

# AS923 帯域における対災害ロバスト性向上：LoRaWANの動的パラメータ制御による迅速なリンク回復

小林 凌也<sup>1,a)</sup> 爰川 知宏<sup>1,b)</sup>

**概要：**大規模災害時、LoRaWAN は有効な通信手段となるが、標準のレート制御（ADR）は緩やかな環境変化を前提としており、建物倒壊等の急激な環境悪化には追従できず通信断絶を招く。本研究では、SNR/RSSI をリアルタイム評価し、悪化の予兆に対し即座にレートを下げる「予防措置型」プロトコルを提案する。環境急変実験の結果、標準 ADR が断絶する状況下でも、提案手法は即座にリンクを維持することを確認した。これにより、災害時における LoRaWAN のロバスト性を確立する。

## 1. はじめに

日本は地理的・気象的条件から豪雨・地震等の自然災害が頻発しており、そのたびに「現場情報の欠落」や「通信途絶」が救助・避難を困難にしてきた。2018 年の西日本豪雨や 2011 年の東日本大震災の事例からも明らかのように、広域災害時には携帯電話網などの既存通信インフラが断絶・輻輳し、現場状況の把握が困難になることが繰り返されている [1], [2]。そのため、既存インフラに依存せず、低消費電力で長距離通信が可能な LPWA (Low Power Wide Area) 通信、特に LoRaWAN の活用が期待されている [3]。

しかし、標準的な LoRaWAN に実装されているデータレート制御機構 (Adaptive Data Rate: ADR) は、通信環境が緩慢に変化することを前提に設計されている。既存の ADR は、パケット損失 (ACK ロス) が一定回数蓄積して初めて通信速度 (Data Rate: DR) を下げる「事後対処型 (Reactive)」の制御を行うため、建物倒壊や土砂崩れといった災害特有の急激な環境悪化に対しては適応が遅れ、致命的な通信断絶を招く課題がある [4]。

そこで本研究では、災害時の急変する電波環境においても安定的にセンシング情報を伝達するため、LoRaWAN における「予防措置型 (Proactive)」データレート制御プロトコルを提案する。本手法は、受信信号の SNR/RSSI をリアルタイムで監視し、環境悪化の予兆を検知した瞬間に、通信失敗を待たず即座に DR を引き下げることでリンクを維持する。本稿では、提案手法の実装および高速エレベーターを用いた環境急変実験による評価結果について述べる。

## 2. 既存手法の課題

LoRaWAN の標準 ADR は、過去  $N$  回 (通常  $N = 64$ ) のアップリンク履歴に基づいて DR を決定する。この仕組みは、静的な環境下でのバッテリー寿命最適化には有効であるが、災害時においては以下の致命的な欠陥となる。

**検知の遅延：**建物倒壊などで通信リンクが急激に悪化しても、 $N$  回の ACK ロスが発生するまで高い DR (低い拡散率) を維持し続けるため、その間の通信が全て失敗する。

**復旧の遅延：** $N$  回の失敗後に DR を 1 段階下げるが、環境悪化が著しい場合、1 段階の調整では不十分であり、通信断絶が長期化する。

## 3. 提案手法：予防措置型パラメータ制御

本研究では、通信失敗 (ACK ロス) を待つのではなく、環境悪化の「予兆」を検知して先回りして制御を行う「予防措置型 (Proactive)」プロトコルを提案する。

### 3.1 即時環境指標に基づく制御

提案手法は、ゲートウェイからのダウンリンク応答に含まれる SNR (信号対雑音比) および RSSI (受信信号強度) をリアルタイムで解析する。

**Proactive 制御 (緊急回避)：**受信 SNR があらかじめ設定した低マージン閾値 ( $T_{Low}$ ) を下回った場合、直前の通信が成功していたとしても、即座に DR を複数ステップ引き下げ (拡散率 SF を上げ)、リンクマージンを確保する。

**効率化制御 (平常時)：**逆に、高マージン閾値 ( $T_{High}$ ) を

<sup>1</sup> 東京国際工科専門職大学

<sup>a)</sup> kobaiput@gmail.com

<sup>b)</sup> t.koko@ieee.org

連続して超えた場合にのみ、慎重に DR を引き上げ、ピンポン現象（頻繁な設定変更）を防止する。

### 3.2 フェイルセーフ機構

環境悪化によりダウンリンク自体が受信できない（ACK が返らない）場合に備え、連続失敗回数が閾値（本実装では  $N = 3$ ）に達した時点で、強制的に DR を引き下げるバックアップ機構も併用する。

提案プロトコルの具体的な判断・実行手順を図 1 に示す。

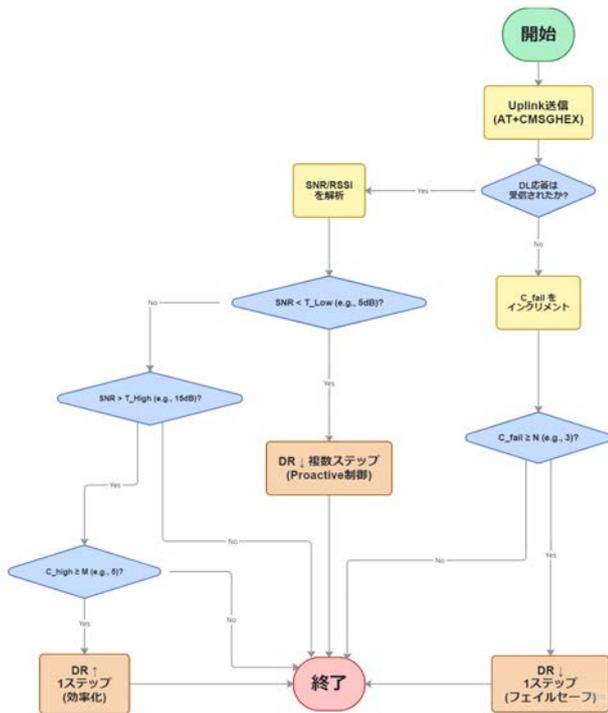


図 1 DR 変更ロジックのフローチャート

## 4. 実装

提案プロトコルを検証するため、以下の構成でシステムを実装した。

- エンドノード: Raspberry Pi + Wio-E5-mini (LoRa モジュール)
- ゲートウェイ: SenseCAP M2 (The Things Stack LNS 接続)
- 制御ロジック: AT コマンドを用い、Confirmed Uplink (確認あり送信) によって明示的に ACK とダウンリンク情報を取得し、Python スクリプトで動的にパラメータを変更する。

## 5. 評価実験

### 5.1 実験方法

災害時の建物倒壊や地下浸入のような「通信環境の劇的な変化」を模擬するため、高層ビル（新宿コクーンタワー）

における高速エレベータでの垂直方向の移動を用いて遮蔽状況を大きく変化させることにより実験を行った（図 2）。

- 実験条件: 地上 37 階（見通し良好・高 SNR）から 2 階（遮蔽環境・低 SNR）へ高速移動し、通信環境を強制的に急変させる。
- 比較対象: LoRaWAN 標準 ADR の理論値と、提案手法の実測値を比較する。

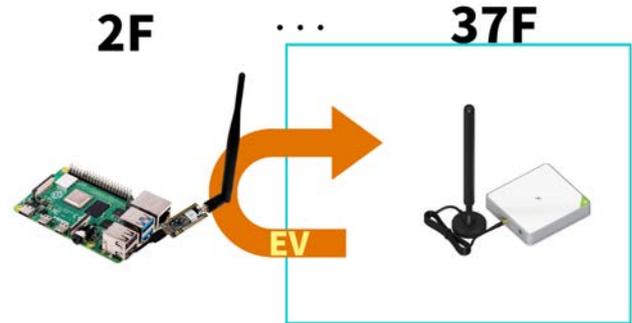


図 2 実験方法

詳細な測定地点を表 1 に示す。37 階と 2 階を移動しながら 9 箇所でデータの測定を実施した。

表 1 評価実験における測定地点

No.	場所
1	37F (教室)
2	37F (エレベータホール)
3	EV (移動中)
4	2F (到着)
5	2F (エレベータホール)
6	2F (エレベータホール)
7	EV (移動中)
8	37F (エレベータホール帰着)
9	37F (教室帰着)

### 5.2 実験結果

測定実験の結果を表 2 および図 3 に示す。図 3 において下部の帯はノードの位置を示し、「EV」はエレベーター移動中の遮蔽による通信断絶を示す。

図 3 に示す通り、37 階では DR3 で安定通信していたが、エレベーター移動による遮蔽（EV 内）を経て 2 階に到着した直後（パケット #4）、SNR が急激に低下（-4.0dB）していることが確認できる。提案手法はこの瞬間、通信自体は成功（ACK 受信）しているにもかかわらず、SNR 低下を検知して即座に DR を 3 から 2 へ引き下げている。この「予防措置」により、その後のパケット #5 以降も通信断絶することなく、安定してデータを送信し続けることに成功している。

表 2 測定結果

No.	結果	DR	SNR	RSSI	Note
1	成功	3	10.0	-32	Initial State
2	成功	3	6.0	-78	Moving to EV
3	失敗	3	-	-	Shielded (Loss)
4	成功	<b>3→2</b>	<b>-4.0</b>	<b>-105</b>	<b>Proactive Action</b>
5	成功	2	7.0	-90	Stable with DR2
6	成功	2	6.0	-93	Stable with DR2
7	失敗	2	-	-	Shielded (Loss)
8	成功	2	7.0	-77	Recovered
9	成功	2	8.0	-32	High SNR Stable

※ No.4 (太字部分) が、Proactive 制御の発動ポイントである。

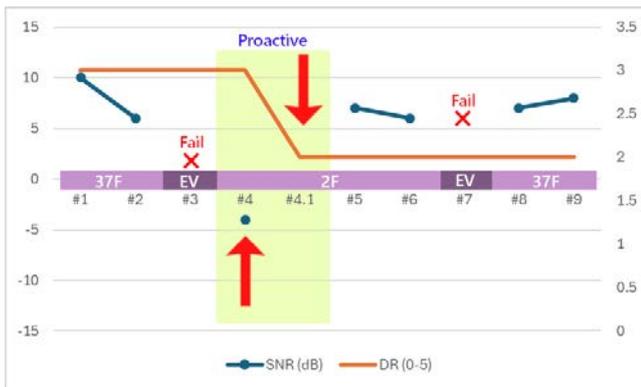


図 3 実験における SNR 変動と予防措置型 DR 制御の挙動

## 6. 考察

標準 ADR の場合、仕様上 64 回の ACK ロスを検知する必要があるため、送信間隔 30 秒と仮定すると、環境変化への追従に約 32 分間の通信断絶が発生する計算となる。対して提案手法は、環境変化直後のわずか 1 パケット (約 30 秒) で最適 DR への移行を完了した。表 3 に比較を示す。

表 3 提案手法と標準 ADR のパフォーマンス比較

項目	標準 ADR (理論値)	提案手法 (実測)
検知トリガー	ACK ロス蓄積 (64 回)	SNR 低下 (1 回)
所要パケット数	64 パケット	<b>1 パケット</b>
所要時間	約 32 分	<b>約 30 秒</b>
通信断絶リスク	極めて高い	<b>最小限</b>

## 7. おわりに

提案した予防措置型の動的パラメータ制御機構は、既存の LoRaWAN の課題を克服し、災害時においても堅牢な通信手段を提供する手段として有効であることを示した。今後の課題として、山間部や実際の地下街など、より現実に即した多様な環境下での実証実験を行い、提案ロジックの汎用性とパラメータ (しきい値) の最適化を進める。さらに、多数のノードが同時に低 DR へ移行した際のネットワーク負荷についても評価し、輻輳回避メカニズムとの統

合についての検討も進めていく。

## 参考文献

- [1] GFDRR / World Bank, : The Great East Japan Earthquake: telecommunications impacts, <https://www.gfdr.org/sites/default/files/publication/knowledge-note-japan-earthquake-3-2.pdf>: 2025-09-12 参照.
- [2] 総務省:情報通信白書 令和 6 年度版, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r06/pdf/index.html>: 2025-09-12 参照.
- [3] Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A. and Zorzi, M.: Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios, IEEE Wireless Communications, 23(5), 60–67.
- [4] Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J. and Watteyne, T.: Understanding the Limits of LoRaWAN, IEEE Communications Magazine, 55(9), 34–40.