

橋梁モニタリングのための LPWA 通信の通信範囲に関する検討

The Communication Range of LPWA Communication for Bridge Structural Monitoring

北見工業大学 工学部

学生会員 ○佐々木 竜太 (Ryota Sasaki)

北見工業大学 工学部

正 会 員 宮森 保紀 (Yasunori Miyamori)

北見工業大学 工学部

正 会 員 山崎 智之 (Tomoyuki Yamazaki)

日本仮設株式会社

正 会 員 日向 洋一 (Yoichi Hinata)

1. はじめに

橋梁などのインフラ構造物は、今後、建設から 50 年以上経過する施設が急増する見込みである¹⁾。一斉に老朽化するインフラの状況を適切に把握するため、センサ技術や通信技術を活用したモニタリングシステムが注目されている。インフラのモニタリングにおいては対象構造物の状態を遠隔で監視するための無線通信技術も重要である。

無線通信規格の LPWA (Low Power Wide Area) は「長距離」「低消費電力」という特徴を持ちインフラのモニタリングに適用性が高いと期待されている。LPWA を活用した例として、浸水モニタリングシステム²⁾や鋼箱桁橋の箱桁内部のひずみ計測に適用した事例³⁾などがある。また、著者らの一部は、橋梁の洗掘による傾斜をモニタリングするシステムで LPWA を採用している。LPWA 通信を構造物のモニタリングに活用すれば、低コストで複数の測定対象を同時に監視することが可能になると期待される。

一方、モニタリングシステムに無線通信を導入する場合、通信距離は様々な条件により左右されることを前提に考えなければならない。例えば、木や建物などの遮蔽物、通信機器を設置する位置、周囲の電波のノイズなどの組み合わせで通信状況は著しく変化する。橋梁にモニタリングシステムを設置する場合も、通信端末は必ずしも電波状況の良い橋面上だけでなく、測定位置に近い桁内部や橋座上など電波環境の悪い場所に設置せざるを得ない場合も想定される。このため、LPWA 通信の特性を生かしたモニタリングシステムを構築するためには、橋梁の環境や通信端末やアンテナの設置条件について検討する必要がある。

本研究では、LPWA 通信規格の LoRa を用い、基地局から半径 15km 圏内の橋梁を対象として、各地点からの通信距離、地形の違いから送受信状況の比較を行いデータ伝送が可能かどうか検証した結果を報告する。

2. LPWA によるモニタリングシステム

2.1 LPWA とは

無線通信規格 LPWA (Low Power Wide Area) は数 kbps から数百 kbps と 5G、Wi-Fi と比べて非常に低速ではある

ものの、一般的な電池で数年にわたって運用可能であり、低コストかつ長距離の通信を可能とする技術である。(図-1) 低電力の通信技術としては Bluetooth など普及しているが、通信距離は 10m 程度である。LPWA を用いれば数十 km 程度の通信も可能であるため、インフラモニタリングの技術のひとつとして注目されている。また電力を確保しにくい場所でも活躍することが期待されている。本研究で用いる LoRa は、LPWA の一種であり、免許不要の周波数帯である 920MHz 帯を利用した通信方式である。

2.2 LoRa 無線計測システムの概要

本研究で用いる LoRa 無線計測システムの概要を図-2 に示す。本システムは、センサユニットに MEMS 型高精度傾斜計を搭載して、橋梁などの構造物の傾斜を測定するものであるが、本研究では無線通信機能について検討を行う。

図-2 に示すように、センサユニットからゲートウェイに LoRa 通信でセンサユニットの傾斜角や電波強度、電源電圧の情報を送信する。ゲートウェイからは LTE 通信でインターネット上のクラウドサーバーに情報を送信する。傾斜角などの基本的な情報は道路管理者などがブラウザで確認できるようにウェブサイト上に表示される。本研究の通信実験では、通信可否の確認のために現場から携帯端末でウェブサイトを確認する。また、本研究では、電波強度や電源電圧などの詳細な情報は、ゲートウェイに接続した小型 PC から別途ログをダウンロードすることで取得する。

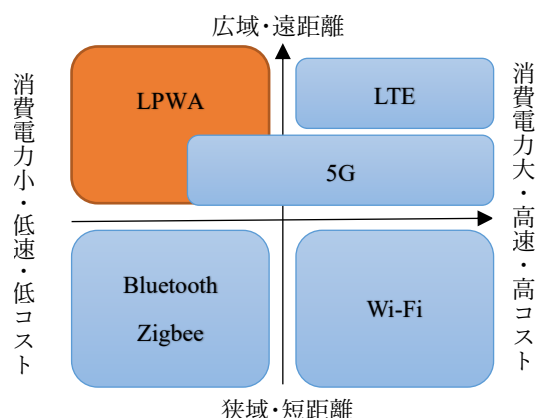


図-1 無線通信規格の特徴⁴⁾

2.3 使用機器

LoRa 通信に用いたゲートウェイ（親機）の仕様を表-1に示す。また、センサユニット（子機）の仕様を表-2に示す。ゲートウェイ設置場所は北見工業大学3号館の屋上に設置した。図-3のセンサユニットは水平2方向の傾斜角、温度を測定するが、システムとして電波強度と電圧も測定してゲートウェイに送信する。アンテナは延長ケーブルでセンサユニットと分離することも可能だが、本研究ではセンサユニットに直接接続している。また、電源は電池と太陽光発電を併用し長期間の稼働が可能だが、センサユニットを移動させるため、太陽光パネルは取り外した。

3. 通信実験

3.1 対象橋梁

対象橋梁はゲートウェイから半径15km圏内の北見市内に架設された橋梁75橋である。全体の地勢は、北見市中心部は盆地であり、南西から北東方向に流れる常呂川や無加川によって、数段の河岸段丘が形成されている⁵⁾。ゲートウェイ設置場所は常呂川左岸の河岸段丘にあり標高は85m、設置建物の高さは31mである。中心市街地は大学の南西にあり、周辺には住宅地と畑地、山林が広がっている。また、大学の北西は丘陵となっている。

図-4は実験対象橋梁の位置を示している。ゲートウェイを中心に半径1km間隔で5橋ずつ選出し、15kmを超える橋梁も5橋選出し、計75橋を対象とした。

3.2 実験内容

本研究では、構造物にセンサを設置する上でどこに設置するとどの程度通信に影響が出るのか比較するため、各対象橋梁において、橋面上あるいは高欄上と、実際にセンサユニットを設置することが想定される橋座上あるいは堅壁前の2か所で計測を行った。

実験期間は2021年10月6日から29日の11日間であり、1日平均7橋で計測した。計測開始前にセンサユニットの電源を入れ、その日の計測終了までセンサユニットは2分間隔で傾斜角をゲートウェイに送信する。計測個所では、専用の治具にセンサユニットを設置し10°または20°の一定の傾斜を与えた。橋梁での計測時刻と傾斜角、方向を記録し、計測個所での電波強度をログと照合した。同一の計測個所では2分ごとに3回の通信が行われるまで計測を続け、電波強度の平均値を記録した。また、3回連続して通信ができない場合に、通信不可として計測を終了した。なお、計測は天候にかかわらず行い、天候も記録した。実験状況を写真-1に示す。

4. 結果と考察

図-5はセンサユニット設置個所を橋面上・高欄上とした場合の各点の通信状況と電波強度、図-6は設置個所を橋座上・堅壁前とした場合の通信状況と電波強度である。また、

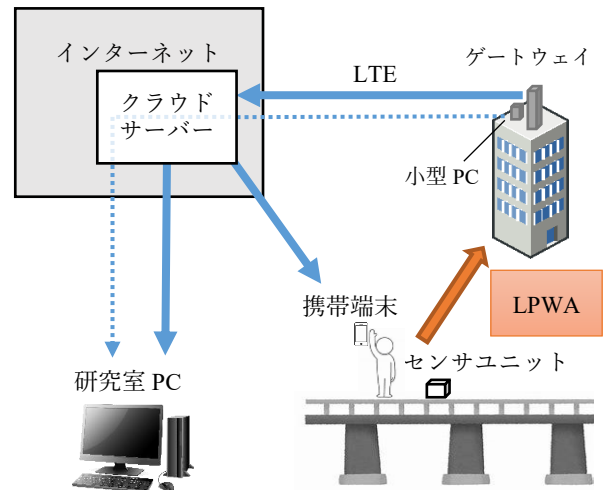


図-2 LoRa 無線計測システムの概要

表-1 ゲートウェイの仕様

項目	仕様内容
型名	ES920GWX2
無線方式	920MHz 帯 LoRa 変調 / LTE
アンテナ	外付けダイポールアンテナ
温度動作範囲	-20~+80℃

表-2 センサユニットの仕様

項目	仕様内容
無線方式	920MHz 帯 LoRa 変調, 最大 15 km
傾斜角	XY 2 軸 $\pm 30^\circ$, 精度 $\pm 0.025^\circ$
温度範囲	$-30^\circ \sim 60^\circ$
筐体サイズ	125×125×75 mm
電源	内蔵電池, 太陽電池

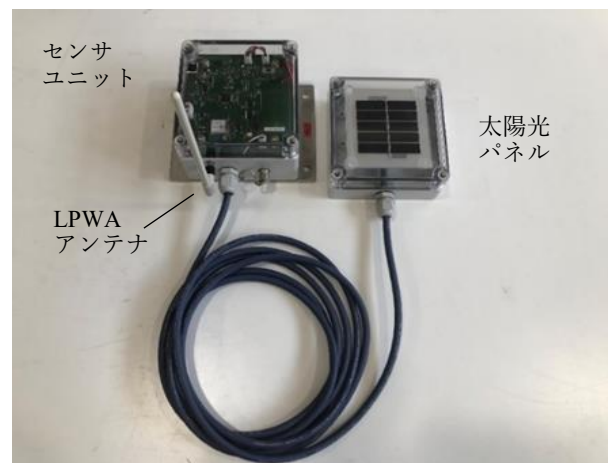


図-3 センサユニット

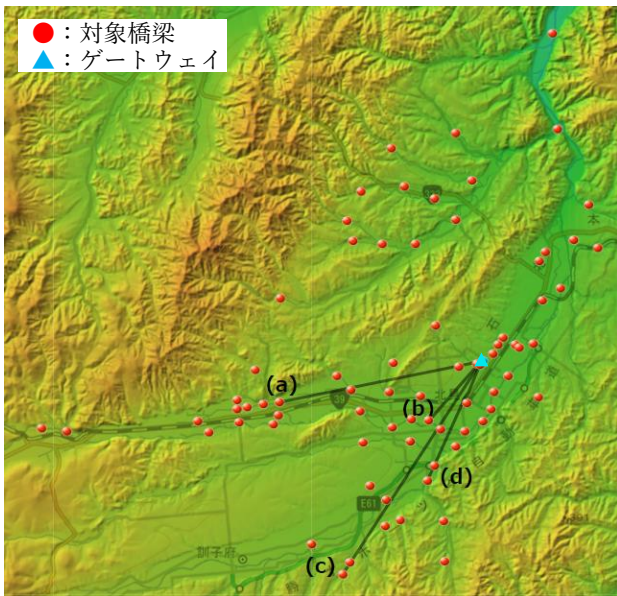


図-4 北見市と対象橋梁
(国土地理院 色別標高図に対象橋梁を追記)



写真-1 センサユニット設置状況 (橋面上)

図-7 は通信可能だった各点のゲートウェイからの距離と電波強度を示す。

高欄上・橋面上で通信ができたのは 75 橋中 29 橋であり、図-5 ではゲートウェイの東から南東方向に分布している。図-7 では通信距離が延びるにしたがって電波強度は低下するが、約 7km 地点まで安定して通信を行うことができていた。また、最長 14km の通信ができた。本研究で使った通信機器の最大通信距離は 15km であり、設置条件が良ければその性能を十分発揮できることが確認できた。

橋座上・堅壁前で通信ができたのは 75 橋中 13 橋であった。図-6 では通信ができた橋梁はゲートウェイの近傍に集中している。図-7 から橋座上・堅壁前での通信は橋面上・高欄上と比べて 10~20dB 程度、電波強度が減少している。通信距離はおおむね 2.5km までで、橋梁による電波の遮蔽効果があったが、最長では 4.4km まで通信を行うことができた。橋面上、橋座上ともに全体として距離が遠くなる

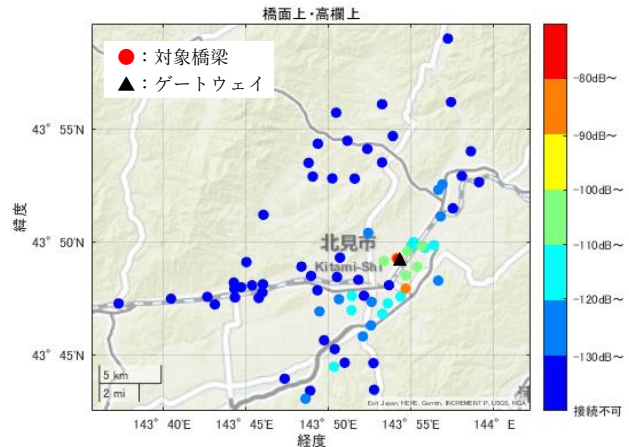


図-5 各測点の通信状況と電波強度(橋面上・高欄上)

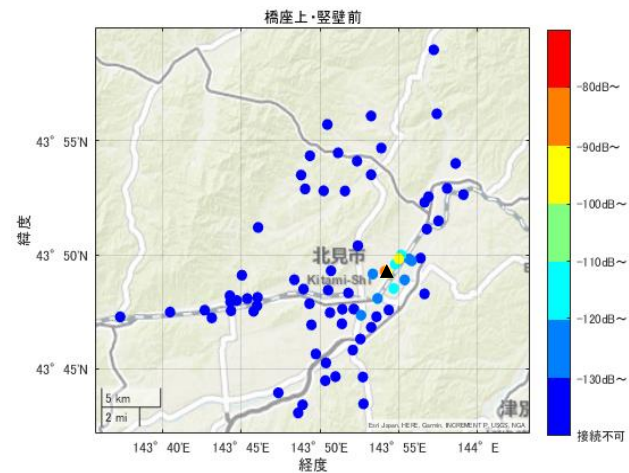


図-6 各測点の通信状況と電波強度(橋座上・堅壁前)

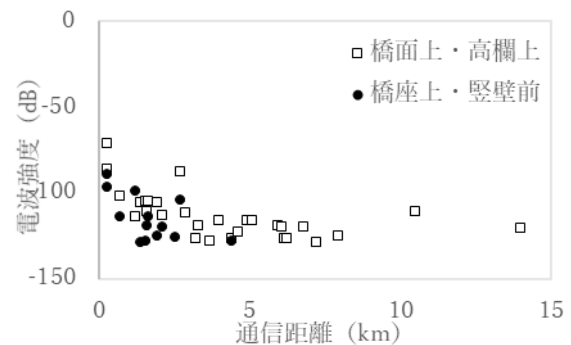


図-7 電波強度と通信距離の関係

につれ電波強度が減少しており、距離減衰していることがわかる。したがって、実際に LPWA 通信を橋梁モニタリングに適用する場合には、センサとアンテナを分離するなど適切な設置方法を検討する必要がある。

通信機器から発せられる電波は、楕円体の広がり(体積)を持ちながら受信地点に伝わる。この楕円で描かれた立体的な空間をフレネルゾーン(Fresnel zone)と呼ぶ⁶⁾。このフレネルゾーンが 2 点間で十分に確保できていれば安定した通信が期待できる。一方、フレネルゾーン内に障害物がある場合、受信電波強度は減少する。またアンテナ高が低い場合も、地面が障害物となる。フレネルゾーンは半径の 60% 以上が確保できていれば、完全にフレネルゾーンが障

害物なしに確保できている場合と比較しても電波強度は大きく低下はしないとされている。

図-8は図-4に示した実験対象のうち4橋について、ゲートウェイと橋梁を線分で結び、その線分上の標高の変化を黒実線で表示した。また、図中の楕円はフレネルゾーンであり、フレネルゾーンは以下の式から算出した⁶⁾。

$$r = \sqrt{\frac{c}{f} \cdot \frac{d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}} \quad (1)$$

ここで、 c は光速であり 300×10^6 m/s とし、 f は周波数で LoRa では 920MHz である。 d_1 と d_2 は送受信地点とフレネル半径を求める地点までの距離である。また、ゲートウェイの高さは標高(85m)、建物高さ(31m)、ゲートウェイ架台高さ(0.84m)の合計 116.84m である。

図-8(a)の地点1は通信距離 11km で通信に失敗した。計測点周辺は農地で通信を阻害するものは特になかったが、フレネルゾーン内に丘陵があり通信できなかった。図-8(b)の地点2は通信距離 4km であり、フレネルゾーンも十分確保できているように見えるが通信に失敗した。これは、図では示していないが計測点周辺は住宅やビルが林立しているため、その結果フレネルゾーンが確保できず、通信に失敗したと考えられる。図-8(c)の地点3は通信距離 14km で通信に成功した。約 12km 地点に起伏があるものの通信に成功している。図ではフレネルゾーンを遮る地形になっているが、3次元的には尾根の先端に近く周辺部から電波が到達したことなどが考えられる。図-8(d)の地点4は通信距離 7km で通信に成功した。計測点周辺に障害物はなく、フレネルゾーンが十分に確保されているため通信に成功した典型的な例と考えられる。

5. おわりに

本研究では橋梁を対象に LPWA の通信実験を行い通信条件の違いから、送受信状況の比較を行った。

- 1) 橋座上で通信できた橋梁は橋面上で通信できた橋梁の半数以下であり橋梁自体による通信への影響は大きい。
- 2) センサユニットからアンテナを分離して橋面上に設置することで、通信距離を延ばすことが期待できる。
- 3) フレネルゾーン内の障害物の割合で通信可否がある程度判断できるが、建物や局所的な地形も影響する。

今後の課題としては、防災での応用を踏まえた天候による通信状況の変化、実運用に適用する場合のセンサユニットとアンテナの最適な設置法の検討があげられる。

謝辞

本研究の一部は、北海道科学技術総合振興センター(ノーステック財団)イノベーション創出研究支援事業スタートアップ研究補助金の助成を受けて実施いたしました。ここに記して感謝申し上げます。

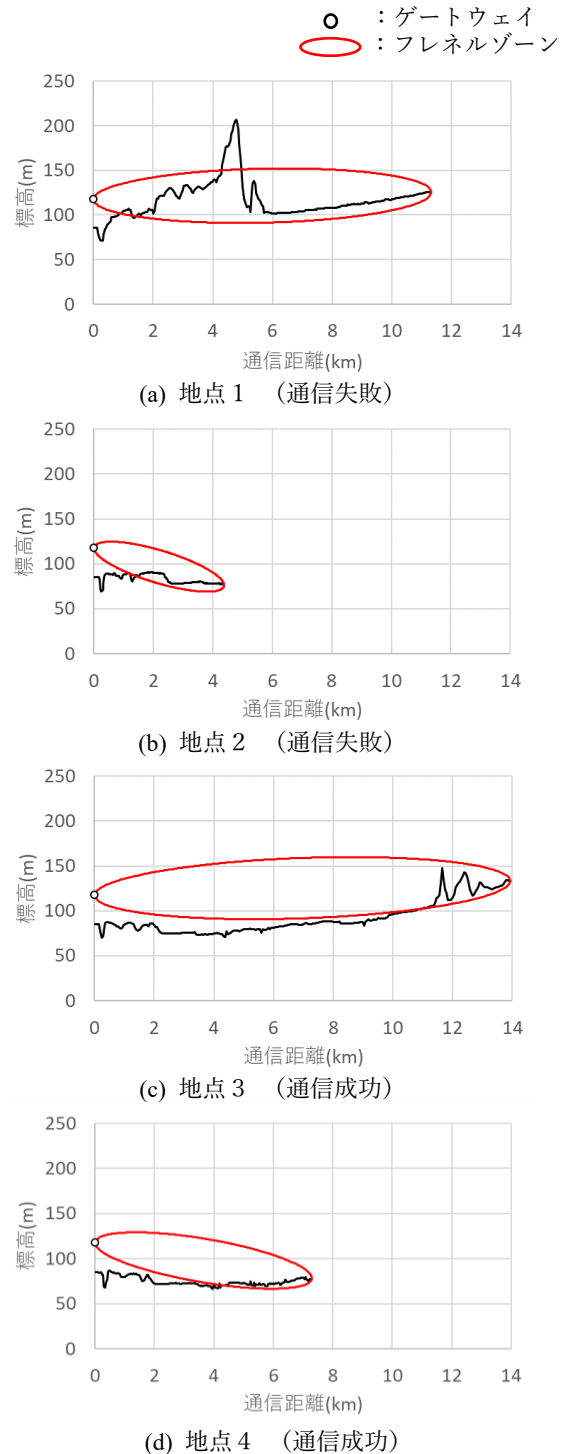


図-8 通信経路上の標高とフレネルゾーン

参考文献

- 1) 国土交通省：令和3年版国土交通白書, 2021.
- 2) 小林亘, 大原美保：LPWAを用いた市街地でのリアルタイム浸水モニタリングに関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 75 巻, 1 号, pp. 36-47, 2019.
- 3) 関屋英彦, 木ノ本剛, 高木真人, 丸山収, 三木千壽：LPWAを活用した鋼桁橋における無線通信に関する基礎的研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 76 巻, 1 号, pp. 53-62, 2020.
- 4) 鈴木一哉, 森本昌治, 岩井孝法：IoT 技術の最新動向, 電子情報通信学会, 12 巻, 1 号, pp. 12-20, 2018.
- 5) 北見市史編纂委員会：新北見市史 上巻, 2019.
- 6) 高田潤一：電波伝搬の基礎理論, 映像情報メディア学会誌, 70 巻, 1 号, pp. 142-148, 2016.