

## 稲作管理システム向け無線ネットワーク用 遅延最小ルーティング手法

田中功一<sup>1</sup> 袖美樹子<sup>†2</sup> 西垣正勝<sup>†1</sup> 水野忠則<sup>†3</sup>

**概要:** 農作業の負担軽減を目的に、環境をモニタリングするフィールドサーバを用いた稲作管理システムが研究されている。水田は他の圃場と異なり比較的電源供給が難しく、加えて農作業の障害となるソーラーパネルのような大型の発電装置を設置することは困難である。その為、フィールドサーバは電池などで動作しなくてはならず、低消費電力化が重要である。また、3G 回線の様な回線使用料の必要な通信網では費用の面から利用に課題がある。そこで、本稿では、回線使用料の不要な IoT 向け通信規格で、ISM バンドを用いた低消費電力かつ伝送距離の長い LoRa を用いた圃場間通信向け遅延最小ルーティング手法の検討を行ったので報告する。特に低消費電力を実現する目的で、センサノードである子機と子機からデータを収集しデータを格納する役割を果たす親機間において、短時間、低消費電力ですべての子機のデータを親機へ収集することを可能とするルーティング手法を検討した。従来のデータ収集ルーティング手法とのシミュレーションを用いた比較では、提案手法は最も収集時間が短いことが確認できた。また、消費電力も従来方法と比べ少ないことが確認できた。加えて、子機数の増加による親機へのデータ収集に必要な時間の増加率が他の手法と比べ小さいことが確認できた。稲作圃場の状況をタイムリーに伝達可能な本提案は、農作業の負担軽減に有益な手法と考える。

## Delayed Minimum Routing Method of Wireless Network for Rice Cultivation Management System

KOICHI TANAKA<sup>1</sup> MIKIKO SODE<sup>†2</sup>  
MASAKATSU NISHIGAKI<sup>†1</sup> TADANORI MIZUNO<sup>†3</sup>

### 1. はじめに

近年日本では、農業従事者の平均年齢が上昇傾向にある。農林水産省の報告[1]によると、平成22年から27年の調査では、農業就業人口は約2割減少し、基幹的農業従事者人口は約1.5割減少している。また平均年齢も0.9歳上昇し67.0歳である。このため、現農業従事者の負担軽減が必要であると考えられる。

この課題を解決する目的で、フィールドサーバを用いた稲作圃場管理システムが研究されている[2, 3, 4]。また、最近では、稲作向けフィールドサーバを搭載した圃場管理システムの販売が開始されている[5, 6]が、導入は思うように進んでいない。原因の1つとして、導入及び運用費用が高価であるためと考えられる。

水田は他の圃場と異なり電源供給が難しく、加えて農作業の障害となるソーラーパネルのような大型の発電装置を設置することは困難である。その為、フィールドサーバは電池等で動作しなくてはならず、低消費電力化が重要である。さらに、3G回線の様な回線使用料が必要な通信網はトータルオペレーションコストの観点から利用が難しい。そ

の為、フィールドサーバの設置・運用コストを削減する目的で、回線使用料が不要の IoT 向け通信規格であり、ISM バンドを用いた低消費電力かつ伝送距離の長い LoRa [7] を用いた圃場間通信の提案[8]が行われている。LoRa は、我々が実験を行っている、石川県の稲作専用農業法人の標準的な規模である 3km×3km 圏内では中継器なしで直接通信が行えるという報告があり、稲作圃場向けの通信規格としては十分な性能を有していると考えられる。そこで LoRa を通信路に利用したネットワーク構築手法を検討する。

圃場管理システムでは、センサを具備したノードである子機のデータをすべて親機に収集し、サーバー等にデータを格納する必要がある。データ収集手法に関しては、ネットワークトポロジーやルーティング手法に関する研究が広く行われている[8, 9, 10, 11]。その代表的な方法は、子機が直接親機と中継器なしにデータを送信する手法である Direct [8] である。Direct は中継器を必要としないためルーティング手法が簡単で非常に扱いやすい手法である。しかし、遠距離に配置されている子機も直接親機と送受信を行うため消費電力に課題がある。この課題を解決する目的で PEGASIS [9] が提案されている。PEGASIS は各子機が最も近い子機にデータを送る方法で、チェーンを形成し最終的にデータを親機に送信する。消費電力は Direct と比べ低減

<sup>†1</sup> 静岡大学 創造科学技術大学院

<sup>†2</sup> 金沢高等専門学校

<sup>†3</sup> 愛知工業大学

できるが、データ収集に必要な時間は短縮できない。これを改善する手法として EPEGASIS[10]が提案されている。EPEGASIS は、親機から子機の距離に応じ子機をいくつかのクラスタに分割し、クラスタ内でチェーンを形成する方法である。この手法は PEGASIS と比較するとクラスタ内チェーンのそれぞれのデータ収集に必要な時間は短縮できるが、最終的に親機にデータ収集するためにも時間が必要という課題が解決していない。

そこで、データ収集に必要な時間をさらに削減することを目的とした EPEGASIS の改良版として CHIRON[11]が提案されている。CHIRON は EPEGASIS と比べさらに領域を細かく分割し、各領域内でチェーンを作成することによりデータ収集に必要な時間を削減する方法である。しかし、チェーンの長さを短くすることにより各チェーンでデータ収集に必要な時間は短縮できたが、各領域のデータを親機に収集するために必要な時間は増加してしまうという課題がある。

本稿では、田植えから収穫までの6か月間電池で稼働するセンサノードである子機と、電源が常時供給されている親機間において、低消費電力、短時間でデータの収集を可能とするネットワークトポロジーとルーティング手法を提案する。提案手法は、センサから取得したデータを保持する各子機間、子機と親機間で、データのマージ処理および伝達を行うことによって、データ収集に必要な時間を短縮する特徴を持つ。

第2章では、稲作向け圃場管理システムのシステムについて説明し、それを実現するための無線ネットワーク要件を説明する。第3章では、従来の手法について説明し、第4章では、今回提案する手法について説明する。第5章では、シミュレーションによる従来手法と提案方法の比較結果について述べる。第6章でまとめを行う。

## 2. 前提条件とシステム構成概要

本稿では、稲作管理システム、具体的には水田の気温、水温、水位を監視するシステムを対象とする。我々が想定する稲作管理システムの全体図を図1に示す。本システムは、フィールドサブシステム、ホームサブシステム、マネージメントサブシステムから構成されている。フィールドサブシステムは圃場に設置し、センサから気温、水温、水位等のデータを取得し、取得したデータを無線ネットワークでホームサブシステムに送信するシステムである。なお圃場に設置されたフィールドサーバを本稿では子機と呼ぶ。ホームサブシステムは、子機から送られてきたデータをインターネット経由でクラウドシステムへとアップロードするシステムであり、本稿では、親機と呼ぶ。親機はインターネット接続可能な事務所に設置されることを想定している。マネージメントサブシステムは、収集されたデータを解析、

表示するシステムで、インターネットを經由して農業従事者がクラウド上に蓄積されたデータを確認できるシステムである。

本稿で議論を行うネットワークトポロジーは複数の子機、1個の親機で形成される無線ネットワークに対するものである。親機は電源が常時供給されるが、子機は省電力の観点から、あらかじめ設定されたタイマおよびタイミングに基づき起動し、データ取得、送信時以外は動作を停止する必要がある。したがってデータ収集に必要な時間は短いほど、電力削減となる。稼働目標としては、田植えから稲刈りまでの6か月間とし、その間電池等の交換を必要としない事とした。また、農業従事者がリアルタイムに圃場のデータを確認できることが望ましいため、取得したデータは遅延なく親機に送られる必要がある。

各子機は、データを1時間に1回取得し、親機に送信をすることとする。この1回の処理を1ラウンドと呼ぶこととする。

親機と子機は、同時に高々1つの子機と通信できる能力を持つこととする。1回の処理では、システム起動、データ取得、取得データを親機に送信、送信が完了次第電源をoffにする。この一連の処理でかかる時間を1ラウンドでかかる稼働時間と定義する。各子機ではデータを親機へ送信する処理上、必要に応じてデータのマージ処理が行われる。例えば、子機1が子機2にデータを送信すると、子機2では子機1のデータと子機2のデータのマージ処理が行われ、次の送信処理では、マージされたデータが送信される。

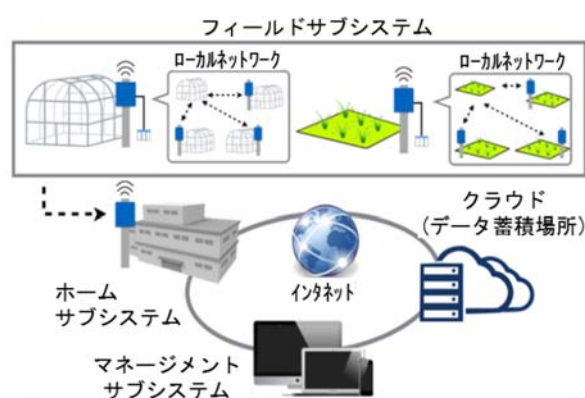


図1 想定する稲作管理システム

## 3. 関連研究

### 3.1 Direct (スター型)

マルチホップ通信を行わず各子機が直接親機までデータ送信を行う手法である。子機から親機に中継機を介さずデータを送信する為、データの平均送信距離とデータ送受信量は少ないという特徴を持つ。我々が利用している LoRa

を用いた場合、他の近距離通信方式と比較し通信距離が長く、3kmx3km 程度の領域であれば中継器なしで親機までデータを送信可能であるため、Direct 手法は、構築が簡単で実用的な方法と考えられる。稲作圃場での1ラウンドのルーティングプロトコル例を以下に示す。

- ① 各子機に電源が投入され、起動する
- ② 親機から子機へブロードキャストにより送信要求を送付する
- ③ 送信要求を受けた子機はデータを取得する
- ④ 子機 1 番から順に親機にデータを送信する。送信が完了した子機は電源を Off にする
- ⑤ 親機は、子機 N 番までデータを取得したら、送付に失敗をした子機に対して再度送付要求を行い、データを再送してもらう。すべてのノードからデータを受信できれば処理を終了する

ここで送信に必要な電力は送信距離の 2 乗に比例し[9]、Direct 手法では、遠くに配置されている子機も直接親機と送受信を行うため消費電力に課題がある。

データ収集に必要なステップ数については、子機の数  $N$  とすると、必要なステップ数  $T$  は、 $N$  となる。

### 3.2 PEGASIS(チェーン型)

消費電力の課題を解決する方法としてチェーンベースプロトコルである PEGASIS(Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems)が提案されている[9]。子機は最も距離が近い子機にのみ接続され、チェーン化される。データはチェーンに沿ってチェーンヘッド(チェーンの最終子機)に送られ、チェーンヘッドから親機に送られる。PEGASIS のネットワークポロジを図 2 に示す。チェーンヘッドはランダムに選択され、親機にデータを送信する義務がある。

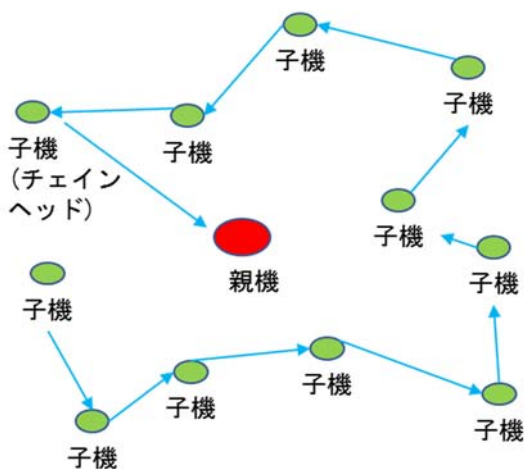


図 2 チェーン型ネットワークポロジ

稲作圃場での1ラウンドのルーティングプロトコルの例

を以下に示す。

- ① 各子機に電源が投入され、起動する
- ② 親機から子機へブロードキャストにより送信要求を送付する
- ③ 送信要求を受けた子機はデータを取得する
- ④ チェインに沿ってチェーンの末端の子機から順にデータを送信する。チェーンヘッドがデータを受信したら、チェーンヘッドは親機にデータを送信する

PEGASIS は DIRECT と比較すると、消費電力は低減できるがデータ収集に必要な時間が長いという課題は解決できていない。

データ収集に必要なステップ数については、子機の数  $N$  とすると、必要なステップ数  $T$  は、 $N$  となる。

### 3.3 EPEGASIS(クラスタ型)

PEGASIS のデータ収集に必要な時間は長くなる課題を解決する手法として EPEGASIS[10]が提案されている。子機を親機からの距離でクラスタに分解し、各クラスタ内で PEGASIS と同じ方法でチェーンを作成する。各クラスタでは、チェーンに沿ってデータをチェーンヘッドに送信する。各クラスタでデータがチェーンヘッドに集まったら、チェーンヘッドは親機にデータを転送する。したがって、PEGASIS と比べるとデータ収集に必要な時間は短縮できる。

データ収集に必要なステップ数については、クラスタ数を  $m$ 、クラスタ  $i$  のチェーンの長さを  $C_i$  とすると必要なステップ数  $T$  は、以下の式で表すことができる。

$$T = \text{MAX}\{C_i\} - 1 + m - 1 + 1$$

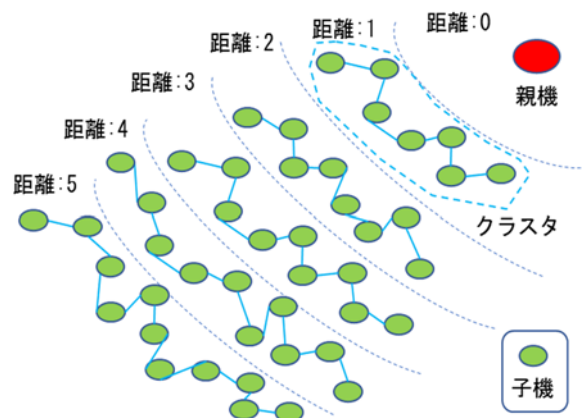


図 3 チェインクラスタ型ネットワークポロジ

### 3.4 CHIRON(クラスタ型)

Beam Star 技術[12]を使って EPRGASIS よりも小さなクラスタ領域に分割することを特徴とする。各クラスタでは、チェーンを構築する。最初、各クラスタのデータは PEGASIS 同じ手法でチェーンヘッドに収集される。次に、親機から最も遠いチェーンヘッドから順に、さらにチェーンヘッド間のチェーンが作られ、これに沿ってデータは親機に送ら

れる。

CHIRON は、チェーンの長さを短くすることにより各チェーンでデータ収集に必要な時間は短縮できたが、各領域のデータを親機に収集するために必要な時間が増加してしまうという課題がある。

データ収集に必要なステップ数については、クラスタ数を  $m$ 、クラスタ  $i$  のチェーンの長さを  $C_i$  とすると必要なステップ数  $T$  は、以下の式で表すことができる。

$$T = \text{MAX}\{C_i\} - 1 + m - 1 + 1$$

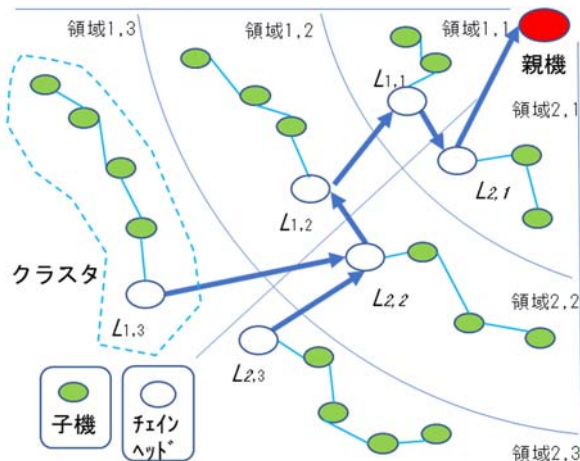


図 4 Beam Star 型ネットワークポロジ

## 4. 提案手法

### 4.1 ルーティングポロジと通信手順

稲作向け圃場管理システムでは、電池等で田植えから稲刈りまでの 6 か月間稼働を行う必要がある。また、センサで取得したデータは遅延なく農業従事者に提供する必要がある。ここでは、1 ラウンドに於いて全データを収集するのにかかる時間を最小化し、また、制約条件として各子機が 6 か月以上稼働とする消費電力とすることを目標とする。親機および子機はすべて時刻同期が行われていることを前提し、各子機は同じ時刻に起動するとする。データ送受信時は、親機、子機とも 1 回の処理で高々 1 つの子機もしくは親機としか通信できない、もしくは 1 個の子機、親機からすべてのノードへのブロードキャストが行えることとする。そのため、親機および各子機において、同期を取りながら規定されたタイミングでブロードキャスト、子機からのデータを親機が受信、子機は親機もしくは別の子機にデータを送信する。これを繰り返すことで、すべての子機が持つデータを親機に収集する。

提案手法の基本的な考え方を説明する。データはなるべく早く農業従事者に提示することが望ましいため、親機は休みなくデータの子機から受信し、インターネット上のクラウドに蓄積することとする。また、消費電力削減の目的で子機はなるべく早くデータを送信し、データ送信が完了次

第電源を Off にすることが望まれる。そこで、子機は必ず最も自分に近い子機もしくは親機にデータを送信し、送信が完了したら電源を Off にすることとする。

送信処理は同期しながら、同じ間隔で繰り返し行われる。1 回の送信処理で、稼働している子機、親機は接続を確立後、データを送信するため、その時点で稼働している子機数は、第  $T$  ステップの子機の数  $N(T)$  とすると、

$$N(T + 1) = \lceil (N(T) - 1) / 2 \rceil$$

となる。即ち、1 回の処理で必ず約 1/2 の子機の電源を off できることとなる。これを繰り返すことにより、データ収集に必要な時間を最小限に抑えることが可能となる。また稼働時間も抑えることが出来るため、低電力化にも寄与する。

図 5 に提案手法のネットワークポロジを示す。枝に付けられた番号はデータが送信されるステップ数を表す。この例では子機が 11 個、親機が 1 個である。

まず、親機に最も近い子機から親機に対してデータを転送する。同時に子機間の距離が最も近い子機と接続が確立され、親機に遠い方の子機から近い方の子機へデータを転送する。次にデータ送信が完了した子機は電源を off にする。この処理をデータ送信が完了していないノードがなくなるまで繰り返す。提案手法のルーティングプロトコルは以下の通りである。

- ① 各子機に電源が投入され、起動する
- ② 親機から子機へブロードキャストにより送信要求を送付する
- ③ 送信要求を受けた子機はデータを取得する
- ④ 親機に最も近い子機が親機にデータを送信する。残りの子機は最も距離が近い子機同士で接続を確立し、データを親機から遠い方の子機から親機に近い子機へ送信する
- ⑤ データの送信が完了したノードは電源を off にする
- ⑥ ④、⑤の処理をすべての子機がデータを転送し、電源 OFF されるまで繰り返す

### 4.2 ルーティングネットワークグラフとデータ収集手順

ここでは、ルーティングネットワークグラフ作成手順について説明を行う。ルーティングネットワークグラフとは、子機、親機間、子機、子機間でデータを送信する順序、方向、送信タイミングを記載した表＝グラフである。送信処理は、このグラフに従って行われる。ルーティングネットワークを有効グラフ  $G=(V, E)$  で定義することとし、 $V$  はノードの集合で、親機と子機がノードとなる。 $E$  は枝の集合で枝  $e=\{i, j\}$  はノード  $i$  からノード  $j$  へデータが送信することを表す。 $E_i$  は  $i$  ステップでデータが送信される枝の集合を表す。ここで、以後の議論を簡単にするため、次のように記号を定義しておく。

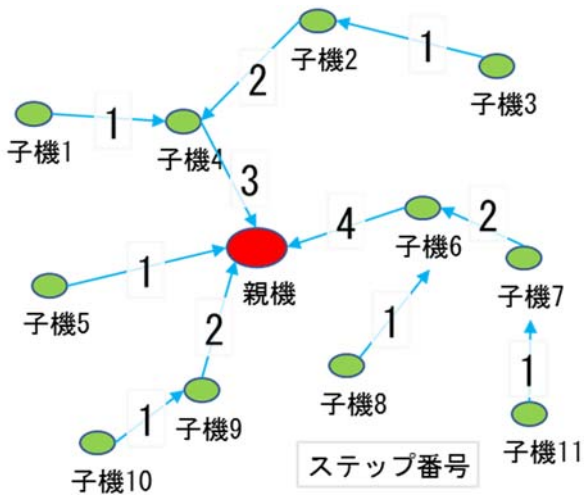


図 5 提案するネットワークトポロジー

- V: {N1, N2} ノードの集合  
 N2: 子機ノードの集合  
 N1: 親機ノードの集合  
 n\_0: 親機ノード  
 n\_j: 子機ノード j where j=1, 2, 3...  
 l: 親機ノードの数  
 m: 子機ノードの数  
 e={n\_j, n\_i}: ノード n\_i からノード n\_j へのデータ送信  
 E\_i: ステップ i での枝の集合  
 E={E\_1, E\_2, ...}  
 F: 送信完了ノードの集合  
 G: 送信未完了ノードの集合  
 Neighbor(j, G): 送信が完了していないノード集合 G の中でノード j に最も距離が近いノード  
 far(j, G): 送信が完了していないノード集合 G の中でノード j に最も距離が遠いノード

ルーティングネットワークグラフ作成プログラムを以下に示す。

```

Procedure Routing(V, E)
1: F={n_0};
2: G=N2;
3: t=0;
4: While(G に属するノードが存在する) {
5:   /*親機への送信*/
6:   t=t+1;
7:   i= Neighbor(n_0, G);
   /*親機に最も近い子機ノードを見つける。*/
8:   枝{n_0, i}を生成し, t タイムステップでの処理を表す集合 E_t に入れる
9:   ノード i を未送信集合 G から削除する。
10:  ノード i を送信完了集合 F に入れる。

```

```

11: /*子機間のデータ転送*/
12: :T=G;
13: While(T に属するノードが存在する) {
14:   j=far(n_0, T);
15:   j を T から削除する。
16:   i=Neighbor(j, T)
17:   i を T から削除する。
18:   枝{i, j}を生成し, t タイムステップでの処理を表す集合 E_t に入れる;
19:   ノード j を未送信集合 G から削除する。
20:   ノード j を送信完了集合 F に入れる。
21: }
22:}

```

図 5 に示す親機 1 個, 子機 11 個の例を用いてプログラムの動きを説明する。

第 1 ステップでは親機に最も近い子機 5 が選ばれ, 親機への送信を表す枝が張られる。次に親機から最も遠くにある子機 11 が選ばれ, 子機 11 に最も近い子機 7 への枝が張られる。同様に, 子機 3 から子機 2 への枝, 子機 10 から子機 9 への枝, 子機 8 から子機 6 への枝, 子機 4 から子機 1 への枝が作成され, 第 1 ステップが完了する。第 2 ステップでは, 第 1 ステップ同様に, 親機から最も近い子機 9 から親機への枝が作成され, 子機 7 から子機 6 への枝, 子機 2 から子機 4 への枝が作成される。第 3 ステップでは, 子機 4 から親機への枝, 第 4 ステップでは子機 6 から親機への枝が作成される。

次にデータ収集通信手順について説明を行う。ルーティングネットワーク作成プログラムで作成されたグラフの木構造に従い, データを親機に収集する。ここでは, 図 5 の例を用いて動作を説明する。

第 1 ステップでは, 第 1 ステップでの処理を表す枝集合 E\_1 に属する枝に対応する送信が親機から子機 11, 子機 11 から子機 7, 子機 3 から子機 2, 子機 10 から子機 9, 子機 8 から子機 6, 子機 4 から子機 1 への送信が行われる。送信を受けた子機は自分が保持していたデータと送られてきたデータを 1 パケットとし, 次の送信に備える。

第 2 ステップでは, 第 2 ステップでの処理を表す枝集合 E\_2 に属する枝に対応する送信, 親機から子機 9, 子機 7 から子機 6, 子機 2 から子機 4 の送信が行われる。

第 3 ステップでは, 枝集合 E\_3 に属する枝に対応する送信, 子機 4 から親機への送信が行われる。

第 4 ステップでは, 枝集合 E\_4 に属する枝に対応する送信, 子機 6 から親機への送信が行われる。

データ収集に必要なステップ数は, T ステップに於ける起動中の子機の数  $N(T)$  とすると以下の式が成立する。

$$N(T + 1) = [(N(T) - 1) / 2]$$

即ち、 $N(T+1) = 0$  となる  $T$  がデータをすべて親機に送信するのに必要なステップとなる。例えば子機が 10 個の場合、

$$\begin{aligned} N(1) &= 10 \\ N(2) &= [(10-1)/2] = 5 \\ N(3) &= [(5-1)/2] = 2 \\ N(4) &= [(2-1)/2] = 1 \\ N(5) &= [(1-1)/2] = 0 \end{aligned}$$

となり、4 ステップですべてのデータを親機に送信できることとなる。

## 5. シミュレーションによる性能評価

すべての子機データの収集に必要な時間、消費電力を確認するシミュレーションを行った。シミュレータは C 言語で作成した。まず、消費電力の計算方法について説明する。親機は常時電源が供給されるため、その消費電力を考察の範囲から除外し、子機のみ計算することとした。各子機は、電池を保持しており、75,000 (mWh) の容量があるものとした。子機は動作状態に応じ 6 つのモード(表 1)があるとした。なお、LoRa を用いた消費電力実測値報告[13]を参考に電流消費は下記の通りと仮定した。ここでデータ転送時の電力値が複数存在するのは、送信電力が距離に依存するためであり、距離と実験機器に設定できる送信電力モードに応じて 53mA, 62mA, 69mA, 78mA とした。

表 1 子機の 6 つのモード

状態	状態名	消費電力 (mA)
1	電源OFF	0
2	データ送信モード	53, 62, 69, 78
3	データ受信モード	13.5
4	システム立ち上げモード	2.7
5	センサーデータ取得モード	2.7
6	待機モード	2.7

また、システム立ち上げ、センサーデータ取得に必要な時間は、実験用器材の実測値から 60 秒、またデータの送受信に必要な時間は 3.4 秒とした。各ラウンドでは、まず各子機が起動時間になったらシステムを起動し、センサからデータを取得する。次に親機がデータ送信要求をすべての子機に対し送信する。子機はデータ送信要求を受信したらデータ収集フェーズ移行し、センサからのデータを取得、データを親機へ送信する手順を実行する。各子機はデータの送信が完了したら低消費電力を実現する目的で電源を off にする。本シミュレーションでは、時刻同期が完全に行われていると仮定する。また、データ送受信の失敗はないも

のとした。

ところで、子機によるデータの結合時間に関しては、本来ならば時間測定を行い、それに基づき消費電力を導出すべきであるが、実装上、送信すべきデータを連続した領域に並べて配置するようにした関係上、送信時の消費電力に含めてよいほど微細であり今回のシミュレーションでは無視している。今後、マージする子機数が増加した場合には配慮すべき点であるが、今回は送信時の動作に含まれるとした。

表 2 に、作成したデータの親機と子機の配置について説明する。ここでは親機を中心として、指定した半径にランダムに子機を指定個数配置した。DATA1 は親機 1, 子機 99 とし、親機と子機の分散範囲は半径 500m とした。DATA2 は、親機 1, 子機 200 とし、親機と子機の分散範囲は半径 500m とした。DATA3 は、親機 1, 子機 300 とし、親機と子機の分散範囲は半径 3000m とした。子機の数、および距離の選定理由は、実際の圃場で農業従事者が連続的に監視するエリアの大きさ、またそれを子機に置き換えた場合に必要な子機数、圃場全域のサイズを考慮して決定した。

比較は Direct, PEGASIS, EPEGASIS, CHION と提案手法でシミュレーションにより行った。また、比較を行った項目は、以下の 3 つの項目とした。その理由は、農業従事者が水田のデータをリアルタイムに確認出来る事、即ちデータ収集時間最小、田植えから稲刈りまでの 6 か月間電池で稼働することとした事に起因する。

- (1) 1 ラウンドに於けるデータ収集に必要な時間
- (2) 1 ラウンドに於ける総消費電力
- (3) 最大稼働日数

表 2 シミュレーションデータの詳細

	親機(個)	子機(個)	半径(m)
DATA1	1	99	500
DATA2	1	200	500
DATA3	1	300	3000

表 3 DATA1 シミュレーション結果

	DATA1		
	稼働時間/ラウンド(秒)	消費電力/ラウンド(mA秒)	稼働日数
Direct[1]	360	21597	119日
PEGASIS[2]	360	20950	117日
EPEGASIS[3]	141	10723	183日
CHIRON[4]	102	8820	187日
Proposed	81	8089	190日

DATA1 のシミュレーション結果を表 3、図 6 に示す。提案手法は、他の方法と比べ、データを親機に収集する時間が最も短い事が分かる。また、消費電力、寿命も最も小さいことが分かる。結果的に理論値に於いては、田植えから稲刈りまでの期間 6 か月稼働できることが分かる。

図 6 では各ステップに於ける送信完了ノード数を示す。Direct はノードが直接親機にデータを送信するため、1 ノードずつ親機へのデータ送信が完了する。その為、線形に送信完了ノード数が増加することが分かる。PEGASIS は、チェーンでデータを送っていく仕組みであるため、最終チェーンヘッドがデータを親機に送信した時にすべての子機データが親機に送信されたことになる。その為最後の時刻ですべてのデータが親機に送信され、処理が完了することが分かる。EPEGASIS は、複数のチェーンを作成しチェーンに沿ってデータをチェーンヘッドに送って行き、次に各チェーンヘッドがデータを親機にデータを送る仕組みである。その為データは、数度にわたり親機に送られ、階段状にデータ送信完了ノードが増加している。CHIRON は複数の小さな領域に分け、その領域でチェーンを形成しデータをチェーンヘッドに収集し、チェーンヘッドがデータを親機に送信する仕組みである。その為、小さなクラスタ毎データが収集され親機に送られることが確認できる。

一方、提案手法は、まず 1 子機分のデータが親機に送られ、次に 2 子機分のデータが親機に送られ、次に 4 子機分のデータが送られる。この様に親機に送られるデータの個数は毎回 2 倍で増加していく。この為急速にデータが収集されることが確認できる。結果として、提案する手法が最も高速にデータ収集可能なことが確認出来る。

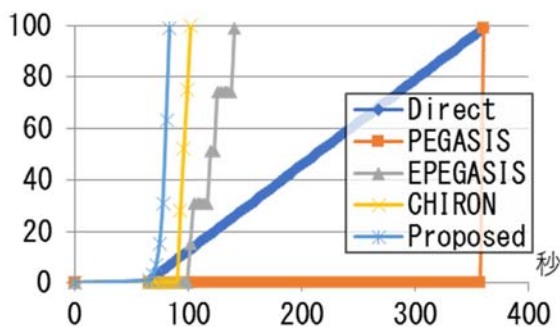


図 6 データ送信完了ノード数

DATA2 に対するシミュレーション結果を表 4 に示す。提案手法は、他の方法と比べ、データを親機に収集する時間が最も短い事が分かる。また、消費電力、寿命も最も小さいことが分かる。また、理論値に於いては、田植えから稲刈りまでの期間 6 か月稼働できることが分かる。また、提案手法は、DATA1 と比べ子機数が 2 倍となっているが収集に必要な時間の増加は 3 秒と短いことが分かる。

DATA3 に対するシミュレーション結果を表 5 に示す。提案手法は、他の方法と比べ、データを親機に収集する時間が最も短い事が分かる。また、消費電力、寿命も最も小さいことが分かる。また、理論値に於いては、田植えから稲刈りまでの期間 6 か月稼働できることが分かる。また、DATA1 と比べ子機数が 3 倍となっているが収集に必要な時間の増加は 6 秒と短いことが分かる。

表 4 DATA2 シミュレーション結果

	DATA2		
	稼働時間/ ラウンド (秒)	消費電力/ ラウンド (mA秒)	稼働 日数
Direct[1]	663	70867	83日
PEGASIS[2]	663	69823	81日
EPEGASIS[3]	177	27346	153日
CHIRON[4]	120	17637	172日
Proposed	84	14700	189日

表 5 DATA3 のシミュレーション結果

	DATA3		
	稼働時間/ ラウンド(秒)	消費電力 (mA秒)	稼働 日数
Direct[1]	963	151453	64日
PEGASIS[2]	963	147243	63日
EPEGASIS[3]	273	50204	131日
CHIRON[4]	135	29359	167日
Proposed	87	23338	183日

図 7 に 1 ラウンドに於ける稼働時間を示す。Direct, PEGASIS はデータ数が増加するに従い、データの親機への送信時間が増加し稼働時間が急激に増加していることが分かる。

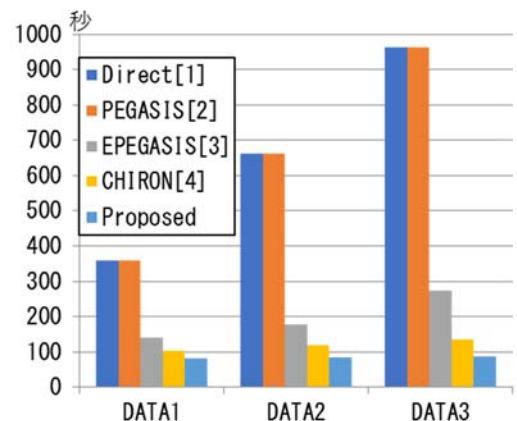


図 7 1 ラウンドの稼働時間

図 8 は、図 7 から EPEGASIS, CHIRON, 提案手法を抜き出し図示したものである。この図から、提案手法はデータ数

増加に対するデータ収集に必要な時間の増加率が最も小さく、子機数が増えても短い時間でデータを収集可能であることが分かる。また、伸び率はノード数に対して3%の伸びであることが分かる。このため、想定した圃場管理システムにとって、最も適した方法と考えられる。

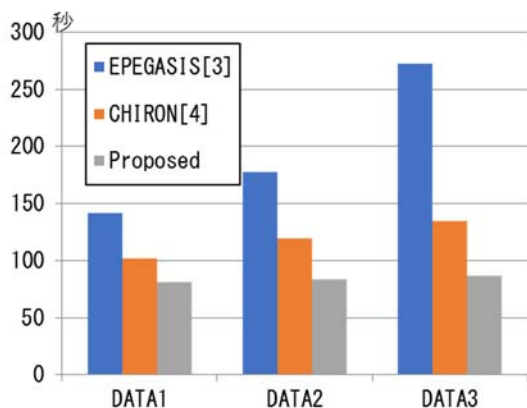


図 8 最大稼働時間比較

## 6. おわりに

水田は他の圃場と異なり電源供給が難しい点に加え、農作業の障害となる大型の発電装置を設置することは困難である。その為、フィールドサーバは電池等で動作しなくてはならず、低消費電力化に課題があった。また、通信に供する回線使用料は農耕に必要なコスト全体から考えると可能な限り低減せざるを得ない。我々は、IoT 向け通信規格である ISM バンドを用いた低消費電力かつ伝送距離の長い LoRa [7] を用いた圃場間通信の検討を行った。

電源の無い環境で、田植えから収穫までの 6 か月稼働するセンサノードである子機と親機間において、短時間でデータの収集を可能とするルーティング手法を提案した。提案手法は、センサから取得したデータを保持する各子機間、子機と親機間で、データのマージ処理および伝達を行うことによって、データ収集に必要な時間を短縮する特徴を持ち、従来手法とのシミュレーションを用いた比較の結果、子機のデータを親機に収集する収集時間が最も短いことが確認できた。また、消費電力も従来方法と比べ小さいことが確認できた。さらに、子機数の増加による親機へのデータ収集に必要な時間の伸び率が他の手法と比べ小さく、有効な方法であることが確認できた。

稲作圃場の状況をタイムリーに伝達可能とする本提案は、農作業の負担軽減に有益な手法と考える。今後は、親機の受信能力や、子機間のデータのルーティング方法、データの集約回数などのパラメータを増減することによって、圃場に最適な解を得るため、シミュレーションおよびフィールドでの実験を進める予定である。

## 参考文献

- [1] 農林水産省 “農業労働力に関する統計”, <http://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/DATA/08.html>, Nov 2016 参照.
- [2] 黒澤清和, 古田昂志, 中川秀門, 北村泰一, 川上悠太, 小紙一袖美樹子. 近距離無線通信システムを搭載した水田用フィールドサーバの開発. 電子情報通信学会技術研究報告 ASN 研究会, 2016/05/12-13.
- [3] 川上悠太, 古田昂志, 中川秀門, 北村泰一, 黒澤清和, 小紙一馬, 田地野直人, 袖美樹子, “水位センサシステムを搭載した, 稲作管理用フィールドサーバの開発,” 電子情報通信学会技術研究報告 NS 研究会, 2016/05/19-20.
- [4] 黒澤清和, 飯島勇, 雨宮良樹, 山道舜也, 豊田真治, 袖美樹子, “稲作向け業務管理システムの開発,” 電子情報通信学会 通信方式研究会, 2016/12/8-9.
- [5] Vegetalia, PaddyWatch, <http://field-server.jp/paddywatch/>, March 2016 参照.
- [6] PS ソリューションズ, e-kakashi, <https://www.e-kakashi.com/>, March 2016 参照.
- [7] <https://www.lora-alliance.org/> (参照 2017-04-2).
- [8] 川上悠太, 豊田真治, 寺田恵太郎, 袖美樹子, “SubGHz 無線を用いた圃場間通信の提案,” 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会, 2016/12/21-22.
- [9] Lindsey, S., & Raghavendra, C. (2002). “Pegasis: power-efficient gathering in sensor information systems”. Proceedings of the Ieee aerospace conference proceedings, 2002. (pp. 3-1125 - 3-1130 vol.3). IEEE. 10.1109/AERO.2002.1035242.
- [10] Jung, S.-M., Han, Y., & Chung, T.-M. (2007). “The concentric clustering scheme for efficient energy consumption in the pegasis”. Proceedings of the The 9th international conference on advanced communication technology (pp. 260-265). Gangwon-Do: IEEE. 10.1109/ICACT.2007.358351.
- [11] Chen, K., Huang, J., & Hsiao, C., “Chiron: an energy-efficient chain-based hierarchical routing protocol in wireless sensor networks”. Proceedings of the Wireless telecommunications symposium, wts'2009 (pp. 183-187). USA: IEEE.
- [12] Mao, S., & Hou, T. (2007). Beamstar: an edge-based approach to routing in wireless sensor networks. Transactions on Mobile Computing, 6(11), 1284-1296.
- [13] 寺田恵太郎, 豊田真治, 平田忠明, 高田裕也, 松本恵子, 袖美樹子 LoRa を用いた圃場管理向け通信プロトコルの提案 DICOMO2017)
- [14] Shalli, Rani, Syed Hassan Ahmed, “Multi-hop Routing in Wireless Sensor networks,” Springer, 2016
- [15] Sherin Abdel Hamid, Hossam S. Hassanein, Glen Takahara, “Routing for Wireless Multi-Hop Networks,” Springer, 2013