

# 受信ノード主導型MACプロトコルのビーコン削減に基づいた長寿命センサネットワーク

横谷 晟人<sup>1,a)</sup> 吉廣 卓哉<sup>2,b)</sup>

概要：IoTは、あらゆる場所にセンサを設置して活用する実用的な技術として、大きく注目されている。IoTを実現するための重要技術の一つとして、電源のない場所にセンサ端末を設置して無線マルチホップ通信によりセンシングデータを集める無線センサネットワークが研究されている。しかし、現在の技術では、乾電池程度の現実的な電源で稼働できる時間は長くても1~2年程度であり、商用サービスとして運用するには短すぎると言わざるを得ない。著者らの研究グループでは、受信ノード主導型MACプロトコルと経路制御プロトコルの組み合わせ効果により、少数のバッテリーを定期的に交換する程度の低い管理コストで運用できる低管理コスト無線センサネットワークを提案した。しかし、少数ノードが対象であっても、概ね1年に一度程度のバッテリー交換が必要になり、実運用のためにはまだ管理コストが高い問題があった。本研究では、上記の低管理コスト無線センサネットワーク方式を拡張し、配送木においてバッテリーを大きく消費する中継ノードの残余電力が一定値未満になった時点で局所的に配送木を再構築することで、近隣ノードの電力を効率的に利用し、ネットワークの寿命を延ばす手法を提案する。シミュレーション評価の結果、経路制御によって全てのノードの電力を平均的に使用する従来の長寿命化手法と比較して、提案手法が大幅に長寿命化できることが明らかになった。本研究により、MAC及び経路制御プロトコルの組み合わせによる消費電力低減効果は、無線センサネットワークの長寿命化に大きく貢献できることを示した。

## 1. はじめに

あらゆる場所にセンサを設置して活用する技術として、IoTが大きな注目を集めている。電源のない場所にセンサ端末を設置して無線マルチホップ通信によりセンシングデータを集める無線センサネットワーク (WSN: Wireless Sensor Network) は、IoTの実用化に大きく寄与する技術として、盛んに研究されている。WSNは、これまでセンサを設置することが困難であった場所にもセンサ端末を設置することができ、環境センシング等の現実的な応用も見込めることから、防災や製造業といった広い分野で応用が検討されている [1]。

WSNの他の無線マルチホップ通信にはない特徴として、多くの場合バッテリーによる駆動が要求される点がある。WSNを長期にわたり安定して実運用するには、省電力化によるノードの長寿命化の実現が必要である。そこで、近年ではIEEE802.15.4[2]といったWSNに適応させた省電

力な通信規格が標準化されている。しかしながら、標準的な乾電池やボタン電池を用いた場合には、1~2年程度のノード寿命しか実現できない。WSNを社会において安定して実運用するにあたっては、乾電池等の現実的な電源を用いるセンサノードにより、敷設してから10年程度の長期間にわたり継続的に運用できることが望ましいが、現行のプロトコルを用いる場合では困難である。

そこで、ノードの省電力化に加えて、電池交換等の管理に係るコストを低減することで、より長期的な安定運用を達成するWSN構築手法として、小島らによって「低管理コスト無線センサネットワーク」が提案されている [3]。しかし、低管理コスト無線センサネットワークでは、ノード故障等に起因するトポロジ変化が配送木のある一か所で発生した際に、配送木に属する全てのノードにより配送木が再構築される。これは、消費電力の浪費であるだけでなく、大規模なネットワークではノード数に比例して再構築の頻度が高くなるため、スケラビリティの問題が生じる。この問題を防ぐためには、ノード故障等のトポロジ変化に対して、局所的な配送木の再構築法が必要である。

本研究では、小島らによる低管理コスト無線センサネットワークの拡張として、トポロジ変化に対する局所的な修復手法を提案する。さらに提案手法を、残余電力を有効利

<sup>1</sup> 和歌山大学大学院システム工学研究科

和歌山県和歌山市栄谷 930 番地

<sup>2</sup> 和歌山大学システム工学部

和歌山県和歌山市栄谷 930 番地

a) m\_yokotani@fw.ipsj.or.jp

b) tac@sys.wakayama-u.ac.jp

用しネットワークを長寿命化するために応用する。つまり、配送木を構成するノードの残余電力が低下した場合に、これら避けるように配送木を再構築する。WSNが自律的に残余電力の低下を検出し、適応的に配送木の局所修復を繰り返すことにより、ネットワーク全体の電力を有効利用し、長寿命なセンサネットワークを実現する。従来手法として、全ノードの電力を平均的に消費する経路制御法によりネットワークを長寿命化する手法は知られているが[4][5]、提案手法はMACプロトコルと経路制御の組み合わせ効果によりさらに消費電力効率を高め、従来法よりも大幅な長寿命化を実現する。

提案手法は、3つの部分から成る。まず、MACプロトコルは、小島らの手法と同じ方法を用いる。基本的には受信ノード主導型MACプロトコルRI-MAC [6]を用いるが、配送木の葉ノードとそれ以外のノード(中継ノードと呼ぶ)を区別し、受信が不要な葉ノードのビーコン送信を停止する。次に、経路制御プロトコルは、消費電力の低い葉ノードの割合をできるだけ大きくする小島らの手法を踏襲し、局所的な修復が可能になるように拡張する。小島らの方法では、葉ノードはビーコンを停止し任意ノードからの受信ができないため、葉ノードが修復処理に参加する場合には、配送木に沿ってメッセージ交換をする必要があった。これに対して提案手法では、局所修復を行うために、配送木による直接的な接続がない近隣ノードともメッセージ交換を可能にする仕組みを導入する。具体的には、近隣ノードに連絡するための連絡ホップを適切に設定し、トポロジ変化時には連絡ホップを用いて全ての近隣ノードがメッセージ交換することで、局所的に配送木を修復する。

本論文は以下のように構成される。第2章で関連研究を紹介する。第3章で本研究の基礎となる小島らによる低管理コストセンサ無線ネットワークについて述べた後、第4章で提案手法を説明する。第5章ではシミュレーションにより提案手法によるネットワークの長寿命化の効果を評価し、最後に第6章でまとめる。

## 2. 関連研究

### 2.1 低消費電力MACプロトコル

ネットワーク全体の消費電力を低く抑える低消費電力MACプロトコルが数多く提案されている。これらは、ノードを定期的にスリープさせながら、タイミングを合わせて隣接ノード間のデータ通信を行うことで、通信データ量に見合った低い消費電力で信頼性のある通信を実現する。B-MAC[7]とX-MAC[8]は、送信ノード主導のMACプロトコルである。B-MACは、ノードが一定時間毎にスリープとウェイクを繰り返し、データ送信時にはその時間間隔よりも長いプリアンブルを送ることで、データ送信時に受信ノードがウェイク状態で待機できる。しかし、送信ノード主導型MACプロトコルは、プリアンブル送信等の送受信

タイミング同期処理にかかる電力が大きく、消費電力の低減には限界がある。より消費電力が低い効率的なMACプロトコルとして、RI-MAC[6]やRC-MAC[9]等の受信ノード主導型MACプロトコルが提案されている。これらのプロトコルでは、受信ノードが定期的にビーコンを送信し、送信したいフレームを持つノード(送信ノード)は、ビーコンを受信した時に受信ノードにフレームを送信する。送信ノードはビーコンを受信するまで受信待受状態で待てば良いため、プリアンブルを長時間送信するよりも消費電力を低く抑えられる。しかし、受信ノード主導型MACプロトコルにおいては、定期的なビーコン送信が電力消費に占める割合が大きいことが、長いノード寿命の実現に当たって問題となる。

### 2.2 長寿命化のための経路制御

経路制御に関しては、センサネットワークに適した配送木を構築する手法が多数提案されている。Luoらは、複数存在する最短路木の中から、センサネットワークの生存時間を最大化するような配送木を構築するアルゴリズムを提案した[10]。Kuoらは、屋内の電源が接続されたセンサネットワーク等を対象として、ネットワーク全体の消費電力を最小化するような配送木を構築するアルゴリズムを提案した[11]。しかし、これらは最適化問題を定式化して解く集中制御に基づいた方法を提案しており、故障等によるトポロジの変化に対応して自律分散的に配送木を計算することはできない。消費電力を全ノードで均等化する動的な経路制御方式も提案されている[4][5]。これらは、できるだけ残余電力が大きいノードを用いて配送木を維持することで、各ノードの電力を均等に利用し、ネットワークを長寿命化する。しかし、これらは経路制御のみでの長寿命化を目指しており、長寿命化の効果が限定される。また、未だに受信ノード主導型MACプロトコルを想定したネットワーク長寿命化のための動的な経路制御手法は存在しない。

## 3. 低管理コスト無線センサネットワーク [3]

### 3.1 想定する環境

本論文では、何らかのセンサと無線通信機能を持ったセンサノードを、フィールド上に多数設置したWSNを想定する。各センサノードは一定時間ごとにセンサからデータを取得してデータパケットを生成し、フィールド上に存在するシンクノードへマルチホップ通信を用いてデータパケットを転送する。また、各ノードの送受信電力は一定であり、シンクノードまで複数の経路を用いることが可能な程度にノードは密に設置されていることとする。

### 3.2 受信ノード主導型MACプロトコル

低管理コスト無線センサネットワークのMACプロトコルは、受信ノード主導型MACプロトコルのひとつである

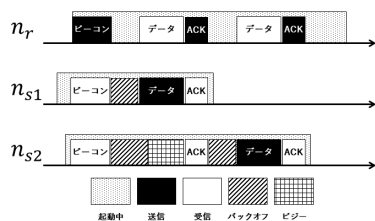


図 1 RI-MAC 送受信手順

RI-MAC[6]を基礎としている。ここではRI-MACの動作について簡単に説明する。

RI-MACにおけるデータフレーム送受信手順を図1に示す。データフレームを受信する受信ノード $n_r$ は、定期的に周囲のノードに対してビーコンを送信する。送信するデータを持つ送信ノード $n_{s1}, n_{s2}$ は、ビーコンに合わせてスリープ状態からウェイクする。受信ノードから送信されたビーコンを受信すると、送信ノード $n_{s1}, n_{s2}$ は、ランダム時間のバックオフ待機後に、データフレームの送信を開始する。待機中に他のノードによるデータ送信が開始されたことを検知した場合は、データの送信をキャンセルすることで、データフレームの衝突を回避する。図1では、 $n_{s1}$ のバックオフ時間が $n_{s2}$ のバックオフ時間に比べて短いため、 $n_{s1}$ が先に送信を開始する。受信ノード $n_r$ はデータフレームの受信が正常に完了すると、送信ノード $n_{s1}$ に対してACKフレームを送信し、ACKフレームを受信した送信ノード $n_{s1}$ はスリープ状態に移行する。受信ノード $n_r$ は周囲のノードとビーコンを送信するスケジュールを適切にずらすことにより、周囲との通信の衝突を避けることが可能である。

### 3.3 低管理コスト無線センサネットワークの概要

センサノードの長寿命化を達成しながら、定期的に電池交換やノード交換が必要な、データ転送を行うノードの数を削減したネットワークを形成することで、長期運用が可能な管理コストを抑えた無線センサネットワークを構築する試みとして、小島らによって「低管理コスト無線センサネットワーク」が提案されている[3]。低管理コスト無線センサネットワークは、RI-MACを改良したMACプロトコルと、新たに提案された、配送木を自律分散的に構築する経路制御プロトコルを組み合わせた効果により、管理コストの低減を達成する。低管理コスト無線センサネットワークには次のような特徴がある。

- 葉ノードを省電力化するMACプロトコルにより、運用中の電池交換を不要にする。
- 経路制御プロトコルにより、定期的に電池交換を要する中継ノードの数が少ない配送木を構築する。
- それぞれ改良したMACプロトコルと経路制御プロトコルを組み合わせることで従来以上の長期運用を低コ

ストに実現する。

### 3.4 MACプロトコルの概要

まず、低管理コスト無線センサネットワークのMACプロトコルについて説明する。マルチホップ通信でシンクノードへセンシングデータを送信する場合、配送木の末端に位置するノード(葉ノード)はセンシングデータを定期的に生成してデータ送信先ノード(次ホップノード)に送信するだけでなく、他のノードのデータを転送する必要はない。そこで、RI-MACにおいて他ノードからのデータ受信時に要する、ビーコンの定期的な送信を停止する。これにより、葉ノードは、次ホップノードからのACKフレーム以外の一切のデータ受信ができなくなるが、消費電力において大きな割合を占めているビーコン送信およびウェイク時間が削減されることで、葉ノードは大幅に省電力化、長寿命化され、電池交換なしに非常に長期間動作することが可能となる。他のノードから受信したデータを転送する必要がある中継ノードは、RI-MACに準じて、定期的にビーコンを送信する。

また、自律分散的に配送木を構築するために制御メッセージのブロードキャストが必要となるが、RI-MACではブロードキャスト通信をサポートしていない。そこで、低管理コスト無線センサネットワークでは「定常状態」と「配送木構築状態」の2状態を新たに導入することにより、これを実現する。「定常状態」では先述の通り葉ノードはビーコン送信を停止し、中継ノードはRI-MACに準じて動作する。「配送木構築状態」では、RI-MACと同様に定期的なビーコンの送信を行うが、ノードはスリープ状態には移行せず常に受信待機状態となる。すなわち、配送木構築状態にあるノードは常時フレームの送受信が可能であることから、制御メッセージのブロードキャストが可能となる。配送木構築状態は常に受信待機状態であるため、消費電力量が大きい。そのため、ノードが配送木構築状態となってから一定時間が経過すると定常状態に遷移することとする。

### 3.5 経路制御プロトコルの概要

次に、経路制御プロトコルについて説明する。低管理コスト無線センサネットワークでは、MACプロトコルにより、定常状態における葉ノードの寿命を大幅に延長した。しかしながら、中継ノードはRI-MACに準じて動作するため、葉ノードに比べて寿命が非常に短く、ネットワークを維持するには中継ノードの定期的なバッテリー交換が必要となる。経路制御プロトコルでは、バッテリー交換に要する管理コストを抑えるため、少数の中継ノードに通信を集中させることによって、中継ノードの数を削減するような配送木を構築する。

配送木の構築は、ノードが配送木構築状態にあるときに実行される。まず、各ノードはシンクノードから最短

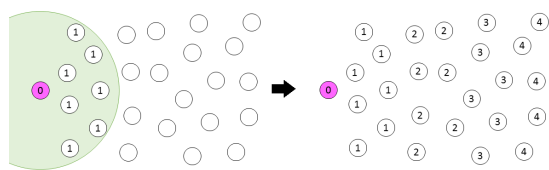


図 2 シンクノードからのホップ数把握

で到達できるホップ数の把握を行う。初期状態では、シンクノード  $n_{sink}$  のみがシンクノードからの最短ホップ数  $level(n_{sink}) = 0$  であり、他のノードはシンクノードからの最短ホップ数が無限大 ( $\infty$ ) で初期化されている。ノード  $n_s$  は定期的に送信する制御メッセージに自身の持つシンクノードからの最短ホップ数  $level(n_s)$  を含める。  $n_s$  から制御メッセージを受信したノード  $n_r$  は、制御メッセージに含まれる  $level(n_s)$  と  $n_r$  の持つ  $level(n_r)$  を比較し、  $level(n_r) > level(n_s) + 1$  であれば、  $level(n_r)$  を  $level(n_s) + 1$  に更新する。この動作を各ノードが繰り返すことにより、全てのノードのシンクノードからの最短ホップ数が確定する。図 2 は、シンクノードに近いノードから順にシンクノードからのホップ数が決定され、最終的に全てのノードがシンクノードからの正しいホップ数を把握することを表している。

次に、各ノードは次ホップの選択を行う。各ノード  $n$  は、制御メッセージに  $level(n)$  に加えて、次ホップ ID  $par(n)$  と、子孫ノード数  $children(n)$  を含めてブロードキャストを行う。制御メッセージを受け取ったノードは、隣接ノード集合から子孫ノード数が最大のノードを次ホップとして選択することで、データ転送を一部のノードへと集約させるような配送木を構築することが可能となる。この時、中継ノード ( $par(n) > 0$ ) はシンクノードからの最短ホップ数が 1 小さいノード、葉ノード ( $par(n) = 0$ ) はシンクノードからの最短ホップ数が同じもしくは 1 小さいノードを選択することで、ループが発生することを防ぐ。配送木構築開始から一定時間経過後、全ノードが配送木構築状態から定常状態に移移することにより、経路制御プロトコルによる配送木構築処理が完了する。

また、図 3 を用いて、低管理コスト無線センサネットワークによる次ホップ選択を説明する。ノードの数字はシンクノードからの最短ホップ数を表している。子孫ノードがある中継ノード E は隣接するシンクノードからのホップ数が 1 小さい中継ノード C を次ホップとして選択する。子孫ノードが無い葉ノード D の次ホップの候補は隣接するノード B または C である。図 3 の場合は子孫ノード数が最大のノード C を次ホップに選択する。

### 3.6 低管理コスト無線センサネットワークの問題

全ノードが定常状態となった後、ネットワーク運用中にノードの故障等によりネットワークに障害が発生するこ

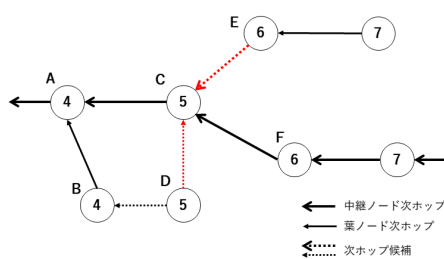


図 3 低管理コスト無線センサネットワークの経路制御プロトコルによる次ホップ選択

とが考えられる。障害によりネットワークが分断された場合、データパケットをシンクノードに収集することができなくなるため、配送木の再構築が必要である。低管理コスト無線センサネットワークでは、各ノードが受信した制御メッセージの情報を用いて、次ホップを再選択することで配送木を再構築するため、障害発生地点の周辺にあるノードは、制御メッセージを送受信できる配送木構築状態に移移しなくてはならない。

低管理コスト無線センサネットワークでは、障害を検出した地点から、各フレームに用意されたフラグを用いて、配送木を辿りながらネットワークに属する全ノードを配送木構築状態へと移移させ、経路制御プロトコルに従って各ノードが次ホップを再選択することで、配送木を再構築する。配送木構築状態にあるノードは常に受信待機状態であることから、消費電力量が定常状態時に比べてかなり大きいため、次ホップを再選択する必要がないノードまで配送木構築状態に移移して、次ホップの再選択を行うことは、非常に電力の無駄が大きい。また、ノード当たりの故障確率が同じとすると、ネットワークの規模が大きくなるにつれ、ネットワーク全体での単位時間当たりの故障発生確率が大きくなり、故障発生回数が増大する。すなわち、ネットワークの拡張性（スケーラビリティ）の問題がある。

これは、定常状態にある葉ノードは、他のノードからフレームを受信するために必要なビーコン送信を停止しているため、次ホップ以外のノードから、何らかのフレームを送信することが困難であるためである。隣接する中継ノードに対しては、ビーコン送信を受信待機状態で待機することにより、RI-MAC の動作に従ってフレームを送信することができるが、低管理コスト無線センサネットワークの経路制御プロトコルでは、中継ノードを可能な限り削減する経路木を構築することから、必然的に中継ノード間の物理的な距離が大きくなり、障害発生ノードの周辺にあるノードの通信可能範囲内に中継ノードが存在する保証はできない。そのため、低管理コスト無線センサネットワークでは、トポロジ変化発生地点の周辺のノードを確実に配送木構築状態に移移させるために、配送木を辿って全ノードを配送木構築状態へと移移させる必要がある。

## 4. 配送木の局所的再構築による長寿命化手法

### 4.1 概要

提案手法では、小島らの手法 [3] を拡張し、トポロジ変化時及び残余電力の低下時に局所的に配送木を再構築することで、従来と比べて大幅な長寿命化を実現する。配送木の再構築は、残余電力が一定値以下のノードが必ず葉ノードとなるように行われる。つまり、再構築のたびに、残余電力が比較的大きいノードが順に中継ノードとなり、近隣ノードの電力を効率利用してネットワークを長寿命化する。全ノードの電力を均等に利用する経路制御による従来手法と比べると、提案手法は葉ノードのピーコンを停止し、中継ノード以外の電力消費を温存することで、各ノードの残余電力を順番に使用することを可能とし、ネットワークを長寿命化できる。なお、提案手法の配送木再構築は相応の電力を消費するため、残余電力が一定値を下回った場合にのみ配送木を再構築することで、頻繁な配送木の再構築を防止する。

配送木の再構築にあたり、小島らの手法に対して、必要最低限の局所領域内のノードのみを配送木構築状態として再構築を行うことが可能となるように拡張を行う。これを実現するにあたっては、葉ノードがピーコンを送信しないことが問題となる。図4に例を示す。図4(a)は配送木が構築され、全ノードが定常状態となった状態で、ノードDの故障によりリンク(E, D)が切れた場面である。提案手法で目指すのは次ホップが変わるノード数を最小化して局所的に修復することであり、この例ではノードEとKが次ホップを変更してHに接続することで、2ノードのみの変化で配送木が再構築できる(図4(b)) (処理の便宜上、提案手法ではLの次ホップも変更される)。このためにはHはKの次ホップに選択されたことを知って中継ノードに変化する必要があるが、Hはピーコンを送信しないため、中継ノードに変化するための制御メッセージをKから受信できないことが問題となる。

この問題を解決するために、提案手法では、KがHを「連絡ホップ」として選択しておき、定期的にKeep Aliveフレームを送ることで、トポロジ変化時にKからHへの制御メッセージの伝達を可能にする。提案手法では、多様なトポロジ変化に対して配送木の局所修復ができるように、すべての葉ノードが連絡ホップを設定する。

故障等によりトポロジが変化した場合には、変化箇所の子にあたる中継ノードを開始点として、配送木を修復できる連絡ホップでできるだけ故障箇所に近いものを探索する。そのような連絡ホップが発見されると、できるだけ少ないノードが次ホップを変更し、配送木を修復する。図4(a)では、リンク(E, D)が切断されると、探索の開始点である中継ノードE、その子である葉ノードKとLが配送木構築

状態になり、配送木の修復を試みる。この場合には、E, K, Lが次ホップを更新して配送木を修復できるため、それ以外のノードは配送木構築状態になることなく、配送木の修復が完了する。もしこの範囲で配送木が修復できなかった場合にも、Eの子孫の中継ノード(とその子である葉ノード)にも順次探索範囲を広げ、配送木の修復を試みる。

以下、4.2節で残余電力低下時に配送木の再構築を開始する手法、4.3節で連絡ホップの選択法、4.4節でトポロジ変化時の配送木の修復法を、詳細に説明する。

### 4.2 残余電力に基づいた配送木再構築の開始

提案手法において、ノードの残余電力に基づいて配送木再構築を開始する手法について述べる。提案手法では、定常状態でネットワークを運用している間に、中継ノード $n_x$ の残余電力が、あらかじめ設定した閾値 $C_{change}$ を下回ると、以後送信する全ての送信フレームに、残余電力が低下していることを表すフラグを立てて送受信を行い、 $n_x$ の次ホップおよび子ノードに $n_x$ の残余電力が低下していることを伝達したのち、一定時間経過後に葉ノードとなる。これに合わせて、4.4節で述べる配送木の再構築動作により、ノード $n_x$ の周辺にあるノードにより局所的に配送木が再構築が開始される。

配送木の再構築により新たに選択する中継ノードは、残余電力があらかじめ設定した閾値 $C_{slimit}$ よりも大きく、比較的寿命が長いノードを選択する。これにより、中継ノード以外のノードの電力を再構築時まで温存しつつ、周辺のノードの電力を順に使用することが可能となる。なお、中継ノードに新たに選択できる最低残余電力量 $C_{slimit}$ は $C_{slimit} > C_{change}$ となるように設定する。これは、残余電力が $C_{change}$ をわずかに上回っているようなノードが新たに中継ノードとして選択されないようにすることで、消費電力量の大きい配送木の再構築動作が、同じ個所で連続して発生することを防止するためである。

中継ノードは、残余電力が $C_{change}$ 以下になったときに葉ノードとなることで、ノード寿命を大幅に延長することができる。図5を用いて説明する。図5はある中継ノード $n$ の残余電力 $C(n)$ を縦軸、運用開始からの経過時間を横軸としたグラフである。時刻 $t = 0$ から時刻 $t = t_{change}$ までは、中継ノードとして動作している。中継ノードは定期的なピーコンの送信や子孫ノードから送信されたデータパケットの転送を行うため消費電力量が大きく、このまま運用を続けるとノード $n$ は時刻 $t = t_{end1}$ で $C(n) = 0$ となる。そこで、残余電力 $C(n)$ が閾値 $C_{change}$ を下回るとノード $n$ は葉ノードとして動作するようにする。葉ノードは先述したように、他ノードのデータパケットを転送せず、定期的なピーコンの送信も停止することから、非常に消費電力量が小さくなる。これにより、本来 $t_{end1}$ までであった寿命を $t_{end2}$ まで延長させることが可能となる。

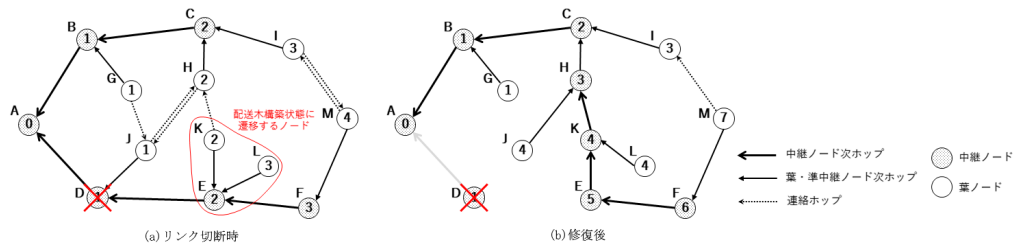


図 4 配送木再構築の概要

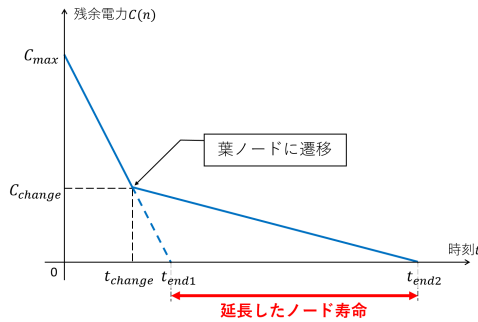


図 5 残余電力による葉ノードへの移移

#### 4.3 配送木再構築の準備：連絡ホップの選択

0 定常状態時における配送木再構築の準備として、配送木の局所的再構築に用いる連絡ホップの選択方法を述べる。先述の通り、提案手法では、全ての葉ノードが連絡ホップを設定することにより、できるだけ多様なトポロジ変化に対して局所修復を可能にする。ある葉ノード  $n_x$  が連絡ホップを選択する場合を考える。 $n_x$  は、連絡ホップとして、配送木を修復できるノードを選択する必要がある。提案手法では、葉ノード  $n_x$  は、次ホップ  $par(n_x)$ 、及び次々ホップ  $par(par(n_x))$  のいずれかが故障した場合にも配送木を修復できるような連絡ホップを配送木構築時に探索し、選択する。上記の条件を満たすためには、 $n_x$  は自分の次々ホップの子孫  $D(par(par(n_x)))$  以外のノードを連絡ホップに選択すれば良い。図 4(a) の例では、ノード K は、J、E、または L を連絡ホップに選択すると、次々ホップ D または次々ホップ E の故障時に配送木を修復できないが、 $D(par(par(n_x)))$  に含まれない H を連絡ホップとすれば、配送木の修復が可能になる。

連絡ホップによる制御メッセージの伝達は、連絡ホップに選択されたノードが中継ノードと同様に定期的にビーコンを送信することで行う。葉ノード  $n_x$  が葉ノード  $n_r$  を連絡ホップに選択したとすると、 $n_x$  と  $n_r$  の両方が配送木構築状態である間に、 $n_x$  が送信した制御メッセージを  $n_r$  が受信する。制御メッセージには  $n_x$  が選択した連絡ホップが含まれており、これを  $n_r$  が受信することで、 $n_r$  は  $n_x$  の連絡ホップに選択されたことを知る。連絡ホップに選択されると、 $n_r$  は、配送木における位置は葉ノードだが中

継ノードと同様に定期的にビーコンを送信することで他のノードからのフレームを受信することができる「準中継ノード」となる。葉ノードである  $n_x$  は、定常状態になると制御メッセージを送信しなくなるが、 $n_r$  が送信したビーコンに対して定期的に連絡ホップ維持のための最小限の情報を持った擬似データフレーム (Keep Alive フレーム) を返信する。 $n_r$  は Keep Alive フレームを 1 つ以上のノードから受信できている間は準中継ノードであり続け、Keep Alive フレームの受信が途切れると、 $n_x$  が連絡ホップを変えたと判断して葉ノードに戻る。なお、準中継ノードは葉ノードと同様に連絡ホップを選択することとする。全ての葉ノードおよび準中継ノードは、 $n_x$  と同様に連絡ホップを選択し、連絡ホップに制御メッセージを送信できる状態を維持する。

準中継ノードは他ノードから送信されたデータの転送は行わないが、定期的にビーコンを送信するため、中継ノードと同等の電力を消費する。従って、ネットワーク全体の省電力化を目指すためには、その数をできるだけ少なく抑えることが望ましい。提案手法では、多くの葉ノードができるだけ共通のノードを連絡ホップに選択することで、準中継ノードの数を低減する。このために、3 節で述べた次ホップの選択法と同様に、他のノードからできるだけ多く連絡ホップとして選択されているノードを、連絡ホップとして選択する。具体的には、提案手法では、制御メッセージに、2 つのフィールド「連絡ホップ」と「連絡ホップ被選択数」を追加する。「連絡ホップ」フィールドにより、各ノードは自分を連絡ホップとして選んでいるノードを知り、その数を連絡ホップ被選択数として制御メッセージに含めて送信する。各葉ノードおよび準中継ノードは、隣接ノードの中に  $D(par(par(n_x)))$  に含まれない中継ノードがなければ (中継ノードに対して他のノードから制御メッセージを送ることは可能なので、あれば連絡ホップを設定する必要がない)、 $D(par(par(n_x)))$  に含まれない葉ノードもしくは準中継ノードの中で、連絡ホップ被選択数が最大のノードを、自分の連絡ホップとして選択する。上記の処理により、全ての葉ノードは、できるだけ準中継ノードの数が少なくなるように、配送木の修復が可能な連絡ホップを選択する。

#### 4.4 配送木の再構築

ノード故障発生時や、残余電力の減少に伴う中継ノードの葉ノードへの遷移に伴うトポロジ変化時には、連絡ホップを用いて局所的に配送木を再構築する。できるだけ少数のノードが配送木構築状態となって再構築を完了するために、配送木構築状態となるノードの範囲が少しずつ拡大するように制御する。

各ノード  $n$  は、自分の次ホップからのビーコンを一定時間受信できなければ、トポロジ変化により次ホップへの到達性が失われたと判断し、配送木構築状態に遷移する。また、中継ノードの残余電力減少により開始した再構築時には、葉ノードに遷移する中継ノードは全ての送信フレームに特定のフラグを立てて送信を行う。このフラグが立ったフレームを受け取った親子ノードも配送木構築状態に遷移する。次ホップへの到達性が失われたノードは、シンクノードまで到達する経路も失うため、シンクノードからのホップ数  $level(n)$  を無限大 ( $\infty$ ) で初期化する。配送木構築状態に遷移して、さらに  $level(n)$  が  $\infty$  になると、以後送信するフレームに「トポロジ変化フラグ」を立て、中継ノードの場合はその子ノードに周知する。子ノードは、次ホップ  $par(n)$  のトポロジ変化フラグが立っていることを検知すると配送木構築状態に遷移する。その後、次ホップ  $par(n)$  から送信された制御メッセージ受信時に、次ホップがもつ  $level(par(n))$  が  $\infty$  であれば、自身のもつ  $level(n)$  も  $\infty$  に更新する。このようにして、トポロジ変更を検出したノードの子孫が順次、配送木構築状態に遷移し、配送木構築状態であるノードの範囲が拡大する。

一方、配送木構築状態に遷移したノード  $n_x$  が、シンクノードからのホップ数が  $\infty$  でない隣接するノード  $n_e$  (以後、出口ノードと呼ぶ) を発見すると、出口ノード  $n_e$  の  $level(n_e)$  に1加算した値をノード  $n_x$  のシンクノードからのホップ数  $level(n_x)$  として設定する。各中継ノード、準中継ノードが、送信するビーコンにはシンクノードからのホップ数が含まれており、この値を通じてシンクノードからのホップ数が  $\infty$  でないノードを発見できる。出口ノードが連絡ホップであれば、出口ノード  $n_e$  を次ホップ  $par(n_x)$  として選択して、次ホップ ID を含めたメッセージを出口ノード  $n_e$  に送信する。出口ノード  $n_e$  は  $n_x$  から受信したメッセージにより  $n_x$  の次ホップとして選択されていることを知り、中継ノードとなる。(  $n_e$  が中継ノードであれば、何もなくて良い。) その後、フレームの交換によって順次シンクノードからのホップ数が更新され、出口ノードから到達可能なノードは全てシンクノードからのホップ数が  $\infty$  でない値に更新されることで、次ホップが決定される。配送木構築状態になったノードは、シンクノードからのホップ数に  $\infty$  でない値が設定されてから一定時間後に定常状態に遷移する。このため、最終的には全ノードが定常状態に遷移し、配送木の再構築が完了する。

ここで、トポロジ変化を検出したノードの子孫が配送木構築状態になる拡大速度に比べて、出口ノードからの経路情報が伝播する速度が十分に速くなければ、不必要に多くのノードが配送木構築状態になり、電力を浪費してしまう。これを防ぐために、提案手法では、中継ノードは、次ホップのシンクノードからのホップ数が  $\infty$ であることを検出してから一定時間  $T$  以後に、はじめてフレームにトポロジ変化フラグを立てて送信する。(つまり、時間  $T$  が経過するまでに次ホップのシンクノードからのホップ数が  $\infty$  でなくなれば、各フレームにフラグを立てて送信しない。) この遅延  $T$  により、配送木構築状態のノードが拡大する速度を低減し、できるだけ少数のノードのみが配送木構築状態になることで配送木の再構築を実現する。

図4(a)の例では、Dの故障をEが検出すると、E, L, Kが配送木構築状態となり、同時に、E, L, Kのシンクノードからのホップ数が  $\infty$  となる。その後、Kが出口ノードHを発見し、制御メッセージによりこの情報が伝播することで、E, L, Kのシンクノードからのホップ数が(H経由のシンクノードからのホップ数に)設定され、再構築が完了する。もし、連絡ホップ(K, H)が存在しないと仮定すれば、E, L, Kのシンクノードからのホップ数は  $\infty$  のままであるが、この場合には、時間  $T$  が経過すると、FとMが配送木構築状態となる。その後は、Mが出口ノードIを発見し、その情報が伝播することで、配送木構築状態になった全ノードE, L, K, J, Mのシンクノードからのホップ数はIを経由したものに更新される。

なお小島らによる低管理コスト無線センサネットワークでは、次ホップのシンクノードからのホップ数が変更された場合はトポロジ変化が発生したと判断して配送木構築状態に遷移する。提案手法では配送木構築状態に遷移するノード数を抑えるため、定常状態の次ホップのシンクノードからのホップ数が変更された場合は、配送木構築状態になることなくシンクノードからのホップ数を更新することとする。

## 5. 評価

### 5.1 評価目的

本研究における提案手法では、低管理コストセンサネットワークを拡張し、配送木においてバッテリーを大きく消費する中継ノードの残余電力が一定値未満になった時点で局所的に配送木を再構築することで、近隣ノードの電力を効率的に利用し、ネットワークの寿命を延長することを目標としている。提案手法により、経路制御プロトコルのみによって長寿命化を実現することを目指す手法と比較して、ネットワーク寿命を延長できていることを確かめるため、定常状態として動作を開始してから、ネットワーク寿命に達するまでの時間を評価指標として、シミュレーションによる評価実験を実施する。

### 5.2 評価方法

提案手法を組み込んだ低管理コスト無線センサネットワークを、C++によるシミュレーションプログラムに実装し、シミュレーションプログラム上で、ノードをランダム配置して提案手法を動作させた。シミュレーションでは、初期配送木の構築、定常状態において一定時間毎に発生するデータパケットをシンクノードに集約する動作とそれに伴う電力消費、電池残量の低下に伴う局所的な配送木の再構築動作を実装し、動作の模倣を行った。

シミュレーションの具体的なシナリオについて述べる。本実験では、500[m]×500[m]のフィールド上にノードを図6のようにランダムに  $n$  個配置し、シンクノードをフィールドの中央に設置する(図6中央赤丸内のノード)。各ノードの通信可能範囲は半径100[m]の円内とする。

シミュレーションのパラメータを表1に示す。シミュレーションでは、初期の配送木構築が終了したのち、全ノードが定常動作を開始してから、ネットワーク寿命に達するまでの各ノードの動作を模倣する。定常動作中は各ノードが行った操作から消費電力量を計算して電池残量を減算し、中継ノードから葉ノードへの遷移や、電池残量枯渇に伴う周辺ノードでの配送木の再構築を行う。なお、各ノードの消費電力の計算方法は次節(5.3節)で述べる。

本評価実験では、MACプロトコルと経路制御の組み合わせにより長寿命化を目指す提案手法と異なり、経路制御のみを工夫することで長寿命化を目指す手法を比較手法として用いる。つまり、提案手法の主たるアイデアである、葉ノードのビーコン削減による省電力効果を評価する。評価にあたり、受信ノード主導型MACプロトコル上で動作する従来手法は存在しないことから、経路制御のみで均等に電力を消費する、比較的単純に動作する手法を設計した。

比較手法の動作を具体的に述べる。各ノードは、RI-MACに準じて定期的にビーコンを周囲のノードに送信する。ビーコンを送信する度に、シンクノードからの最短ホップ数が1小さい隣接ノード集合から、ランダムに1つを次ホップに選択する。比較手法に関しても、提案手法と同様に定常動作を開始してからネットワーク寿命に達するまでの各ノードの動作を模倣する。

評価指標には、定常状態として動作を開始してから計測したネットワーク寿命を用いる。ネットワーク寿命は、最初に電池残量が枯渇したノードが発生するまでの時間と、最初にシンクノードまでの経路が確保できないノードが発生し、配送木の再構築による修復が不可能になる(ネットワークが分断される)までの時間のうち、短い方の値を用いる。また、シミュレーションは構成ノード数  $n$  ごとに5回ずつ実施し、平均値を用いる。

### 5.3 電力消費の計算方法

評価に用いるシミュレーションプログラムでは、ノード

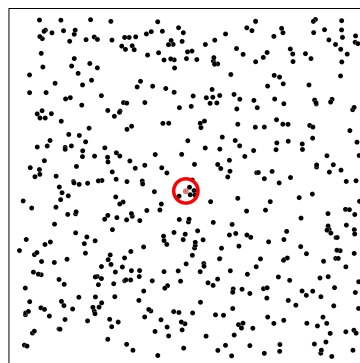


図6 ノード配置例 ( $n = 500$ )

表1 シミュレーションパラメータ

| 変数            | 意味                  | 値               |
|---------------|---------------------|-----------------|
| $C_{batt}$    | バッテリー容量             | 2500[mAh]       |
| $V$           | 動作電力                | 3[V]            |
| $b$           | ビーコン送信間隔            | 60[秒]           |
| $p$           | 制御メッセージ送信間隔         | 60[秒]           |
| $r$           | センシング間隔             | 1800[秒]         |
| $l_{data}$    | データフレームサイズ          | 61[Bytes]       |
| $l_{ack}$     | Ack フレームサイズ         | 31[Bytes]       |
| $l_{beacon}$  | ビーコンサイズ             | 93[Bytes]       |
| $l_{control}$ | 制御メッセージサイズ          | 93[Bytes]       |
| $t_{txwait}$  | 送信時のビーコン待受時間        | 1[秒]            |
| $n$           | 構成ノード数              | 250,500,1000[個] |
| $C_{slimit}$  | 中継ノードとして選択可能な最低残余電力 | 800[mAh]        |
| $C_{change}$  | 中継ノードとして動作可能な最低残余電力 | 700[mAh]        |

表2 消費電力諸元

| 操作            | 時間 [秒]    |                      | 電流 [mA]      |           |
|---------------|-----------|----------------------|--------------|-----------|
|               | $t_{txb}$ | $t_{rxb}$            | $I_{txb}$    | $I_{rxb}$ |
| データ送信 (1 バイト) | $t_{txb}$ | $416 \times 10^{-6}$ | $I_{txb}$    | 20        |
| データ受信 (1 バイト) | $t_{rxb}$ | $416 \times 10^{-6}$ | $I_{rxb}$    | 15        |
| 受信待機          | -         | -                    | $I_{listen}$ | 7         |
| スリープ          | -         | -                    | $I_{sleep}$  | 0.03      |

の消費電力を求めるにあたって、センサネットワークに用いられるハードウェアの1つであるMICA2[12]の仕様を基に算出した表1と表2の電力パラメータ値を用いた電力モデルを使用する。

具体的には、ノードが送受信を開始してから、次に送受信を開始するまでを送受信の1単位としたときに、送受信1単位当たりに行われた操作の回数および時間を測定し、MICA2の電力モデルを表す式に代入することで、消費電力を算出する。回数および時間を測定した操作は、データパケットの送信回数 ( $NUM_{dtx}$ )、データパケットの受信回数 ( $NUM_{drx}$ )、制御メッセージの送信回数 ( $NUM_{ctx}$ )、制御メッセージの受信回数 ( $NUM_{crx}$ )、ACKの送信回数 ( $NUM_{ctx}$ )、ACKの送信回数 ( $NUM_{atx}$ )、ACKの受信回数 ( $NUM_{arx}$ )、スリープ時間 ( $t_{sleep}$ )、受信待機時間 ( $t_{wake}$ )



である。

また、消費電力モデルを表す式は次の式 1 である。

$$E = E_{rx} + E_{tx} + E_{listen} + E_{sleep} \quad (1)$$

$E$  は送受信 1 単位あたりに消費する電力量である。 $E_{rx}$  は受信電力、 $E_{tx}$  は送信電力、 $E_{listen}$  は受信待受電力、 $E_{sleep}$  はスリープに必要な電力である。

データフレームのサイズを  $l_{data}$ 、制御メッセージのサイズを  $l_{control}$ 、ACK のサイズを  $l_{ack}$  としたとき、各値は以下のように計算される。

$E_{tx}$ : 送信電力はデータフレームの送信と制御メッセージの送信、ACK フレームの送信にかかる電力を合算したものである。データフレーム 1 回の送信にかかる電力は  $l_{data}t_{txb}I_{txb}V$  であり、制御メッセージ 1 回の送信にかかる電力は  $l_{control}t_{txb}I_{txb}V$ 、ACK フレーム 1 回の送信にかかる電力は  $l_{ack}t_{txb}I_{txb}V$  であるから、 $E_{tx} = NUM_{dtx}l_{data}t_{txb}I_{txb}V + NUM_{ctx}l_{control}t_{txb}I_{txb}V + NUM_{atx}l_{ack}t_{txb}I_{txb}V$  である。

$E_{rx}$ : 受信電力も送信電力と同じようにデータフレームの受信と制御メッセージの受信、ACK フレームの受信にかかる電力を合算したものである。データフレーム 1 回の受信にかかる電力は  $l_{data}t_{rxb}I_{rxb}V$  であり、制御メッセージ 1 回の受信にかかる電力は  $l_{control}t_{rxb}I_{rxb}V$ 、ACK フレーム 1 回の受信にかかる電力は  $l_{ack}t_{rxb}I_{rxb}V$  であり、 $E_{rx} = NUM_{drx}l_{data}t_{rxb}I_{rxb}V + NUM_{crx}l_{control}t_{rxb}I_{rxb}V + NUM_{arx}l_{ack}t_{rxb}I_{rxb}V$  である。

$E_{listen}$ : 受信待機時間が  $t_{wake}$  である時、消費電力  $E_{listen} = t_{wake}I_{listen}V$  となる。

$E_{sleep}$ : スリープ時間が  $t_{sleep}$  である時の消費電力は  $E_{listen} = t_{sleep}I_{listen}V$  となる。

以上のようにして計算された、1 通信あたりの消費電力量  $E$  を各ノードごとに積算することにより、ノードごとの電池残量をシミュレーションする。

### 5.4 評価結果

表 3 に、シミュレーションの結果求められた、それぞれの構成ノード数  $n$  において、提案手法において定常状態として運用を開始してから初めて配送木の再構築が行われた時刻、ネットワーク寿命に達した時刻、比較手法においてネットワーク寿命に達した時刻を示す。また、表 3 の結果を横軸を構成ノード数、縦軸を発生時刻として示したグラフを図 7 に示す。

表 3、図 7 のシミュレーション結果より、全ての構成ノード数  $n$  において、提案手法が比較手法に対してネットワーク寿命を延長できていることが確認された。特に、 $n = 250, 500$  の場合にはネットワーク寿命を約 1 年延長することができることが確認できた。なお、構成ノード数が増えるにしたがって、提案手法および既存手法共にネット

表 3 シミュレーション結果

|           |           | 構成ノード数 $n$ |        |        |
|-----------|-----------|------------|--------|--------|
|           |           | 250        | 500    | 1000   |
| 提案手法      | ネットワーク寿命  | 1395.0     | 1124.9 | 779.9  |
| 比較手法      | ネットワーク寿命  | 1061.7     | 772.1  | 635.3  |
| (参考) 提案手法 | 初回再構築発生時刻 | 781.4      | 507.7  | 311.21 |

(単位：日)

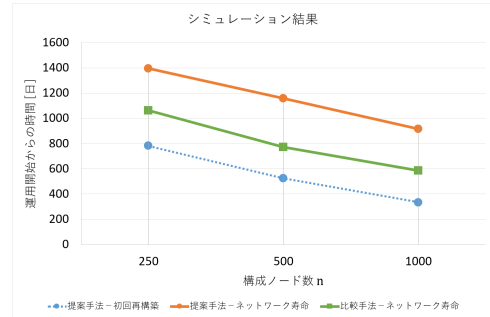


図 7 シミュレーション結果

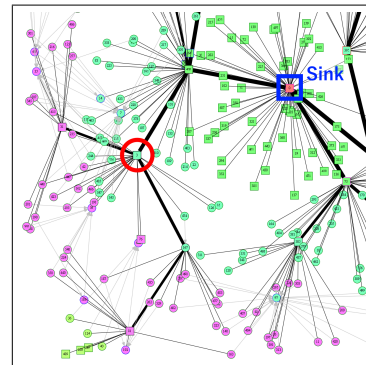
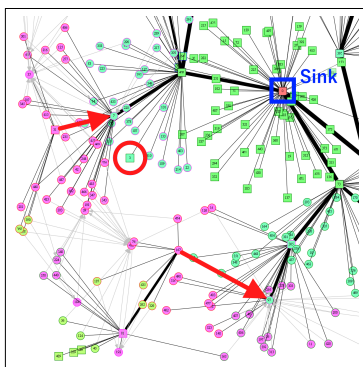


図 8 再構築前の配送木の一例 ( $n = 500$ )

ワーク寿命が短くなっているが、これは構成ノード数増加に伴って各ノードがシンクノードに向けて転送すべきパケット数が増大したため、消費電力量が大きくなったことが原因であると考えられる。

次に、提案手法による配送木の再構築の例を示す。図 8 は再構築前の配送木 ( $n = 500$ ) の一部、図 9 は再構築後の配送木の一部である。図中右上に青色四角で示したノードがシンクノードであり、図の左下に位置するノードからシンクノードへ向けてパケットが送信される。なお、同じ色で塗りつぶされたノードはシンクノードからの最短ホップ数が同じノードであることを示している。図 8 の赤丸で示した中継ノードの残余電力が低下したため葉ノードへの遷移が発生したことから、配送木の局所的な再構築が開始され、再構築の結果、図 9 の赤矢印で示すように異なるノードを中継ノードとして選択していることが確認できる。

図 9 再構築後の配送木の一例 ( $n = 500$ )

## 6. おわりに

本研究では、低管理コストセンサネットワークのネットワーク寿命を延長して管理コストをさらに抑えるため、電力消費が大きい中継ノードの残余電力が一定の値を下回ると、中継ノードから葉ノードに遷移し、中継ノードとして選択しないように配送木を局所的に再構築させることで、葉ノードとして動作していた周辺ノードの残余電力を効率よく使う手法を提案した。また、シミュレーションにより、提案手法の評価実験を行った。

シミュレーションプログラムによる評価実験の結果、提案手法では、ネットワークに属する全てのノードの電力を均等に消費する比較手法に比べ、ネットワーク寿命が長くなることが確認された。

比較手法ではネットワークの全ノードの電力を均等に消費するため、定期的に多数のノードのバッテリーが同時に枯渇し、多くのノードのバッテリー交換が必要となる。それに対して提案手法では、通信を一部のノードに集約させながら周辺のノードの電力を順に使用するため、多数のノードのバッテリーが同時期に枯渇することはない。また、バッテリー残余電力が低下した中継ノードは、省電力な葉ノードとなり動作し続けることから、配送木が維持できている間の任意の時期にバッテリー残余電力が低下したノードのバッテリーを交換するだけで、安定して長期間ネットワークを運用することが可能となると考えられる。

今後の課題として、提案手法においてすべてのノードの残余電力をほぼ同時に使い切るような、より効率的な配送木再構築の制御方法が挙げられる。現状の固定閾値では、ネットワーク寿命到達時の各ノードの残余電力にばらつきがあるため、改善の余地があると考えられる。

提案手法では、送受信電力とスリープ電力の比が大きいほど長寿命化の効果が大きくなるが、評価において用いた MICA2 は比較的古いハードウェアであり、最新機器ではスリープ電力が大きく改善されているため、より提案手法の効果が大きく表れると考えられる。例えば、MICA2 のス

リープ電力は  $0.03[\text{mA}]$  であるが、TelosB[13] では  $5.1[\mu\text{A}]$  まで改善されており、最近の IEEE802.15.4 対応チップではカタログ値で  $1[\mu\text{A}]$  を下回るものも現れている。今後の課題の一つとして、提案手法が動作する最新のハードウェアを探索し、最新技術を反映したシミュレーションや実機実験により、提案手法の可能性を明らかにすることが挙げられる。

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] 小島祥平, 吉廣卓哉: “受信ノード主導型 MAC プロトコルに基づいた管理コストが低い無線センサネットワーク,” 情報処理学会論文誌, Vol.57, No.2, pp.471-479 (2016).
- [4] X. Zhang and Z.D. Wu, “The balance of routing energy consumption in wireless sensor networks,” Journal of Parallel and Distributed Computing, Vol.71 Issue 7, pp.1024-1033 (2011).
- [5] X.H. Li, K.L. Fang, H.P. Chen, H.S. Ho, Energy-balance routing for wireless sensor networks with scale-free characteristic, Telecommunication Networks and Applications Conference (ATNAC) (2012).
- [6] Y. Sum, O. Gurewits, and D. B. Johnson: “RI-MAC: A Receiver-initiated Asynchronous Duty Cycle MAC Protocol for Dynamic Traffic Loads in Wireless Sensor Networks,” In Proc. of SenSys '08, pp.1-14 (2008).
- [7] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, “Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks,” In Proc. of SenSys '04, pp.95-107 (2004).
- [8] M. Buettner, G. Yee, E. Anderson, and R. Han: “X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-cycled Wireless Sensor Networks,” In Proc. of SenSys '06 (2006).
- [9] P. Huang, C. Wang, L. Xiao: “RC-MAC: A Receiver-Centric MAC Protocol for Event-Driven Wireless Sensor Networks,” In Proc. of IWQoS '10 (2010).
- [10] D. Luo, X. Zhu, X. Wu, and G. Chen, “Maximizing Lifetime for the Shortest Aggregation Tree in Wireless Sensor Networks,” In Proc. of INFOCOM '11 (2011).
- [11] T.W. Kuo and M.J. Tsai, “On the Construction of Data Aggregation Tree with Minimum Energy Cost in Wireless Sensor Networks: NP-Completeness and Approximation Algorithms,” In Proc. of INFOCOM '12 (2012).
- [12] J. L. Hill and D.E. Culler, “MICA: A Wireless Platform for Deeply Embedded Networks,” IEEE Micro, Vol.22, No.6, pp.12-24 (2002).
- [13] MEMSIC Inc: “TelosB Data Sheet”, (入手先 ([http://www.memsic.com/userfiles/files/DataSheets/WSN/telosb\\_datasheet.pdf](http://www.memsic.com/userfiles/files/DataSheets/WSN/telosb_datasheet.pdf))) (2016.01.26).