センサネットワークの適用技術に関する研究

エネルギア総合研究所　系統・情報通信担当　梶山　勝哉
流通事業本部　系統保護担当　髙田　諭
（H20/1までエネルギア総合研究所　系統・情報通信担当）

1 まえがき

従来，広大な敷地等で何らかの測定データを採るためには，計測装置（以下，センサという）設置点までの通信線の設置や電源の確保が難しく，コストもかかっていた。

近年，IEEE802.15.4（ZigBee）をはじめとして，センサ間を無線で結び，自律的にネットワークを構成してデータを伝送するネットワーク技術が開発されており，測定データの収集を効率的に実現できる可能性がある。

そこで，センサネットワーク技術を活用することにより，コストメリットが期待できる業務として，変電所巡視業務および洞道内酸欠確認業務を想定し，それらの業務にセンサネットワーク技術を適用した場合の標準的な環境下における電波伝搬特性試験を実施し，評価したので紹介する。

2 電波伝搬特性試験

（1）使用した無線方式

電波伝搬特性試験では，ZigBee，400MHz帯の特定小電力無線（以下，特定小電力という）を使用した。

無線方式の仕様を表1に示す。

表1　試験に使用した無線方式

無線方式	ZigBee	特定小電力
アンテナ形状	チップ　ホイップ	ホイップ
周波数帯	2.4GHz 帯	400MHz 帯
伝送速度	250Kbps	2.4Kbps
変調方式	DS/SS	FSK
送信電力	1mW（0dBm）	10mW（10dBm）
最低受信電力	－90dBm	－90dBm

（2）変電所構内の電波伝搬特性試験

① 見通し内，外（中継なし）の伝搬特性

情報収集対象設備に対し遠方からデータを収集することを想定し，観測点（高さ1m）から目視可能な箇所（見通し内），機器の裏など目視不可能な箇所（見通し外）にセンサノードを設置した場合について実験を行った。

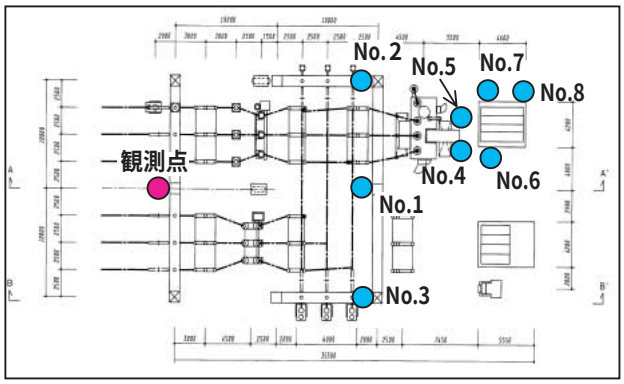
試験については，図1のように区分し，受信電力（RSSI）および通信成功率を測定した。

測定環境を図2，3に示す。

伝搬環境	設置箇所	高さ
見通し内	金属構造物なし（No.1）	なし
	金属構造物あり（No.2,3）	あり（0.5m,1.0m※）
見通し外	Ｔｒ裏面（No.4,5）	なし
	スイッチギア側面（No.6,7,8）	あり（0.5m）

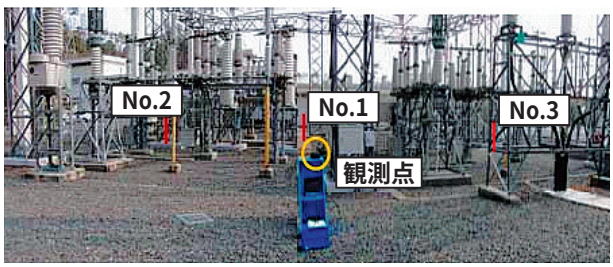
※1.0mはZigBee（チップアンテナ）のみ実施

図１　変電所構内の測定区分

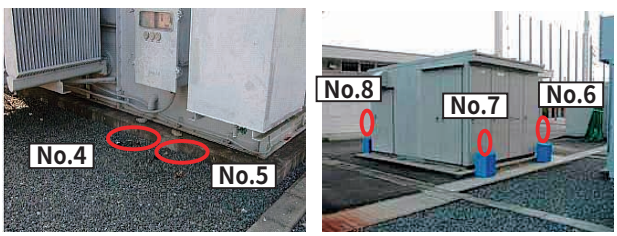


※１　観測点の設置高さは1.0m固定
※２　観測点～No.1距離：20m

図２　変電所構内のセンサノード配置図



No.1　：観測点～センサ間金属構造物なし
No.2,3：観測点～センサ間金属構造物あり



No.4,5　：Tr裏面
No.6～8：スイッチギア側面

図３　センサノード設置状況

測定結果を図4，5に示す。

特定小電力は，見通し外においてもRSSIが低下しておらず，全ての箇所で－70dBm以上で，最低受信電力－90dBmに比べて十分高い電力で受信しており，通信は安定している。

ZigBeeは，RSSIが－70～－85dBmで，最低受信電力－90dBmからのマージンがあまりなく，見通し外において低下が著しい。特にチップアンテナでは通信成功率が100%にならない箇所が全測定箇所（8箇所）のうち7箇所あり，通信が不安定であった。この要因としては，ZigBeeは送信電力が1mW（0dBm）であり，特定小電力の送信電力10mW（10dBm）に比べ1/10しかないこと，および，周波数が高いため回折効果が小さいことが考えられる。以上のことから，変電所巡視業務にはZigBeeよりも400MHz帯を利用する特定小電力無線の適用が有効であると考えられる。

一方，高さによる利得効果であるが，金属構造物なしの場合は，全ての無線方式において見られた。これは，受信ノードを高い位置に設置することにより，送信～受信間のフレネルゾーンがより確保されるためと考えられる。

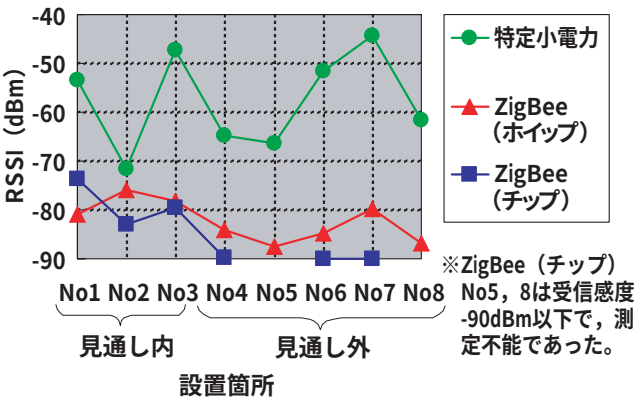


図４　各設置箇所（H＝0m）におけるRSSI

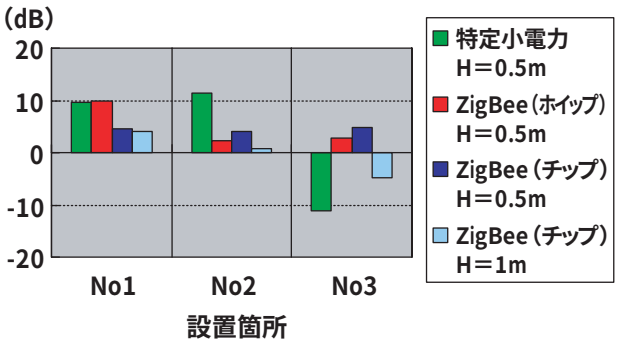
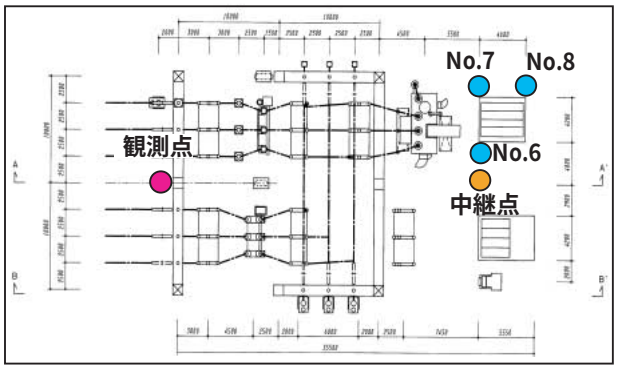


図５　高さによるRSSI変化（H＝0mとの比較）

② 見通し外（中継あり）の伝搬特性

ZigBeeチップアンテナにおいて，見通し内に中継ノードを設置した。測定環境を図6，測定結果を表2に示す。

中継ノードから見通し内No.6，見通し外No.8については通信成功率が改善しているが，見通し内No.7では改善が見られない。いずれの場合も通信成功率は100%になっておらず，中継ノードを設置しても通信は不安定である。



※中継点の設置高さ：0.5m

図６　見通し外（中継）センサノード配置図

表２　中継による通信成功率の改善

設置点		スイッチギア側面，H＝0m		
		No．6	No．7	No．8
通信成功率（%）	中継なし	73	94	0
	中継あり	95	90	89

改善が見られない

（3）洞道内の電波伝搬特性試験

センサを投げ入れにより地上に配置しガス（CO_2，CO，NO，NO_2など）を検出することを想定し，下記の実験を行った。測定場所は発電所搬入抗で行った。測定状況を図8に示す。

高さ方向に約5m，幅方向に約7.5mの大きさであり，奥行きは約700mある。また，坑内の進入口から発電所までの高低差は約250mあり，直線的に見通せる最大距離は約400mである。搬入抗内部は一部吹き付けコンクリート部や，給配管，制御ケーブルなどがあり，内部の電波環境は誘導と散乱が発生しやすい環境となっている。

想定するモデルでは投げ入れにより設置したセンサとの距離を測定するため，近距離のRSSIの変動を調査する必要があったことから，図7のように区分し測定を実施した。

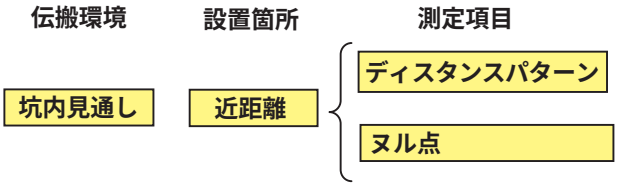


図７　洞道（搬入抗）内の測定区分

図８　洞道（搬入抗）内の測定状況

①　ディスタンスパターン

投げ入れによるセンサ設置点までの距離を算定するには，設置するセンサノードのRSSIを利用するため至近距離のRSSI変動を知る必要がある。送信～受信間の距離を25mまで1m毎に測定した。

測定結果を図9に示す。ZigBeeチップアンテナでは，図9に示すとおりアンテナ設置高さがない場合，5m程度までRSSIが単調減少する傾向を示した。一方，5m以降の減衰傾向は緩やかである。これは，内壁で反射した電波が直接波に合成されるためと考えられる。

また，特定小電力無線では，送信出力が大きいため，受信側で入力飽和（－40dBm）した。

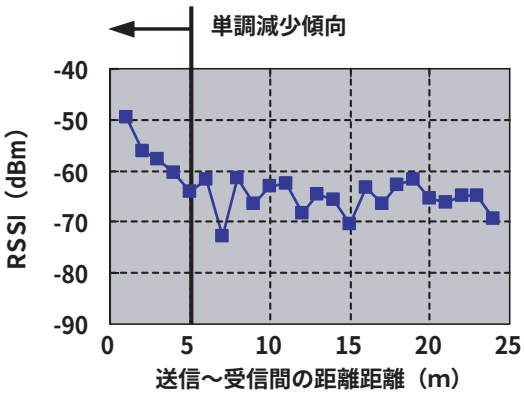
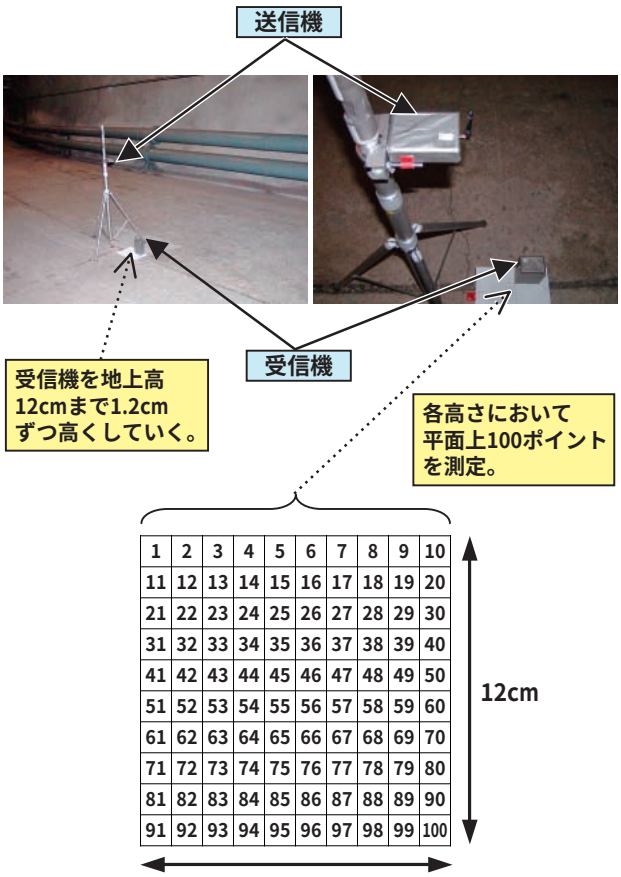


図９　距離によるRSSI変化

②　ヌル点

投げ入れによるセンサ設置箇所でRSSIが急激に落ち込む点（以下，ヌル点という）があった場合，RFチップの受信感度以下となりデータの取得ができない危険性がある。このため，地上面付近のRSSIの測定調査を行い，ヌル点がないか確認した。

測定方法を図10に示す。送信機の高さを1mに設置し，受信機を地上面付近に設置した。なお，無線方式はZigBee（ホイップアンテナ）とした。地上面からの受信機設置高さを1波長分（約12cm）まで1/10波長分（約1.2cm）ずつ高くし，その高さにおける平面上100ポイント（搬入抗長手方向12cm，幅方向に12cm面内）についてRSSIを測定した。また，送信機は坑内幅方向中央（抗内中央），受信機直上1mに設置した。測定結果を図11に示す。



１マスの間隔 1.2cm　計 100マス

図10　地上面付近のRSSI測定方法

設置高さが少し変わるだけでRSSIは大きく変化し，高さ9.6cmでRSSIが急激に低下するポイントがあることがわかった。高さ9.6cmのポイントでは，送信機との距離が近いにもかかわらず通信不可となった。そのほかの高さでは，－40～－60dBm程度で変動していたことから，複雑な反射により，位相が打ち消しあいRSSIが落ち込むヌルが地上9.6cm面付近で発生したと思われる。

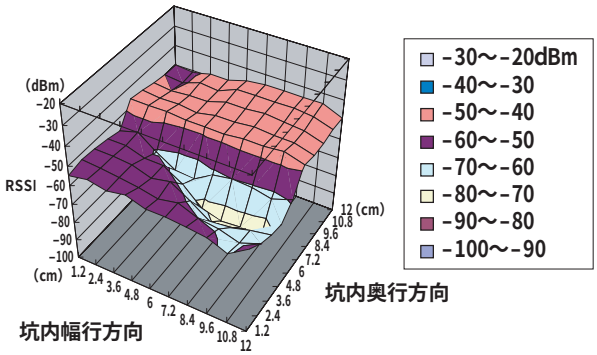


図11　高さ9.6cmにおけるRSSI変化

3 センサネットワーク適用への考察

変電所構内および洞道内（坑内）において電波伝搬特性を調査し，評価を行った。その結果は以下のとおりである。

（1）変電所構内

・2.4GHz，400MHz帯を利用した場合，400MHz帯の方が見通し外通信に強い。

・400MHz帯では設置箇所（見通し内・外，高さ）に関係なく安定した通信が可能である。一方，2.4GHz帯では見通し外ではRSSIの変動が激しく安定した通信ができない。

以上のことから，400MHz帯を利用する特定小電力無線の適用が有効である。また，直接通信できる変電所面積は160m*160m程度であると推測される。

表３　各無線方式における通信距離目安

通信方式		金属構造物	ZigBee（ホイップ）	特定小電力
受信マージン	見通し内	あり	12dBm	18dBm
		なし	9dBm	36dBm
	見通し外		2dBm	23dBm
通信限界距離※（目安）	見通し内	あり	78m	160m
		なし	55m	1,260m
	見通し外		33m	420m

※減衰定数として2.0（自由空間値）を採用し，見通し内20m，見通し外30m基準で計算。

（2）洞道内（坑内）

・坑内のようなトンネル内は導波管として作用するため，2.4GHz，400MHzともに通信成功率は平面大地に比べ良好となる。

・センサ設置点までRSSIを用いて距離算出をする場合，2.4GHzチップアンテナで至近距離5m程度まで測定できる可能性がある。

・観測点近傍の地上面付近に急激な受信電力降下点がある。このためヌル点が存在する可能性が大きい。よって，センサ受信機側で空間ダイバーシティ受信する必要がある。

（3）まとめ

変電所構内および洞道内への適用可能性をまとめると表4のとおりとなる。

表４　適用可能性まとめ

適用箇所	気中開放型変電所	円筒形状トンネル（洞道，坑内など）
モデル業務	巡視補助	酸欠確認
利用周波数	400MHz帯	2.4GHz帯
無線規格	ARIB T-67	IEEE802.15.4
アンテナ部	ホイップアンテナ	チップアンテナ ダイバーシティ受信
適用範囲	160m程度	5m程度（地上面）

4 あとがき

変電所など金属構造物が多い箇所や洞道など壁面からの反射波の影響が大きい箇所におけるセンサネットワークの実現可能性を評価するために，変電所および洞道内において，各種無線方式の電波伝搬特性を調査し，適用可能な無線方式および設置高さによる影響について評価するとともにヌル点の存在などの課題について明らかにした。

本研究で得られた知見は，センサネットワークを適用する際の判断材料として活用できる。

参考文献

（1）髙田諭，梶山勝哉「ワイヤレス・センサネットワークの適用技術に関する一考察」平成20年度電気学会電子・情報・システム部門大会