

# Wi-Fi Direct を用いた低消費電力な無線センサ網の通信プロトコル

## Designing a Low-power Communication Protocol for Wireless Sensor Networks using Wi-Fi Direct

田代 志保† 吉廣 卓哉‡  
Shiho Tashiro Takuya Yoshihiro

### 1 はじめに

近年、電源のない場所に無線通信機能をもつセンサを設置してネットワークを構築し、センサの観測値を無線マルチホップ通信により収集する無線センサネットワーク(WSN)の研究が実用化しつつある[1]。低消費電力化が進んだことにより、電源電力のない山間部や農地等の広い領域に設置することが可能であることから、環境や防災といった広い分野での応用が期待されている。また、WSN 向けの通信規格として IEEE802.15.4[2] が標準化され、製品化も進んでいる。

しかし、センサ端末を用いた商用サービスは、期待するよりも普及していない。この原因は複数考えられる。まず、センサ端末自体が高価であり、享受するサービスの価値に対して価格が高い点が挙げられる。センサ端末が量産されることによる価格の低下が期待されるが、現時点ではそのような目処は立っていない。次に、消費電力が意外に大きい点が挙げられる。商用サービスにするのであれば、例えば単純な環境モニタリングでは、単 3 乾電池 2 本で数年程度は動作することを期待したいが、現状の IEEE802.15.4 で無線マルチホップ通信を行うと、せいぜい数ヶ月といったところである。また、センサ端末の管理・運用上の問題として、動作確認や設定変更のために、物理的にセンサ端末を回収・接続をする必要がある点も、長期運用における課題である。

このような状況から、本研究では、現在入手できるハードウェアを用いて、できるだけ現実的な無線マルチホップ通信を行うセンサ端末を試作する。本稿では、現在でも低価格で購入できる Wi-Fi Direct に対応したマイクロコントローラ ESP8266EX を想定し、このチップで動作する無線センサネットワークの MAC 及び経路制御プロトコルを設計する。ESP8266EX は安価であるが、Wi-Fi を用いるため、消費電力が大きい問題がある。これは、提案する通信プロトコルによって消費電力の低減を行った上で、ある程度の大きさの太陽光パネル等を併用することで、電力収支をプラスにすることを目指す。また、ESP8266EX は Wi-Fi 経由でログインやプログラムの書き換えが可能であり、これらの機能によって、将来的にセンサ端末の管理に係る負担の軽減が期待できる。

提案プロトコルでは、まず全ノードがデータ収集を行うシンクノードまでの距離(ホップ数)を把握する。次に、省電力化のためにセンシング間隔を 1 周期とし、その 1 周期を時間分割したタイムスロットを導入する。各ノードにホップ数によって動作するスロットを割り当てることにより、

末端ノードからデータ送信を開始させることが可能となる。さらに、各ノードはシンクノードまでの距離が自身よりも小さいノードへデータ送信を行うことにより、シンクノードへデータを到達させる。この提案プロトコルを ESP8266EX に実装し、基礎評価を行ったので、ここに報告する。

本論文は以下のように構成される。第 2 章では Wi-Fi Direct や実験で用いる ESP8266EX などの基礎となる技術を説明する。第 3 章では安価に使用可能な Wi-Fi Direct を用いた無線センサネットワークを構築するためのプロトコル設計を述べる。第 4 章では提案したプロトコルを用いて実機による評価実験を行った結果とその考察を述べる。最後に第 5 章で本論文をまとめる。

### 2 基礎となる技術

#### 2.1 Wi-Fi Direct

Wi-Fi Direct とはアクセスポイントを用いずに機器が相互に接続するための技術である[4]。通信規格には Wi-Fi と同じく IEEE 802.11 a/b/g/n/ac が用いられる。通常の Wi-Fi では機器間の通信にはアクセスポイントを介する必要があるが、Wi-Fi Direct を用いると、端末が仮想的な親機である SoftAP (ソフトウェアアクセスポイント) となることができるため、アクセスポイントなしで通信を行うことができる。そのため、ルータや Wi-Fi ベースステーションなどのアクセスポイントとして用いるハードウェアがなくとも他の Wi-Fi 機器からの接続を受け付けることができる。

#### 2.2 ESP8266EX

Espressif Systems 社によって開発、製造されている TCP/IP スタックとプログラム可能なマイクロコントローラを備えた低価格な Wi-Fi チップである[5]。対応している通信規格は IEEE 802.11 b/g/n であり、日本国内の技適マークを取得しているため、日本国内でも使用が可能である。2017 年 2 月時点で 1 つあたり 550 円と安価に入手可能であり、普及した Wi-Fi チップの 1 つである。また、Wi-Fi 通信を用いてのログインやプログラムの書き換えの機能がある。このチップを用いて無線センサネットワークの構築を行った際には、無線ログインやプログラムの書き換えの機能によってネットワークの管理が容易になることが考えられる。本研究では ESP8266EX を用いて実機実験を行う。

### 3 Wi-Fi Direct を用いた無線センサ網のプロトコル

#### 3.1 想定する無線センサネットワーク

本研究では、無線通信機能とセンシング機能を持った多数のセンサノードとセンシングデータを蓄積する役割を持ったシンクノード 1 つで構成されているネットワークを想定する。各センサノードは一定時間ごとに搭載したセンサか

† 和歌山大学大学院システム工学研究科, Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University

‡ 和歌山大学システム工学部, Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

ら値を読み取ってセンシングデータを生成し、マルチホップ通信を用いてデータをシンクノードへ送信する。各センサノードはバッテリー駆動を前提としており、センサは ESP8266EX 等の Wi-Fi Direct が搭載された安価なチップを用いる。また、バッテリー駆動であることから、低消費電力で動作し、長期的な運用が可能であることが求められる。そのため、ある程度の大きさの太陽光パネル等を併用することにより、電力収支がプラスになることを目指す。

### 3.2 提案手法の概要

本研究では、Wi-Fi Direct を用いてセンサネットワークを構築するために省電力化した通信プロトコルを設計する。

提案手法では、各ノードは省電力化のために、センシング間隔を 1 周期とし、時間分割したスロットによって動作を遷移させる。スロットには、データを送信する送信スロットとデータを受信する受信スロットの 2 種類があり、それら以外のスロットでは省電力なスリープ状態となる。シンクノードから一番遠い末端ノードから送信スロットを開始することで、1 周期でセンシングデータの収集を可能にする。そのため、スロットの割り当てには各ノードのシンクノードまでの距離情報を用いる。ここで距離はシンクノードからのホップ数によって測るものとする。

各ノードはシンクノードまでの距離を把握するため、APモードとなり、ビーコンフレームに含まれる SSID に距離情報を格納する。まず、自身の距離が確定するまではウェイク状態となる。Wi-Fi AP のスキャンを行うことスキヤニングといい、このスキヤニングを行う。隣接ノードから距離情報を受け取れば、その値に 1 を加えた値を自身の距離とする。自身の距離が確定すれば、AP モードとなり、SSID に距離情報を含めて広告を行う。以上の動作を末端ノードまで行うことにより距離情報の把握を行う。

各ノードは送信スロットのときに次ホップへデータ送信を行う。次ホップの選択はデータ送信毎に以下のように行われる。各ノードは隣接ノードの中から自身の距離より小さいノードを次ホップの候補とし、候補が複数あった場合には、その中からランダムに選択されたノードを次ホップのノードとする。

### 3.3 距離情報の伝搬

本論文で提案するプロトコルでは、まず、すべてのノードがシンクノードまでの距離 (ホップ数) を把握する。初期状態では各センサノードはシンクノードまでの距離情報は持っておらず、シンクノードのみが距離情報を 0 として持っている。各ノードはまず、スキヤニングを行い、次ホップとなるノードを探す。初めにシンクノードの隣接ノードが距離を 1 とし、距離のブロードキャストを行う。その隣接ノードがこれを検出し、自身の距離を 2 として距離のブロードキャストを行う。同様の動作を全ノードが逐次的に行うことにより、全ノードが距離の把握を行う。

各ノードの動作を詳しく述べる。ノード  $n_s$  はシンクノードまでの距離を把握するためにまず AP のスキヤニングを行い、そのノード  $n_s$  と同じネットワークに属する隣接ノード集合  $N_r$  を把握する。次ホップとなり得るノードが見つかったも、そのノードをすぐに次ホップとするのではなく、一定期間はスキヤニングを続ける。その後、次のように動作を行う。ノード  $n_s$  のシンクノードまでの距離  $d(n_s)$  と、ノード集合  $N_r$  の中で距離が一番小さいノード  $n_r$  の距離  $d(n_r)$  を比較する。距離  $d(n_s)$  がまだ設定されていないか、 $d(n_s) > d(n_r) + 1$  であれば、 $d(n_s) = d(n_r) + 1$  とする。距



図 1 スロットと 1 周期の関係

離  $d(n_s)$  が確定すれば、一定期間その距離のブロードキャストを行う。ブロードキャストは Wi-Fi Direct の AP モードを用いる。AP モード中は通常のインフラストラクチャモードの AP と同様に一定間隔でビーコンフレームが送信されており、ビーコンフレームに含まれる SSID に距離情報を含めることにより、距離情報のブロードキャストを行う。すべてのノードがこの手順を繰り返すことにより、各ノードがシンクノードまでの距離を把握することができる。なお、ノードの故障等で距離の再設定を行う場合があるが、これについては 3.6 章で詳しく述べる。

SSID にはネットワークを判別するネットワーク ID、各ノードの距離、ノード ID から成り立っている。ノード ID はすべてのノードに対する識別を可能とするために、ネットワーク内で一意になるよう管理者が設定を行う。

### 3.4 時刻同期とスロット分割

全ノードは時刻同期を行い、時間分割した一定期間 (タイムスロット) ごとに動作を遷移させる。タイムスロットの導入により、動作を行わないスリープ期間を長くすることができ、低消費電力な動作を実現する。また、各ノードが正しい時刻で動作を遷移させるために時刻同期を行う。

時刻同期は、ノード  $n_s$  の距離決定時に初めて行われる。ノード  $n_s$  は次ホップとしたノード  $n_r$  にデータを送信し、時刻情報をノード  $n_r$  から受け取る。その後、ノード  $n_s$  は自身の時刻を受信した時刻に設定する。これにより時刻同期を行う。すべてのノードがこの手順を行うことにより末端ノードまで時刻同期を行うことが可能となる。しかし、各ノードはスリープ等を繰り返すことにより、ノード間の時刻に誤差が生じる。そのため、データの送信を行うたびに時刻同期を行う。仮にノード  $n_s$  の時刻とノード  $n_r$  の時刻に誤差が生じたとしても、データを送信する毎に時刻が再同期される。

各ノードは距離 (ホップ数) によってスロットの設定を行う。スロットにはデータの送受信が可能なウェイクスロットとスリープ状態となるスリープスロットのどちらかが設定される。周期とスロットの関係を図 1 に示す。最大スロット数を  $M$ 、スロット長を  $t_{slot}$ 、1 周期を  $R$  とすると  $R > M \times t_{slot}$  となり、左辺は右辺に対して十分に大きいものとする。また、最大スロット数、スロット長、周期はそれぞれ時刻情報とともに次ホップから送信されるため、現在時刻から現在のスロットを計算することができる。スロット割り当てと各スロットにおける詳しい動作については次章で述べる。

### 3.5 各ノードのスロット割り当て

本章では、スロットの割り当て方法と各スロットの動作を説明する。各ノードのウェイクスロットは受信スロットか送信スロットのどちらかであり、それ以外のスロットではスリープとしデータ通信は行わない。受信スロットではデータ受信を行い、送信スロットではデータ送信を行う。また、割り当てるスロットはノードの距離 (ホップ数) から求められ、ある時刻のときに前後のノードでデータの送受信が可能となるようにスロットの割り当てを行う。全ノードは受信スロットののち、送信スロットへ移行する。例えば、 $k + 2$  ホップのノードから  $k$  ホップのノードまでデータ

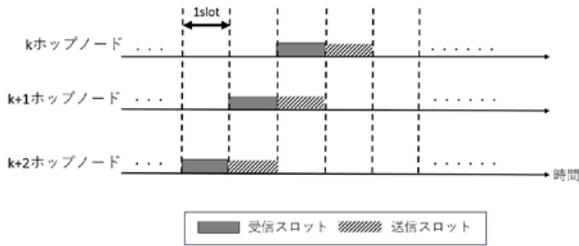


図2 kホップノードからk+2ホップノードの  
スロット割り当て

送信を行う場合を述べる。k+2ホップのノードが送信スロットのとき、k+1ホップのノードは受信スロットであり、このとき、k+2ホップのノードからk+1ホップのノードへデータ送信が行われる。また、k+1ホップのノードが送信スロットのとき、kホップのノードは受信スロットであり、このとき、k+1ホップのノードからkホップのノードへデータ送信が行われる。図2はkホップのノードからk+2ホップのノードのスロット割り当てを表している。また、末端ノードからデータ送信を開始することにより、全ノードからシンクノードまでデータ送信を可能にする。

各ノードnの受信スロットと送信スロットの割り当てはノードnの距離情報 $d(n)$ と最大スロット数Mから、受信スロット $T_r = M - d(n)$ 、送信スロット $T_s = M - d(n) + 1$ として求める。スロットの割り当てにより、1周期のなかで末端ノードからデータ送信が開始される。また1スロットごとにデータはよりシンクノードに近いノードに送られていき、シンクノードまで各ノードのセンシングデータが届く。

各ノードは受信スロットでは、スロット開始からスロット終了までAP(アクセスポイント)として動作する。APである間はビーコンの送信が行われているため、距離情報を含むSSIDのブロードキャストが行われる。これにより、データ送信を行いたいノードはデータ受信が可能なノードを見つけることができる。またこの間データ受信が可能であり、ノードからデータを受け取れば時刻情報の送信を行う。

各ノードは送信スロットでは、スロット開始時刻からランダムな時間が経過してからデータ送信を行う。同ホップのノードは送信スロットが同じであり、隣接ノードである可能性が高い。そのため、スロット開始と同時にデータ送信を行うと、高頻度で電波干渉が発生する。これを回避するためにランダムな時間、スリープとなってからデータ送信を行う。このランダムなスリープ時間 $t_w$ は1スロットの長さ $t_{slot}$ から、 $t_w < t_{slot}/2$ として求められる。これは、同ホップのノード集合 $N_e$ のランダムなスリープ時間 $t_w$ が $t_w > t_{slot}/2$ として設定された場合、集合 $N_e$ のノードはスロット終了までにデータ送信ができず、受信ノードがスリープへ移行してしまう可能性があるからである。データ送信を行ったのち、受信ノードから時刻情報を受け取れば、次の受信スロットまでをスリープ時間と設定し、スリープへ移行する。

これら一連の流れを各ノードが周期的に行うことにより、各ノードからシンクノードまでデータの送信とシンクノードからの全ノードへの時刻同期が可能となる。

図3の例を用いて受信スロットと送信スロットでの詳しい動作を説明する。図3はスロットmのとき、ノード $n_s$ からノード $n_r$ へデータ送信を行う場合の動作である。ノード

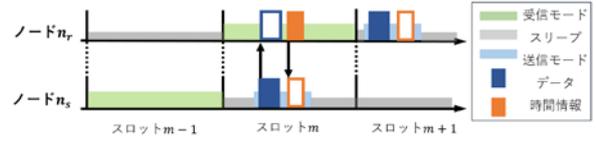


図3 kノード $n_s$ とノード $n_r$ の動作

ド $n_s$ はスロットmのとき、スロット長の半分以内のランダムな時間スリープしてから、ノード $n_r$ へデータ送信を開始する。この間、ノード $n_r$ は受信スロットであるため、ノード $n_s$ からデータを受信すれば時刻情報をノード $n_s$ へ送信する。ノード $n_s$ は時刻情報を受信したならば、自身の時刻を再設定したのち、スリープとなる。

### 3.6 次ホップの決定

本章では各ノードの次ホップの決定方法を述べる。初期状態では、隣接ノードの中から最小ホップ数のノード1つを次ホップノードとして選択する。その後、各ノードは受信スロットのとき、自身のホップ数よりも小さいホップ数のノードを次ホップに選択する。これにより、データはシンクノードへ近づく。また次ホップに選択可能な隣接ノードの中で最小の距離のノードが複数存在した場合は、その中からランダムに1つのノードを次ホップノードとして、ノードの偏りを防ぐ。なお、送信スロット期間中に、自身のホップ数より小さいホップ数が見つからなければ、隣接ノードのなかで最小ホップ数を広告しているノードを次ホップと選択し、距離の再設定を行う。

初期状態では、ノード $n_s$ の距離 $d(n_s)$ は未設定である。このとき、次ホップに選択可能な隣接ノード集合 $N_r$ からシンクノードまでの距離(ホップ数)が最小のノードを次ホップの候補とする。この選択可能な隣接ノード集合 $N_r$ はAPモードとなりSSIDを広告しているノードの集合であり、隣接ノード集合Nと等しい。次ホップの候補が複数あった場合、ランダムに選択することにより、データ受信を行うノードの偏りを防ぐ。

送信スロットのとき、 $d(n_s)$ は確定済みである。このとき、最大1スロット間スキューニングを行う。もし、受信ノード集合 $N_r$ から距離 $d(n_s)$ より小さい距離のノードが見つければスキューニングを終える。この受信ノード集合 $N_r$ は隣接ノード集合Nの部分集合であり、集合 $N_r$ の要素はスロット毎に変わる。ノードが見つければ、その中から距離が最小のノードを次ホップの候補とする。次ホップの候補が複数見つかった場合、ランダムに選択することにより、データ受信を行うノードの偏りを防ぐ。選択したノードの距離 $d(n_s)$ により以下のどちらかの動作を行う。

- $d(n_r) = d(n_s) - 1$  の場合、受信ノード $n_s$ にデータ送信
- $d(n_r) < d(n_s) - 1$  の場合、受信ノード $n_s$ にデータ送信したのち、 $d(n_s) = d(n_r) + 1$ として距離を再設定し、ウェイクとなるスロット割り当てを変更

送信スロットのとき1スロット間のスキューニングを行っても、受信モードとなっているノード集合 $N_r$ から $d(n_r) < d(n_s)$ となるノード $n_r$ が見つからなかった場合について説明する。ここで次ホップが見つからない原因として、次ホップとしていたノードに故障や時刻に大きな誤差が発生した場合などが考えられる。集合 $N_r$ の中から最小ホップ数を広告しているノードを次ホップの候補とする。次ホップの候補が複数あった場合、ランダムに選択することにより、データ受信を行うノードの偏りを防ぐ。選択したノード

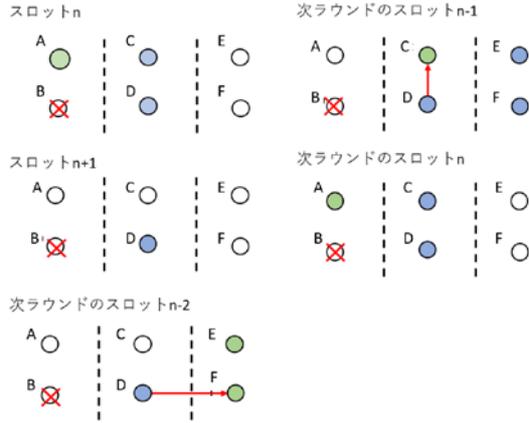


図4 距離再設定時の動作例

を $n_m$ とすると、仮設定の距離を $d'(n_s) < d(n_m) - 1$ として設定を行う。距離の仮設定後は、2 スロット間はスキューニングを行い、距離 $d(n_m)$ よりも小さいホップ数のノードを探す。ここで2 スロットの間スキューニングを行うのは、ノード $n_s$ の隣接ノードすべてが受信モードとなる時間を網羅するためである。この2 スロット中に、距離 $d(n_m)$ よりも小さいホップ数のノードが見つければ、再度距離を設定し、見つからなければ、 $d(n_s) = d'(n_s)$ として距離の設定を終える。

図4に動作例を示す。図4の例はノードDの次ホップであるノードBが何らかの原因で故障した場合の動作である。ノードDはスロットnのときにデータ送信を行うために次ホップを探すが、隣接ノードで受信モードとなっているノードを見つけることができない。その後、受信ノードが見つかるのは次周期のスロットn-2のときである。このとき、ノードFを次ホップとして選択し、ノードDの仮設定の距離 $d'(D)$ を $d'(D) = d(F) + 1 = d(D) + 2$ と設定する。スロットn+1のとき、 $d'(D) > d(C) + 1$ となるノードCが受信モードとなるため、ノードDはノードCを次ホップとして選択する。ノードDの距離 $d'(D)$ は更新され、 $d'(D) = d(C) + 1 = d(D) + 1$ となる。スロットnのとき、受信モードとなっている隣接ノードは見つからない。以上で隣接ノードすべてが受信モードとなる時間を網羅することができる。よってノードDの距離を新たに $d'(D) = d(C) + 1$ として設定し、各スロットの割り当てを行う。

## 4 評価

### 4.1 評価方針

本研究における提案手法では、安価なマイクロコントローラであるESP8266EXを想定し、Wi-Fi Directを用いた実用的な無線センサネットワークの実現を意図している。本章では、提案プロトコルを実機実装し、10ノードを用いた簡単なシナリオを用いて基礎的な実機評価を行う。特に、提案手法においては、送信スロットと受信スロットを設定し、各ノードが適切な時間にウェイクとスリープを繰り返す周期的な動作を行うことが基本である。一方で、安価なマイクロコントローラでは水晶振動子の精度が低い等の理由で、スロット切り替えのタイミング同期に誤差が生じる可能性が考えられる。本評価では、そのようなタイミング誤差の影響により、提案プロトコルが誤動作する可能性について検討する。一方、高密度なセンサネットワークにおいては、フレーム衝突や電波干渉により、通信性能が悪化する可能性がある。このような通信性能に関しては、多数

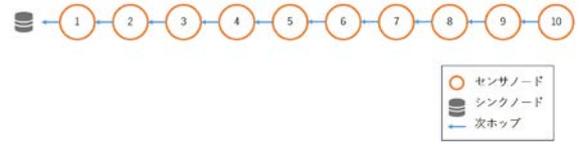


図6 実験時のネットワークポロジ

表1 実験パラメータ

種別	意味	値
ノード配置	ノード間の距離	1.3[m]
	ノードの地上高	0.8[m]
パラメータ	スロット長	30[秒]
	1周期	6[分]
	実験時間	18[周期]

表2 ログに出力される項目

状態	ログ項目	値の種別	
共通項目	スリープ設定値	数値	
	初期状態のみ	Wi-Fi スキャン結果 (検出 AP リスト)	文字列
		送信先 SSID	文字列
		ノード時刻	数値
		受信したノード時刻	数値
		ホップ数	数値
受信スロット	広告 SSID	文字列	
	送信元ノード ID	数値	
	スロット番号	数値	
送信スロット	スキューニング結果	文字列	
	送信先 SSID	文字列	
	ノード時刻	数値	
	受信したノード時刻	数値	
	スロット番号	数値	

のノードによる本格的な評価が必要になるため、今後の課題とする。

### 4.2 評価シナリオ

提案手法を組み込んだESP8266EXをセンサノードとして室内に設置し、提案手法を動作させた。本実験では各ノードが次ホップに選択するノードは固定して行う。本来であれば次ホップの選択は自律的に行うが、本実験では基礎的な動作実験を目的としているため、常に同じノードを次ホップとして選択する。ネットワークのトポロジは直線となり、図6にその様子を示す。図6で示されるセンサノード内の数字は各センサノードのIDである。実験パラメータを表1に示す。表1における実験時間の18周期は、1周期が6分間であることから108分間となる。

実験環境は室内であり、通常のWi-FiのAP等が設置されていることから、電波干渉は頻繁に発生することが予想される。ESP8266EX内に動作ログを保存する。この動作ログとして保存されるデータの一覧を表2に示す。ノードの状態ごとに表2のログ項目で示されている情報がESP8266EXに保存される。この状態とは、距離が未設定時の初期状態、データ受信を行う受信スロットのとき、データ送信を行う送信スロットのとき、のいずれかである。

受信スロットと送信スロットの終了時に、その後にスリープを行う時間の設定値を保存する。スキューニングを行う初期状態と送信スロットでは、スキューニングを2秒間行った結果である隣接のノードSSID、選択した次ホップのSSID、受信したノード時刻とそのときの自身のノード時

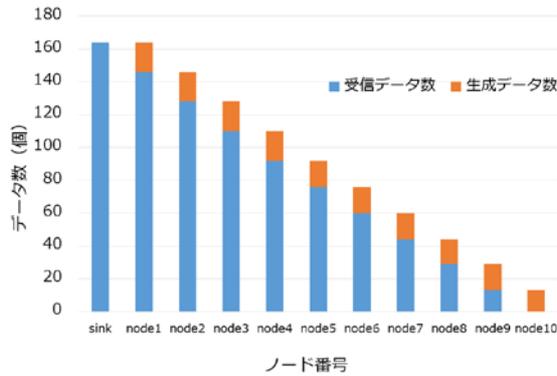


図 6 各ノードのデータ受信数と生成数

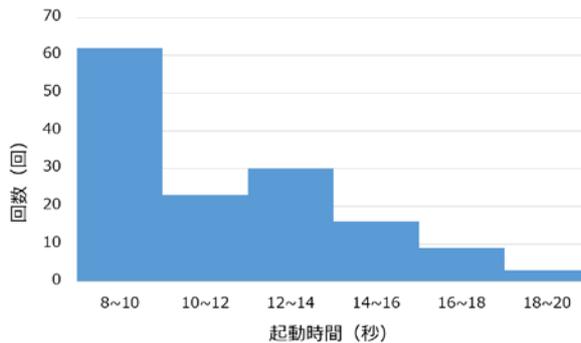


図 7 全ノードの送信スロット時の起動時間

刻を保存し、送信スロットでは、自身の SSID と受信したデータの送信元ノード ID を保存する。

10 個あるノードの中で末端となるノードから起動し、その後、シンクノードの動作を開始させた。またシンクノードへ送信させるデータはダミーデータとし、データサイズは 2 バイトとした。

以上の条件のもと、センサノードを動作させ、ネットワークの構築を試みる。

### 4.3 結果

図 7 に、実験の結果得られた各ノードの受信データ数と生成データ数を示す。実験では、データは損失することなくシンクノードまで到達していたことが確認できた。

次に、ノードの送信スロット時の起動している時間を示す。図 8 は全周期、全ノードの送信スロット時の起動時間を 2 秒間隔でヒストグラムにあらわしたものである。この結果から、送信スロットでは起動してからデータ送信を完了しスリープするまでに、概ね 8 秒から 10 秒程度かかっていることが確認できた。また、それ以上時間を要しているノードがあるが、これらのノードは 1 度のスキャンで親ノードを見つけることができずに、数回スキャンを行ったためであった。この原因については 4.4 節で述べる。

以上の結果から、データ通信は問題なく行えており、送信スロット時の起動時間が 10 秒程度に抑えられることが確認できた。

### 4.4 タイミング誤差に関する考察

毎周期、親ノードと時刻同期をしているにも関わらず、スロット切り替えのタイミングにずれが生じていたことが観測された。提案プロトコルでは、親ノードが受信スロットのとき、スロットの前半 15 秒以内のランダムな時間に子ノードが起動し、データ送信を行うはずであった。しか

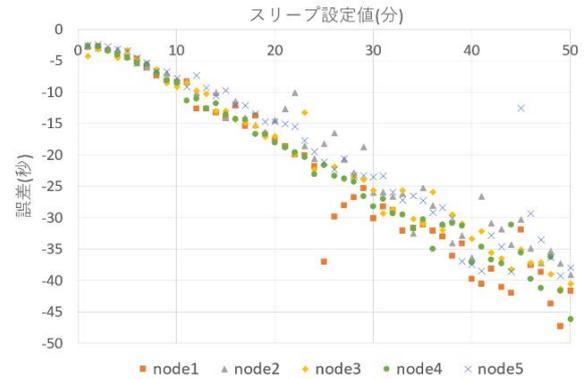


図 8 スリープ設定値と誤差

し、実際には子ノードが親ノードの受信スロットよりも早く起動したため、子ノードは親ノードを見つけられずに、親ノードの探索を数秒間行うという動作が何度も観測された。

このタイミングのずれに関して、スリープ設定値と実際にスリープを行った時間を調査する実験を 5 つの個体に対して行った。実験ではスリープ設定値を 1 分から 1 分間隔で値を増やし、50 分まで調査を行った結果である。実験の結果を図 8 に示す。図 8 はスリープの設定値を横軸にとり、スリープ設定と実際にスリープを行った時間との差分を縦軸にとった値を散布図に示したグラフである。誤差がプラスの値である場合、スリープ設定値よりも遅く起動し、誤差がマイナスの値である場合、スリープ設定値よりも早く起動したことを意味する。

結果から、ESP8266EX を用いた場合、スリープ設定値が大きくなるほど、スリープ設定値よりも早く起きる傾向が観測された。またどの個体であっても、誤差の大きさはスリープ設定値とある程度の相関があることが、結果から確認できる。これは、ESP8266EX 内のカウントを行っている水晶振動子の精度が低く、温度変化の影響を受けやすいため、クロックが安定せず、カウントが早まっていると考えられる。

ESP8266EX が Wi-Fi の AP として動作する場合には、最大 4 つのクライアントと同時に Wi-Fi 接続が可能であり、同時接続数に制約がある。実験結果から、クライアントからのデータ送信に約 10 秒が必要であるため、想定するクライアント数に応じてスロット長を検討する必要がある。一様配置の場合には、クライアントが Wi-Fi AP をランダム選択することから、平均的な接続クライアント数は大きくならず、ある程度の偏りに耐えられるだけのスロット長を設定すれば良い。一方で、タイミング同期誤差の影響もスロット長の設定に影響する。今回の実験ではスロット長を 30 秒とし、前半 15 秒の間でクライアントがランダムに起動するように設定したが、この場合にはタイミング同期誤差が 15 秒を超えると、スロット終了後にクライアントが起動することになり、動作周期内でのデータ送信に失敗する結果となる。先述の通り、タイミング同期誤差はスリープ時間が長くなるほど大きくなるが、スリープ時間と誤差の値にはある程度の相関があった。このことから、スリープ設定値に対してスリープ動作を行う前に補正をいれることによって誤差を小さくすることが可能であると考えられる。しかし、補正を入れたとしても個体差などから値のばらつきが発生するため、スリープ時間の設定値は値のばらつきが少ない 20 分以内に抑える必要があると考えられ

る。1 周期，及び 1 スロットの長さは，消費電力に大きな影響を及ぼす。本研究では，小型太陽光パネル等の設置により，エネルギー収支をプラスにすることを意図するが，どの程度の給電を想定するかにより，許容できる周期が変わる。今後は給電性能を考慮した周期の設定について検討を進める必要がある。なお，このバランスを超える周期を設定したいのであれば，RTC(Real-time Clock) モジュールを接続する必要がある。センサ端末のコストが少し上がる。一般的な RTC モジュールを接続した場合には，時刻の誤差は 1 ヶ月あたり約 1 分程度になる。

## 5 おわりに

本研究では，Wi-Fi Direct を用いた低消費電力な無線センサネットワークの通信プロトコルを提案した。提案手法では，安価なマイクロコントローラを前提とし，実用的なセンサネットワークの実現を意図している。提案プロトコルでは，ノードの動作をタイムスロットにより遷移させることで省電力化し，また自身の距離に基づいてスロットの割り当てを行うことにより，センサネットワークの構築を実現するものである。また実験では，安価なマイクロコントローラである ESP8266EX をセンサノードとして用いた。

実験の結果，データ到達率は 100 % であり，起動してから親ノードを見つけ，データ送信を行い，スリープするまでの時間が約 10 秒であったことが確認された。このことから，提案プロトコルは正常に動作したことが確認できる。スリープから復帰したタイミングに誤差が発生し，結果的に親ノードよりも子ノードが早く起動しているという現象が発生していた。この現象をさらに詳しく調べるため，スリープとの設定値と実際のスリープを行った時間の調査実験を行った。この結果，スリープ設定値がある一定を超え大きくなると，本来の時間よりも早く起動するという現象が発生することが確認された。また，どの個体に対しても同様の結果が得られた。これは安価なマイクロコントローラでは，水晶振動子の精度が低い等の理由で正確な時刻のカウントができていないことが原因だと考えられる。以上の結果から，提案プロトコルを用いた場合，安価なマイクロコントローラのような精度の低い時刻カウントであっても，データ通信は問題なく行われることが確認できた。

今後の課題として，現在の起動時間や通信にかかる時間等から，バッテリー消費量を計算し，どの程度の長期的運用が可能なのかを検討する必要がある。また，将来的には実際にバッテリーを用いて計測することを目標としているが，この場合，バッテリーの残量電力が枯渇するまで長期に使用し，結果を得る必要がある。また，高密度なセンサネットワークにおいては，フレーム衝突や電波干渉により，通信性能が悪化する可能性がある。このような通信性能に関しては，多数のノードによる本格的な評価が必要になるため，これについても今後の課題とする。

**謝辞** 本研究の一部は JSPS 科研費 15H02691 の助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] 阪田史郎, 戸辺義人, 南正輝, 猿渡俊介, 鈴木誠, 石原進, 若宮直紀, 鈴木敬, 西山裕之, 福永茂, 河野隆二, “3 章 センサネットワーク”, 電子情報通信学会「知識ベース」4 群-5 編 (2010).
- [2] IEEE Computer Society, “IEEE Std 802.15.4-2003, IEEE

Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems- Local and metropolitan area networks Specific requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer,” (2003).

- [3] Wi-Fi Alliance, “Wi-Fi Direct,” 入手先< <https://www.wi-fi.org/ja>>(参照 2017-02-01)
- [4] Espressif Systems, “ESP8266EX Overview,” 入手先< <https://espressif.com/en/products/hardware/esp8266ex/overview>> (参照 2017-02-01)