

Private LoRa メッシュネットワークを用いたスマートビレッジアプリケーションシステムの開発とスリランカへの実装

大和田泰伯[†] 井上 真杉[†] 佐藤 剛至[†] 軍司 明允^{††} 高田不二夫^{††}

紀伊 寛伍^{††} 伯川 宗平^{††}

[†] 国立研究開発法人情報通信研究機構 ネットワーク研究所 レジリエント ICT 研究センター
サステナブル ICT システム研究室 〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

^{††} BHN テレコム支援協議会 〒110-0005 東京都台東区上野 5 丁目 2 4-1 1

E-mail: [†]{yowada,inoue,sato_g}@nict.go.jp, ^{††}{gunji,takada,kii,hakukawa}@bhn.or.jp

あらまし スリランカの農村地域では、紅茶の生産が盛んに行われているが、洪水や土砂災害などの自然災害が問題となっていることに加え、茶畑などがある山間部では携帯電話網がまだ整備されていない場所も少なくない。また、そのような農村地域において生活する人々は高齢化が進んでおり、高齢者に何か非常事態が発生した際に周囲に助けを呼ぶ手段にも課題があった。これらの農村地区の課題を解決するアプリケーションシステムとして、プライベート LoRa を用いたメッシュネットワークと NerveNet を組み合わせることにより、地域内の情報を地域内で共有するアプリケーションシステムを開発し実証実験を通してその動作検証を行い、スリランカにおいてそのシステムを実装し、現地へ移管を行った。本稿では、このシステムについて紹介する。

キーワード NerveNet, Private LoRa, Mesh Network, スマートビレッジ, IoT, センサ, スリランカ

Development of a Smart Village Application System Using Private LoRa Mesh Network Deployed in Sri Lanka

Yasunori OWADA[†], Masugi INOUE[†], Goshi SATO[†], Yoshimasa GUNJI^{††}, Fujio TAKADA^{††},
Kango KII^{††}, and Souhei HAKUKAWA^{††}

[†] Sustainable ICT System Laboratory, Resilient ICT Research Institute, Network Research Institute,
National Institute of Information and Communications Technology,
4-2-1 Nukui-kitamachi, Minato-ku, Tokyo, 105-0123 Japan

^{††} BHN Association, 5-24-11 Ueno, Taito-ku, Tokyo, 110-0005 Japan

E-mail: [†]{yowada,inoue,sato_g}@nict.go.jp, ^{††}{gunji,takada,kii,hakukawa}@bhn.or.jp

Abstract In rural areas of Sri Lanka, tea production is a major industry; however, these regions face challenges such as frequent natural disasters including floods and landslides. Additionally, many mountainous areas where tea plantations are located still lack adequate mobile network coverage. Compounding these issues is the aging population in these rural communities, where elderly individuals often have limited means to call for help in emergency situations. To address these challenges, an application system was developed that enables local information sharing within the community by combining a mesh network based on Private LoRa with NerveNet. The system was validated through demonstration experiments and subsequently implemented and transferred to local stakeholders in Sri Lanka. This paper introduces the system and its deployment.

Key words NerveNet, Private LoRa, Mesh Network, Smart Village, IoT, Sensor, Sri Lanka

1. 背景

スリランカは農業が盛んな国であり、GDP における農林水産業が占める割合は 2022 年時点で 8.28% を占め [1]、その中でも特に紅茶生産が盛んで、全農業輸出額に占める紅茶の輸出額の割合は約 62% にも及ぶ [2]。山間部では多くの茶畑や紅茶製造のための工場が存在し、全人口の 26.5% は農業に従事している [3]。茶畑は主に山間部に多く位置しており、山間部で農業に従事する人口も多いため、小さな村が国土に広く分布している。また、熱帯地域に位置するスリランカでは、雨季における洪水、特に Flash flood と呼ばれる突発的な洪水が多く発生し、この洪水によって多くの被害が出ている。さらに、近年では若い人を中心に都市部に出て働く人も多くなってきており、農村地域における高齢化も課題となっている。

我々は地域コミュニティの課題解決を行うアプリケーションサービスを提供する地域プラットフォームの実現を目指し、NerveNet 技術をコア技術として、さらにその応用技術に Private LoRa を用いたメッシュネットワーク技術を開発してきた。この技術を先に述べたスリランカの農村地域における課題解決に応用し、複数のアプリケーションシステムを、安価に入手可能な IoT 機器で構成・構築した共通プラットフォーム上で運用し、その有効性・実現可能性を実証を通して検証を行う。本稿では、開発した Private LoRa を用いたメッシュ型のネットワーク構築技術及びプラットフォーム技術と、その上に実装したアプリケーション、及びこれらを組み合わせた統合的なシステムの実証実験環境と、その動作結果について述べる。

2. Private LoRa を用いたメッシュネットワーク技術

2.1 関連技術

LoRa (Low Power Long Range) は、無線物理層に Chirp 変調を用いた通信技術であり、低ビットレートではあるものの拡散率や符号化率に応じて通信速度も変わり、低い受信信号強度の無線信号であっても信号を復調し受信できる特徴を有する。そのため、小さな送信電力であっても長距離の無線データ伝送が行える。スリランカでは日本と同じ 920MHz 帯が LPWA 用のアンライセンズバンドとして割り当てられている。この LoRa を用いた通信規格として、IP を含む上位層のプロトコルまでを含む LoRaWAN [4] という規格が LoRaWAN Alliance により定められている。LoRaWAN では、LoRaWAN Gateway と呼ばれるインターネットに接続された基地局と、LoRaWAN Gateway に接続するセンサで構成されたネットワーク構成を取り、センサは LoRaWAN の規格に則って LoRaWAN Gateway を介してインターネット上のサーバにデータを送信することができる。これらの LoRaWAN の規格上は、センサデータをインターネット上のサーバに収集する（もしくはその逆方向の通信）を前提として設計されているスター型のネットワーク構成のため、LoRaWAN Gateway に接続されたデバイス（センサ）同士が直接情報をやり取りすることを想定していない。我々の考える地域プラットフォームのコンセプトでは、地域内に存在

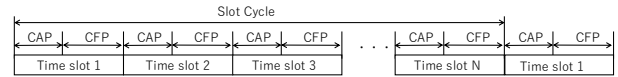


図 1 LoRa を用いた送信スロットの割当

する複数のセンサやデバイス同士がそれぞれ相互に接続することで地域のネットワークと情報サービスを提供するプラットフォームを構築し、インターネットが無くても、そのプラットフォーム上で地域内のサービスを提供できる仕組みを作ること为目标としているため、LoRaWAN の設計思想やアーキテクチャとは異なったアーキテクチャ、ネットワーク構造となる。よって、我々は LoRa の物理層技術はそのまま利用しつつも、その上位層については独自に設計できる Private LoRa を用いて、装置同士が互いに送受信を行うことでネットワークを構成可能なメッシュネットワーク機能を設計・実装した。

2.2 無線アクセス方式

LoRa による通信速度は、使用する帯域幅 (Band Width: BW 128kHz, 250kHz, 500kHz) や拡散率 (Spreading Factor: SF 6~12) や符号化率 (Coding Rate: CDR 4/5, 4/6, 4/7, 4/8) に応じて通信距離 (所望 SINR) や通信速度が変化する。LoRa の物理層における通信速度は 37.5kbps (BW=500kHz, SF=6, CDR=4/5) ~ 0.18kbps (BW=128kHz, SF=12, CDR=4/8) と非常に低速であるため、100Byte 程度のデータを送信する場合であっても選択したパラメータ設定によっては送信時間に数秒を要する。LoRa の通信モジュールにはデータ送信を行う直前に、その無線チャネルで他の装置が送信を行っていないかをキャリアセンスする機能が入っており、それにより同時送信によるデータの衝突を避ける。しかし、マルチホップによる通信を想定し、広域に通信機を配置した場合には、全ての装置同士が必ず通信範囲内にいるとは限らないため、通信範囲外にいる装置同士が同時に送信することで、その間に位置する受信機で信号が衝突する隠れ端末問題が発生する恐れがある。この隠れ端末問題を解決するために、我々の Private LoRa を用いた通信では、TDMA による非競合型の無線アクセスと、キャリアセンスによる競合型の無線アクセスのハイブリッドによるアクセス制御方式を実装している。この通信におけるアクセス制御を図 1 に示す。

全ての通信装置は、無線機のパラメータとして共通の設定 (Channel, BW, SF, CDR, PANID (Personal Area Network ID)) に加え、TDMA で使用するためのスロット割当設定、TDMA サイクルの設定、装置毎に個別の ID 割当とスロット番号割当の設定が行われる。TDMA サイクルにおける 1 スロットの中も、全無線機が衝突も許容しつつキャリアセンス後に送信権を獲得する送信スロット (Contention Access Period: CAP) と、他の送信と衝突しないよう装置毎に個別に割り当てられた送信スロット (Contention Free Period: CFP) が設定できる。これにより、自分の送信スロットが回ってくるまで待てない、タイムリーに送信したい情報は CAP にて送信することでリアルタイム性を維持し、他との衝突無く確実に送信したい情報は CFP で送信を行う、といったアプリケーションの要

求に応じた送信制御が行える仕組みを提供する。TDMA では、全ての装置で時刻の同期が取れていることを前提とするため、その時刻同期のための仕組みとして2種類実装している。一つはGPSを用いた絶対時刻の同期方法であり、定期的にGPSから受信した情報に含まれる時刻情報に基づいてOSが持つローカルタイムを合わせる方法である。もう一つは、LoRaを用いて定期的に送信される制御情報の送信タイミングで、その装置が持つローカルタイムの時刻情報を送信し、受信した装置ではLoRaによる送受信に要した時間分の補正を行った上で、一番早く進んでいる時刻に自身のローカルタイムを合わせる手法である。前者はそれぞれがGPSから得られる絶対時刻に同期するため比較的精度良く時刻の同期が行えるメリットがあるが、GPS信号が受信できる屋外にGPSアンテナを設置する必要がある。一方、後者はGPS信号が受信できない場所でも利用できる反面、時刻同期をLoRaのデータ送受信経由で行うため、時刻の同期誤差が生じることや、制御情報の送信間隔によっては装置全体の時刻同期ができるまでに時間がかかるデメリットがある。

2.3 メッシュネットワーク機能

我々の実装するプロトコルでは、LoRaを用いて送信されるデータは全てブロードキャストを用いて送信される。そのため、送信されたデータは、同一の無線物理層パラメータで設定されたLoRaモジュール全てにおいて、所望SINRを満たしていれば受信処理が行われる。また、全装置は定期的に自身のID情報と、自身の周辺で受信可能な隣接装置のID情報及びその受信信号強度の情報を定期的に制御情報としてブロードキャストしており、周辺の制御情報を受信することで、2ホップ先までの到達可能な装置の情報を得ることができる。この情報に基づいて、経路制御プロトコルOLSR[5]におけるMulti-point Relay (MPR) 選択アルゴリズムと同様の方法で、受信したブロードキャストデータを再中継する装置が選択される。これにより、再ブロードキャストを繰り返すフラッディングにおいて、不要な再送信を削減することができる。装置が新しい情報をブロードキャストする際には、情報にレコードIDという識別子をつけて送信する。受信した装置では、その情報のレコードIDが過去に自身が再ブロードキャストしていないかどうかを確認した後、再送信していない場合には自身のデータベースに受信したデータを登録するとともに、受信信号の送信元からMPRとして選択されている場合にのみ、再ブロードキャストを行う。この再ブロードキャストによるフラッディングを行う事により、全ての装置間でデータを同期共有することができる。このフラッディングにより構成されるネットワーク及びデータ共有の仕組みを、本稿ではLoRaメッシュネットワークと呼ぶ。

2.4 アプリケーションとのインターフェース

LoRaメッシュネットワーク装置及び内部ソフトウェア構成を図2に示す。LoRaメッシュネットワーク機能やGPSを用いた時刻同期機能、NerveNetの機能等は、全てコンテナとして動作しており、マイクロサービス化されている。これらの機能はDockerが動作する環境であれば簡単に動作させることができる。LoRaメッシュネットワークを用いた送受信をアプリ

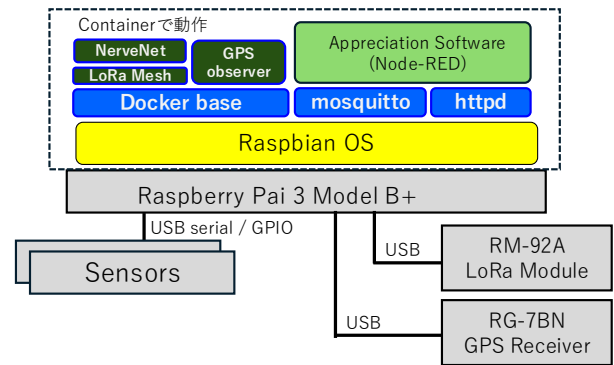


図2 LoRaメッシュネットワーク装置のハードとソフトウェア構成

ケーション側から利用するためのAPIとして、MQTT[6]を利用したAPIを提供している。全ての装置内ではMQTTブローカー(mosquitto)が動作しており、このブローカーを介することで、MQTTによるPub/Subデータ送受信と同じ方法でLoRaメッシュネットワークを介したデータの送受信を行うことができる。アプリケーションは特定のトピックという識別子をつけてデータを好きなタイミングでデータを送信(publish)することができる。MQTTで送信されたデータは、LoRaMeshコンテナに受け渡され、自身の送信タイムスロットで実際にLoRaを用いた送信処理が行われる。受信者は購読したい(受信したい)トピックを指定してMQTTブローカーにsubscribeすると、そのトピックのデータのみMQTTブローカーから受け取ることができる。更に、アプリケーションの開発環境をより直感的に行えるようにするため、NodeRED[7]もそれぞれの装置で動作しており、装置にシリアル接続したセンサから得られたデータをそのままMQTTを用いて送信する、もしくはあるトピックでLoRa経由で受信したデータにも基づいて、何らかのアクションを起こすようなプログラムをNodeREDを用いて簡単に書くことができる。

3. スマートビレッジアプリケーション

3.1 要求条件とハードウェア設計

1. 章でも述べた通り、スリランカの農村地域では、1. 携帯電話網のサービスエリアが不十分な地域が少なくないこと、2. 洪水やFlash Floodと呼ばれる突発的な洪水が多く、それに備えるための早期警報システムが求められていること、3. 紅茶生産がスリランカにおける主力産業であり、紅茶を製造する工場において、茶葉の揉み込みや発酵過程における湿度や酸素濃度が茶葉の品質に大きく関係していることから、それらのデータ取得のニーズがあること、4. 農村地域における高齢化が進んでおり、高齢者を地域で見守る際に、緊急の事態が起きたことを周辺に知らせる手段が必要であること、の4つのニーズに答えられるアプリケーションシステムを設計する必要がある。また、それに加え、これらのシステムを構築する際の機材は、スリランカにおいても現地調達可能であり、かつ安価にシステムが構築できることが求められる。そのため、本システムの構築は、広く使われている安価なシングルボードコンピュータである

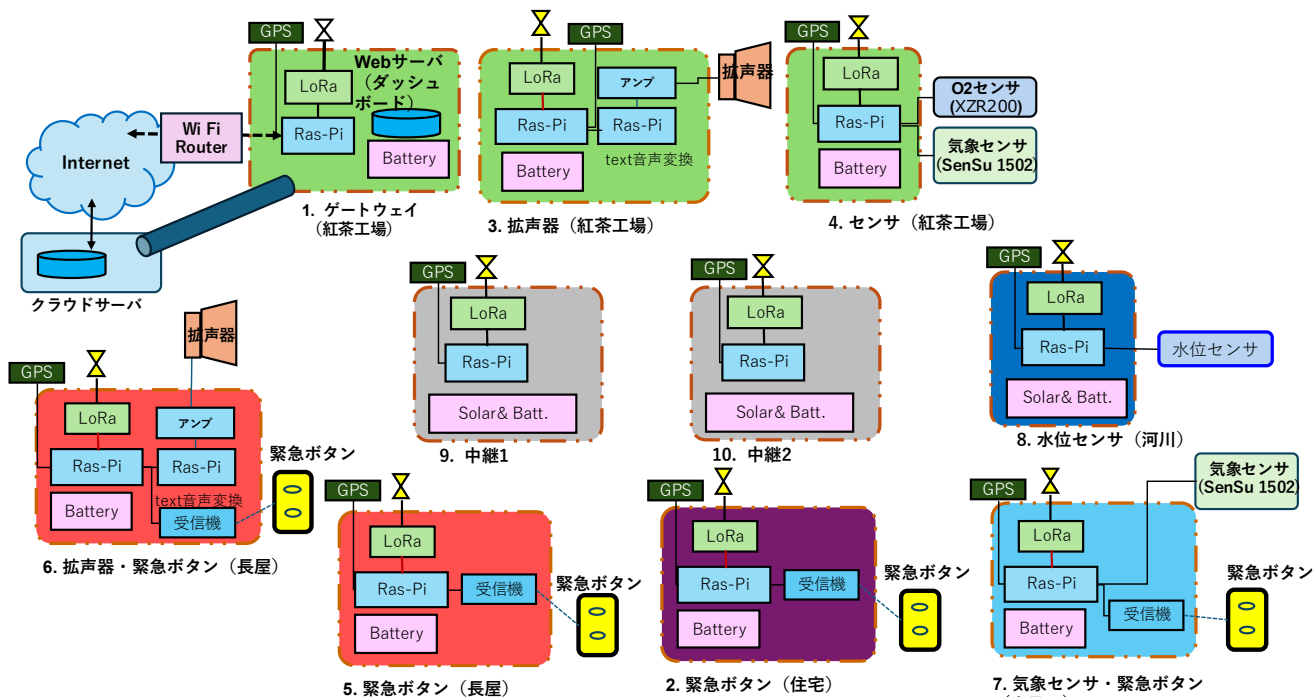


図 3 システムの全体構成

Raspberry Pi 3 Model B+ を採用し，LoRa 通信モジュールには RFLink 社製 RM-92A を採用した．また GPS 受信機として USB 接続の GPS 受信モジュール RG-7BN を使用した．この構成を基本構成として，そこに目的や用途毎にセンサ類や拡声器などを組み合わせ，複数種類の装置を実装した．停電の発生や，場所によっては商用電源が利用できない場所に設置することも想定し，全ての装置には鉛蓄電池，DC-DC 変換機を介して装置に電源を供給する形にし，蓄電池は商用電源もしくはソーラーパネルから充電を行える構成にした．システムの全体構成を図 3 に示す．

3.2 システム全体構成とアプリケーションの実装

今回のシステムを展開するフィールドとして，スリランカ中部州に位置する Kandy 県 Gampola 市内の Elpitiya 地区の農園及び紅茶工場一帯に協力頂いた．このエリアに設置する機器の配置図を図 5 に，使用するセンサ等の機器を図 4 に示す．

この一帯の中心部には紅茶工場があり，そこでは主に工場内の温湿度センサ及び酸素濃度計のセンサ情報をセンシングする．また，その東側を南北にマハウェリ川が流れており，そこにはフロート式の河川水位センサを設置する．中心部にはホテルがあり，そこには屋外に気象センサを設置する．西側の丘の中腹には長屋があり，住民が数世帯生活をしている．丘の上にも住宅があり，高齢者が生活をしている．人が比較的多く集まる場所は，この長屋周辺と，紅茶工場及びホテル周辺であるため，そこに音声が届くよう拡声器を備えた装置を設置する．また，人が多く生活する長屋や住宅，ホテルには，緊急通報用のボタンとその受信機を設置することとした．それぞれにおいて，次の 4 つのアプリケーションを開発した．



図 4 使用する装置及びセンサ機器

3.2.1 センサ情報を収集し可視化するアプリケーション

河川の水位センサ，気象センサ（照度，温度，湿度，雨量，風速，風向），紅茶工場のセンサ（温湿度，酸素濃度），を 1 分毎に計測し，LoRa メッシュネットワークにて共有する．これらのデータは，データの可視化を行うダッシュボードアプリケー



図 5 実証エリアと機器の設置位置

ションが動作するゲートウェイ装置にも同期され、時系列のグラフとして可視化される(図??)。このダッシュボードアプリケーションが動作する装置は、インターネットにも接続されており、クラウド上のサーバとの間で NerveNet [?] の L2VPN 機能を使用することで、インターネット経由でダッシュボードのアプリケーション画面にアクセスすることもできるようにした。また、ダッシュボードアプリケーションが動作する装置を含む全ての LoRa メッシュネットワークの装置では MQTT ブローカーが動作しているため、クラウドサーバ上において、その装置に直接 MQTT を用いて Publish/Subscribe を行うことで、独自にセンサデータや拡声器を利用したアプリケーションを実装することができる。

3.2.2 放送アプリケーション

LoRa メッシュネットワークを用いて、拡声器から警報や案内を放送するアプリケーションも開発した。放送する内容の登録はダッシュボードアプリケーションから行い、放送するデータの入力方法として、定型音声ファイルの指定再生と任意のテキストを入力して送信する2種類の入力方法を用意した。定型音声ファイルの指定再生は、予め拡声器が接続された装置内に番号付けした形で音声ファイルを用意しておき、ダッシュボード側ではそのファイル番号を指定して再生要求を送信すると、拡声器からそのファイル番号の音声ファイルが再生される仕組みである。任意のテキストデータを送信した場合には、そのテキストを含む情報が LoRa メッシュネットワークを介して共有され、拡声器が接続された装置がそれを受信すると、自動的にテキスト読み上げにより音声に変換され拡声器から放送される。これにより、LoRa で送る情報量を最小限にしつつ、目的の放送を行う事ができるようにした。

3.2.3 緊急通報ボタンが押されたことを通知するアプリケーション

緊急通報ボタン(以降、緊急ボタンと呼ぶ)には、常に携帯できるよう、小型の特定小電力を用いた無線ボタンを採用した。また、装置本体にもランプ付きのボタンが備え付けられており、そのボタンも緊急ボタンと同様の動作する。緊急ボタンが押されたことを受信機が検知すると、その装置に備え付けたボタンのランプが点灯するとともに通知が LoRa メッシュネットワー



図 6 中継局の設置方法

クを介して送信される。通知がゲートウェイまで到達すると、そこから指定された人に SMS で通知が飛ぶ仕組みを実装している。拡声器と連動させる設定を行えば、ボタンが押された際に拡声器から指定された音声ファイルを再生させることもできるようにした。ダッシュボード上でも、緊急通報があったことが表示され(図 9)、確認ボタンを押すと応答確認メッセージが送信され、緊急ボタンが押された装置では応答確認メッセージを受信すると、点灯していた装置ボタンのランプが消灯する。これにより、緊急通報を発報した人が、対応する人にメッセージが伝わったかどうか分かる仕組みになっている。

3.2.4 水害の早期警報アプリケーション

水位センサの状態は1分毎に送信し、その状態はダッシュボードアプリケーションで可視化できるようにした(図 8)。さらに、一番上段のセンサが反応した場合、つまり、一番上段に設置したセンサ位置まで水位が上昇した場合には、自動的に拡声器からその情報を音声で知らせる、早期警報アプリケーションも開発した。

4. 実証環境の構築と検証

我々は、図 5 に示す各拠点に各種センサや拡声器を備えた装置を設置し、実証実験を行った。実証の場所一帯は森林の中であり、かつ長屋や住宅があるエリアとホテルや紅茶工場、河川があるエリアとの間には丘や森があり見通しが完全に無いため、丘の上や森林の中心部に中継用の装置を設置している(図 6)。この中継装置と河川に設置した水位センサを搭載した装置は、商用電源を用いずソーラーパネルとバッテリーのみで運用継続している。それ以外の住宅、長屋、紅茶工場、ホテルは商用電源からバッテリーを充電しつつ装置へ給電を行う構成で動作している。今回の検証では、LoRa メッシュネットワークの TDMA サイクルを 60 秒とし、10 台の装置に対してそれぞれ 6 秒毎のスロットを割り当て、各スロットは全て CFP スロットとして割り当てた。このスロット割当てに合わせ、センサデータ

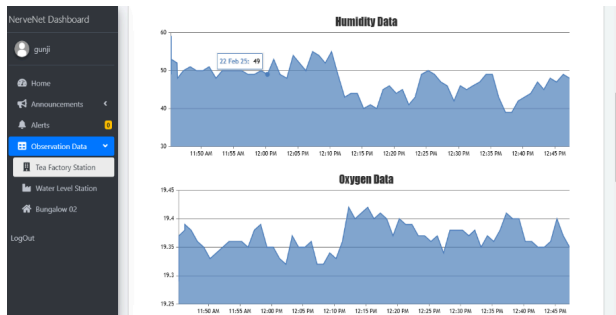


図 7 ダッシュボードアプリ画面（気象センサのデータ）

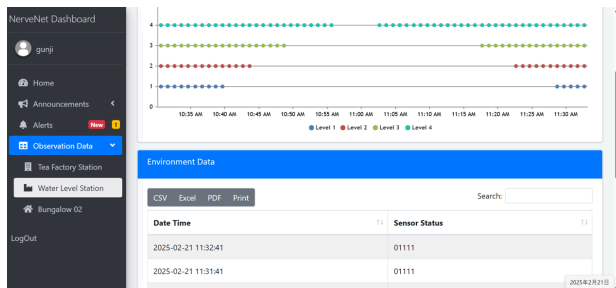


図 8 ダッシュボードアプリ画面（水位センサのデータ）

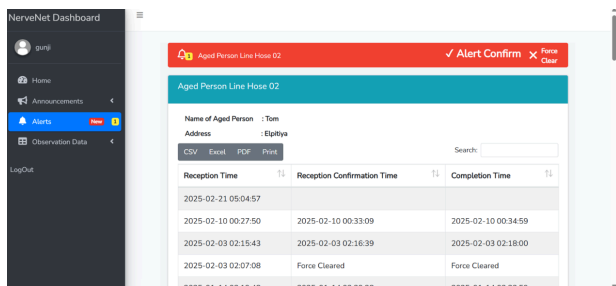


図 9 ダッシュボードアプリ画面（緊急ボタンの信号受信時）

の送信間隔も 60 秒に設定した。今回、全ての装置は固定的に設置されるため、隣接装置発見に使用する制御メッセージの送信頻度も 30 分に 1 回と送信間隔を広げることで制御メッセージのオーバーヘッドを削減する設定とした。図 7-9 に、ダッシュボードアプリケーション上に表示されたフィールドセンサ、紅茶工場のセンサ、水位センサ等の情報を示す。本実証実験期間中の LoRa メッシュネットワークを介した情報の共有において、受信できなかったデータは発生しておらず、送信されたデータは全てダッシュボードアプリケーションへ損失無く共有できていることが確認できた。これは、フラッドイングによる冗長化されたブロードキャスト送信と TDMA による他との衝突が生じないアクセス制御による効果であると言える。

水位センサの動作検証については、設置後にセンサを水に浸水させて動作の確認を行い、ダッシュボード上にもそのセンサの状態が正しく表示されていることを確認した。緊急通報ボタンの受信機は、住宅、長屋及びホテルに設置しており、そのいずれかの場所でボタンが押されても、拡声器から緊急メッセージが流れるとともに、ダッシュボード上に緊急ボタンが押された旨の表示がなされること、ダッシュボード上で対応ボタンを押すと、緊急ボタンの受信機が接続されている装置のランプも

消灯することが確認できた。最後に、ダッシュボード上でテキストメッセージや定型音声ファイルの送信を行うと、拡声器からそのメッセージが音声で放送されることも確認でき、今回実装した全てのアプリケーションが現地で正常に動作することが確認できた。

5. まとめ

本稿では、スリランカにおける農村地域の課題解決に資する地域プラットフォームとして、Private LoRa を用いた LoRa メッシュネットワーク機能と、それを利用した地域ネットワークプラットフォームを開発し、そのプラットフォームを利用した 4 つのアプリケーションを実装した。それらの実証場所としてスリランカの農村地域を選定し、実際にネットワークを構築して実装したアプリケーションの全ての動作を確認し、その有効性を検証した。これらのシステムは、2025 年 2 月 28 日にこの地域の管理者に対して譲渡され、現在も現地で運用され続けている。

謝辞

本研究の一部は、APT (Asia Pacific Telecommunity: アジア太平洋電気通信共同体) の ICT Pilot Projects for Rural Areas (Category-II) における助成事業により実施したものである。

文 献

- [1] <https://saea.lk/overview-of-agriculture-sector-in-sri-lanka/>
- [2] <https://www.srilankabusiness.com/tea/tea-export-growth.html>
- [3] <https://tradingeconomics.com/sri-lanka/employment-in-agriculture.html>
- [4] LoRaWAN Alliance, <https://loro-alliance.org/>
- [5] T.H. Clausen, P. Jacquet, "Optimized link state routing protocol (OLSR)," IETF Request for Comments 3626, Oct. 2003.
- [6] A. Stanford-Clark and A. Nipper, "MQTT Version 3.1.1," OASIS Standard, 2014. <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/>
- [7] N. O'Leary, "Node-RED: Flow-based programming for the Internet of Things," JS Foundation, 2016. <https://nodered.org>
- [8] M. Inoue, M. Ohnishi, H. Morino, T. Sanefuji and Y. Owada, "Fast Recovery from Link Failures and Blackout of a Managed Wireless Mesh for NerveNet," 2010 IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM 2010, Miami, FL, USA, 2010, pp. 1-6, doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5684192.
- [9] C. S. M. Babou, Y. Owada, M. Inoue, K. Takizawa and T. Kuri, "Distributed Edge Cloud Proposal Based on VNF/SDN Environment," in IEEE Access, vol. 12, pp. 124619-124635, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3454357