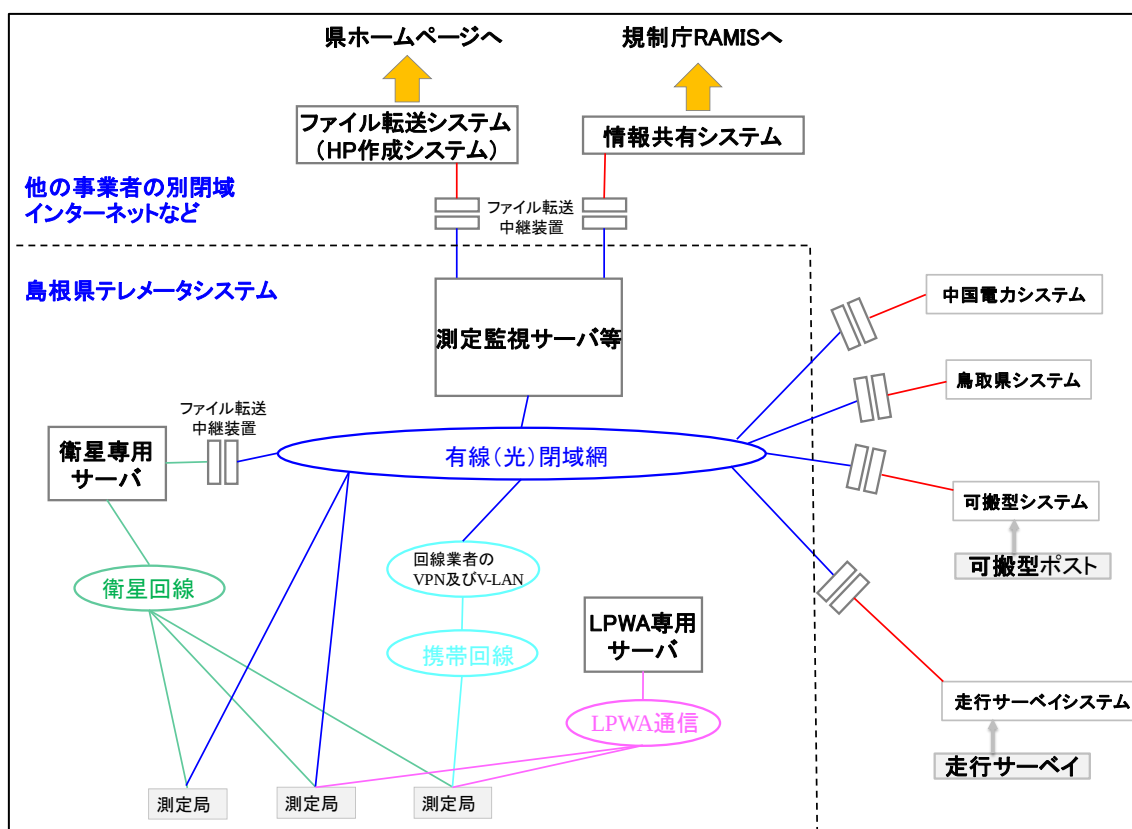


図 3-22 県ネットワーク概要図

4. 予備調査

大規模な導入試験を実施する前に数地点で予備試験を実施した。ZETA 機器は令和 5 年度放射線監視等交付金によって整備した機器を使用して調査を行った。

4.1 ZETA 機器の設置場所

予備調査で使用した機器は以下のとおり。

- ・ ZETA サーバエッジ：1 台
- ・ ZETA AP：1 台
- ・ ZETA Mote：1 台
- ・ ZETA GW：4 台

機器の設置場所は図 4-1 に示す。電波シミュレーションの結果から宍道湖周辺は遮るものがなく通信状況が良好だとわかったので、県原子力環境センターの対岸にある県立美術館と宍道湖ふれあいパークのモニタリングポスト（電子線量計タイプ）に ZETA GW を設置した。また、島根原子力発電所周辺の深田北局と魚瀬局（局舎設置タイプ）にも ZETA GW を設置した。魚瀬局の ZETA GW は直接 ZETA AP と通信できなかったなので、深田北局に ZETA Mote を設置し、通信を行った。

ZETA GW は 3.3 の通信ファイルを 2 分に 1 回の頻度で送信するように設定した。

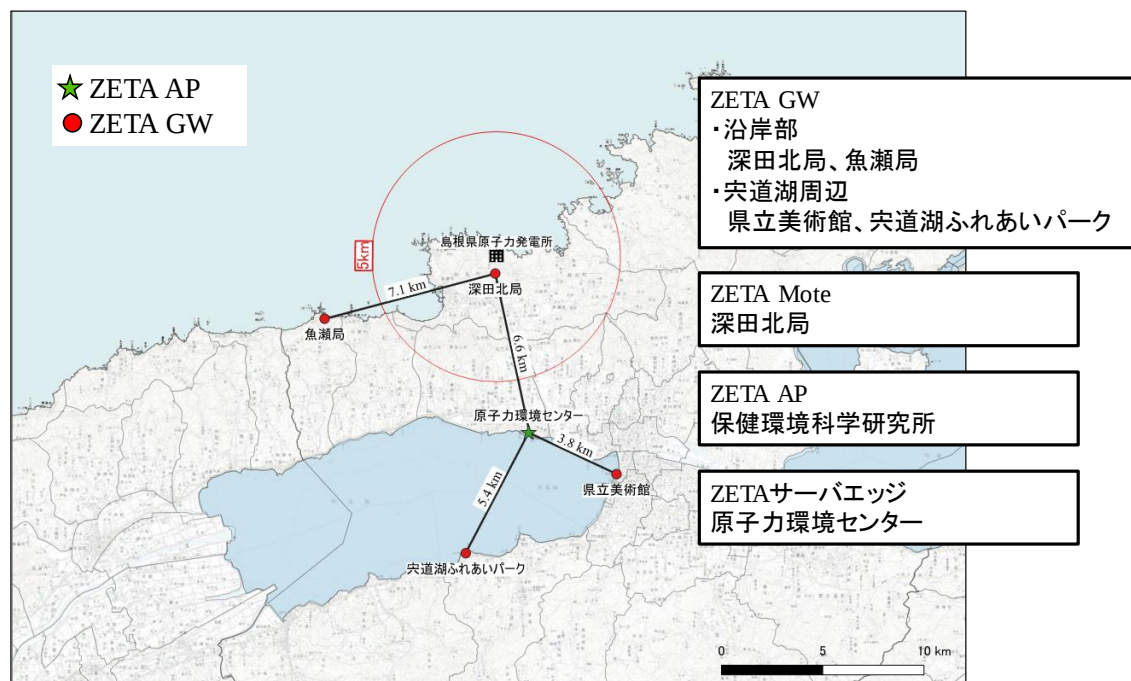


図 4-1 設置場所

4.2 ZETA 通信の通信可能距離

4 地点に設置した ZETA GW もしくは ZETA Mote の RSSI の変動を図 4-2 に示す。RSSI のデータは ZETA の仕様で 4 時間に 1 回の頻度もしくは ZETA AP と再接続する時にサーバに記録される。通信が不安定（RSSI が -120dBm 以下）な場合は再登録の数が増えて、RSSI のデータ数が多くなっている。魚瀬局は深田北局の ZETA Mote を経由して通信を行っているため、似た挙動を示している。

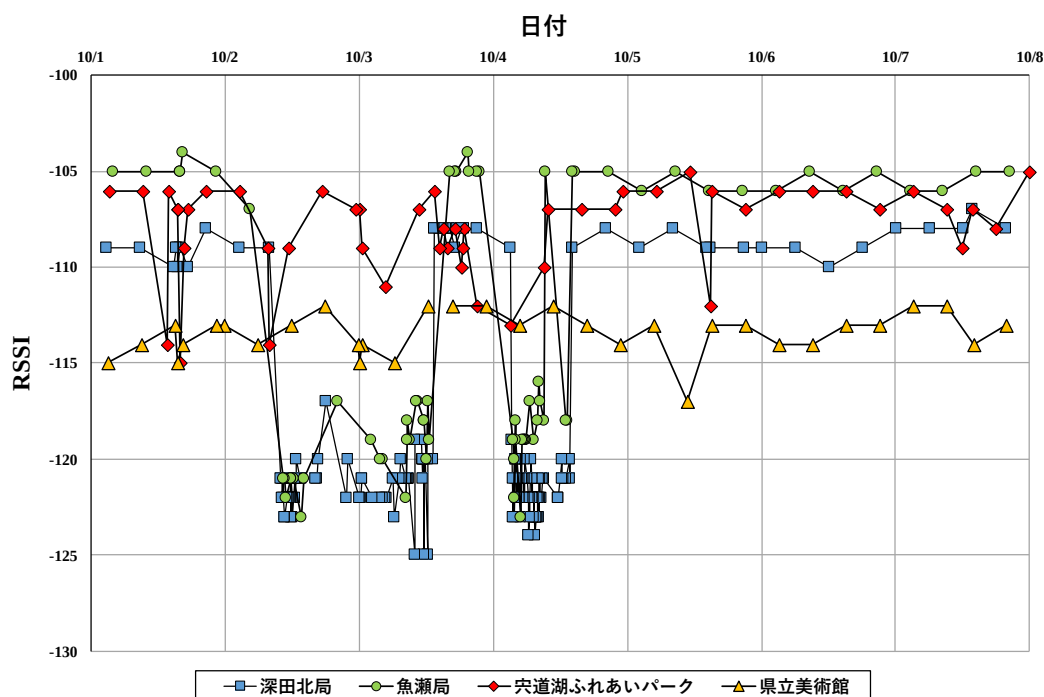


図 4-2 RSSI の挙動

図 4-3 に 4 地点の ZETA GW がサーバにデータをアップした数を示す。すべての地点でデータがサーバにアップされており、ZETA 通信で測定値を送信できた。また、RSSI が -120dBm 以下で不安定な 10 月 2 日～4 日の深田北局や魚瀬局でも 700 回近くのデータがアップロードされた。

これらの結果から、ZETA は中継器なしで約 $4\text{km}\sim 6\text{km}$ 、中継器 1 台で約 14km の通信が可能ということが分かった。電波シミュレーションの結果よりも広範囲で通信ができたのは、ZETA AP のアンテナを 7 階建の屋上に設置したことが要因だと考えられる。

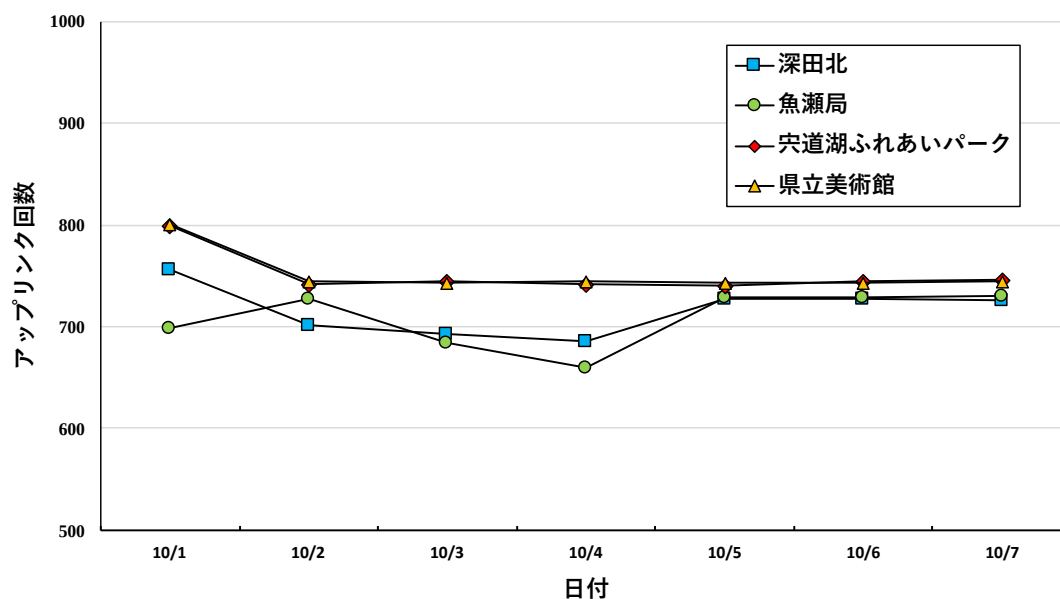


図 4-3 ZETA GW からのアップリンク回数

4.3 ZETA 通信の安定性の試験結果

4 地点で ZETA 通信できることがわかったので、テレメータシステムに LPWA 用のデータベースを作成し、モニタリングポストの測定値を登録できるか試験をした。測定器や測定期間は以下の条件で行った。

①測定期間

2024 年 10 月 1 日～11 月 30 日

②測定器

深田北局、魚瀬局：NaI(Tl)シンチレーション検出器（応用光研工業株式会社製）

穴道湖ふれあいパーク、県立美術館：Si 半導体検出器（応用光研工業株式会社製）

③通信ファイルの作成装置

深田北局、魚瀬局：Raspberry Pi（県設定）

穴道湖ふれあいパーク、県立美術館：Raspberry Pi（応用光研工業株式会社設定）

④送信頻度

2 分に 1 回

⑤欠測数

測定器の点検等を除いてデータベースに登録できなかった数

また、ZETA 通信と比較するために主回線と副回線でも同様にデータベースを作成し、回線ごとに測定値をそれぞれのデータベースへ登録した。

①主回線

深田北局、魚瀬局：有線（光）広域イーサネット（エネコム）

宍道湖ふれあいパーク、県立美術館：携帯回線（エネコム）

②副回線

4 局：衛星回線、ExBird（スカパーJSAT）

表 4-1 に回線ごとのデータベースへの欠測数を示す。なお、10 月 11 日の深田北局及び 11 月 13 日の魚瀬局で線量率計の定期点検を実施したため、点検期間中のデータは欠測数から除いている。主回線は欠測がなく、ほぼリアルタイムで測定値をデータベースに登録できた。衛星回線は欠測数わずかに発生した。これは、雨などの気象条件で通信が不安定になり、データの収集が間に合わなかったことが原因である。宍道湖ふれあいパークと県立美術館は送信するデータの種類が少なく、データ容量が小さいため欠測にならなかったと考えられる。ZETA の欠測数は深田北局、魚瀬局、宍道湖ふれあいパークでは衛星回線と同程度だった。しかし、県立美術館で 118 個（測定値 4 時間分）欠測になった。

表 4-1 回線ごとの欠測数

回線の種類	深田北局	魚瀬局	宍道湖ふれあい パーク	県立美術館
主回線	0	0	0	0
衛星回線	2	15	0	0
ZETA	0	5	3	118

また、ZETA についてデータベースに登録したデータの数と欠測率を表 4-2 にまとめた。欠測数が多かった県立美術館でも期間中の欠測率は 0.3%程度でほぼデータ登録ができた。2 分に 1 回の頻度ではデータ転送を失敗することがあるが、3.3 記載の方法で 1 時間分のデータを遡って通信ファイルを作成したことで、欠測率を少なくできた。

表 4-2 ZETA 通信の欠測率

	深田北局	魚瀬局	宍道湖ふれあい パーク	県立美術館
総データ数	43,720	43,745	43,920	43,920
登録したデータの数	43,720	43,730	43,917	43,802
欠測率(%)	0	0.03	0.007	0.27

4.4 予備調査のまとめ

ZETA 通信の距離及び安定性の試験から、今回の既設モニタリングポストへの設置方法とテレメータシステムへのデータ転送方法を用いることで島根原子力発電所周辺 30 km 圏内の多くの場所に ZETA 通信網を拡大できることがわかった。ZETA 機器の設置場所は建物の屋上などの標高が高く見通しがよい地点を選定することで、遠くまで通信できる。さらに、島根原子力発電所周辺には宍道湖・中海といった湖があり、湖周辺のモニタリングポストでは良好な通信環境を形成できることがわかった。

5. 実運用を想定した LPWA によるモニタリングポスト間通信の導入試験

5.1 設置前の現地調査

モニタリングポストに ZETA 機器を設置する前に調査用の ZETA Mote やクラウドサーバを用いた現地調査を TOPPAN デジタル株式会社に委託した。結果を表 5-1 に示す。この結果から、中継器局や衛星基地局の設置場所を検討した。

表 5-1 事前調査の結果

	MP場所	接続成功	RSSI値									
			1		2		3		4		5	
			UP	DOWN	UP	DOWN	UP	DOWN	UP	DOWN	UP	DOWN
56	埋蔵文化財調査センター	○	-109	-110	-107	-108	-109	-108	-108	-108	-108	-111
57	消防署秋鹿出張所	○	-115	-115	-117	-113	-113	-113	-113	-114	-113	-114
58	秋鹿公民館	○	-113	-115	-113	-112	-113	-115	-113	-113	-117	-116
59	大野地区浄化センター	○	-124	-118	-120	-117	-118	-117	-	-	-	-
93	鹿園寺	×	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
101	水産技術センター	○	-117	-120	-117	-120	-117	-120	-117	-121	-116	-120
61	雑賀小学校	○	-117	-121	-121	-120	-122	-121	-122	-120	-121	-121
62	朝日公民館	×	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
64	松江合同庁舎	×	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
47	生馬公民館	×	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
54	オフサイトセンター	○	-111	-111	-108	-109	-109	-109	-109	-110	-109	-109
55	城西公民館	○	-96	-96	-96	-95	-97	-95	-96	-94	-97	-95
84	池田団地公園	×	-115	-116	-113	-114	-113	-115	ND	ND	ND	ND
88	宍道支所	×	-116	-117	-115	-127	ND	ND	ND	ND	ND	ND
107	出雲空港	×	-115	-115	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
46	テクノアークしまね	○	-119	-117	-114	-115	-115	-115	-115	-116	-115	-115
48	菅田会館	○	-117	-114	-113	-109	-114	-115	-114	-114	-113	-109
53	くにびきメッセ	○	-108	-108	-109	-110	-108	-107	-110	-107	-110	-111
64	古志原公民館	×	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
77	広域防災拠点	○	-121	-125	-122	-125	-121	-127	-123	-125	ND	ND
81	玉作資料館	×	-120	-123	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
82	玉湯支所	○	-104	-108	-105	-106	-104	-106	-104	-105	-105	-107

5.2 ZETA 機器の設置場所

電波シミュレーションの結果及び事前調査の結果より、令和 6 年度は、昨年度整備した範囲を拡大し、宍道湖周辺 22 箇所（図 5-1）の地点に ZETA GW を設置した。今回、ZETA のメッシュ型の独自ネットワークを作成も試験する目的で、ZETA Mote も 22 箇所のモニタリングポストに設置した。宍道湖西岸は ZETA のみで通信することが難しい可能性があったので、衛星基地局をサンレイクのモニタリングポストに設置した。また、松江市の市街地には中継局として、県庁屋上（7 階建）に ZETA Mote を設置した。表 5-2～5-5 に本調査で設置した ZETA 機器の設置場所一覧を示す。

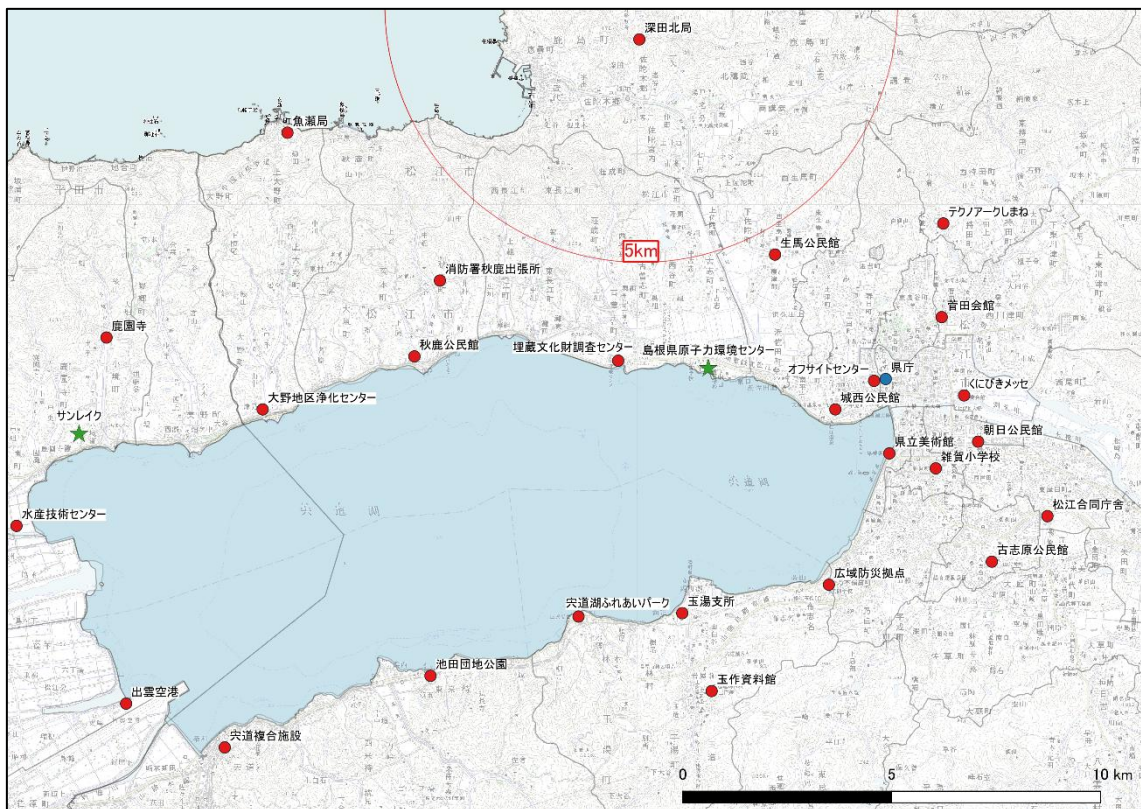


図 5-1 ZETA 機器の設置場所

表 5-2 ZETA サーバエッジの設置場所

地点名	設置場所	ZETA APとの通信方法
県原子力環境センタ	サーバラック内	有線LAN or 衛星回線 (ExBird)

表 5-3 ZETA AP (基地局) の設置場所

地点名	設置場所	アンテナ設置場所	アンテナ高	ZETAサーバとの通信方法
県保健環境科学研究	建物7階	建物屋上	約30m	有線LAN
サンレイク	モニタリングポスト	自営柱	約5m	衛星回線 (ExBird)

表 5-4 ZETAGW 及び ZETA Mote の設置場所

地点名	ZETA GW設置場所	ZETA Mote設置場所	アンテナ高
深田北局	モニタリングポスト	局舎屋上	約4m
魚瀬局	モニタリングポスト	局舎屋上	約4m
テクノアークしまね	モニタリングポスト	自営柱	約5m
生馬公民館	モニタリングポスト	自営柱	約5m
菅田会館	モニタリングポスト	自営柱	約5m
くにびきメッセ	モニタリングポスト	自営柱	約5m
オフサイトセンター	モニタリングポスト	建物屋上	約17m
城西公民館	モニタリングポスト	自営柱	約5m
埋蔵文化財調査センター	モニタリングポスト	自営柱	約4m
消防署秋鹿出張所	モニタリングポスト	自営柱	約5m
秋鹿公民館	モニタリングポスト	自営柱	約5m
大野地区浄化センター	モニタリングポスト	自営柱	約5m
県立美術館	モニタリングポスト	自営柱	約5m
雑賀小学校	モニタリングポスト	自営柱	約5m
朝日公民館	モニタリングポスト	建物屋上	約5m
古志原公民館	モニタリングポスト	自営柱	約5m
松江合同庁舎	モニタリングポスト	建物屋上	約32m
広域防災拠点	モニタリングポスト	自営柱	約5m
玉作資料館	モニタリングポスト	自営柱	約5m
玉湯支所	モニタリングポスト	自営柱	約5m
宍道湖ふれあいパーク	モニタリングポスト	自営柱	約5m
池田団地公園	モニタリングポスト	自営柱	約5m
宍道複合施設	モニタリングポスト	自営柱	約5m
鹿園寺	モニタリングポスト	自営柱	約5m
水産技術センター	モニタリングポスト	自営柱	約5m
出雲空港	モニタリングポスト	自営柱	約5m

表 5-5 ZETA Mote（中継器局）の設置場所

地点名	設置場所	アンテナ設置場所	アンテナ高
県庁	建物屋上	建物屋上	約34m
サンレイク	建物屋上	建物屋上	約17m

5.3 ZETA 機器の設置作業

ZETA 機器は「3. 既設モニタリングポストへの設置とテレメータシステムへのデータ転送方法」で日海通信工業株式会社に設置作業を委託した。また、既設モニタリングポストに改修が必要な部分は、応用光研工業株式会社に改修作業を委託した。

新規で購入した ZETA 機器については、TOPPAN デジタル株式会社に ZETA サーバエッジへ登録を依頼した。また、ZETA GW を県が作成した通信ファイル用に設定する作業も依頼した。

代表的な地点の設置作業及び登録作業の様子を図 5-2～5-13 に示す。

	
施工前	アンテナ取り付け金具
	
アンテナ取り付け作業	機器収納ボックスの増設

図 5-2 既設モニタリングポスト（菅田会館）への設置作業①

	
有線 LAN の配線	USB 給電の配線
	
ZETA 機器の取り付け	同軸ケーブルの配線
	
施工後	

図 5-3 既設モニタリングポスト（菅田会館）への設置作業②

	
施工前	アンテナ取り付け
	
アンテナ取り付け	機器収納ボックスの設置
	
同軸ケーブルの配線	ZETA 機器の取り付け

図 5-4 既設モニタリングポスト（くにびきメッセ）への設置作業①



図 5-5 既設モニタリングポスト（くにびきメッセ）への設置作業②



図 5-6 既設モニタリングポスト（玉湯支所）への設置作業①

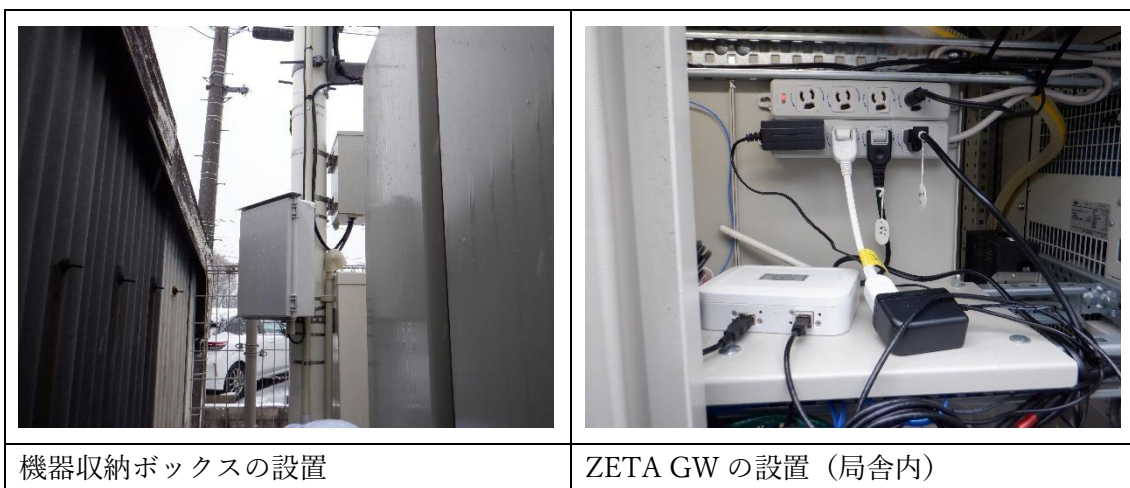


図 5-7 既設モニタリングポスト（玉湯支所）への設置作業②

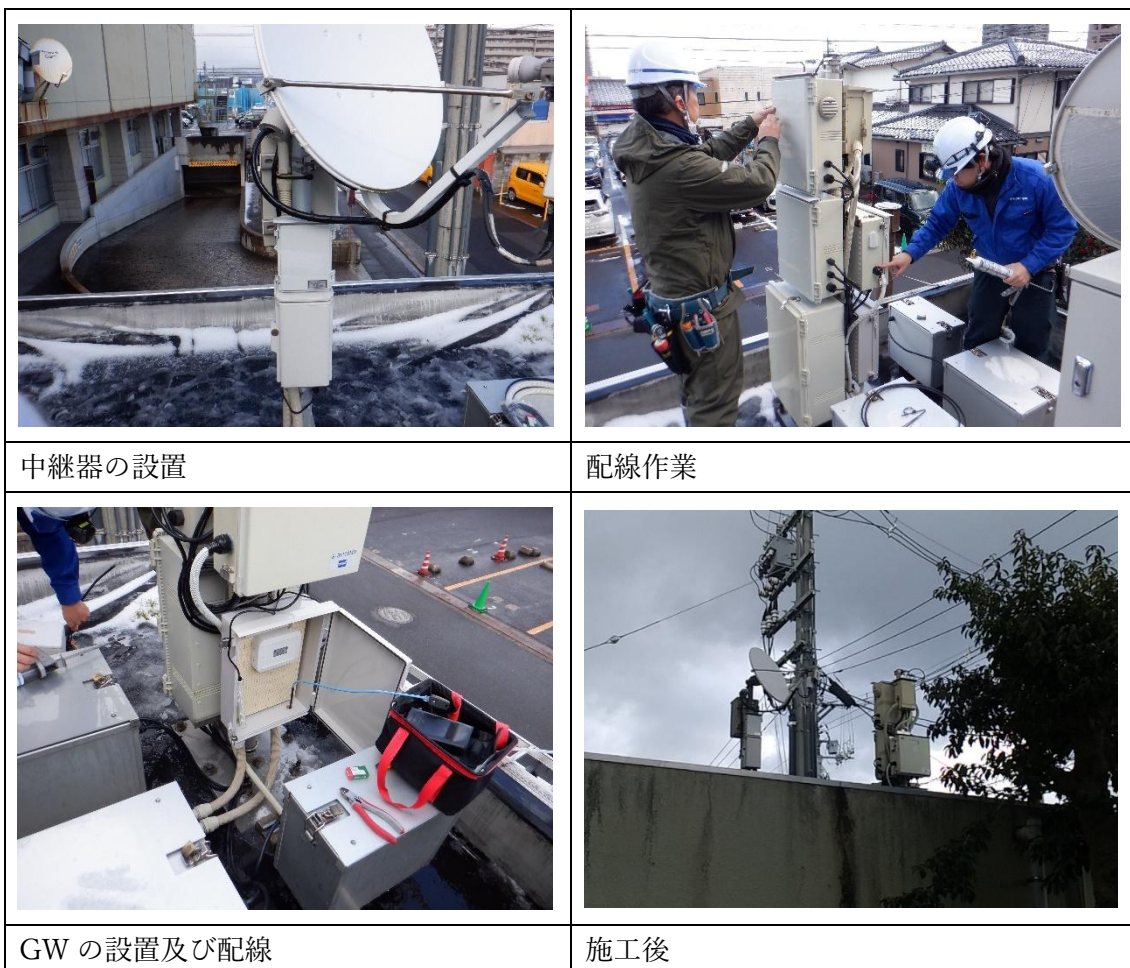


図 5-8 既設モニタリングポスト（朝日公民館）への設置作業

	
施工前	新規ポールの設置
	
機器収納ボックスの設置	GW 設置及び配線
	
施工後	

図 5-9 既設モニタリングポスト（オフサイトセンター）への設置作業

	
アンテナの取り付け	同軸ケーブルの配線
	
ZETA Mote（中継器）の設置	施工後

図 5-9 建物屋上（オフサイトセンター）への設置作業

	
ZETA Mote（中継器）	施工後

図 5-10 建物屋上（松江合同庁舎）への設置作業

	 
施工前	ZETA Mote（中継器）

図 5-11 中継器局（県庁）への設置作業①



図 5-12 中継器局（県庁）への設置作業②

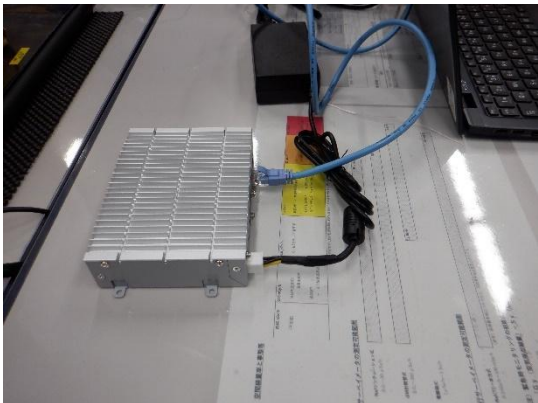
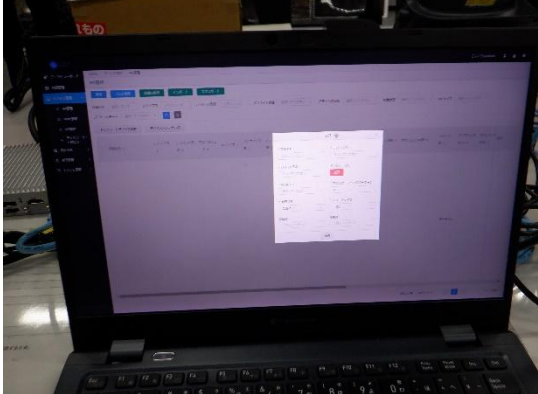
	
ZETA サーバエッジ登録作業	ZETA サーバエッジ登録作業
	
ZETA サーバエッジ登録作業	ZETA サーバエッジ登録作業
	
ZETA サーバエッジ登録作業	整備方針の協議

図 5-13 ZETA サーバへ登録作業等

5.4 調査結果

5.4.1 通信結果

図 5-1 の地点の既設のモニタリングポストと ZETA 機器を用いて通信ネットワークを作成し、以下の条件で調査を行った。予備調査では送信頻度は 2 分に 1 回としていたが、機器の増設に伴う通信の混線を考慮して、5 分に 1 回に設定を変更した。

①測定期間

2025 年 1 月 26 日～1 月 31 日

②測定器

深田北局、魚瀬局：NaI(Tl)シンチレーション検出器（応用光研工業株式会社製）

その他のモニタリングポスト：Si 半導体検出器（応用光研工業株式会社製）

③通信ファイルの作成装置

深田北局、魚瀬局、秋鹿公民館、玉湯支所、宍道複合施設：Raspberry Pi（県設定）

その他のモニタリングポスト：Raspberry Pi（応用光研工業株式会社設定）

④送信頻度

5 分に 1 回

⑤データ登録数

測定器の点検等を除いてデータベースに登録できた数

表 5-6～5-8 に期間中のデータ登録数、登録率及び ZETA Mote の RSSI の平均値を示す。また、ZETA 通信の経路を図 5-14 に示す。宍道湖の湖岸にあるモニタリングポストや県庁中継器局周辺のモニタリングポストはデータ登録がほぼできており、ZETA によるデータ伝送が可能とわかった。

また、水産技術センターや出雲空港はサンレイク衛星基地局を介して ZETA サーバエッジにデータ伝送を行っており、ZETA は他の回線を利用して伝送できることが分かった。

生馬公民館、朝日公民館及び玉作資料館は ZETA GW と ZETA Mote をサーバ上で認識することはできたが、データ転送までの通信強度がなかった。秋鹿公民館は機器登録ができなかった。

表 5-6 各モニタリングポストのデータ登録数

テクノアーク しまね	生馬公民館	菅田会館	くにびきメッ セ	オフサイトセ ンター	城西公民館	埋蔵文化セン ター	消防秋鹿出張 所	秋鹿公民館	大野地区浄化 センター	雑賀小学校
2,983	0	1,202	4,227	4,265	4,291	3,441	1,060	0	4,318	3,641
朝日公民館	古志原公民館	松江合同庁舎	広域防災拠点	玉作資料館	玉湯支所	池田団地公園	宍道複合施設	鹿園寺	水産技術セン ター	出雲空港
0	98	71	371	0	4,297	4,319	650	4,103	3,875	4,320

表 5-7 各モニタリングポストのデータ登録率

テクノアーク しまね	生馬公民館	菅田会館	くにびきメッ セ	オフサイトセ ンター	城西公民館	埋蔵文化セン ター	消防秋鹿出張 所	秋鹿公民館	大野地区浄化 センター	雑賀小学校
69%	0%	28%	98%	99%	99%	80%	25%	0%	98%	84%
朝日公民館	古志原公民館	松江合同庁舎	広域防災拠点	玉作資料館	玉湯支所	池田団地公園	宍道複合施設	鹿園寺	水産技術セン ター	出雲空港
0%	2%	2%	9%	0%	99%	100%	15%	95%	90%	100%

表 5-8 モニタリングポストの ZETA Mote の RSSI

テクノアーク しまね	生馬公民館	菅田会館	くにびきメッ セ	オフサイトセ ンター	城西公民館	埋蔵文化セン ター	消防秋鹿出張 所	秋鹿公民館	大野地区浄化 センター	雑賀小学校
-117		-115	-102	-100	-90	-117	-125		-115	-120
朝日公民館	古志原公民館	松江合同庁舎	広域防災拠点	玉作資料館	玉湯支所	池田団地公園	宍道複合施設	鹿園寺	水産技術セン ター	出雲空港
	-125	-120	-115		-98	-110	-130	-120	-120	-97

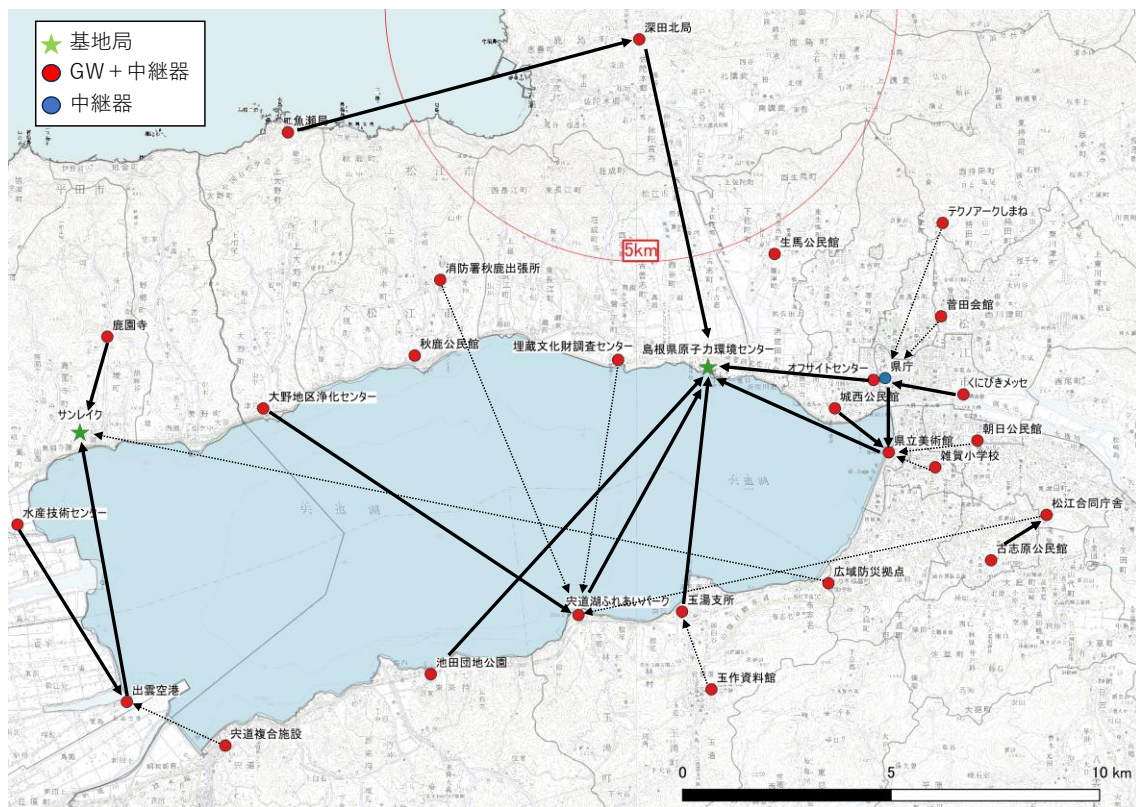


図 5-14 ZETA 通信の経路

5.4.2 秋鹿公民館の通信不良

5.4.1 通信結果で秋鹿公民館は ZETA サーバエッジに ZETA 機器の登録ができなかった。しかし、事前調査（表 5-1）では穴道湖ふれあいパークを経由して通信可能だった。そこで、図 5-15 のように、予備の ZETA Mote を用いて接続試験を行った。その結果、予備機を経由してデータ転送が可能だった。



図 5-15 予備機を使った通信試験

設置業者の日海通信工業株式会社に機器やアンテナの状況確認を依頼した。2 月 13 日に状況確認を実施し、同軸ケーブルとアンテナの接続部分が折れていることが原因だとわかった（図 5-16）。新しい同軸ケーブルとアンテナに交換することで、通信状況が改善した。



図 5-16 折れたアンテナ

5.4.3 送信時間の検討

5.4.1通信結果より、菅田会館や広域防災拠点のRSSIの値に比べてデータ登録数が少ない。また、松江市街地の ZETA GW 及び ZETA Mote の再登録数も多いことから、機器の増設に伴う通信の混線が発生していることが考えられた。そこで、通信頻度を次の a)～c)に ZETA GW を設定変更し、データ登録数に変化があるか調査した。

①送信頻度

a) 10 分に 1 回

b) 菅田会館、テクノアーク、松江合同庁舎、広域防災拠点、宍道複合施設を 11 分に 1 回
その他のモニタリングポストは 10 分に 1 回

c) 20 分に 1 回

②測定期間

a) 2025 年 2 月 4 日～2 月 7 日

b) 2025 年 2 月 11 日～2 月 14 日

c) 2025 年 2 月 18 日～2 月 21 日

表 5-9、5-10 に a)～c)の設定時のデータ登録数と登録率を示す。なお、秋鹿公民館は、b)の期間中にアンテナの交換（5.4.2 記載）を行っている。表 5-6、5-7 の結果に比べて、通信の改善が見られた。特にテクノアークしまね、菅田会館などの登録数は頻度を減らすほどデータ登録率の改善が見られた。このことから、ZETA 機器が密集しており、1つの ZETA AP や ZETA Mote にアクセスが集中している地点については、送信頻度を調整することで、通信の安定性を高めることができる。

しかし、生馬公民館などのデータ転送ができてない地点や宍道複合施設などの RSSI が低い地点は登録率に変化があまりなかった。これらの地点を改善するためには、中継器局の増設や衛星基地局の増設が必要と考えられる。

表 5-9 a)～c)に設定した時のデータ登録数

	テクノ・アーク しまね	生馬公民館	菅田会館	くにびきメッ セ	オフサイトセ ンター	城西公民館	埋蔵文化セン ター	消防秋鹿出張 所	秋鹿公民館	大野地区浄化 センター	雑賀小学校
a)	1,811	0	1,051	2,787	2,805	2,874	2,883	1,347	47	2,879	2,741
b)	2,543	0	1,241	2,671	2,880	2,880	2,821	2,366	1,044	2,880	2,299
c)	2,644	0	2,450	2,879	2,862	2,880	2,694	2,876	2,790	2,850	2,439
	朝日公民館	古志原公民館	松江合同庁舎	広域防災拠点	玉作資料館	玉湯支所	池田団地公園	宍道複合施設	鹿園寺	水産技術セン ター	出雲空港
a)	0	3	565	0	0	2,870	2,879	1,133	2,704	2,714	2,879
b)	0	128	170	1,651	0	2,862	2,880	843	2,851	2,761	2,880
c)	0	521	801	2,123	0	2,865	2,880	663	2,587	2,852	2,880

表 5-10 a)～c)に設定した時のデータ登録率

	テクノ・アーク しまね	生馬公民館	菅田会館	くにびきメッ セ	オフサイトセ ンター	城西公民館	埋蔵文化セン ター	消防秋鹿出張 所	秋鹿公民館	大野地区浄化 センター	雑賀小学校
a)	63%	0%	36%	97%	97%	100%	98%	47%	2%	100%	94%
b)	88%	0%	43%	93%	100%	100%	98%	82%	36%	100%	80%
c)	92%	0%	85%	100%	99%	100%	94%	100%	97%	99%	85%
	朝日公民館	古志原公民館	松江合同庁舎	広域防災拠点	玉作資料館	玉湯支所	池田団地公園	宍道複合施設	鹿園寺	水産技術セン ター	出雲空港
a)	0%	2%	16%	0%	0%	100%	100%	39%	94%	94%	100%
b)	0%	4%	6%	57%	0%	99%	100%	29%	99%	96%	100%
c)	0%	18%	28%	74%	0%	99%	100%	23%	90%	99%	100%

5.4.4 ZETA Mote（中継器）専用バッテリーの寿命

既設のモニタリングポストに ZETA を導入するにあたって、機器の維持管理を検討する必要がある。県では、ZETA Mote は電源のない場所でも設置できるように、専用バッテリーで稼働するタイプを導入した。このバッテリーの交換頻度を知るために、宍道湖ふれあいパークに設置した ZETA Mote のバッテリー量の減少を調査した。ZETA Mote は ZETA AP と接続する際にバッテリー量も RSSI のデータと併せて送信する。表 5-11 にバッテリー量の推移を示す。2 月 28 日のデータ転送を最後に更新がなく、バッテリー量が 1.7 を下回ると通信できなくなる。また、バッテリーの減り方も一定ではない。これは、ZETA Mote に接続する機器の数や通信頻度に依存していると考えられる。

今後は、今年度整備した ZETA Mote についてもバッテリー量の調査を行い、最適なバッテリー交換の頻度を検討する予定である。

表 5-11 ZETA Mote のバッテリー量の推移

日付	6 月 5 日	10 月 1 日	12 月 1 日	1 月 26 日	2 月 28
バッテリー量	2.84	2.80	2.70	2.46	1.68

5.5 LPWA によるモニタリングポスト間通信の評価

LPWA (ZETA) と既設のモニタリングポストを用いて通信ネットワークを構成し、テレメータシステムまでのデータ転送を確立し運用した。送信頻度の検討や通信不良だったモニタリングポストの修理を行うことで、22 地点中 15 地点 (予備調査の設置地点を含めると、26 地点中 19 地点) で 85% 以上のデータ登録率で良好な通信結果となった。宍道湖西岸のモニタリングポストは衛星回線を併用した ZETA 通信を実施し、問題なくデータ転送ができた。

最終的な ZETA 通信の経路を図 5-17 に示す。3.2 の電波シミュレーションの結果より広いエリアで ZETA ネットワークを構成できたのは、中継器局や ZETA AP のアンテナを見通しがよい高い地点に設置したためと考えられる。ZETA は衛星回線よりも設置場所を考慮する必要があるが、ネットワークを確立できれば、安定した通信を行うことが可能であり、原子力発電所周辺 30km 圏内の放射線モニタリングで有効な通信手段である。

今後は、通信が不安定な 7 地点を改善するために、中継器局を設置する場所を検討や更なる通信ネットワーク拡大を目的とした ZETA 機器の最適な配置方法を調査したい。

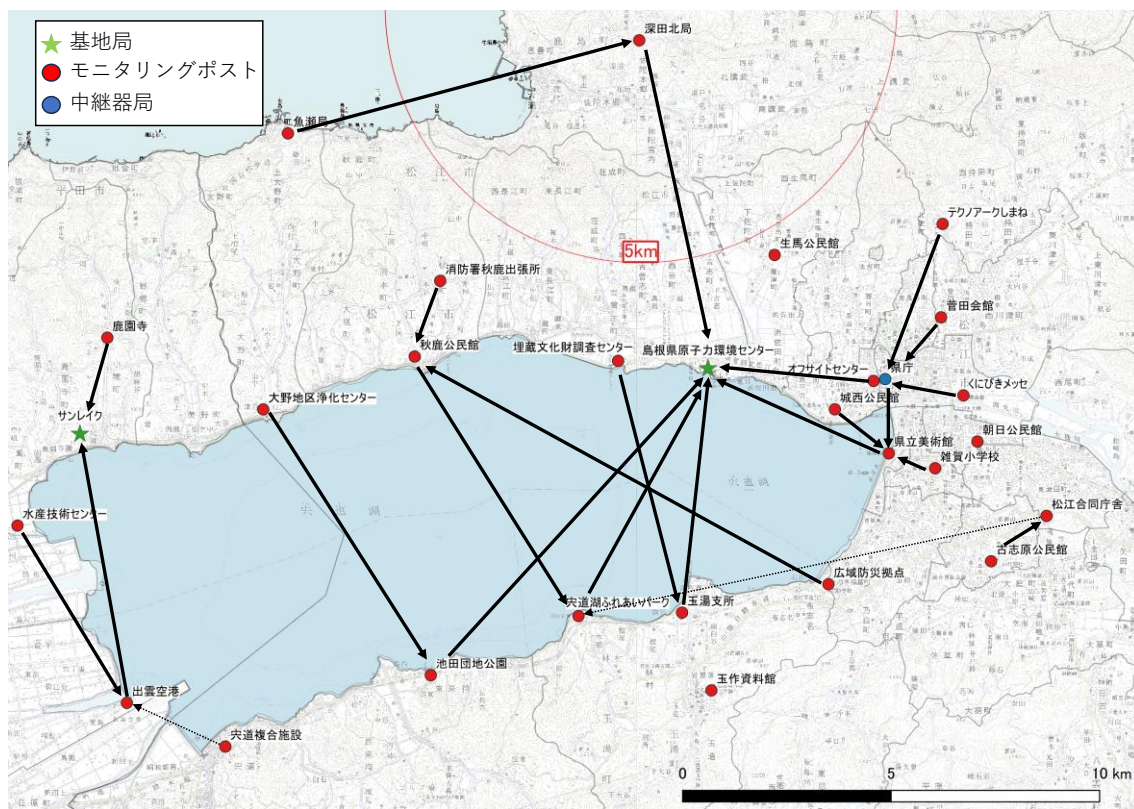


図 5-17 ZETA 通信の経路

6. 安定した運用に向けた課題

4.予備調査及び5. 実運用を想定した LPWA によるモニタリングポスト間通信の導入試験を実施する中で現れたトラブル・課題についてまとめた。

6.1 同軸ケーブルによる減衰

LPWA 通信を整備する上で、アンテナ高は通信安定性を決める重要な項目の一つである。モニタリングポストや建物の屋上に設置する際に、同軸ケーブルを用いてアンテナをより高い場所に設置した。しかし、ZETA 機器を高所作業台等が必要な高い位置に設置するとバッテリー交換や機器のメンテナンスに支障が生じる。そこで、予備調査では同軸ケーブルでアンテナを延長する方法を選択した。使用したケーブルは「無線 LAN 屋外アンテナ専用同軸ケーブル WLE-CC10」(BUFFALO 製) 及び「WLE-CC5」(BUFFALO 製) である。

モニタリングポストに ZETA 機器を整備・運用していく中で、設置前の事前調査よりも RSSI が低下している地点があった。ZETA 機器等に問題はなかったので、同軸ケーブルの減衰が原因と考えられた。特に 10m の同軸ケーブルを設置した地点で、顕著に RSSI が低下していたので、同軸ケーブル 10m でアンテナを延長した ZETA Mote とケーブルなしの ZETA Mote で比較を行った。比較用にモニタリングポストに設置した様子を図 6-1、6-2 に示す。



図 6-1 比較調査の設置の様子①



図 6-2 比較調査の設置の様子②

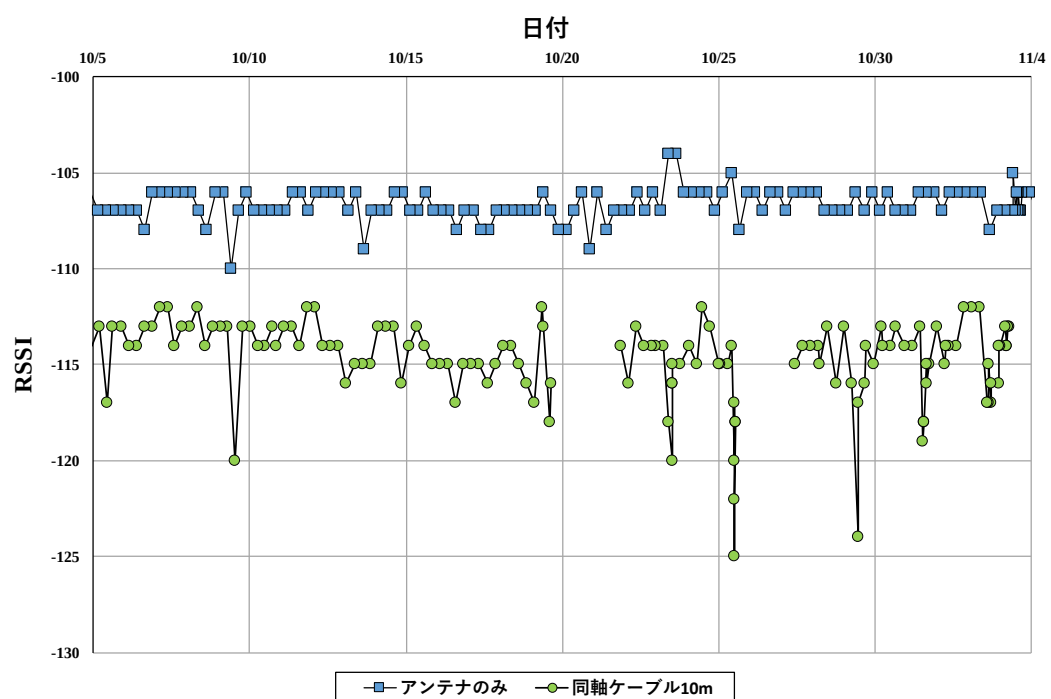


図 6-3 比較調査の結果

図 6-3 より、10m の同軸ケーブルを使用すると、RSSI が-5~-8 dBm 程度低下することがわかった。ケーブルの長さや通信強度の減衰量は比例することから、アンテナのみで ZETA 機器を設置することが望ましい。しかし、電源の場所やバッテリー交換などを考慮して表 5-8 及び 5-10 のニタリングポストには 10m の同軸ケーブルは使用せず、5m の同軸ケーブルを使用して ZETA 機器を設置した。

表 5-8 及び 5-10 より、5m の同軸ケーブルを使用しても高い RSSI や通信安定性を確保することができた。このことから、ZETA 機器に使用する同軸ケーブルは 5m 以下が望ましいと考えられる。

今後は ZETAAP や予備調査で設置したモニタリングポストの一部では 10m の同軸ケーブルを使用しているため、5m 以下のものに交換する予定である。

6.2 ZETA Mote (中継器) の設置場所

ZETA はメッシュ型の独自のネットワークを作成できることが利点であり、災害時などに ZETA Mote が使用不可になった場合、他の ZETA Mote に自動で切り替え、通信を復旧することができる。そのため、モニタリングポスト間に ZETA Mote を複数台整備することが望ましい。本試験では、モニタリングポスト全てに ZETA Mote を整備することで、複数の通信経路 (メッシュ) の作成を検討した。しかし、県庁周辺の ZETA Mote が密集している地点では、想定していた経路よりも多数の ZETA Mote を経由し、通信ができない事があった (図 6-4)。今回は、アクセスが集中していた城西公民館の ZETA Mote を撤去することで解決できた。

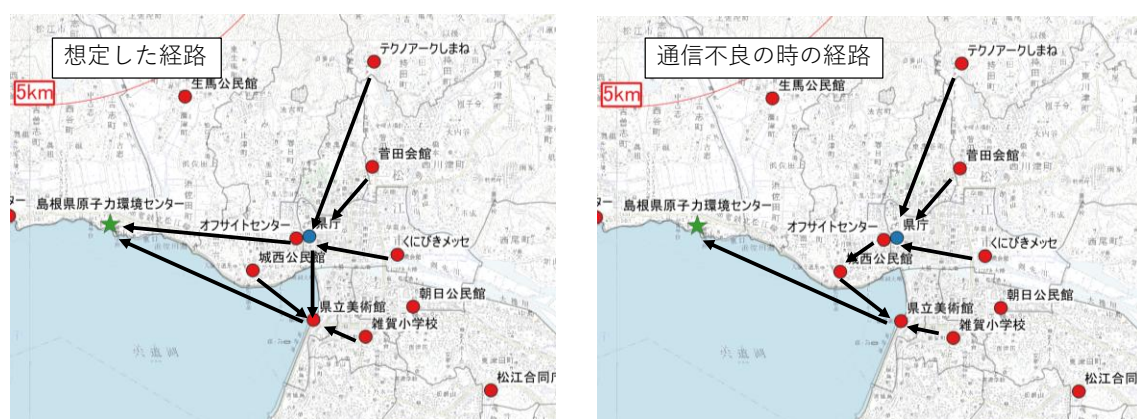


図 6-4 トラブル時の通信経路

6.3 ZETA GW の通信頻度

5.4.3 の送信時間の検討より、ZETA GW の通信頻度と通信の安定性に密接に関連している。特にアクセスが集中している ZETA AP（県保健環境科学研究所）や ZETA Mote（県庁、県立美術館）で混線による送信失敗が見られた。本試験で設置した ZETA GW は「ZETA-P」というプロトコルモードで、サーバ側から同じタイミングで送信するように指示する設定となっている。このモードでは、ZETA GW ごとに送信するタイミングをずらすことはできないので、送信頻度を少なくして解決した。

今後の課題として、最適な送信頻度を見つけることやアクセスが分散するような ZETA 機器の配置を検討する必要がある。また、ZETA 機器の販売業者の TOPPAN デジタル株式会社には、送信タイミングをずらす ZETA GW ソフトの開発を依頼している。

6.4 ZETA Mote（中継器）の故障

設置前の現地調査に向けて設置していた県庁屋上の ZETA Mote で通信不良が発生した。メーカーに現地対応を依頼したが、現地では改善せず予備機に交換し、既存の機器はメーカー引き取りになった。その後の調査で機器の SAW フィルタに電流・電圧がかかったことで故障したと判明した。落雷が影響した可能性があるが、詳しい原因は不明と回答があった。

また、同様の事象が深田北やサンレイクの ZETA Mote で確認された（図 6-5）。突然 RSSI 値が -20 dBm 程度低下し、それ以降で前の RSSI 値に戻らない。現状は予備機に交換して対応しているが、短い期間で故障が頻発しており、対策が必要である。設置方法に問題があるのか、機器の改修で解消できるのか検討する必要がある。

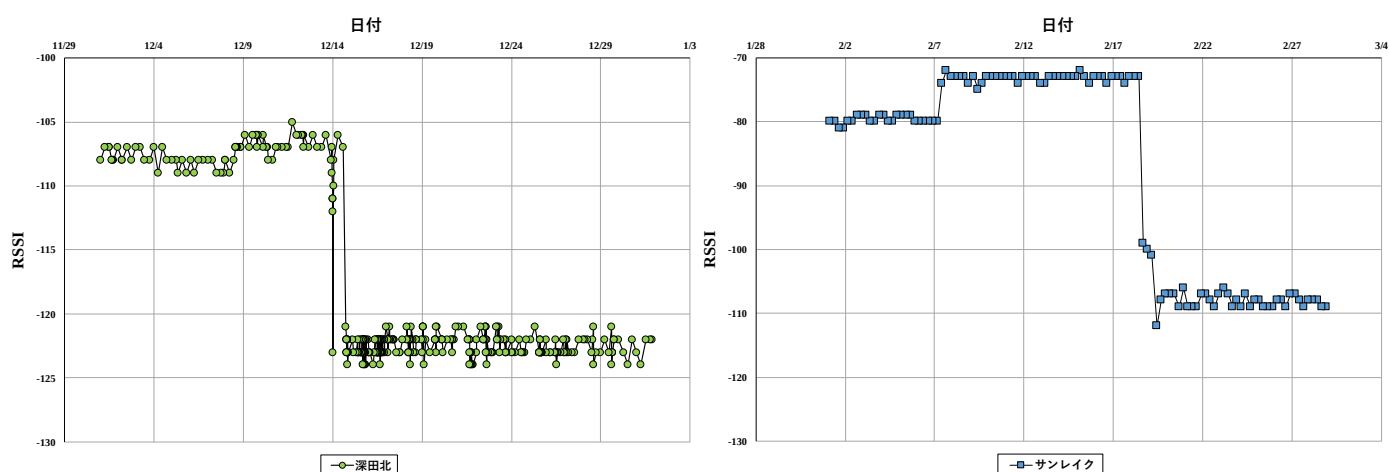


図 6-5 トラブル時の RSSI 値

6.5 ZETAAP の故障

ZETA AP は令和 5 年度末に 2 台設置を県保健環境科学研究所とサンレイクに設置して運用している。サンレイクの ZETA AP は夏ごろから ZETA サーバエッジへの再登録は急増し、データ転送が不安定になった。代替機と交換したところ、通信状況が改善した為、ZETA AP の故障が考えられる。故障の原因等はメーカーが調査中である。

また、県保健環境科学研究所の ZETA AP は 3 月からすべての ZETA Mote からの RSSI 値が -20 dBm 程度の低下が確認された。ZETA AP を代替機と交換したところ、通信状況が改善した為、ZETA AP の故障が考えられる。サンレイクの ZETA AP の故障症状と異なり、6.4 の ZETA Mote（中継器）の故障症状と似ている。これも原因調査をメーカーに依頼している。

7. まとめ

LPWA を用いたモニタリングポストの導入に向け、実際にモニタリングポストを用いて導入試験を行い、実環境における最適な配置方法や長期安定性の評価など実運用にあたり必要な知見を収集し、導入に当たっての基礎資料とすることを目的として調査を行った。結果は 26 地点中 19 地点で調査期間中の欠測が 15%未満という良好な通信結果となり、ZETA 通信及び衛星回線を併用した ZETA 通信で問題なくデータ転送ができた。ZETA 機器の配置は、中継器局や ZETA AP のアンテナを建物の屋上や平野などの見通しがよい高い地点に設置する必要があり、通信の安定性にはデータ送信頻度が影響していることがわかった。

ZETA は衛星回線よりも設置場所に制限があるが、ネットワークを確立できれば、安定した通信を行うことが可能である。機器の設置方法や機器の故障といった課題が残っているが、原子力発電所周辺 30km 圏内の放射線モニタリングで有効な通信手段である。