山岳トンネルにおける省電力広域(LPWA)無線通信規格 LoRaWAN の適用性検討

大成建設(株) 技術センター　正会員 ○水野 史隆　谷 卓也
(株)MIRAIt Service Design　小原 光弘　岡田 俊之
ウェイブ・エレクトロニックス・ジャパン(株)　金 敬東

1．はじめに

LPWA（Low Power Wide Area）は，広域データ通信，低消費電力を特徴とする無線通信の総称である(図-1)．これまで IoT 向けの無線通信技術としては，主に Wi-Fi 等の近距離無線通信技術や携帯電話通信技術が採用されてきた．しかし，消費電力の大きさ，高コストといった課題があり，これらの課題を克服する通信技術として，IoT デバイスへの LPWA の普及が多くの産業で進みつつある．建設業においても，LPWA の工事現場への適用がされ始めているが[2)]，山岳トンネル工事への適用事例は少ない．

筆者らは，山岳トンネル工事における坑内計測の省力化を推進する要素技術として，LPWA の積極的な活用を考えている．現状，B 計測をはじめとする坑内計測のデータ伝送は主に有線で行われ，ケーブルの取り回しや電源の確保が必要であり，省力化の余地が多分にある．そこで坑内計測のデータ伝送を LPWA に置き換えることができれば，これらの課題が解消し，計測に係る負担の大幅な削減が期待される．

本報告では，LPWA の坑内計測への適用に向けて実施した基礎的な坑内通信実験の結果について報告し，今後の展望について述べる．

2．通信方式の選定

LPWA の主な通信方式には，Sigfox，LoRaWAN，NB-IoT 等がある．筆者らは，これらの LPWA 無線方式の中で，ライセンスを必要とせず，携帯電話通信の電波が届かない山岳地帯でも坑内に自営の基地局を設置でき，低コストの通信システムを構築可能な LoRaWAN（Long Range Wide Area Network）を選定した．LoRaWAN は，920MHz 帯の ISM バンドを使用し，13 dBm 以下の低い出力でも遠距離通信を可能とする LoRa 変調を採用した通信方式である．

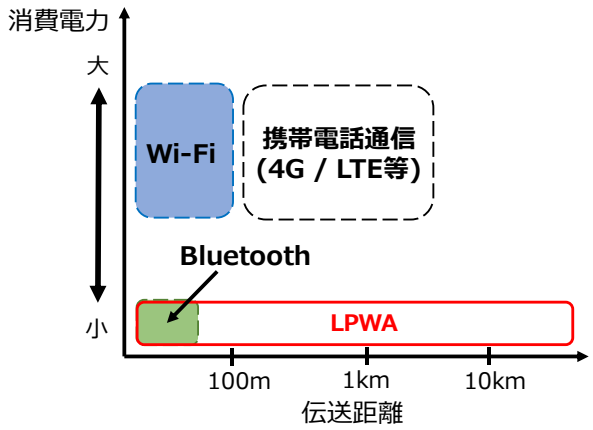

図-1　LPWA の位置付け[1)を参考]

3．坑内における LoRaWAN の通信実験

LoRaWAN は，見通しの良い屋外では，数 km から数十 km の距離を通信可能であることが報告[3)]されているが，線形構造物であるトンネル坑内における通信特性については，あまり知られていない．そこで，2 つの山岳トンネル工事現場（A トンネル，B トンネル）において，LoRaWAN 規格の通信機器（PLNetworks 社製 LoRa 無線通信ユニット）を用いた坑内通信実験を行った．

実験では，坑内における通信可能距離の検証（実験①）と吹付けコンクリートに設けた孔内に LoRaWAN の通信機器を挿入した場合の通信実験（実験②）の 2 つの検証を行った．実験②は，LoRaWAN を実際に坑内計測機器に組み込んだ場合の通信環境を想定した実験である．通信状況の評価には，RSSI（Received Signal Strength Indication）を用いた．RSSI は，無線通信における受信信号の強度を表す指標であり（単位は dBm），通信距離が長くなるに従って値が低下し，ある値を下回ると電波が受信できなくなる．本実験に用いた通信機器の通信可能最低 RSSI は，約-134 dBm であった．実験①の通信距離の検証では，図-2 に示すように，直線部の他、見

キーワード　山岳トンネル　LPWA　LoRaWAN　坑内計測　データ伝送
連絡先　〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株) 技術センター TEL045-814-7217

© Japan Society of Civil Engineers

通しがきかない丁字路（実験①´）でも実験を行った．

実験②は，天端に設けたφ50 mm の孔に送信機を挿入し，受信機は孔から約 10m 離れた坑内に設置し，挿入深さが通信に与える影響について調べた．

実験を行った 2 つのトンネルの特徴について述べる．A トンネルは，断面積が約 50 m^2 で，ほぼ直線の見通しの良いトンネル線形である．一方，B トンネルは，小断面（約 35 m^2）で，一部で曲率の大きな箇所があり，通信環境としては，A トンネルと比較して不利な条件にある．坑内の壁面は，A トンネルでは実験区間のほとんどで覆工コンクリートに覆われた状態であったが，B トンネルは全線で吹付けコンクリートと鋼製支保工が露出した状態であった．また，両トンネルともに，ずり出し用のベルトコンベヤが設置さていた．

4．結果と考察

実験①の実験結果を図-3 に示す．両トンネルともに通信距離が長くなるにつれて RSSI が低下することがわかった．A トンネルでは，送受信機間の距離が 1.7 km まで通信可能であることを確認したが，切羽に到達したため，それ以上の距離での検証はできなった．一方，見通しの悪い B トンネルでは 1.4 km まで通信可能であることを確認した．1.6 km 地点でも通信を試みたが，電波は受信できなかった．図-3 中に、Fris の伝達公式より導出される伝搬損失の推定式 [1]を破線で示した．今回の実験結果から，トンネル坑内が概ね n=2.5 から 3 の間の条件にあることが示唆された．

実験①´の丁字路では，図−2 に示す条件で通信を行った結果，RSSI は-120 dBm であった．これは直線部における通信距離 1.5 km に相当する RSSI であり，見通しがきかない場合，電波が大きく減衰することがわかった．しかし，まったく見通しのきかない条件においても，通信が可能であることがわかった．

実験②の結果を図-4 に示す．送信機の挿入深さに比例して RSSI が低下することがわかった．計測機器に LoRa 通信モジュールおよびアンテナを組み込む場合の挿入深さは 10cm 以下を想定している．本実験から，周囲の吹付けコンクリートが通信に及ぼす影響は，十数 dB 程度の RSSI 低減に留まることがわかった．

5．まとめと展望

坑内における LoRaWAN の通信可能距離の検証を行い，見通しの良い条件で 1.7 km 離れた距離でも通信可能であることを確認した．また，見通しの悪い線形であっても 1 km 以上の通信が可能であることが示唆された．本検討を通して，LoRaWAN が坑内計測における有用なデータ伝送ツールになり得ることが確認できた．今後は，坑内計測のデータ伝送への LoRaWAN の適用による現場計測の省力化を進めていきたい．

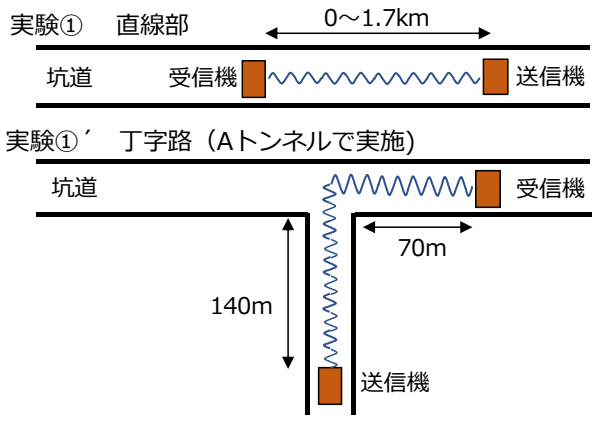

図-2　通信距離に関する実験概要

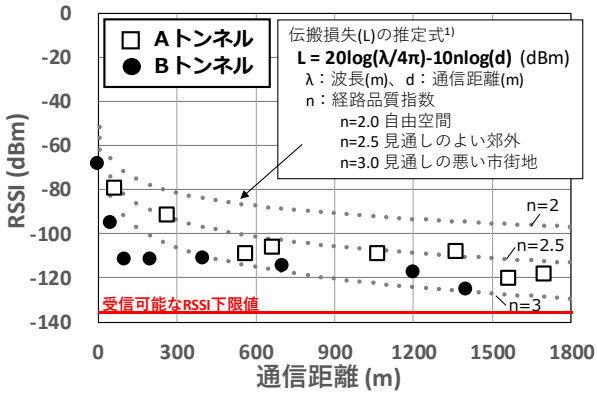

図-3　通信距離と RSSI の関係

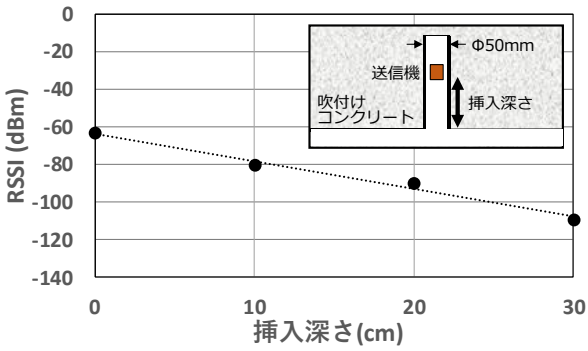

図-4　孔への挿入深さと RSSI の関係

参考文献

1) 鄭：IoT ネットワーク LPWA の基礎，リックテレコム，2017.
2) 日経 BP 社：日経コンストラクション 2019 年 10 月 14 日号，p26，2019.
3) 加藤ら：超小型気球による夜行雲観測を目指した装置開発と初期実験結果，大気球シンポジウム，2019.

© Japan Society of Civil Engineers