

# マルチホップネットワークでの動的センシングレートと省エネルギー経路選択を統合したデータ収集の可能時間の延長

大沢 恭平<sup>1</sup> 串田 高幸<sup>1</sup>

**概要:** マルチホップセンサーネットワークにおいて、バッテリー駆動ノードによる継続的なデータ収集では、一定のセンシングレートによるバッテリー消費の増加とデータ収集可能時間の短縮が課題となっている。特に農業分野の環境モニタリングでは、環境変化に応じた適応的なセンシング制御が求められる。本稿では、この課題を解決するため、動的センシングレート変更と省エネルギー経路選択を統合したデータ収集手法を提案する。提案手法は、天気予報と実測値に基づく5段階の動的センシングレート制御、ホップ数を重視した省エネルギー経路選択、およびESP32のDeepSleepモードを活用した省電力制御の3つの要素技術から構成される。農業環境モニタリングを想定した評価実験において、従来の15[min]に1回の固定間隔手法と比較してセンシング回数を24時間で96回から54回まで削減できることを示した。また、DeepSleepからの復帰オーバーヘッドは、1回の通信の1/150程度であり、総エネルギー消費量への影響は十分に小さいことを示した。

## 1. はじめに

### 背景

マルチホップネットワークは、複数のノードが中継点となり、データを転送することで、直接通信できないノード間の通信を可能にするネットワークアーキテクチャである [1]。このネットワーク形態は、センサーネットワーク、モバイルアドホックネットワーク (MANET)、メッシュネットワークの分野で活用されている。マルチホップネットワークの特徴として、ネットワークの拡張性、障害耐性、カバレッジ範囲の拡大が挙げられる。一方で、複数のノードを経由することによる遅延の増加、経路制御の複雑さ、電力消費の増加の課題も存在する [2]。マルチホップネットワークはヘルスケア、軍事、農業の分野で活用されている [3]。農地の環境モニタリングでは、センサーノードは気温、湿度、土壌湿度、監視画像データを収集する。これらのデータは環境整備、作物の成長監視、病害虫の予測に使用される [4]。

センサーネットワークは複数の小型IoTデバイスのノードで構成され、それぞれのノードはバッテリーで動作する。ノードの小型化に伴い、バッテリーサイズも制限されるため、バッテリー消費量の削減と効率化は重要な課題で

ある。マルチホップネットワークはシングルホップ通信と比較して広範囲のセンシングに適している。遠隔地にあるサーバーにセンシングデータを保存するために、各センシングノードはサーバーまで他のノードを中継してセンシングデータを送る必要がある。短距離のマルチホップを行うことで、ノード間の通信距離の短縮と消費電力量の削減ができる。したがって、マルチホップネットワークはノードの消費電力量削減に効果的な手法である [5]。クラスター化されたネットワークは、センサーノードを地理的に近いグループに分割し、各クラスター内でクラスターヘッドを選出することで、ネットワークの効率的な管理と通信を実現する手法である。クラスターヘッドはクラスター内のノードからデータを収集し、他のクラスターヘッドやサーバーと通信を行う。この構造により、ネットワーク全体の通信オーバーヘッドを削減し、ノードの消費電力量を効率化できる。また、クラスター化により、ネットワークのスケラビリティが向上し、大規模なセンサーネットワークの管理が容易になる。さらに、クラスターヘッドのローテーション機能を実装することで、ネットワーク全体の負荷分散と寿命の延長が期待できる [6]。

### 課題

課題は、一定のセンシングレートでデータを収集し続けることによるバッテリー消費の増加と、データ収集の可能時間の減少である。また、一定間隔でデータを取得しても、

<sup>1</sup> 東京工科大学大学院バイオ・情報メディア研究科  
コンピュータサイエンス専攻  
クラウド・分散システム研究室  
〒192-0982 東京都八王子市片倉町1404-1

短い間隔ではデータの変化量が乏しいことがある。例えば気温は、短期的には微小な変動に留まり、急激な変化は稀である。従来型の多くのセンサーネットワークはイベントの有無に関わらず一定のセンシングレートでデータを収集するため、データの整合性は確保できても、バッテリーやストレージの圧迫が生じる [7]。また、データの中継を行うクラスターヘッドノードはデータの中継によってクラスターメンバーよりも多くのバッテリーを消費する。マルチホップネットワークでは、トポロジーの上位ノードが停止すると、下位ノードはデータをサーバーに送信できなくなる。このような下位ノード(クラスターメンバー)は孤立ノードと呼ばれる。図 1 は孤立ノード発生 の例である。CM1-1, CM1-2, CM2-1, CM2-2 はそれぞれ CH1 と CH2 を介してサーバーまでデータを送信する。しかし、バッテリー枯渇により CH2 が動作を停止すると、CM2-1, CM2-2 はバッテリーが残っていてもサーバーにデータを送信できない。この時、CM2-1, CM2-2 は孤立ノードとなる。孤立ノードになったノードのバッテリーを有効活用できていない。

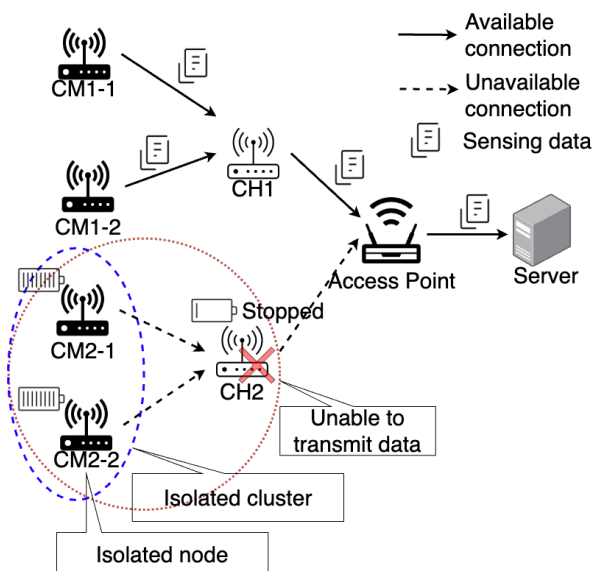


図 1 孤立ノード

## 各章の概要

第 2 章では本稿の関連研究を記述する。第 3 章では本稿の提案手法を記述する。第 4 章では提案手法の実装を記述する。第 5 章では提案手法の評価実験を記述する。第 6 章では提案手法の議論を記述する。第 7 章では本稿のまとめを記述する。

## 2. 関連研究

LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy protocol) はクラスターヘッドの選択に確率的なアプローチを採用し、各ラウンドごとにクラスターヘッドが変更さ

れる [8]。ノードが交代でクラスターヘッドになることで消費電力量をノード間で均一にしている。クラスターヘッドは TDMA(Time Division Multiple Access) を使用してクラスターメンバーにセンシングデータの送信権限を与える。ノードは指定されたタイミングでセンシングデータを送信するため、他のノードとの電波干渉や競合が抑えられるというメリットがある。ただし、ノード間で同期をとる必要がある。LEACH は全てのノードがサーバーと通信できることを前提としている。実際にはノードの通信範囲は限られているため、マルチホップ通信を必要とする広域での通信には適していない。また、LEACH はセンシングエリア内に多数のノードが配置されている場合に最も有効な手段である。それゆえ、ノード数が少数である場合には効果を発揮しない [9,10]。

ICIC アルゴリズムでは、マルチホップネットワークにおいて最も伝送距離の短い経路を選択してデータを転送することで消費電力の削減を行う。この手法では、データ転送レートはが考慮されていない [11]。

HEED はエネルギー効率の高いクラスターヘッドを選出するアルゴリズムである。各ノードは自身の残存エネルギー量と隣接ノードとの通信距離からクラスターヘッドとしての適正を計算する。各ノードは計算によって求めた値が閾値よりも高い場合、クラスターヘッドを担う。この手法ではクラスターヘッド選出のための隣接ノードとの通信がオーバーヘッドとなるため、ノード数の多い環境では大きな通信コストがかかる。また、センシングエリア内でクラスターサイズを均等に分割できるという条件がある [12-14]。

## 3. 提案

### 提案方式

本稿では動的なセンシングレートの変更と、省エネルギー経路選択によってバッテリー消費の削減とデータ収集の可能時間を延長することを目的とする。

なお、本提案方式では以下の項目を前提条件として設定する。

- リンクは固定とし、変更されることはない。
- 各ノードは接続可能なノードのリストをあらかじめ保持している。
- センシングレートは全ノードで共通である。
- サーバーは 1 台である。
- ノードの親子関係が逆転することはない。

本稿の提案方式を 3 つのセクションに分けて説明する。

### 3.0.1 センシングレート変更

本セクションではセンシングレート変更手法について述べる。本提案手法では、天気予報と実測値に基づいてセンシングレートを決定・変更する、イベント駆動センシング手法を用いる。

本提案手法では、農業分野における作物の監視目的に応じて、センシングレートを動的に変更する手法を採用する。表1に示すように、監視目的を霜害防止、病害管理、品質管理、熱害防止に分類し、それぞれの目的に応じた温度変化量、変化時間、温度絶対値の閾値を設定している。

表 1 監視目的別センシング条件と推奨レート

監視目的	温度変化量	温度絶対値	推奨レート
霜害防止	-3 °C以上	0 °C付近	High, Ultra High
病害管理 (結露)	-5 °C前後/ 湿度 90%	(夜間)25 °C以上	Medium
成熟・糖度 (品質管理)	+5 °C以上	-	Low
日焼け防止 (熱害)	+3~5 °C	35 °C	Ultra High
通常時	-	-	Ultra Low

センシングレートは以下の5段階に分類される：

- Ultra High(1分間隔): 実測値が1°Cを下回った場合、または実測値が35°Cを上回った場合
- High(5分間隔): 1時間後の予報温度が1°Cを下回る場合、または予報温度が35°Cを上回る場合
- Medium(15分間隔): 現在の実測値から3時間後までの予報温度の変化量が3°C以上の場合
- Low(30分間隔): 実測値が25°Cを上回った場合
- Ultra Low(60分間隔): 通常時

この動的センシングレート変更により、農作物に重大な影響を与える可能性がある環境変化を検出した際には高頻度でデータを収集し、通常時には低頻度でデータ収集を行うことで、バッテリー消費を抑制しながら必要な監視精度を維持する。天気予報データを活用することで、将来の環境変化を予測し、事前にセンシングレートを調整することが可能である。

### 3.0.2 省エネルギー経路選択

本セクションでは、省エネルギー経路選択手法について述べる。本提案手法では、各ノード間での1回の通信にかかる消費エネルギー量の総和を通信コストとして、各ノードが負担する通信コストが全ノードで平滑化されるように経路選択を行う。

図2は、マルチホップネットワークのトポロジー例を示している。目標ノードをNode4とした場合、距離の近いNode2, Node3の2つのノードを介してNode4へデータを送信する経路(Route1)と、距離が離れているが直接Node4へデータを送信する経路(Route2)が存在する。この時、Route1の通信コストは $C_1 + C_2 + C_3$ 、Route2の通信コストは $C_4$ である。

第5章の実験結果から、通信コストはノード間の距離によってはほとんど変化しないことがわかっている。した

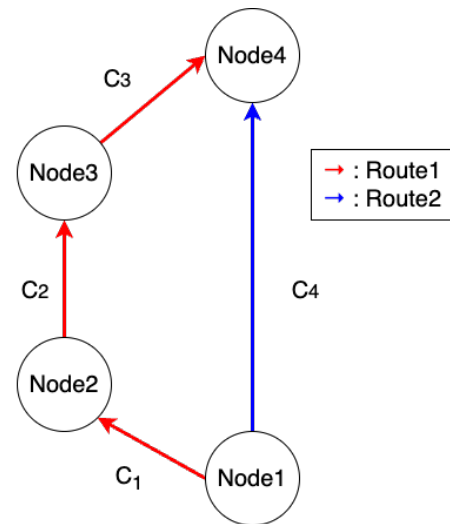


図 2 トポロジー例

がって、通信コストの総和はホップ数と通信回数の積で表される。そこで、決定されたセンシングレートが高い場合には多くのノードのエネルギーを消費するRoute1を避け、Route2を選択する。逆に、センシングレートが低い場合には、Route1を選択する。

### 3.0.3 DeepSleep

DeepSleepは、ESP32の省エネルギーモードである。DeepSleepは、CPUを停止させることで消費電力を抑える。DeepSleepは、LightSleepと比較して消費電力が低いですが、復帰には約2[sec]のオーバーヘッドが発生する。ただし、第5章の実験結果から、DeepSleepを使用することで、LightSleepの場合よりも約95%の省エネルギー効果を得られることがわかっている。したがって、本提案手法では毎回のセンシング間隔でDeepSleepを使用することでデータの収集時間の延長を実現する。

## 理論的解析

### 3.0.4 エネルギー消費モデル

ノード*i*の総エネルギー消費量 $E_i$ は以下の式で表される：

$$E_i = E_{sense} \cdot N_{sense} + E_{tx} \cdot N_{tx} + E_{rx} \cdot N_{rx} + E_{sleep} \cdot T_{sleep} \quad (1)$$

ここで、 $E_{sense}$ はセンシング1回あたりのエネルギー消費量、 $N_{sense}$ はセンシング回数、 $E_{tx}$ と $E_{rx}$ はそれぞれ送信・受信1回あたりのエネルギー消費量、 $N_{tx}$ と $N_{rx}$ は送信・受信回数、 $E_{sleep}$ はスリープ時の単位時間あたりのエネルギー消費量、 $T_{sleep}$ は総スリープ時間である。

動的センシングレート $R(t)$ を導入することで、センシング回数は：

$$N_{sense} = \int_0^T R(t) dt \quad (2)$$

となり、固定レート  $R_{fixed}$  と比較して、以下の条件を満たすとき動的センシングレートの方が省エネルギー効果が得られる：

$$\int_0^T R(t)dt < R_{fixed} \cdot T \quad (3)$$

### 3.0.5 最適経路選択の定式化

ノード  $i$  からサーバーまでの経路  $P_i$  におけるエネルギーコスト  $C(P_i)$  は：

$$C(P_i) = \sum_{j \in P_i} (E_{tx,j} + E_{rx,j}) \cdot R(t) \cdot T \quad (4)$$

全ノードのエネルギー消費を平準化する目的関数は：

$$\min_{i \in N} \max C(P_i) \quad (5)$$

### ユースケース・シナリオ

本稿の提案方式は農地での環境モニタリングに適用することを想定している。農地では、作物の成長監視、病害虫の発生監視、品質管理、熱害防止、霜害防止を目的とし、気温、湿度、土壌湿度、監視画像データを収集する。

実際の IoT デバイスのデータ収集の例を以下に示す。ブドウ農園では短期間の気候変化に対応し、適切な防除を行う必要がある。図3は本稿でのユースケースを示している。

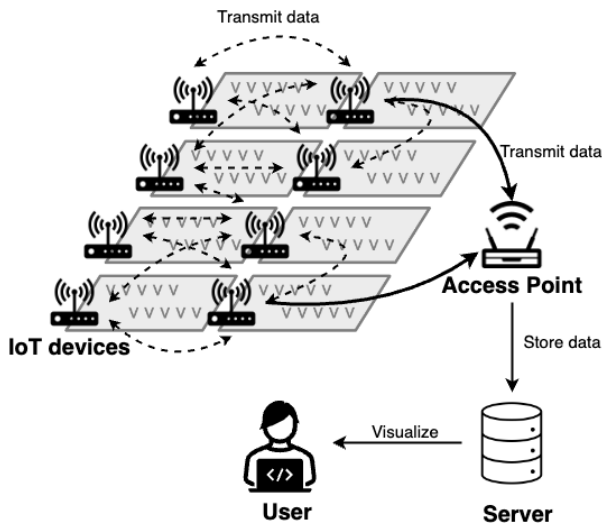


図3 ユースケース

図3のように、本システムは農地に配置された IoT デバイスが環境データを収集し、マルチホップネットワークを利用して複数のノードを介しながらサーバーへデータを送信する。その後、サーバーに蓄積されたデータはユーザーによって可視化され、農業生産の管理や農作物の品質管理に活用される。

具体的な IoT デバイスを用いたセンシングソリューションの例として、ワイン用ブドウの品種であるカベルネ・ソー

ヴィニョンの栽培農地が挙げられる。ブドウ農園では、短時間での天気の変化に迅速に対応し、防除対策を適切に行うことが求められる。特に、2~3時間での気温変化はブドウの成長に大きな影響を及ぼす病原菌の発生を招く可能性があるため、リアルタイムでの環境監視とデータ解析が重要である。

## 4. 実装

以下に提案手法で実装が必要な主要コンポーネントと機能を示す。

### Server

- OpenWeatherMAP からの天気予報取得
- センシングレート決定
- ノードのリンク情報管理

### Gateway Node

- Wi-Fi 接続管理
- ESP-NOW 通信設定
- サーバー通信とデータ送信
- レート更新指示の配信

### Sensor Node

- センサーデータ取得
- 動的レート調整
- バッテリー監視
- 通信制御

### ESP-NOW 通信管理

- ACK 管理と再送制御
- ピア管理
- 通信統計情報

### マルチホップルーティング

- 動的ルート探索
- ルーティングテーブル管理
- 障害時の自動経路切り替え

## 5. 評価実験

### 実験環境

#### 5.0.1 センシングレート変更

センシングレート変更の実験では、OpenWeatherMAP の Weather API から 1 時間毎に取得した東京都八王子市の気温変化、天気予報を用いて、センシングレートを変更した。

#### 5.0.2 省エネルギー経路選択

使用機器、環境は以下の通りである。

- ESP32-WROOM-32 2 台
- INA219 2 台
- ESP-NOW
- 機器間距離: 15[cm], 1[m]
- 送信データサイズ: 100[byte]
- 送信間隔: 5[sec]

### 5.0.3 DeepSleep

使用機器、環境は以下の通りである。

- ESP32-WROOM-32 1台
- INA219 1台
- DeepSleep, LightSleep 変更サイクル: 5[sec]

### 実験結果と分析

#### 5.0.4 センシングレート変更

図4はOpenWeatherMAPのWeather APIから取得した2025/7/4の東京都八王子市の気温変化を示している。

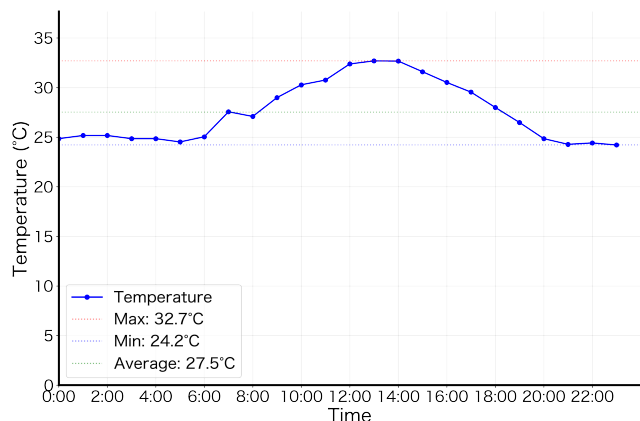


図4 2025/7/4の気温変化

図5は2025/7/4のESP32の状態遷移を示している。

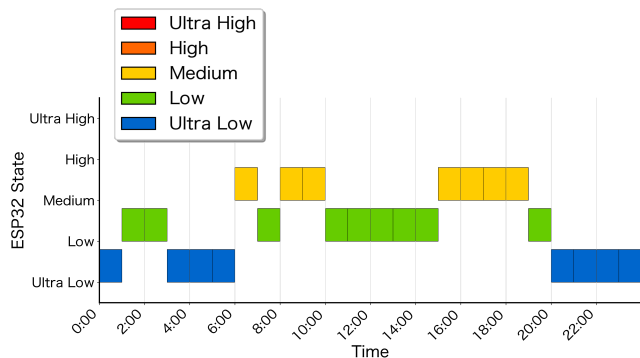


図5 2025/7/4のESP32の状態遷移

図4の気温変化に対応して、センシングレートが変更されている。2025/7/4の気温変化ではUltra Low, Low, Mediumのセンシングレートが使用された。

2025/7/4のセンシングでは、総センシング回数は54回であった。内訳は表2の通りである。

表2 センシング種別 内訳

Medium	28回
Low	18回
Ultra Low	8回

例えば、センシング間隔を15分固定で24時間のセンシングを実施した場合、総センシング回数は96回となる。本提案手法を適用することで総センシング回数は54回となり、42回のセンシングを削減できた。これは、環境変化に応じてセンシングレートを変更することで不要なセンシングを抑制し、省エネルギー化に貢献することを示している。

#### 5.0.5 省エネルギー経路選択

このセクションでは、ESP32の通信による送受信の消費エネルギーを計測した結果を述べる。実験は、15[cm], 1[m]の2つの距離で行った。図6, 7は、15[cm]の距離での実験結果を示している。

図6は、受信ノードの消費エネルギー量を示している。

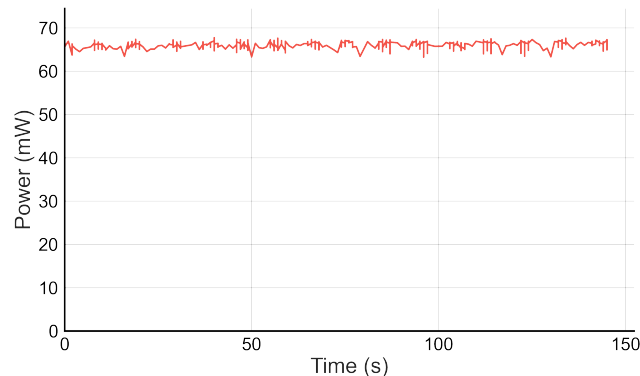


図6 receiver power timeline(15[cm])

図7は、送信ノードの消費エネルギー量を示している。

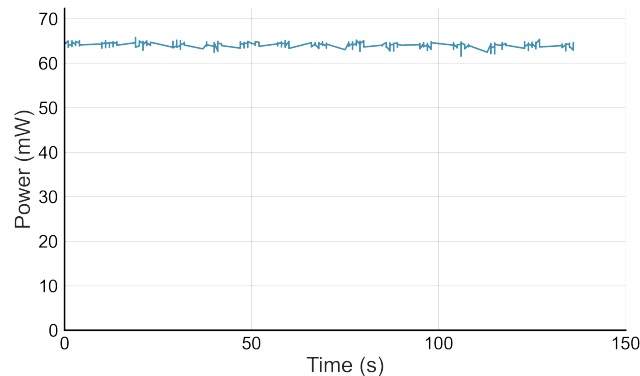


図7 sender power timeline(15[cm])

15[cm]の距離での受信ノードの平均消費エネルギー量は約66.3[W], 送信ノードの平均消費エネルギー量は約62.4[W]であった。

図8, 9は、1[m]の距離での実験結果を示している。図8は、送信ノードの消費エネルギー量を示している。

図9は、送信ノードの消費エネルギー量を示している。

1[m]の距離での受信ノードの平均消費エネルギー量は約65.7[W], 送信ノードの平均消費エネルギー量は約67.5[W]であった。

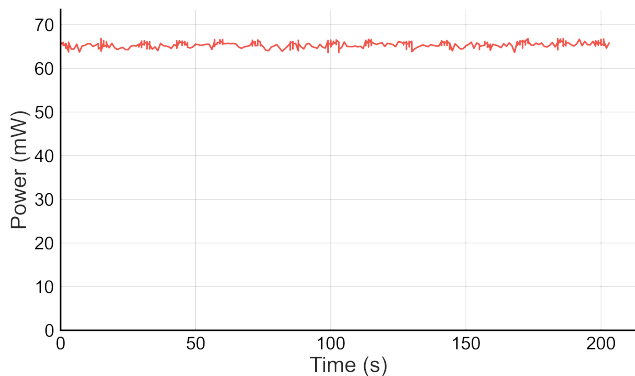


図 8 receiver power timeline(1[m])

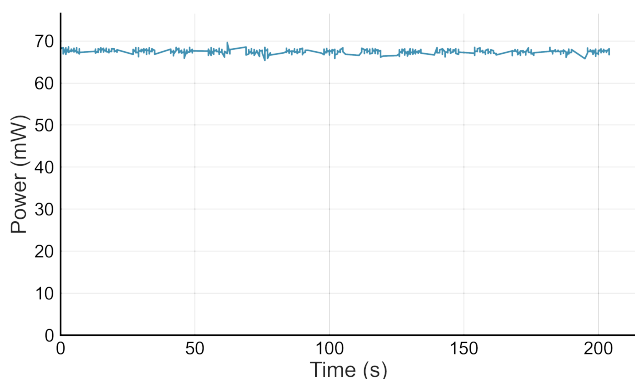


図 9 sender power timeline(1[m])

以上の結果から、距離による消費エネルギーの増加は見られず、また、送信と受信の役割の違いによる消費エネルギー量の違いも見られなかった。経路選択では、ノード間の距離ではなく、サーバーまでのホップ数を重視することでエネルギー効率の良い経路を選択できると考えられる。

### 5.0.6 DeepSleep

このセクションでは、ESP32 の DeepSleep と LightSleep の消費エネルギー量の差と DeepSleep の復帰のオーバーヘッドについて述べる。図 10 は DeepSleep(5[sec]), LightSleep のサイクル (5[sec]) を示している。

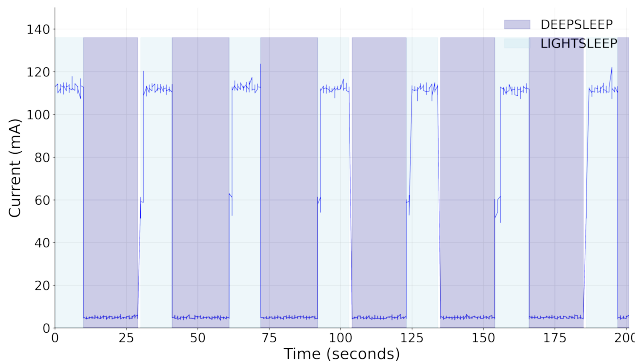


図 10 DeepSleep, LightSleep のサイクル

DeepSleep 時の平均消費エネルギー量は約 25.4[mW], LightSleep 時の消費エネルギー量は約 506.7[mW] であっ

た。DeepSleep 時の消費エネルギー量は LightSleep 時の約 5%であり、DeepSleep を使用することで約 95%の省エネルギー効果を得られると考えられる。

理想的な 1 サイクルあたりの時間は約 12[sec](DeepSleep 5[sec] + LightSleep 5[sec]) である。しかし、DeepSleep からの復帰には約 2[sec] のオーバーヘッドが発生するため、実際の 1 サイクルあたりは 12[sec] となっている。本稿で提案する手法におけるセンシングレートは、最高でも 1 分間隔である。本稿の提案手法で最も高いセンシングレートは 5 分間隔であり、2[sec] のオーバーヘッドは 1/150 程度の影響である。したがって、DeepSleep からの 2[sec] の復帰時間による消費エネルギーの余剰は全体の消費エネルギーに対して無視できるレベルであると判断した。このことから、センシング間隔中は毎回 DeepSleep することで、最大限の省エネルギー効果を得られると結論付けた。

## 6. 議論

本稿で提案した動的センシングレート変更と省エネルギー経路選択を統合したデータ収集手法について、実験結果から得られた知見を基に議論する。

センシングレート変更による省エネルギー効果について、2025 年 7 月 4 日の実験では、従来の 15 分固定間隔によるセンシング (96 回) と比較して、提案手法では 54 回のセンシングに削減された。これは 42 回の削減効果を示しており、バッテリー消費量の大幅な改善が期待できる。特に、環境変化が少ない時間帯に Ultra Low (60 分間隔) レートを適用することで、不要なデータ収集を効果的に抑制できることが確認された。

省エネルギー経路選択の実験結果では、ノード間距離 (15[cm], 1[m]) による消費エネルギー量の差がほとんど見られなかった。この結果は、ESP32-WROOM-32 における短距離通信では送信電力の調整が限定的であることを示唆している。従って、経路選択においてはノード間距離よりもホップ数を重視する戦略が妥当であることが実証された。ただし、本実験結果での距離はいずれも短距離であるため、今後、10[m] 程度の距離で実験を行い、距離による影響を再度検証する必要がある。また、障害物による通信環境の不安定さも加えて検証を行い、その結果から、より適切な経路選択のためのパラメータを決定する必要がある。

DeepSleep の活用による約 95[%] の省エネルギー効果は、センサーネットワークの運用時間延長に大きく貢献する。復帰時の 2 秒のオーバーヘッドは、本提案手法の最短センシング間隔 (1 分) に対して約 3.3[%] に相当するが、約 95[%] の省エネルギー効果と比較すると十分に許容可能な範囲である。

実験で使用した天気予報データ (OpenWeatherMAP Weather API) は実際の農業現場での活用を想定した現実的なデータソースである。しかし、天気予報の精度に依存

する部分があり、予報と実測値の乖離が大きい場合には適切なセンシングレート制御が困難になる可能性がある。

## 7. おわりに

本稿では、マルチホップセンサーネットワークにおけるデータ収集の可能時間延長を目的として、動的センシングレート変更と省エネルギー経路選択を統合したデータ収集手法を提案した。提案手法は、天気予報と実測値に基づく5段階の動的センシングレート制御、ホップ数を重視した省エネルギー経路選択、およびESP32のDeepSleepモードを活用した省電力制御の3つの要素技術から構成される。

実験結果から、センシングレート変更により従来の固定間隔手法と比較してセンシング回数を96回から54回まで42回のセンシング回数削減が実現された。これらの成果により、マルチホップセンサーネットワークにおけるデータ収集の可能時間を大幅に延長できることを実証した。特に、農業分野における環境モニタリングにおいて、作物に重大な影響を与える環境変化を適切に検出しながら、通常時の不要なセンシングを効果的に抑制できることが示された。

## 参考文献

- [1] Akyildiz, I., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. and Cayirci, E.: A survey on sensor networks, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 40, No. 8, pp. 102–114 (online), DOI: 10.1109/MCOM.2002.1024422 (2002).
- [2] Conti, M. and Giordano, S.: Mobile ad hoc networking: milestones, challenges, and new research directions, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 52, No. 1, pp. 85–96 (online), DOI: 10.1109/MCOM.2014.6710069 (2014).
- [3] Ahlawat, B. and Sangwan, A.: Energy Efficient Routing Protocols for WSN in IOT: A Survey, *2022 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COM-IT-CON)*, Vol. 1, pp. 380–385 (online), DOI: 10.1109/COM-IT-CON54601.2022.9850649 (2022).
- [4] Arora, S., Nijhawan, G., Verma, G. and Patel, R. J.: A systematic survey on various energy harvesting systems for WSN applications, *2021 International Conference on Industrial Electronics Research and Applications (ICI ERA)*, pp. 1–5 (online), DOI: 10.1109/ICI ERA53202.2021.9726530 (2021).
- [5] Pešović, U. M., Mohorko, J. J., Benkič, K. and Čučej, Ž. F.: Single-hop vs. Multi-hop–Energy efficiency analysis in wireless sensor networks, *18th telecommunications forum, TELFOR* (2010).
- [6] Heinzelman, W., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H.: Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 10 pp. vol.2– (online), DOI: 10.1109/HICSS.2000.926982 (2000).
- [7] Daupayev, N., Engel, C. and Hirsch, S.: Two-to-One Trigger Mechanism for Event-Based Environmental Sensing, *Sensors*, Vol. 25, No. 13 (online), DOI: 10.3390/s25134107 (2025).
- [8] Omari, M. and Laroui, S.: Simulation, comparison and analysis of Wireless Sensor Networks protocols: LEACH, LEACH-C, LEACH-1R, and HEED, *2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pp. 1–5 (online), DOI: 10.1109/INTEE.2015.7416826 (2015).
- [9] Song, L., Song, Q., Ye, J. and Chen, Y.: A Hierarchical Topology Control Algorithm for WSN, Considering Node Residual Energy and Lightning Cluster Head Burden Based on Affinity Propagation, *Sensors*, Vol. 19, No. 13 (online), DOI: 10.3390/s19132925 (2019).
- [10] Shih, E., Cho, S.-H., Ickes, N., Min, R., Sinha, A., Wang, A. and Chandrakasan, A.: Physical Layer Driven Protocol and Algorithm Design for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '01*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 272–287 (online), DOI: 10.1145/381677.381703 (2001).
- [11] Shah, I. K., Maity, T., Dohare, Y. S., Tyagi, D., Rathore, D. and Yadav, D. S.: ICIC: A Dual Mode Intra-Cluster and Inter-Cluster Energy Minimization Approach for Multihop WSN, *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 70581–70594 (online), DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3188684 (2022).
- [12] Leu, J.-S., Chiang, T.-H., Yu, M.-C. and Su, K.-W.: Energy Efficient Clustering Scheme for Prolonging the Lifetime of Wireless Sensor Network With Isolated Nodes, *IEEE Communications Letters*, Vol. 19, No. 2, pp. 259–262 (online), DOI: 10.1109/LCOMM.2014.2379715 (2015).
- [13] Omari, M. and Laroui, S.: Simulation, comparison and analysis of Wireless Sensor Networks protocols: LEACH, LEACH-C, LEACH-1R, and HEED, *2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pp. 1–5 (online), DOI: 10.1109/INTEE.2015.7416826 (2015).
- [14] Priyadarshi, R., Singh, L., Randheer and Singh, A.: A Novel HEED Protocol for Wireless Sensor Networks, *2018 5th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, pp. 296–300 (online), DOI: 10.1109/SPIN.2018.8474286 (2018).