

アンライセンスバンドを使う LPWA 規格の 実フィールドでの比較評価

高橋幹[†] 國澤良雄[†] 神谷尚保[†] 新保宏之[†]

概要: 低消費電力で広域をカバーする LPWA は、国内外で IoT 向けに多く使用されている。LPWA の規格には、ライセンスバンドを使用する LTE ベースの規格と、アンライセンスバンドを使用する規格が存在し、両規格は今後も共存し状況に応じて使い分けることになると考えられる。本稿では、多数存在するアンライセンスバンドを使用する規格に着目し、森林、郊外、屋内といった様々な環境において、各規格の実力を評価した結果を報告する。また、測定結果をもとに各規格がどのようなユースケースに適しているかについても述べる。

キーワード: IoT, LPWA, アンライセンスバンド, マルチホップ

Evaluation in a Field Environment for Unlicensed-band LPWA specifications

TSUYOSHI TAKAHASHI[†] YOSHIO KUNISAWA[†]
NAOYASU KAMIYA[†] HIROYUKI SHINBO[†]

Abstract: Most of IoT devices supports LPWA specification which uses lower power and covers wider area. LPWA specifications are classified in two types. One is based on LTE and another uses unlicensed-band. Both are applied properly depending on use cases for the time being. We focused on unlicensed-band LPWA specifications and evaluated their performances in the suburbs and building and forest. And we proposed how each LPWA specification should be used from those results.

Keywords: IoT, LPWA (Low Power Wide Area), Unlicensed-band, Multi-hop

1. はじめに

無線規格 LPWA (Low Power Wide Area) のデバイスは簡素な回路でデバイスの消費電力が少ないため単価が安く、通信距離が長いこと少ない局数で広域をカバーする。IoT に適していることから LPWA のデバイス数は急増し、2023 年には 5 億台を突破すると予測されている[1]。

LPWA 規格は、ライセンスバンドを使用する LTE ベースの規格と、アンライセンスバンドを使用する規格の 2 種類に分類され、前者は LTE-M と NB-IoT、後者は LoRaWAN や Sigfox など多数の規格が存在する。LTE ベースの規格は周波数の利用が管理されており他システムからの干渉を受けにくい、既存の LTE 基地局を中心にエリア展開するため、人が立ち寄らないエリアを十分にカバーすることはできない。一方、アンライセンス系 LPWA 規格は無線 LAN ルータのように誰でも任意の場所に機器を設置できる反面、近くで他者が同じ周波数を使用していると、電波干渉が発生し通信品質が低下する懸念がある。高密度でデバイスが配置され干渉の懸念がある都心部では LTE ベースが中心となり、LTE 圏外で単位面積当たりのデバイス数が少ない田舎では主にアンライセンス系 LPWA が配置されると考えられる。

しかし、当該環境にアンライセンス系 LPWA を導入する場合、様々な環境で各規格の無線性能を評価した上で、適用方法を検討する必要がある。例えば、木や建物など遮蔽物がある環境では、各規格の無線仕様からの想定より短い通信距離になる。遮蔽物の程度によっては直接電波が届かないため、マルチホップで中継する構成になり、中継器の間隔や通信経路によって通信成功率が異なる。災害発生時などに高頻度でデータを送る場合には、他システムとの干渉によって通信成功率が低下する可能性がある。

本稿では、前述した内容を把握する目的で、見通しが良い環境、建物が多少ある郊外、森林環境、屋内など様々な環境において、アンライセンス系 LPWA の各規格の実力を評価した結果を報告する。また、評価結果から各規格が適しているユースケースを述べる。

2. アンライセンス系 LPWA 規格と実環境での適用に向けた課題

2.1 アンライセンス系 LPWA 規格の特徴

日本では表 1 の 7 規格のアンライセンス系 LPWA の製品が販売されている。各規格の技術的特徴を次に示す。

[†] (株)KDDI 総合研究所
KDDI Research, Inc.

- LoRaWAN [2]
表 1 の中で最も多くの国で導入されている．スペクトル拡散の一種であるチャープ変調により雑音に強く受信感度が良い．拡散率を上げると通信速度は低下するが，受信感度は上がる．
- Sigfox [3]
1 国 1 事業者が Sigfox 社と契約し，その事業者が全国網を構築する．Sigfox 社がデータを一元管理しているため，自前のサーバや親機を用意する必要がない．
- Wi-SUN [4]
日本ではスマートメータに搭載されている．他の LPWA と異なり IP 層に対応しており，混雑時に TCP/IP の制御を可能としている．マルチホップにすると広域をカバーすることが可能となる．
- ZETA [5]
中国の ZFiSense 社が開発した．マルチホップ専用の中継器が無線環境に応じ最適な経路を自動で選択する．ZETA サーバを使う前提のため自前のサーバを用意する必要がない．
- Weightless [6]
台湾の Ubiik 社がデバイスを製造している．LPWA としては高速な最大 100kbps のマルチキャスト通信に対応し，遠隔からファームウェア更新が可能と謳っている．
- EnOcean Long Range [7]
従来規格 EnOcean をベースとして，屋外向けに受信感度を改善した．現製品は上り通信のみの対応で，専用センサのみインタフェースを開放している．
- ELTRES [8]
Sony 社が開発した．GPS を使い時刻同期後にデータを送るため送信時間が短く，高速移動中の通信を実現している．GPS が見える屋外での利用を前提としている．

2.2 実環境への適用における課題

実環境でアンライセンス系 LPWA の機器を導入する場合，主に 3 点の課題が挙げられる．

課題(1)として，親機 1 台のカバレッジの実力値の把握がある．アンライセンス系 LPWA の親機は，センサ等を接続した子機から届いたデータをインターネット経由等でサーバに送る役割を担っている．親機 1 台が広域をカバーすると多くの子機が収容され，回線や設備費用といった導入コストが安価になる．しかし，実際には，屋外における森林や建物，屋外における床や壁といった遮蔽物によって，アンライセンス系 LPWA 規格の仕様上の通信距離どおりにはならないと考えられる．このため，実際に適用される環境でのカバレッジの把握が必要になる．

次の課題(2)では，マルチホップに適した配置に関する知見を得ることが挙げられる．子機から親機まで直接電波が届かない量の遮蔽物がある場合，中継器を使ってマルチホップすることにより親機 1 台でカバーするエリアが広くなり，導入コストを抑えられる．どの程度の遮蔽物で直接電波が届かなくなるか，どのような通信経路や機器の間隔で高い通信成功率を得られるか，といった知見を得ることが機器の配置を決める上で重要となる．

最後の課題(3)は，他システムの干渉による影響を評価することである．他者が同じ周波数チャネルを利用すると，通常はキャリアセンスで信号の衝突は回避される．しかし，機器が互いの存在を認識していない隠れ端末の関係にある場合，信号が衝突して通信に失敗することがある．災害時等でセンシングした結果を高頻度で親機に送ると信号が衝突する可能性が上がる．このため，同じタイミングで信号を送信した場合，通信成功率にどのような変化があるか評価することが課題となる．

表 1. アンライセンス系 LPWA 規格のスペック

規格名	LoRaWAN	Sigfox	Wi-SUN	ZETA	Weightless	EnOcean Long Range	ELTRES
受信感度	-137dBm	-142dBm	-104dBm	-130dBm	-135kbps	-120dBm	-142dBm
通信速度	9.4kbps	100bps	100kbps	300bps	100kbps	1.3kbps	80bps
双方向	可	可 (回数制限有)	可	可	可	不可 (製品は上りのみ)	不可 (上りのみ)
親機設置	自前で設置	1 国 1 事業者 が設置	自前で設置	ZiFiSense 社 などが提供	自前で設置	自前で設置	Sony 社が 全国展開中
長所	受信感度と通信 速度を柔軟に 変更可	1 社でデータ管理 するためグロー バル展開が容易	アプリ層を 含めて標準化 されており高速	有線での給電が 不要な中継器で マルチホップ	マルチキャ スト通信可	エナジーハー ベスティングに より給電不要	高速移動時 も通信可
短所	受信感度が 良いと低速	回数制限あり	受信感度が 良くない	親機は LTE 圏内に設置 する前提	受信感度を 良くすると 低速	受信感度が 良くない	GPS 同期を 取るので 屋外利用前提

3. 実環境における評価

3.1 評価項目

課題(1)から(3)を表2の場所で評価した。

表2. 測定項目

課題	評価対象	測定場所
(1)	親機1局の カバレージ	屋外(埼玉県ふじみ野市) ・Rural環境 ・Sub-Urban環境 屋内(KDDI総合研究所内)
(2)	マルチホップに 適した配置	屋久島 ・ヤクスギランド(高度差小) ・白谷雲水峡(高度差大)
(3)	他システムの干渉	屋内(KDDI総合研究所内)

課題(1)の屋外評価では、親機を地上高約16mのKDDI総合研究所(埼玉県ふじみ野市)の建物屋上に設置し、子機を自動車の屋根に取りつけた(図1)。子機から親機へ一定間隔でデータを送り、通信可否と受信信号強度RSSI(Received Signal Strength Indicator)から、親機北側の見通しが良いRural環境と、東側の住宅街があるSub-Urban環境の通信距離を測定した。LoRa, ZETA, Wi-SUN, EnOcean Long Range, Weightlessの5規格の評価では、無指向性のアンテナを使用し、出力を20mWに設定した。LoRaに関しては、最も受信感度が良い拡散率(SF12)に設定し、陸上移動局の免許を取得し250mW出力時の通信距離も測定した。



図1. 屋外評価の様子

課題(1)の屋内評価は、KDDI総合研究所の建物内で実施した。親機を東棟3階(図9)のドア上部に設置し、子機をヘルメットに取りつけた状態で3階から地下1階まで移動し、子機の場所と親機に届いた信号のRSSIを測定した(図2)。1階から3階まで各階の高度差は4.5mで、地下1階と1階の高度差は5.5mある。



図2. 屋内評価の様子

課題(2)の評価では、マルチホップ通信が活用される代表

的な場所として森林が密集する屋久島を選定し、高度差が小さいヤクスギランド周辺と高度差が大きい白谷雲水峡周辺の2か所で測定した。ヤクスギランドでは、親機を土産物店横に立てた三脚に設置し、子機は道路脇の丸椅子に置いた(図3)。白谷雲水峡では、親機をペンション2階の室内の窓際に設置した三脚に固定し、ヤクスギランドと同様に丸椅子上に子機を配置した(図4)。マルチホップ対応機器を販売するLoRa, ZETA, Wi-SUNの3規格について、子機から親機へ一定間隔でデータを送り、通信距離と実効速度を測定した。



図3. ヤクスギランドの様子



図4. 白谷雲水峡の様子

課題(3)については、図5の構成で評価した。LPWA規格の親機と子機を2セット用意し、片方を測定系、もう片方を与干渉系とした。両系で子機から親機へ、同じタイミングで通信を開始し、10秒間隔で30回データを送り通信成功率を測定した。課題(2)と同じく、LoRa, ZETA, Wi-SUNの3規格を使用して、総当たりで評価した。LoRaは周波数チャンネルを固定できるが、測定で使用したZETAとWi-SUNの機器はチャンネルが動的に変わるため、ZETAとWi-SUNはスペアナで使用されているチャンネルを確認し、LoRaを同じチャンネルに設定して測定した。

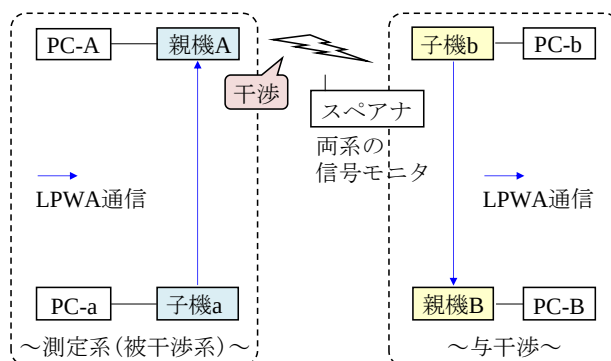


図5. 干渉評価の測定系

3.2 課題(1):親機 1 台のカバレッジに関する測定結果

3.2.1 屋外評価

Rural 環境の結果を図 6 と表 3 に示す。Rural 環境では、5 規格の中で最も受信感度が良い LoRa が最も通信距離が長く、約 10km までは概ね通信が成功し、19km 程度まで通信が可能だった。次に通信距離が長かったのは ZETA で、約 2km まで安定した通信が可能な結果となった。LoRa との受信感度の差 7dB に対し、通信距離の差が大きいのは、セキュリティのため子機を親機に登録する Registration が受信感度より高い受信レベルで解除されたことが原因と考えられる。Weightless は ZETA より Registration 解除が起きやすく、屋外で安定した通信は困難だった。EnOcean Long Range と Wi-SUN は、前述の 3 規格ほど受信感度が高くないことから、通信可能な距離は 400m 程度だった。



図 6. 屋外評価の結果 (Rural 環境、20mW 出力)

表 3. 屋外の通信距離 (Rural 環境)

規格	受信感度	安定した通信可(A)	失敗あるが通信可(B)
LoRa	-137dBm	10km	10-19km
ZETA	-130dBm	2km	2-7km
EnOcean L.R.	-120dBm	—	2km
Weightless	-133.5dBm	—	400m
Wi-SUN	-104dBm	—	450m

Sub-Urban 環境では、図 7 と表 4 に示す結果となった。全体的に Rural 環境より通信距離が短く、最もカバレッジが広がった LoRa で安定した通信が可能な距離 3km 程度だった。ZETA は失敗することはあるが 2km 程度までは通信可能だった。他の 3 規格は安定した通信をすることが難しい状況だった。

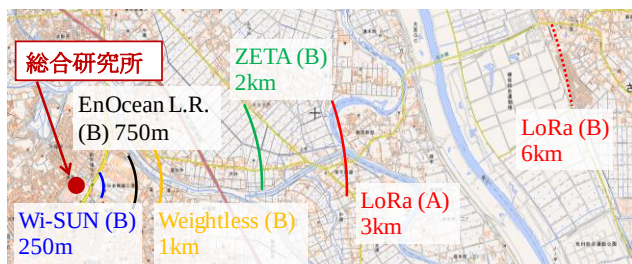


図 7. 屋外評価の結果 (Sub-Urban 環境)

表 4. 屋外の通信距離 (Sub-Urban 環境)

規格	受信感度	安定した通信可(A)	失敗あるが通信可(B)
LoRa	-137dBm	3km	3-6km
ZETA	-130dBm	—	2km
EnOcean L.R.	-120dBm	—	750m
Weightless	-133.5dBm	—	1km
Wi-SUN	-104dBm	—	250m

次に、Rural 環境で LoRa の親機と子機の出力を 20mW から 250mW に変えた結果を図 8 に示す。20mW で安定した通信が可能なのは約 10km までだが、250mW に上げると約 19km まで安定した通信が可能となった。

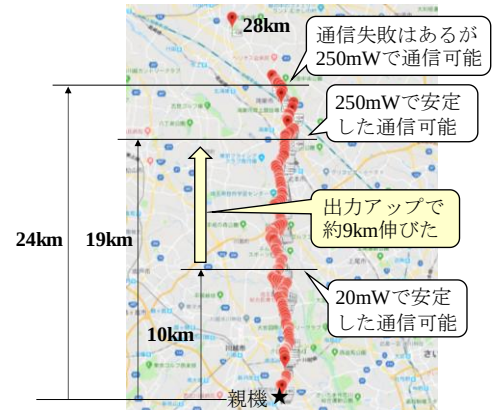


図 8. LoRa の通信距離 (Rural 環境、250mW 出力)

3.2.2 屋内評価

測定結果を図 9 に示す。親機と同じ 3 階で見通し内の東棟であれば、直線状の通路内を伝搬するため減衰が少ない。

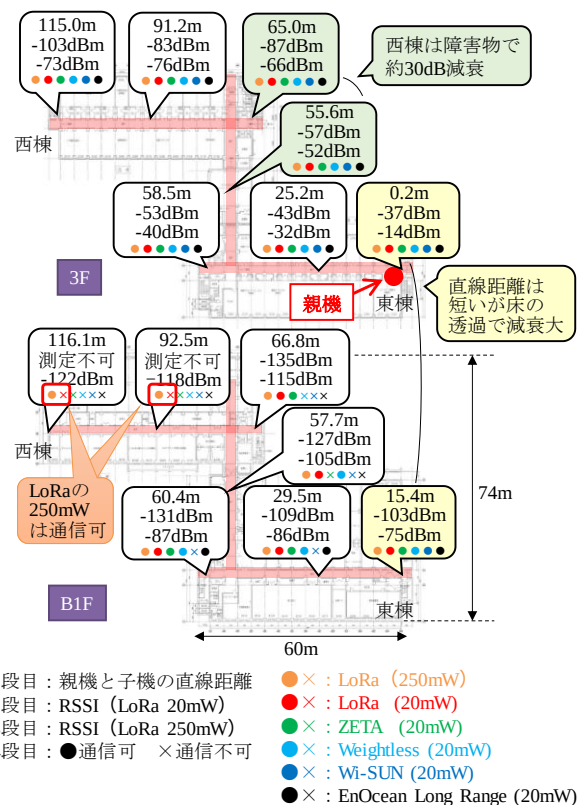


図 9. 屋内評価の結果

見通し外の西棟や別の階には壁や床を透過して伝搬するため減衰が大きくなるが、同じ階で 100m 程度の距離であれば通信が可能だった。20mW 出力の場合、地下 1 階西棟では 5 規格とも通信不可だが、LoRa の 250mW 出力であれば通信可となった。

3.3 課題(2):マルチホップに適した配置に関する測定結果

ヤクスギランドでの測定結果を図 10 と表 5 に示す。森林が密集する山道では、LoRa の 1 ホップの通信距離は 300～500m 程度となった。測定で使用した LoRa の機器では通信経路を予め設定するため、山を迂回するように機器を配置すると広域での通信を実現できる。一方、ZETA は 100-300m と LoRa より少し短い通信距離となり、中継器が通信経路を自動で選択する仕様のため、測定中に経路が変わり通信成功率が下がることがあった。機器配置後に増築などで遮蔽物が増える可能性が低い場合は通信経路を固定する方が長くエリアを広く取れるが、都市部など構造物の環境がよく変わるケースでは通信経路を自動選択の方が適している。Wi-SUN に関しては、他 2 規格ほどの受信感度がないことから、通信可能な距離は 20m だった。

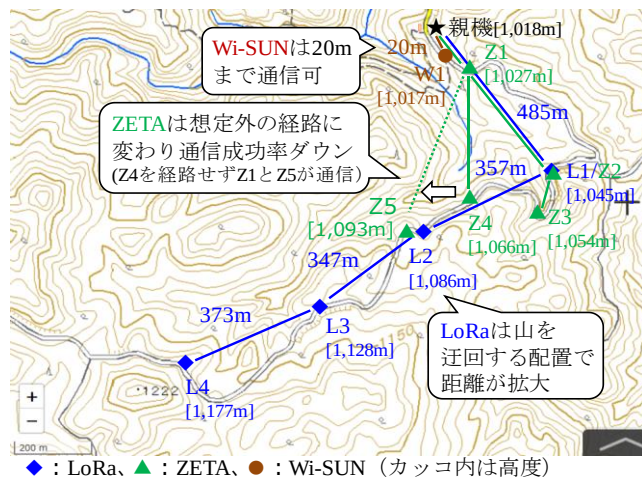


図 10. ヤクスギランドでの測定ポイント

表 5. ヤクスギランドでの測定結果

規格	中継器 の数	子機/中継器 の設置場所	RSSI [dBm]	実効速度 [bps]
LoRa	0	L1	-117	114
	1	L1, L2	-122	62
	2	L1, L2, L3	-126	39
	3	L1, L2, L3, L4	-123	32
ZETA	0	Z1	-95	-
	1	Z1, Z2	-104	189
	1	Z1, Z4	-99	184
	2	Z1, Z2, Z3	-79	104

白谷雲水峡での測定結果を図 11 と表 6 に示す。高度差があり森林の密度が濃い場所と薄い場所があり、白 L1 のように見通しが良い場所に LoRa の子機を配置すると 1～3km の通信が可能だった。ZETA は子機が低い場所にあると通信に失敗することが多く、通信距離は 500m 以下という結

果となった。

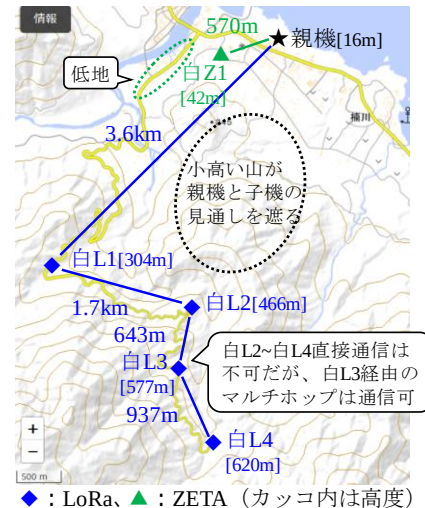


図 11. 白谷雲水峡での測定ポイント

表 6. 白谷雲水峡での測定結果

規格	中継器 の数	子機/中継器 の設置場所	RSSI [dBm]	実効速度 [bps]
LoRa	0	白 L1	-132	125
	1	白 L1, 白 L2	-137	63
	0	白 L1(親), 白 L3(子)	-127	96
ZETA	0	白 Z1	-107	110

中継器が送信中に次の信号を受信すると通信に失敗するため、送信間隔を長くして通信すると、図 10 と図 11 で示したように中継器数が増えるにつれ実効速度が低下した。また、子機の目前をバスなどが横切ると、10～15dB の減衰が起こり通信不可となることがあった。

3.4 課題(3):他システムの干渉に関する測定結果

測定結果を表 7 に示す。与干渉系が ZETA や Wi-SUN の場合、同じチャネルの LoRa の信号を検知すると別のチャネルに移動するため、LoRa は通信失敗の回数が少ない。ZETA はチャネルを変更すると Registration が解除され、変更後の Registration に時間を要するため、再び Registration するまでは子機に入力されたデータが廃棄され通信エラーとなった。Wi-SUN は、干渉を検知しチャネルを変更した直後から送信可能な状態となり送信タイミングをずらすため、ZETA より通信成功率が高かった。

表 7. 干渉がある場合の通信成功率

干渉信号(与干渉系)	LoRa	ZETA	Wi-SUN
測	LoRa	29/30	29/30
定	ZETA	9/30	測定不可
系	Wi-SUN	26/30	測定不可

3.5 評価結果の考察

課題(1)の屋外評価において、Rural 環境の LoRa は約 10km まで通信が安定した。殆ど遮蔽物がなかったため、距離と

受信電力の理論値から求まる 10km という通信距離と同じ結果が得られた。Sub-Urban 環境も LoRa のカバレージが最も広がったが、道路周辺の建物や電柱により信号が減衰し、安定した通信が可能な距離は Rural 環境の 1/3 以下となった。Sub-Urban 環境で機器を配置する場合は、理論値よりエリアが狭いことを考慮して親機を配置する必要がある。LoRa (受信感度-137dBm) に対し、ZETA (受信感度-130dBm) や Weightless (受信感度-133.5dBm) は通信距離が短かった。屋外環境は RSSI が変動し、子機が親機に登録する Registration を維持できるレベルを下回ると Registration 解除が起こった。ZETA は受信感度の閾値に余裕がある RSSI が得られるエリア内のみ子機を配置した方がよい。Weightless は ZETA より Registration 解除が起こりやすいため屋外での適用は難しい。Wi-SUN (受信感度-104dBm) と EnOcean Long Range (受信感度-120dBm) は、他 3 規格ほど受信感度が良くないため通信距離は短い。長距離通信が不要で、高速かつ TCP/IP の制御が必要な場合は Wi-SUN、電池交換が困難な場所の機器はエネルギーハーベスティングが可能な EnOcean Long Range が適している。

次に、LoRa の出力を 20mW から 250mW へ上げた場合に着目する。受信電力が 20mW と 250mW の出力差の 11dB 相当増えたことで通信距離が約 9km 伸びた。20mW 出力では約-125dBm まで安定した通信が可能なため、図 12 の 20mW と 250mW の距離-受信電力グラフ(理論値)で、-125dBm での距離の差を比較した。この差が約 9km なので、測定結果は妥当といえる。また、課題(1)の屋内評価では、LoRa の出力を 20mW から 250mW にすると、全ての測定点で RSSI が上がり、通信品質の安定が見込めることを確認した。

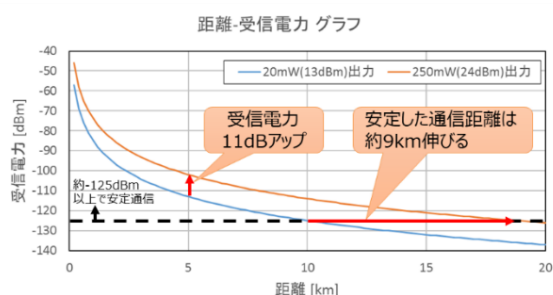


図 12. 通信距離と RSSI の関係

課題(2)のマルチホップの最適配置に関する評価では、ヤクスギランドにおいて、LoRa は 300-500m, ZETA は 100-300m と課題(1)の Sub-Urban 環境より更に短い通信距離となった。山や道路脇の樹木による遮蔽の影響を大きく受けたことが原因と考えられる。樹木の密度が図 13 の(a)の程度であれば親機と子機で直接通信が可能だが、図 13 の(b)の程度になるとマルチホップで遮蔽物を迂回させる構成が適している。マルチホップにする場合、測定で使用した LoRa 機器のように通信経路を固定に設定するケースと、ZETA のように通信経路が自動で切り替わるケースが考

えられる。図 13 の(b)の森林環境のように機器配置後に遮蔽状況があまり変わらない場所では通信経路固定のマルチホップが適しているが、建物の増築などで遮蔽状況が変わる図 14 のような場所では通信経路が自動で切り替わるマルチホップが適している。また、交通流の発生などで遮蔽環境が変動することを見越し、再送制御や RSSI 値に余裕がある場所に機器を設置する等の対策が必要となる。



(a) マルチホップ不要なケース (親機と子機が直接通信可) (b) マルチホップが必要なケース

図 13. 森林密集度の比較

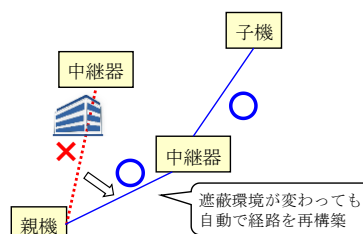


図 14. 経路自動選択が適しているケース

課題(3)の評価では、LoRa のチャンネルを固定に設定し、ZETA や Wi-SUN を利用する他システムが同じタイミングで通信を開始しても通信成功率は低下しなかった。干渉源が自動でチャンネルを変更する規格であれば通信成功率は低下しない。しかし、チャンネルを自動変更する設定で運用している場合、ZETA のようにチャンネル変更後の Registration 完了するまでセンサ等外部機器から入力された情報は破棄する仕様であれば、Registration の状態を確認してからデータを入力することが重要となる。Wi-SUN のようにチャンネル変更後に再び Registration しない規格であれば、チャンネル変更の有無を気にせず外部機器のデータを入力することが可能となる。複数システムが同時に通信する可能性が高い場合は、ZETA より Wi-SUN の方が高い通信成功率を維持すると考えられる。

4. ユースケースへの適用

3 章の測定結果を踏まえ、アンライセン্স系 LPWA の各規格がどのユースケースに適しているか検討した。アンライセン্স系 LPWA は、1 章で述べたように主にセルラー圏外で使われる。地理的環境を踏まえ、図 16 で示したように、①セルラー圏から見通しが良い、②セルラー圏まで 1km

程度で見通しが悪い、③セルラー圏まで 1km 以上あり人が殆ど立ち寄らない、の 3 種類にユースケースを分類した。①は農場や養殖場の温度や照度の管理、②は登山者の探索や橋梁などインフラ監視、③はダム水位や地滑り監視、が例として挙げられる。

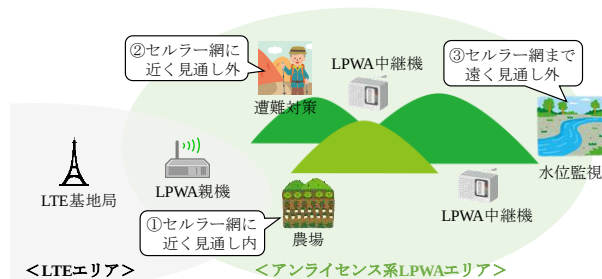


図 16. ユースケースの分類

3.2 節の図 6 から、①のセルラー圏まで見通しで距離が 400m 以下の場合、5 規格いずれも利用できる。但し、セルラー圏まで数 km 離れている場合には、LoRa か ZETA が適している。②のように森林や建物など遮蔽物がある場合は、図 7 の結果から LoRa と ZETA 以外の 3 規格で通信距離を充分に取ることは難しい。②で建物内に LPWA を導入するケースであれば、図 9 で示したように同じ階で親機から 100m 程度の距離であれば 5 規格いずれも適用できる。但し、複数階を 1 台の親機でカバーする場合は、LoRa, ZETA, Weightless の利用が適している。親機 1 台でエリアを充分にカバーすることが難しい場合は、陸上移動局の免許を取得して出力を 20mW から 250mW に上げると 11dB 相当カバレッジを伸ばすことが可能となる。親機から子機まで直接電波が届かないほどセルラー圏から離れている③の場合には、3.3 節の図 10 と図 11 で示したように、LoRa や ZETA のマルチホップ構成が適している。増築などで遮蔽環境が変わりやすい場所に中継器を置く場合は通信経路を自動選択する ZETA、構造物がほとんど変わらず広域をカバーする場合には通信経路が固定の LoRa が適している。③のユースケースは災害発生時など状況に応じて通信頻度が異なる。通信が高頻度で発生する場合、3.4 節の表 7 で示したように、他システムの通信や複数子機からの同時接続により、信号が衝突して通信成功率が低下する懸念がある。信号衝突を回避するスケジューリング機能を搭載すると、通信成功率の低下を抑えることが可能となる。

5. まとめ

アンライセンスバンドを使う LPWA 規格に着目し、商用サービスを想定した環境での適用方法を検討するため、5 規格(LoRa, ZETA, Wi-SUN, Weightless, EnOcean Long Range)の無線性能を評価した。

見通しの環境で必要な通信距離が数百 m であれば、5 規

格いずれも適用できる。1 台で数 km カバーする場合には LoRa や ZETA が適している。森林環境でマルチホップさせる場合には、増築などで遮蔽環境が変わる場合は ZETA、変わる可能性が低い場合は LoRa が適している。路線バスなど交通流がある場所では、電波が減衰するため再送制御などの対策が求められる。

実際に商用サービスを提供する場合は、機器設置や運用のコスト、プライバシー保護が必要なケースではセキュリティ対策なども重要な判断材料となる。コストは販売台数によって変動し、セキュリティは政策動向などが影響する。また、今後の需要に応じて各規格の機能は拡張され、適しているユースケースが変わる可能性があるため、国内外の最新動向の注視も必要と考えられる。

参考文献

- [1] 藤井宏治. “LPWA は爆発的に伸びる？—NB-IoT と LoRa が主流へ,” 月刊テレコミュニケーション, vol. 36, no. 1, pp.14-15, 2018
- [2] LoRa Alliance, “LoRaWAN 1.1 Regional Parameters,” 2017.
- [3] 日比学. “実用フェーズに突入した「SIGFOX」の最新動向,” 第 5 回 IoT/AI ビジネスカンファレンス, no.D-1, 2018.
- [4] IEEE Computer Society, “IEEE Std 802.15.4,” 2015.
- [5] 坪田弘樹. “まだまだある！注目の新興 LPWA ZETA, ELTRES の勝機,” 月刊テレコミュニケーション, vol.35, no.11, . pp.10-13, 2018.
- [6] 藤井宏治. “新 LPWA 規格「Weightless-P」が日本上陸,” 月刊テレコミュニケーション, vol. 34, no. 8, pp. 34-35, 2017.
- [7] 板垣一美. “LPWA の実像（その 3）～LoRa, Sigfox, NB-IoT だけでなく！新興勢力の台頭,” マルチメディア推進フォーラム, 2018.
- [8] 北園真一. “独自の LPWA 技術で長距離安定通信を実現 国際標準に採択された「ソニー方式 LPWA」,” 第 23 回 IoT 技術セミナー, 第 3 講演, 2018.