

# 異種無線による電力効率化のための ノードのグループ構成手法のシミュレーション

戸澤 涼<sup>1</sup> 稲村 浩<sup>2</sup> 中村 嘉隆<sup>2</sup>

概要: IoT センサデバイスは, バッテリー駆動が前提となるため省電力化が重要である. LoRaWAN は, 無線センサネットワーク (WSN: Wireless Sensor Network) において省電力で広域カバレッジを実現している. 本研究では, WSN 内で複数ノードのグループを自律的に構成し代表がデータを集約し代理送信する手法を基本に遠距離, 近距離において異種通信を使い分けることで, WSN の電力効率化を図る. 我々はこれまで, 異種無線を組み合わせた場合と既存の LoRa のみの WSN における消費電力の差異を実測にて検証し, 提案したプロトコルを用いた際のデータの集約による消費電力の効率化に関する消費電力のモデル式を実測データで評価により提案手法の有効性を提示した. 本稿では, 提案手法の有効性を評価するために応用として, 実環境においてゴミ収集の IoT 化を推進した場合, 提案手法を用いた場合の方が LoRaWAN のみの既存ソリューションと比較し, 消費電力の観点で有効であるかをネットワークシミュレーターの ns-3 を用いて評価する. 愛知県東浦町のゴミステーション配置の実データを用いて, BLE と LoRaWAN を備えたセンサノードをスマートゴミ箱に配置し, 収集に必要なゴミ箱の状態をセンシングする状況を模擬し, 提案手法の消費電力効果を調べる. さらに作業コスト削減を図るため, センサノードのバッテリー交換作業のタイミングの集約についても評価する.

## Simulation of Node Group Construction Method for Energy Efficiency

RYO TOZAWA<sup>1</sup> HIROSHI INAMURA<sup>2</sup> YOSHITAKA NAKAMURA<sup>2</sup>

### 1. はじめに

WSN (WSN: Wireless Sensor Network) は, IoT におけるセンサネットワーク技術である. IoT の利用用途は, 環境モニタリング, ビル管理, スマートホーム等が挙げられる. 現状の IoT では, バッテリー駆動の制約によるデバイスの省電力化及び遠隔におけるノード管理の必要性, 低伝送量, ノード数の増加によるネットワークの混雑等が課題となっている. これらの課題に対し, WSN において省電力で広域カバレッジを特徴とする省電力広域通信規格の一つである LoRaWAN が選択肢として注目されている. LoRaWAN とは, LoRa という長距離通信を特徴とした省電力広域ネットワークプロトコルである. スター型のトポロジや免許不要の周波帯を利用しているためネットワーク構築が低コストで可能である. しかし, LoRaWAN

の課題として, ネットワーク内のデバイス数が増加した際にパケット到達率が低下するという課題がある. 以上の背景から, LoRaWAN について, スケーラビリティを考慮した高集積なセンサネットワークの研究が行われている. 既存手法では, WSN 内で幾つかのセンサからなるグループを作成しグループの代表がセンサ情報を集約し代理送信することで, ネットワークの収容数向上と消費電力量削減の可能性を提示した. しかし, グループ構成手法を用いるには, センサ間の直接通信が必要になる. LoRaWAN のみでは仕様上実現が困難である上に, グループの生成や維持などにおける具体化が求められる. そこで我々は先行研究として, 消費電力の削減や平準化の観点で, 市販されている LoRaWAN と BLE が搭載されたモジュールに着目し, 遠距離通信は LoRaWAN, 近距離通信は BLE を用いることで異種通信の消費電力を考慮したグループ構成手法を提案し, 電力実測実験のもと有効性を提示した [1].

本稿では, 提案手法の有効性を評価するために応用とし

<sup>1</sup> 公立はこだて未来大学大学院 システム情報科学研究科

<sup>2</sup> 公立はこだて未来大学 システム情報科学部

て、実環境においてゴミ収集の IoT 化を推進した場合、提案手法を用いた場合の方が LoRaWAN のみの既存ソリューションと比較し、消費電力の観点で有効であるかをネットワークシミュレーターの ns-3[2] を用いて評価する。具体的には、愛知県東浦町のゴミステーション配置の実データを用いて、BLE と LoRaWAN を備えたセンサノードをスマートゴミ箱に配置し、収集に必要なゴミ箱の状態をセンシングする状況を模擬し、提案手法の消費電力効果を調べる。さらに作業コスト削減を図るため、センサノードのバッテリー交換作業のタイミングの集約についても評価する。

## 2. 関連研究

### 2.1 LoRaWAN におけるネットワーク効率化のためのノードのグループ化構成法と通信制御方式

LoRaWAN にはノード数のスケーラビリティ、及び拡散率による通信時間が大きく異なるという課題がある。手柴らが提案する手法 [5] は、消費電力量を抑制しセンサノードのバッテリー寿命を延伸するため、GW (GW: Gateway) とセンサノードの距離、ノード数、消費電力量をもとにノードのグループを作成し、GC (GC: Group Coordinator) と呼ぶセンサノードを経由して通信する。想定環境は、ノードが均一に分布されたネットワークであり、センサノードが持つ通信モジュールはスケジュールされた時刻に下り受信が可能な LoRaWAN のクラス B である。アプローチを下記に示す。センサノードはネットワークに参加後、指定されたグループ内の GC を経由しデータを送信する。通信時間による消費電力量効率化のため、拡散率とそれに伴う通信時間をもとに、同一周波数を異なる時間のスロットへ分割する。グループの構成により、センサノード全てが GW と接続する既存モデルと比較し合計送信時間が削減される可能性がある。拡散率を考慮した時間スロットの割当により、同一周波数を一定時間で分割する時分割多元接続 (TDMA: Time Division Multiple Access) により時間スロットの効率的な割当が可能となると述べている。

課題として、グループ化にはセンサノード間での通信が必要となるが、LoRaWAN の仕様上、実現が困難である点、グループ編成時にネットワークサーバにセンサノードの物理的位置を手動で登録しなければならない点つまり動的なノードの変化への対応が困難であることや GC に LoRaWAN の利用が集中することによる消費電力増加が考慮されていない点等があげられる。そこで提案手法では、グループ化手法を活かし異種無線を用いた消費電力効率化、及びノードの情報を用いて自律的にグルーピングする。

### 2.2 LPWA 通信を利用する IoT プラットフォーム向けの電力効率を考慮したゲートウェイ配置手法の検討

辻丸らが提案する手法 [4] は、センサノードの消費電力

を平準化するため、LoRaWAN における GW の配置を最適化するものである。LoRaWAN のようなスター型トポロジーの無線ネットワーク構成であると、ノード間の通信距離と消費エネルギーの差異を考慮する必要がある。既存研究では、LoRaWAN における拡散係数を考慮することで通信距離と消費エネルギーのトレードオフを考慮し GW を複数配置し輻輳を減少させ消費電力を削減している。

課題として、拡散率をエネルギー消費のみでノードに割り当てているため、同様の拡散率が割り当てられたセンサノードが密集した場合の衝突可能性が考慮されていない点、GW の同時接続数の上限が考慮されていないため、通信の衝突可能性が考慮されていない点が挙げられる。本研究では既存の LoRaWAN が提供する機能を用いて解決する。

## 3. 提案方式

無線センサネットワークにおいて電力効率化のための異種無線を組み合わせたグループ化方式を実現する。ここで、電力効率化とはノードの消費電力削減及び各ノードの消費電力が均一となる平準化を指す。我々は異種無線として長距離伝送可能だが消費電力の大きな LoRaWAN に加えて、短距離伝送向けに BLE (BLE: BlueTooth Low Energy) を採用した。

### 3.1 グループ化

異種無線によるグループ化の具体的な手法とプロトコルを示す。

#### 3.1.1 センサノード間通信

LoRaWAN の長距離伝送の回数を減らし、センサネットワーク全体の消費電力削減するため、異種無線 (LoRaWAN, BLE) (図 1 参照) を適用する。集約ノード (GL: Group Leader) は、グループ内は BLE, GW とは LoRaWAN を用いてデータの送受信を行う。グループメンバ (GM: Group Member) ノードは、BLE にてデータを送受信する。

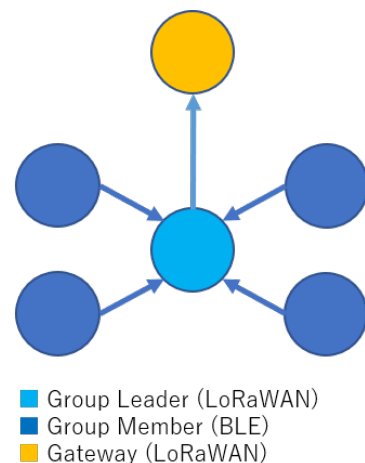


図 1 グループ化のトポロジー

### 3.1.2 単純グループ化手法におけるグループ構成

既存手法 [5] ではグループを作成する際に、全てのセンサノードの位置を事前に LoRaWAN の NS (NS: Network Server) が把握していることが前提条件となっている。ネットワーク運用者の管理コストを削減するため、我々は、センサ起動時に周囲のセンサノード情報を取得し NS に提供することで、センサノード増減に合わせ能動的にグループを構成する手法を提案し、これを単純グループ化手法と呼ぶ。

センサ起動からグループを作成するまでのプロトコルを説明する。センサは起動時に、データ収集時間 ( $T_{da}$ : Data Acquisition Time) の間、BLE を用いてノードの情報を発信し周囲のノード情報を受信する。起動から  $T_{da}$  経ったのち、NS へ送信する。NS は、収集したノード情報から重複を排除したのち、お互いに到達可能なノード同士でグループを作成し、各ノードからみた信号強度が最も高いノードを GL とする。

### 3.1.3 平準化つきグループ化手法におけるグループ再構成

既存手法 [5] では、GC がグループ内のセンサノードの通信を集約すると述べていた。これにより、GW に接続するセンサノードが減りスケラビリティを向上させる。しかし、GC での通信回数が増加するため、GC の消費電力量の増加が顕著になることが懸念される。我々は、消費電力平準化のため、バッテリー残量を推測しグループ内における GL の入れ替えをする手法を提案し、これを平準化つきグループ化手法と呼ぶ。

グループ再構成のプロトコルを説明する。各ノードは、異種無線の通信回数をローカルに保持する。GL ノードには交代周期が割り当てられ一定の送信回数に達した元、GL ノードが受信した通信回数を元に各センサのバッテリー残量を推測しバッテリー残量に余裕のあるノードを次の GL としグループに通知する。

### 3.1.4 センサノードの近接性を考慮した拡散率・通信タイミング割当の検討

既存研究 [4] では、LoRaWAN は長距離通信になるほど消費電力が増加するため、GW とセンサノードの距離をもとに適切な拡散率を割り当てていた。しかし、シミュレーションの環境が密集した住宅街であったため、隣接したノードが同様の拡散率のもと通信を開始した場合に、衝突が発生し、パケット到達率が大きく低下することが懸念される。グループ化にも同様のことが言え、隣接したグループにおいて、拡散率の割当や通信タイミングの制御を検討する必要がある。提案方式では、拡散率の割当は、GW との距離により適切な拡散率を割り当てる LoRaWAN の ADR (ADR: Adaptive Data Rate) 機能を用い、通信タイミングの割当は、ACK による再送制御をする LoRaWAN の Confirmed Data mode を用いる。

## 3.2 システム構成

システム構成図 (図 2 参照) を示す。システムが想定するセンサデバイスは、異種無線 (BLE, LoRaWAN) の通信機能を持つモジュールを搭載している。LoRaWAN ネットワークは、3つのコンポーネントからなり、センサノード・GW・ネットワーク制御を行うネットワークサーバ (NS: Network Server) から構成されたスター型トポロジである。NS で受信したセンサデータは、クラウド上のデータストアに保存される。提案方式は、前述した LoRaWAN ネットワークのアーキテクチャを拡張し、グループの作成・通知をするアプリケーションサーバ (AP: Application Server) を配置する。

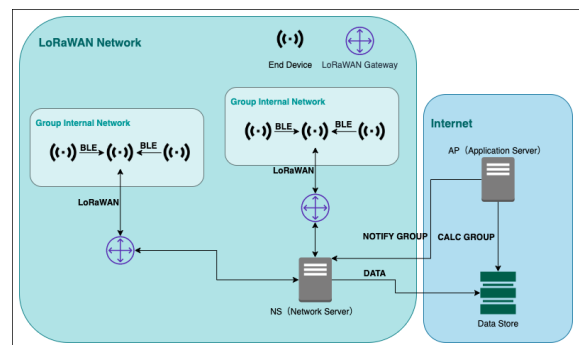


図 2 システム構成図

## 4. 評価実験

IoT とセンサネットワークの応用として都市における情報化の推進がスマートシティとして議論されており国内の取組みも含め報告がある [13]。さまざまな応用が検討されているが、都市におけるゴミ収集の効率化は社会実装が期待される応用のひとつである。例えばゴミの集積を検知するシステムの提案 [14] や、LoRaWAN を用いたセンサノードとバックエンドシステムの構築 [15] など、我々の異種無線の組み合わせによる電力効率化と補完的な研究も多いため、評価対象として都市におけるゴミ収集の効率化を取りあげる。

### 4.1 実環境に基づいたシミュレーション環境における検証

既存手法と比較し、提案手法はグループを収集したノードの情報から自動で作成するため、様々なシチュエーションにおいて展開可能である。ゴミ収集は IoT を導入したことにより、定期的な作業員の回収業務からセンサが検知した場合に回収する形態へ変化した。回収業務は効率化されるが、センサは電池給電であるためバッテリーの交換作業が追加で必要となる。国内のゴミ収集における IoT 利用例では、利用者の電源管理における負担を軽減するため、月に 1 度の充電で済むようシステムを提供している。電源管理のコストを削減するには、バッテリー交換時期は長く 1 度に



交換できる数も多い方が良い。提案手法が上記の観点で、既存の LPWA ソリューションと比較し有効であるか検証するため、シミュレーションを実行する。

以下の実験を実環境に基づいたシミュレーションを用いて行い、既存手法と提案手法の比較を議論する。

**実験 1** LoRaWAN 単独での従来手法に対して異種無線を用いた本提案の単純グループ化手法にて消費電力の違いを明らかにし提案手法の省電力効果を確認する。

**実験 2** バッテリ交換作業のタイミング集約を想定し本提案手法の単純グループ化手法と平準化つきグループ化での消費電力とノード毎の残量のばらつきを求めてバッテリー交換のタイミングが揃うことを確認する。

**実験 3** 単純グループ化手法との比較における平準化つきグループ化手法の消費電力の増大を抑えるため、GL ノード交代頻度を変化させ省電力効果を明らかにする。シミュレーションの前提となる事項を、ゴミステーションにおけるグループ化、GW およびセンサノードの配置で説明し、以降、3つの実験それぞれの結果を述べる。

#### 4.1.1 ゴミステーションにおけるグループ化

実環境として、愛知県東浦町が発行しているゴミステーションマップ (図 3 参照) から位置座標及びゴミ系統 (燃えるゴミ・燃えないゴミ・資源ごみ) を取得し、ゴミステーションの座標をセンサの位置情報とする。各ゴミ系統に対しセンサを取り付けると仮定し、ゴミステーション毎にグループを構築する。以降、各ごみ系統に対してセンサ取り付けたものをスマートゴミ箱と称する。文献 [10] を参考に、スマートゴミ箱の仕様を表 1 参照に示す。スマートゴミ箱の状態を超音波センサを用い 3 種類で把握する。



図 3 愛知県東浦町ゴミステーションマップ

表 1 スマートゴミ箱の仕様

項目	値
状態	Empty, Filled, Full
センサー	超音波センサー
無線	LoRaWAN, BLE

#### 4.1.2 GW およびセンサノードの配置

LoRaWAN の GW の通信可能距離は、都市部や郊外では 5km 程度と言われている。我々の実測では高低差のある環境で実際に 3.5km の伝送が可能であることを確認している [1]。図 3 をもとに、全てのスマートゴミ箱に対しカバーレッジを確保できるように GW を図 4 のように配置した。シミュレーションに用いた GW の配置座標を表 2 に示す。

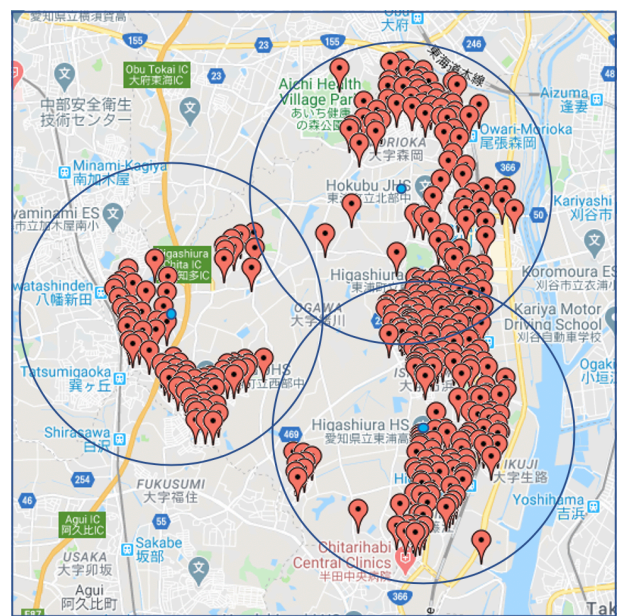


図 4 カバレッジを考慮した GW の配置

表 2 ゲートウェイの配置場所詳細

名前	座標
東浦町卯ノ里小	(34.969392, 136.924615)
愛知県立東浦高	(34.953981, 136.962864)
東浦町立北部中学校	(34.973183, 136.967018)

#### 4.1.3 シミュレーションシナリオ

実験の目的を達成するため以下のシミュレーションシナリオを用意した。シミュレーションにはネットワークシミュレータ ns-3 [2] を使用する。性能評価のため、従来方式 (LoRaWAN 単独) と単純グループ化、平準化つきグループ化と 3つのケースを試行した。ノードは、文献 [11] より抽出した表 3 に則り 10 分間に 1 度ゴミ箱の残容量をネットワークサーバへ送信する。表 4 にシミュレーションに用いたパラメータを示す。ネットワークサーバ側で、センサデバイスとセンサデータを紐づけるため、GL のパイロー

ドは、BLE のネットワークアドレスとセンサデータを、集約するノード分送信する。

表 3 LoRaWAN のユースケース

ケース	GW 接続デバイス (台)	ゲートウェイ (台)	通信頻度
電灯監視	200	1	1 分毎
ゴミ箱	2000	4	10 分毎
GPS トラック	3000	5	15 分毎
水道メーター	30000	10	30 分毎
パーキングメーター	60000	15	1 時間毎

表 4 グループ化におけるパラメータ

項目	値
GW 数	1
ノード数	32
通信間隔	10 分
BLE アドレス (short)	4byte
LoRaWAN ペイロード	11 ~ 242byte
GL ペイロード	8byte * number of nodes
GM ペイロード	4byte
LoRaWAN ADR	True
シミュレーション時間	1 時間

#### 4.1.4 消費エネルギーの計測

消費電力量に関して、正確なエネルギーを導出することは困難であるため、消費電流量の計測をもって評価する。LoRaWAN は、ns-3 モジュール (文献 [9] 参照) が提供する電力モデルを用いる。BLE は、文献 [12] を参考に Rx (0.003A), Tx (0.003A) とする。バッテリーの参考値として、屋外での LoRaWAN モジュール [16] に搭載されている充電式バッテリー (4100mAh) を用いる。シミュレーターでの実測値と実際の製品のスペックとの間に差があったため、前者に合わせ BLE の負荷電流を調整しシミュレーションを行った。計測した各通信方式の 1 送信あたりの消費電流量を表 5 に示す。シミュレーターの都合上、地域を限定し行った。対象地域では、全てのグループが 3 ノードで構成されている。

表 5 1 送信あたりの消費電流量 (グループは 3 ノードの場合)

Parameter	Value
LoRaWAN	8mA
GL (単純グループ化)	13.4mA
GM (単純グループ化)	0.6mA
GL (平準化つきグループ化)	14.4mA
GM (平準化つきグループ化)	1.2mA

#### 4.2 実験 1: 単純グループ化手法による消費電力

LoRaWAN 単独での従来手法に対して異種無線を用いた本研究の単純グループ化手法にて消費電力の違いを明らかにし提案手法の省電力効果を確認する。ノード毎の消費電力について、従来方式 (LoRaWAN 単独) は図 5 に、単純グループ化は図 6 に示す。また、ネットワーク全体での消費電力について、表 6 に示す。従来手法のネットワーク全体の消費電力は 1 時間あたり 5.369W であった。本研究の単純グループ化手法ではネットワーク全体の消費電力は 1 時間あたり 2.54W であった。このことからネットワーク全体で 47% の電力削減が可能であると言える。従来手法では全ノードが 21 日間の稼動が可能である。本提案の単純グループ化手法では GL ノードが 13 日、GM ノードが 285 日稼動可能である。

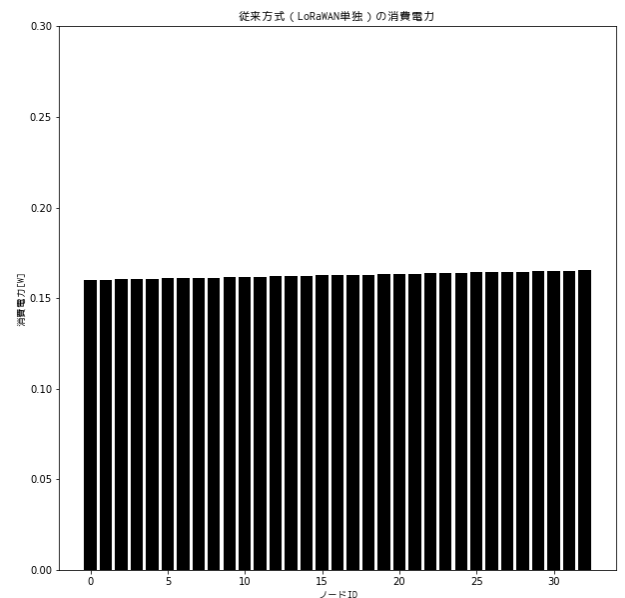


図 5 従来方式 (LoRaWAN 単独) の消費電力

表 6 従来方式 (LoRaWAN 単独) と単純グループ化の比較

方式	ネットワーク全体の消費電流量
従来方式 (LoRaWAN 単独)	5.369W
単純グループ化	2.54W

#### 4.3 実験 2: 平準化つきグループ化によるバッテリー交換の集約

バッテリー交換作業のタイミング集約を想定し本提案手法の単純グループ化手法と平準化つきグループ化での消費電力とノード毎の残量のばらつきを求めてバッテリー交換のタ

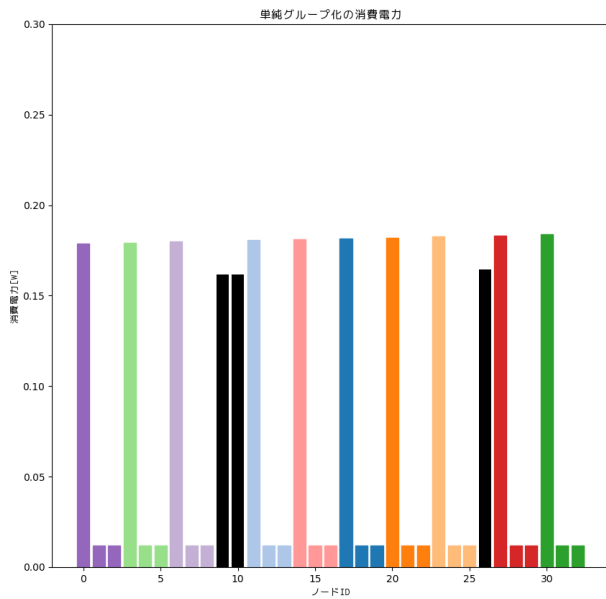


図 6 単純グループ化の消費電力 (LoRaWAN 単独比較用)

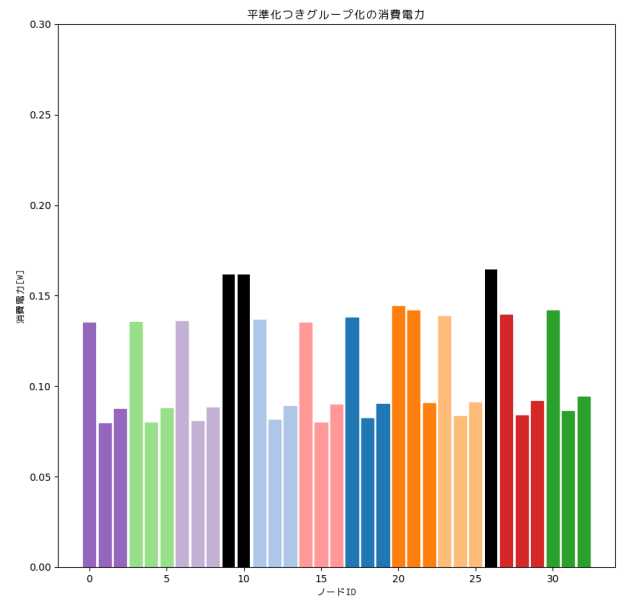


図 7 平準化つきグループ化の消費電力 (単純グループ化比較用)

イミングが揃うことを確認する。平準化つきグループ化のノード毎の消費電力を図 7 に示す。また、ネットワーク全体での消費電力とノード間の消費電力のばらつきについて、表 6 に示す。ネットワーク全体の消費電力は 1 時間あたり本提案手法の単純グループ化手法と平準化つきグループ化でそれぞれ 2.54W, 3.657W となり平準化動作のために 44% の増加であるものの、提案手法では全ノードが 43 日間の稼動が可能である。均一にバッテリーが消費されるため、従来手法の 21 日間に対し 2 倍の交換周期で済むことがわかった。

表 7 単純グループ化と平準化つきグループ化の比較

方式	ネットワーク全体の消費電流量	標準偏差 ( $\sigma$ )
単純グループ化	2.54W	248817e-07
平準化つきグループ化	3.657W	90340e-07

#### 4.4 実験 3: 平準化におけるノード交代頻度と省電力効果

単純グループ化手法との比較における平準化つきグループ化手法の消費電力の増大を抑えるため、GL ノード交代頻度を変化させ省電力効果を明らかにする。平準化つきグループ化のノード毎の消費電力の時間推移を交換頻度毎にまとめたものを図 8, 図 9, 図 10 に示す。交換頻度を調整した平準化グループ化の消費電力では、時間が経過するほど効果が見られるので 4 時間時点でのまとめを表 8 に示す。消費電力はそれぞれ、30W, 27W, 20W と交換頻度を緩くする方が電力効率を挙げられることが判った。単純グルー

プ化と平準化つきグループ化でのパケット到達率を表 9 に示す。平準化つきグループ化では BLE でのパケット到達率がそれぞれ、73%, 75%, 71% と減少する傾向にある。原因として、単純グループ化での BLE のパケット到達率が 100% であることから、GL ノードのダウンリンク部分で衝突が発生し BLE でのパケット到達率が低下していると考えられる。また、GL ノードの交換頻度の間隔が長くなるほど、LoRaWAN, BLE においてのパケット到達率が減少する傾向が見られたが、シミュレーションに一部不具合があり、結果の読み取り値が正確でない可能性がある。

## 5. おわりに

WSN では、電池駆動型の IoT センサでは省電力化が議論されている。WSN の中でも、LoRaWAN という長距離通信、低消費電力を特徴とする通信規格では都市部や市街地のような密集地において、ノードの台数が増加した際に、通信の衝突から再送が発生し結果としてバッテリー寿命が短命化するという課題がある。そこで我々は、WSN の消費電力効率化 (消費電力削減・消費電力平準化) のための BLE, LoRa を組み合わせた異種無線によるノードのグループ化の実現を本研究の目的においた。目的の実現のために、既存の通信規格のプロトコルを変更せず異種無線の消費電力効率化が実現可能なシステムを設計した。提案したシステムは、ノードが収集可能な情報からのグループ構築機能、各ノードの通信における、Rx, Tx の理論値及び通信利用回数等からバッテリー残量を算出し、GL の切り替えをする電力平準化機能を実装することで、WSN の

表 8 消費電力比較

方式	ネットワーク全体の消費電力	平均消費電力	標準偏差 (σ)
平準化つきグループ化 (交替頻度:毎回)	30W	0.9W	468866e-07
平準化つきグループ化 (交替頻度:送信 2 回に 1 回)	27W	0.82W	190241e-07
平準化つきグループ化 (交替頻度:送信 3 回に 1 回)	20W	0.61W	216180e-07

表 9 パケット到達率比較

方式	LoRaWAN	BLE
単純グループ化	100 %	100 %
平準化つきグループ化 (交替頻度:毎回)	96 %	73 %
平準化つきグループ化 (交替頻度:送信 2 回に 1 回)	92 %	75 %
平準化つきグループ化 (交替頻度:送信 3 回に 1 回)	93 %	71 %

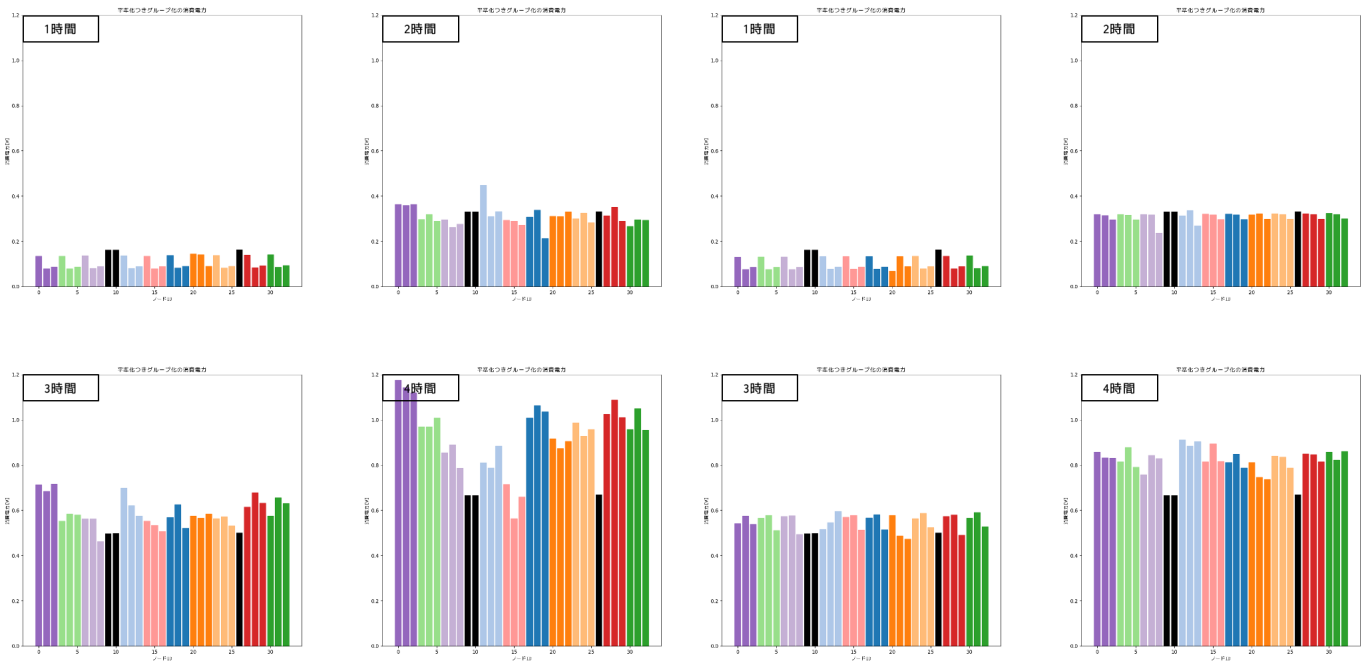


図 8 平準化つきグループ化の消費電流量 (交替頻度:毎回)

図 9 平準化つきグループ化の消費電流量 (交替頻度:送信 2 回に 1 回)

オペレーターは、既存の通信方式と同様の利用で、バッテリー寿命を延伸することが実現可能となる。

その有効性を確認するため、提案システムをごみ収集のスマート IoT 化を話題とし、実世界を再現しシミュレーションした。スマート IoT 化されたごみ収集のためのセンシングシステムに適用したシミュレーションを実施した。愛知県東浦町のゴミステーション配置の実データを用いて、BLE と LoRaWAN を備えたセンサノードをスマートゴミ箱に配置し、収集に必要なゴミ箱の状態をセンシングする状況を模擬し、本 GC 手法の消費電力効果を求めたところ、LoRaWAN 単独での従来手法に対して異種無線を用いた提案手法の単純グループ化ではネットワーク全体の消費電流量は、それぞれ 5.369W, 2.54W となり、本提案手法により 47% の削減が可能であることを示した。さらに、センサノードのバッテリー交換作業のタイミングを集約して

作業コスト削減を図るため、提案手法の平準化つきグループ化と単純グループ化を比較すると、平均消費電力はそれぞれ 2.54W, 3.657W となり 44% の増加であるものの、平均消費電力のばらつきは抑制され、均一にバッテリーが消費されるため、従来手法の 21 日間に対し 2 倍の 43 日間の稼動が可能であり交換周期を長くとることが可能になった。

参考文献

- [1] 戸澤涼, 稲村浩, 中村嘉隆: 高集積センサネットワークにおける異種無線を用いた電力効率化の検討, 情報処理学会第 82 回全国大会講演論文集, Vol.2020, 2020.
- [2] ns3 (最終閲覧日: 2020 年 5 月 7 日), <https://www.nsnam.org/>
- [3] オープンデータ ごみステーション—東浦町 (最終閲覧日: 2020 年 3 月 10 日), <https://www.town.aichi-higashiura.lg.jp/soshiki/kohojoho/kohotokei/>



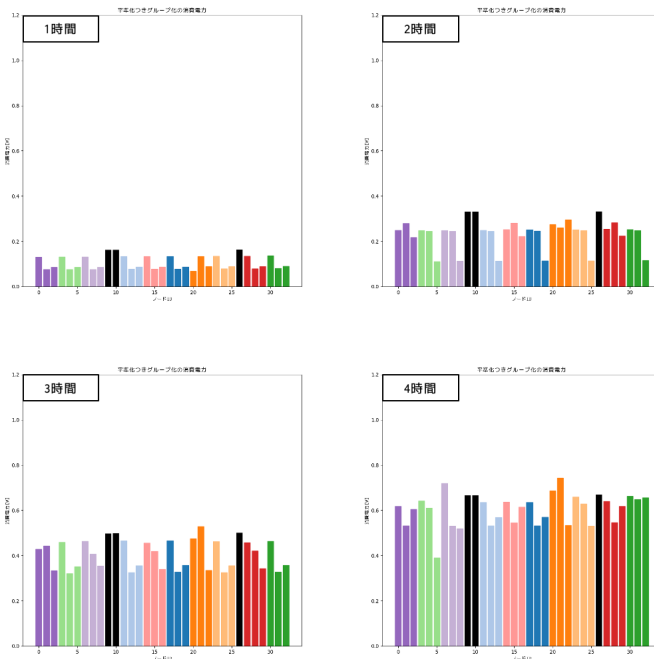


図 10 平準化つきグループ化の消費電流量 (交替頻度:送信 3 回に 1 回)

[12] Power consumption analysis of bluetooth low energy commercial products and their implications for IoT applications. *Electronics (Switzerland)*, 7(12), 2018

[13] Khatoun, Rida and Zeadally, Sherali: Smart cities: concepts, architectures, research opportunities, *Communications of the ACM*, Vol.59, No.8, 2016

[14] Kristanto, Slamet and Yashiro, Takeshi and Koshizuka, Noboru and Sakamura, Ken: Dynamic Polling Algorithm for Low Energy Garbage Level Measurement in Smart Trash Bin, *Proceedings of the Second International Conference on IoT in Urban Space*, No.92-94, 2016

[15] Fedchenkov, Petr and Zaslavsky, Arkady and Sosunova, Inna: Enabling Smart Waste Management with Sensorized Garbage Bins and Low Power Data Communications Network, *Proceedings of the Seventh International Conference on the Internet of Things*, No.28, 2017

[16] Outdoor LoRa/LoRaWAN Wireless I/O Module (最終閲覧日: 2020 年 5 月 7 日), [https://www.advantech.com/products/23ed4776-1633-4901-a776-8532a23ea8b4/wise-4610/mod\\_b9c0a2e0-c841-4826-8008-36a91d837e1e](https://www.advantech.com/products/23ed4776-1633-4901-a776-8532a23ea8b4/wise-4610/mod_b9c0a2e0-c841-4826-8008-36a91d837e1e)

[gyomu/opendata/1514185444468.html](http://gyomu/opendata/1514185444468.html)

[4] 辻丸勇樹, 坂本龍一, 近藤正章, 中村宏: LPWA 通信を利用する IoT プラットフォーム向けの電力効率を考慮したゲートウェイ配置手法の検討, *情報処理学会研究報告会*, Vol.32, No.1, pp.46-53, 2017.

[5] 手柴瑞基, 湯素華, 小花貞夫: LoRaWAN におけるネットワーク効率化のためのノードのグループ構成法と通信制御方式, *情報処理学会研究報告会*, Vol.89, No.13, pp.1-8, 2018.

[6] Dambal, Vageesh and Mohadikar, Sameer and Kumbhar, Abhaykumar and Guvenc, Ismail: Improving LoRa Signal Coverage in Urban and Sub-Urban Environments with UAVs, *arXiv*, 1902.11243, 2019.

[7] Wu, He and Nabar, Sidharth and Poovendran, Radha: An Energy Framework for the Network Simulator 3 (ns-3), *SIMUTools 2011 - 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*

[8] LoRaWAN Range Part 2: Range and Coverage of LoRaWAN in Practice (Updated) (最終閲覧日: 2020 年 4 月 6 日), <https://smartmakers.io/en/lorawan-range-part-2-range-and-coverage-of-lorawan-in-practice>

[9] signetlabdei/lorawan: <https://github.com/signetlabdei/lorawan>

[10] Joni, Koko and Haryanto, Haryanto and Rohim, D: Smart Garbage Based on Internet of Things (IoT), *Journal of Physics: Conference Series*, Vol.953, pp.012189

[11] 1 台の LoRa ゲートウェイでどれだけのデバイスに対応できますか? (最終閲覧日: 2020 年 4 月 30 日), <https://soracom.zendesk.com/hc/ja/articles/115001237211-%EF%BC%91%E5%8F%B0%E3%81%AELoRa%E3%82%B2%E3%83%BC%E3%83%88%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%82%A4%E3%81%A7%E3%81%A9%E3%82%8C%E3%81%8F%E3%82%89%E3%81%84%E3%81%AE%E3%83%87%E3%83%90%E3%82%A4%E3%82%B9%E3%81%AB%E5%AF%BE%E5%BF%9C%E3%81%A7%E3%81%8D%E3%81%BE%E3%81%99%E3%81%8B->