

無線マルチホップセンサネットワークにおける タイムスロット割当て方式のトポロジの違いによる性能評価

長井亮介^{†1} 廣瀬文哉^{†1} 川本良太^{†2}
小室信喜^{†1} 阪田史郎^{†1} 原誠一郎^{†2}

無線センサネットワークでは、バッテリー駆動で数年の稼働が要求されるため、省電力化が重要な課題である。省電力化のためにはパケット衝突による再送を削減することが有効である。そこでMACプロトコルのIEEE 802.15.4では、ビーコンモードにおいて、CSMA/CAによる競争アクセス期間とノードにタイムスロットを割当てて優先的に通信する期間が設けられている。本研究では、クラスタ・ツリー型のマルチホップセンサネットワークにおいて、各ノードのタイムスロットの割当てを順序付けをすることで省電力化するタイムスロット割当て方式を提案する。シミュレーションにより、様々なクラスタ・ツリートポロジのネットワークにおいて行い、トポロジの違いによる評価を比較し、提案方式の有効性を示すとともに考察する。

Performance evaluation by the difference in topology of Time Slot Assignment Scheme in Wireless Multihop Sensor Networks

RYOSUKE NAGAI,^{†1} FUMIYA HIROSE,^{†1}
RYOTA KAWAMOTO,^{†2} NOBUYOSHI KOMURO,^{†1}
SHIRO SAKATA^{†1} and SEIICHIRO HARA^{†2}

In wireless sensor networks, energy saving is highly important because sensor nodes are battery-powered and several-year network lifetime is generally required. It is effective to reduce the number of packet retransmissions caused by collisions. IEEE 802.15.4 MAC protocol defines two types of periods in beacon mode. One is contention-based access period, i.e., CSMA/CA, and the other is TDMA-based contention free access period. This paper proposes a novel energy-efficient timeslot allocation scheme in which the allocation to each intermediate nodes is carried out based on appropriate ordering to reduce packet collisions. Results of simulation, in which various multihop tree networks are compared in terms of energy consumption, transmission delay and delivery ratio, show that the proposed scheme is effective.

1. はじめに

近年、無線通信技術やデバイス技術の発達により、個々のセンサが無線通信を介してネットワークを構築するセンサネットワークが注目されている。また、多数の端末をアクセスポイントの介在なしに相互に多段接続するマルチホップによって送信電力を増加せずに通信距離の延長を可能とする。これにより様々な応用への幅が広がることになる。センサネットワークでは、各ノードは電源供給ではなくバッテリー駆動で数年の稼働が要求されるため、省電力化が重要な課題となっている。しかし、センサネットワークにおいて、シンクノードには各センサノードの情報が収集されるので、シンクノード付近ではトラフィックが増大してしまう。その結果、パケット衝突による輻輳が発生し、消費電力の増加や到達率の低下、遅延の増加といった問題につながる。

無線センサネットワークのMAC層(Media Access Control layer)プロトコルとしてIEEE 802.15.4^{†1}が存在する。IEEE 802.15.4 ビーコンモードでは、CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)による競争アクセス期間(CAP: Contention Access Period)とノードに保証タイムスロット(GTS: Guaranteed Time Slot)を割当てて優先的に通信できる期間(CFP: Contention Free Period)と2つの分けられたスーパ・フレームが存在する。このスーパ・フレームによって、有効な通信ができ、かつ省電力化が実現される。

スーパ・フレームを利用した従来研究では、センサノードからのセンサデータ送信頻度に応じて、スループットを最大化し消費電力を最小化するためタイムスロット割当て方式が提案されている。しかし、従来の方式のトポロジはスター型を前提としており、マルチホップには対応していない。マルチホップで構成されることにより、通信距離が増加され大規模なネットワークを構築できるなどの利点があり、応用の幅を広げることができる。

本稿では、IEEE 802.15.4 ビーコンモードでのクラスタ・ツリー型のマルチホップセンサネットワークにおいて、従来方式を適用させることで、ネットワーク全体でパケット衝突削減により省電力化するタイムスロット割当て方式を提案する。

^{†1} 千葉大学大学院 融合科学研究科

^{†2} アルファシステムズ

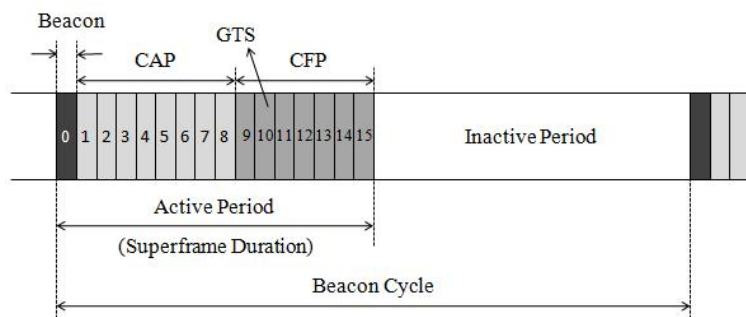


図1 スーパーフレーム構造

2. 従来研究

2.1 IEEE 802.15.4 ビーコンモード

センサネットワークにおいて、省電力化にはスリープ制御の実装が効果的である。しかし、ノード同士が協調するために、他のノードとの衝突をしないようにしなければならない。特に高負荷時には輻輳が発生することで、衝突が起きやすくなる。衝突が起こることでデータを再送することになるので消費電力の浪費につながる。

IEEE 802.15.4 ビーコンモードでは、双方向通信と省電力を両立するためにスーパーフレーム (Superframe) とビーコン (Beacon) が適用されている。スーパーフレーム期間中に、親子関係にあるノードが送受信を行う。

スーパーフレームの構造は、図1に示す。スーパーフレームは、CAP (Contention Access Period) と CFP (Contention Free Period) に分けられる。CAP では、CSMA/CA 方式を利用して通信を行い他のデバイスと競争するアクセス期間である。CFP では、TDMA 方式を利用して通信を行う無競争期間であり、GTS (Guaranteed Time Slot) と呼ばれる保証タイムスロットを用いて、コーディネータが指定するノードが通信を行う。CFP によりノード間同士の衝突を避けることが可能となる。

2.2 従来方式

無線センサネットワークにおけるランダムな時間を待ってからデータを送信する CSMA/CA

と、タイムスロットに時間を分割し割当てを制御する TDMA を併用して通信性能や効率を向上させる方式はこれまで多くの研究がなされている²⁾³⁾。その中でも、IEEE 802.15.4 ビーコンモードにおいて、スーパーフレームを利用した従来研究として、センサノードからのセンサデータ発生頻度に応じてスループット向上と、低消費電力を実現するタイムスロット割当て方式⁴⁾が提案されている。

この従来方式はスター型であるのでシングルホップである。この方式において、通信距離を延ばし、大規模なセンサネットワークに対応すべく、マルチホップネットワーク (クラスタ・ツリー型) への適用を考える。しかし、従来方式は送信頻度が固定されているため、親ノードは一度割当てたら割当てを変更する必要がないので、一度割当てが決まったら割当ては更新が不可能固定である。したがって、このまま従来方式をマルチホップに適用させると、各ノードが個々に割当てを開始を行うことで、割当ての順序によっては消費電力を抑えた割当てが困難になってしまう。さらに、マルチホップでは中継する役目を持つセンサノードに接続していないルータが存在するが、これらのルータにおける割当ての基準が考えられていないという問題がある。

本稿では、各ノードのタイムスロットの割当ての順序付けとセンサに接続していないルータの割当ての基準を設けることでクラスタ・ツリー型のマルチホップセンサネットワークにおいて、従来方式を適用させることにより省電力化する方式⁵⁾を提案し、実際に様々なクラスタ・ツリートポロジのパターンでシミュレーション評価を行うことで、提案方式のトポロジの違いによって比較をし、提案方式の有効性を示すとともに考察する。

3. 提案方式

提案方式では、ネットワークトポロジは下の図2のようにクラスタ・ツリー型である。送信頻度は固定であり、センサノードの移動や、ノード数の増減はないものとする。シンクノードをコーディネータ、センサノードが接続していない中継のみの役割をするノード (中継ルータ) およびセンサノードに接続するノード (エッジルータ) をルータ、センサノードをエンドデバイスとする。センサノードはエッジルータの周辺のみが存在し、割当てを行っていない場合は CSMA/CA で親ノードに送信する。各ルータおよびシンクノードはセンサノードの送信頻度を予め把握しているものとする。

パケットリレー方式でコーディネータから遠いルータからタイムスロットの割当てを開始することで割当ての順序付けをさせる。そのためには、割当てが完了したことを伝える完了通知と完了通知を送信したノードを記憶する管理リスト、そして新たな割当ての基準として

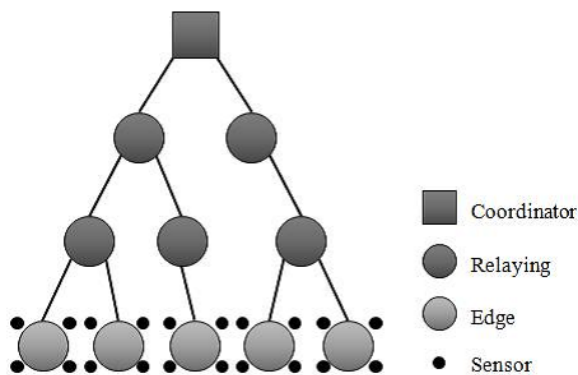


図 2 クラスタ・ツリー型トポロジの例

ビーコン間のトラフィックを提案する。

3.1 タイムスロットの割当ての順序付け

各ノードのタイムスロットの割当ての順序付けさせるために、完了通知と管理リストを提案する。

完了通知とは、中継ルータおよびエッジルータが自身の割当てが完了したときに親ノードに送信するためのものである。完了通知の役目は、各ノードが自身の割当てが終了したときに完了通知を送信することで、その親ノードに割当てが完了したことを知らせることができる。完了通知は割当てが完了した後の次の親ノードのデータ送信する機会に、センサデータと共に送信する。

管理リストとは、中継ルータおよびコーディネータが所持している、それぞれ自身の子ノードの欄があるリストであり、子ノードから完了フラグを受け取ったときその子ノードの欄を ON に変更する。管理リストの役目は、中継ルータおよびコーディネータが現状で自身の子ノードの割当てが完了しているかどうかを確認できる。管理リストから確認した上で、全ての子ノード欄が ON になったら全ての自身の子ノードが完了したことになるので、自身の割当てを開始する。

図 3 に完了リストと管理リストの動作例を示す。まず、管理リストの子ノードの欄は ON になっていないので、親ノードは割当てはできないため待機中である。子ノードは自身の割当てが完了したら、完了通知をセンサデータと共に親ノードに送信する。完了通知を受け

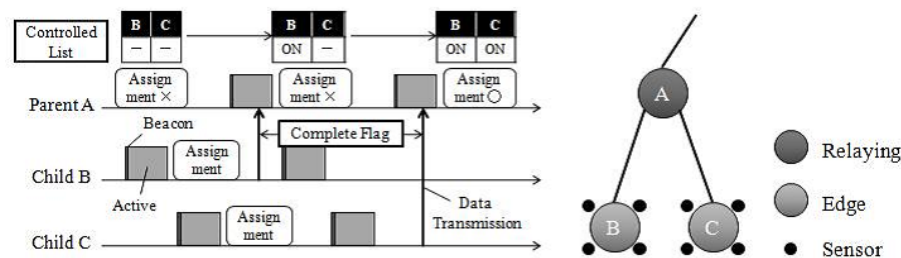


図 3 完了通知と管理リストの動作例

取った親ノードは自身の持つ管理リストのその子ノードの欄を ON にする。図においては、Child B の子ノードが完了通知を送って親ノードである Parent A はその子ノードの欄を ON にしたが、まだ Child C からの完了通知を受け取っていないので、親ノードは割当ては開始できない。そして、Child C が割当てが完了して、完了通知を送信し、親ノードが欄を ON にしたら、この親ノードは全ての子ノードの欄を ON にすることができたので、親ノードの Parent A 自身の割当てを開始する。

3.2 中継ルータおよびコーディネータの割当ての基準

中継ルータおよびコーディネータにおいてセンサノードの送信頻度に代わる割当てを行う基準としてトラフィックの計測を提案する。ここでトラフィックとはネットワーク上を移動する単位時間当たりのデータの量（ビット数）のことである。トラフィックの計測する期間は自身のビーコン間で行い、計測したトラフィックの情報は自身の親ノードにセンサデータと共に送信する。このとき完了通知と同じときに送信する。それぞれ子ノードからトラフィックの計測値が送られた親ノードは、子ノードのトラフィックの計測値に応じて、タイムスロットを割当てて。

図 4 に動作例を示す。中継ルータは、全ての自身の子ノードからの完了通知を受け取り割当てを開始し完了した後、自身のトラフィックの計測を開始するようにする。ここで、割当ては完了しているが、自身の完了通知はまだ親ノードには送信せずに待機しておく。中継ルータでは、自身のビーコン間で一定時間トラフィックの計測を行う。ビーコン間で計測したトラフィックは次の親ノードのセンサデータを送信する機会に、センサデータと共に送信する。このときトラフィックの計測値とともに完了通知も送信する。中継ルータおよびコーディネータは、それぞれ自身の子ノードから送られてきたトラフィックの計測値を用いて、

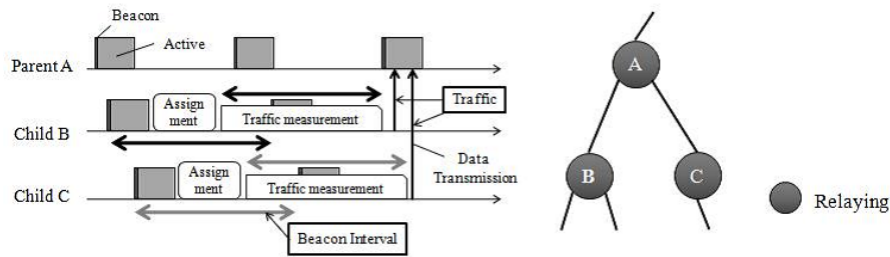


図 4 ビーコン間における動作例

表 1 シミュレーション条件

パラメータ	値
エリア	50m×50m
ノード数	トポロジにより異なる
SO	0
BO	6
ビーコンサイズ	13 [バイト]
バッファサイズ	20 [フレーム]
ビーコン間隔	983.04 [ミリ秒]
アクティブ期間	12.56 [ミリ秒]
シミュレーション時間	30 [分]

送信頻度に代わってトラフィックの計測値を基準にすることで、トラフィックの計測値の大きいルータに優先的にタイムスロットを割当てる。

4. シミュレーション評価

4.1 シミュレーション諸元

提案方式の有効性を検証するため、計算機シミュレーションによる性能評価を行った。シミュレーションより従来方式の IEEE 802.15.4 と提案方式の実装をし、ネットワーク全体でのトラフィックを変化させたときの総消費電力、配信率、遅延について比較した。シミュレーション条件を表 1 に示す。

ネットワークトポロジ（以下トポロジ）はクラスター・ツリー型であり、4つのパターン別のトポロジにおいてシミュレーションを行うことにより、どのトポロジでも提案方式が有効であるかを示すと同時に、トポロジの違いによる評価を比較し考察する。トポロジの4つ

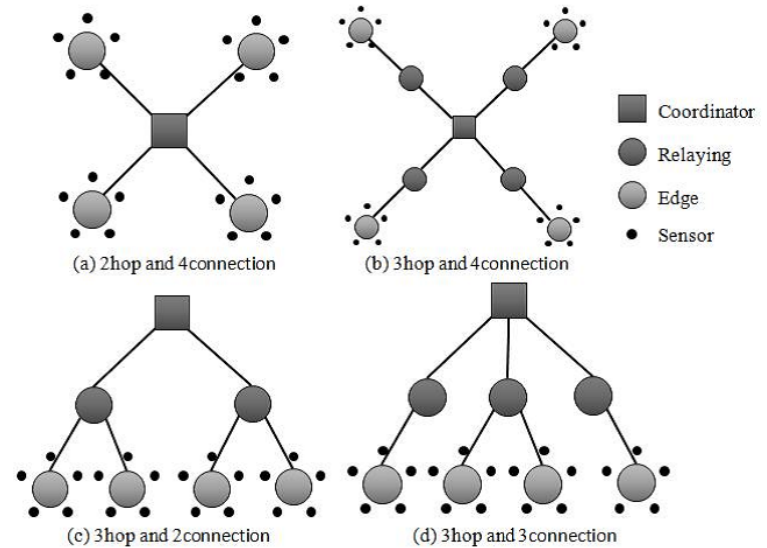


図 5 ネットワークトポロジの 4 つのパターン

のパターンを図 5 に示す。各 4 つのパターンのトポロジは、全てエッジルータが 4 つあり、各エッジルータには 5 つのセンサノードが接続しているため、センサノードは合計 20 個である。

図 5(a) は 2 ホップで、コーディネータに 4 つのルータが接続しているトポロジである。各センサノードからエッジルータへ、エッジルータからコーディネータへ一定間隔でデータを送信する。このデータ送信間隔を変化させてシミュレーションを行う。各センサノードは、ネットワーク結成後、接続している親ノードであるエッジルータ以外と通信することはない。各センサノードからエッジルータへの通信距離は全て同じ距離であり、エッジルータからコーディネータへの通信距離も全て同じ距離である。

図 5(b) は 3 ホップで、コーディネータに 4 つのルータが接続しているトポロジである。このトポロジも図 5(a) とほぼ同様であるが、図 5(a) との違いは、3 ホップなので、各センサノードからエッジルータへ、エッジルータから中継ルータを挟み、中継ルータからコーディネータへ一定間隔でデータを送信する。

図 5(c) は 3 ホップで、コーディネータに 2 つのルータが接続しているトポロジである。

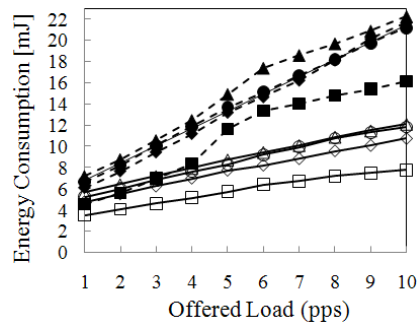


図 6 総消費電力

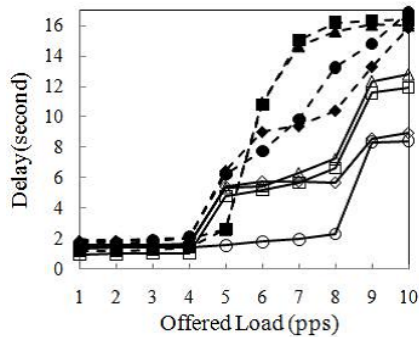


図 8 遅延

あとは図 5(b) と同様である。

図 5(d) は 3 ホップで、コーディネータに 3 つのルータが接続しているトポロジである。あとは図 5(b) と同様である。

4.2 シミュレーション結果 -総消費電力-

図 6 に図 5 の 4 つのトポロジの総消費電力のシミュレーション結果を示す。総消費電力では、どのトポロジにおいても、従来方式の IEEE 802.15.4 も提案方式もトラフィックの増加に伴い、増加の傾向にある。その中でも、各トポロジにおける提案方式の総消費電力は IEEE 802.15.4 の総消費電力よりも下回ることはない。したがって、マルチホップネットワークにおいて、タイムスロットの割当てが有効に行われ、省電力化につながっている。トラフィックの増加に伴い、提案方式と IEEE 802.15.4 の差が広がることから、高トラフィック

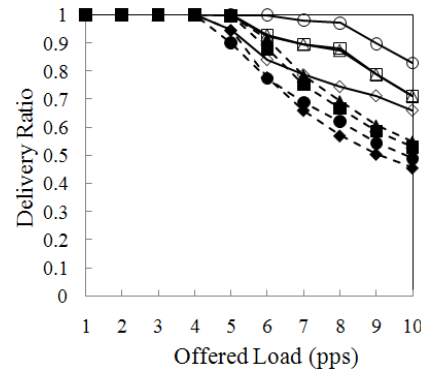


図 7 配信率

ク時に発生する輻輳が回避でき、パケットの衝突や再送などによる消費電力の増加が抑えられていることが分かる。

トポロジの違いによるシミュレーション結果を比較すると、図 5(a) のトポロジでは、4 つのトポロジの中ではルータ数が最も少ないので、4 つのトポロジの中で提案方式も IEEE 802.15.4 も最も低いグラフとなっている。ルータ数の少なさと 2 ホップのネットワークであるので、低トラフィック時では、総消費電力が他のトポロジよりも大きく低くなっているが、トラフィックが増加に伴い輻輳が発生しやすくなる上に、最も輻輳の起きやすいコーディネータは 4 つのルータが接続しているので、IEEE 802.15.4 では輻輳が発生したと思われる 5pps から急激に総消費電力が増加している。しかし、提案方式ではタイムスロットの割当てが有効に行われているので、IEEE 802.15.4 と同じように急激に増加することがなく、低トラフィック時と同様に低消費電力が維持できている。

図 5(b) のトポロジでは、4 つのトポロジの中で最もルータ数が多い上に、図 5(a) と同様にコーディネータは 4 つのルータが接続しているので、図 5(c) と (d) の差よりも IEEE 802.15.4 のグラフは差が同じ 3 ホップのネットワークの中でも大きい。しかし、提案方式ではタイムスロットの割当てによって、高トラフィック時でも急に総消費電力が増加することなく低消費電力が維持されている。

図 5(c) のトポロジでは、3 ホップの中ではルータ数も少なく、コーディネータの接続も 2 つのルータなので、総消費電力はわずかに低いが、他の 3 ホップの中では全体的に低い値を示している。これらのトポロジはどのルータも平等の子ノード数であるのだが、図 5(d) のトポロジでは、ルータの中には子ノードが 1 つのルータと 2 つのルータが存在する。

提案方式は、負荷の高いノードを優先的にタイムスロットを割当てることによって輻輳を回避するのだが、図 5(d) のトポロジでは子ノード数が平等ではないので、子ノード数が多い方が負荷の高いノードになりやすいため、このノードを優先的にタイムスロットを割当てる。しかし、総消費電力は子ノード数が平等の他のトポロジよりも改善は大差はなく、むしろ図 5(c) のトポロジの方がルータ数が多いのに、グラフはほぼ同じであることから、負荷の高いノードにタイムスロットを割当てることは総消費電力に影響及ぼすことは少ないことが分かる。

4.3 シミュレーション結果 -配信率-

図 7 に図 5 の 4 つのトポロジの配信率のシミュレーション結果を示す。配信率では、どのトポロジにおいても、IEEE 802.15.4 も提案方式も低トラフィック時には高配信率を維持しているが、トラフィックの増加に伴い、減少の傾向にある。その中でも、各トポロジにお

る提案方式の配信率は IEEE 802.15.4 の配信率よりも常に上回っている。したがって、マルチホップネットワークにおいて、タイムスロットの割当てが有効に行われ、消費電力だけでなく高配信率も実現している。これは、トラフィックが増加に伴い、提案方式では輻輳が回避でき、パケットロスの減少などによって高配信率が維持できていることが分かる。

トポロジの違いによるシミュレーション結果を比較すると、図 5(a) と (b) のトポロジでは、ほぼ同じグラフであるので、配信率はエッジルータとコーディネータとの間にルータを挟んでホップ数の違いと IEEE 802.15.4 と提案方式と関係ないことが分かる。さらにこの 2 つのトポロジは、輻輳が発生した 5, 6pps では提案方式は IEEE 802.15.4 と同じく下がり、7pps 以降は IEEE 802.15.4 よりも高配信率だが必ずしも良い結果ではない。これは、すべて平等のルータ数の子ノードにしているため、どのノードに対してタイムスロットを割当てても変わらないところから、提案方式の効果が減少したのではないと思われる。

図 5(c) のトポロジでは、4 つのトポロジの中でも極端に低い配信率であり、IEEE 802.15.4 だけでなく、提案方式も他のトポロジよりも改善が見られる結果ではなかった。これは、図 5(a) と (b) のトポロジと同じように、すべて平等のルータ数の子ノードにしている上に、図 5(a) と (b) と違って中継ルータが 2 つのエッジルータの子ノードにしているため、

図 5(a) と (b) と比較して負荷の高いノードが存在するトポロジであることから、配信率が低くなってしまおうと思われる。

図 5(d) のトポロジでは、IEEE 802.15.4 は低い配信率であるのに対して、提案方式は 4 つのトポロジの中で最も高い配信率を維持している。これは、図 5(d) のトポロジでは子ノード数が平等ではないので、子ノード数が多い負荷の高いノードを優先的にタイムスロットを割当てることによって輻輳を回避することが配信率にとって有効であると思われる。したがって、提案方式における負荷の高いノードにタイムスロットを割当てるとは高配信率を実現できることが分かる。

4.4 シミュレーション結果 -遅延-

図 8 に図 5 の 4 つのトポロジの遅延のシミュレーション結果を示す。遅延では、どのトポロジにおいても、従来方式の IEEE 802.15.4 も提案方式もトラフィックの増加に伴い、比例して増加の傾向にある。その中でも、各トポロジにおける提案方式の遅延は IEEE 802.15.4 の遅延よりも常に上回っている。したがって、マルチホップネットワークにおいて、タイムスロットの割当てが有効に行われ、消費電力だけでなく低遅延も実現している。これは、トラフィックが増加に伴い、提案方式では輻輳が回避でき、バッファオーバーや再送の減少などによって低遅延が維持できていることが分かる。しかし、提案方式は 9pps から急激に遅

延が高くなっているため、この提案方式の限界が遅延においては 9pps にあると思われるが、それでも IEEE 802.15.4 より遅延が高くなることはない。

トポロジの違いによるシミュレーション結果を比較すると、図 5(a) と (b) のトポロジは、同じグラフの形をしているので、配信率と同様にホップ数の関係は少ないと思われる。図 5(a) と (b) のトポロジでは、他の 2 つのトポロジよりも IEEE 802.15.4 と提案方式ともに遅延が高いため、輻輳が発生しやすいコーディネータにおける接続の数が遅延に影響すると考えられる。5pps では、IEEE 802.15.4 の方が提案方式よりも遅延が低くなっている。これは、再送などの遅延を考えなければ、タイムスロットを割当てた通信は CAP のあとに行うので遅延が発生するので、5pps では輻輳による再送などによる遅延よりもタイムスロットを割当てることによる遅延が勝ったと思われる。

図 5(c) のトポロジでは、配信率では低配信率だったのに対して遅延は IEEE 802.15.4 では低く、提案方式は図 5(a) と (b) とほぼ同じ形のグラフである。4 つのトポロジの中では 9pps での遅延の上がり幅が小さいが、これはコーディネータにおける接続の数の影響で、数が最も少ないトポロジであるため上がり幅が小さいと考えられる。

図 5(d) のトポロジでは、4 つのトポロジの中で提案方式のグラフのうち最も低遅延を維持している。これは、配信率と同様に、図 5(d) のトポロジでは子ノード数が平等ではないので、子ノード数が多い負荷の高いノードを優先的にタイムスロットを割当てることによって輻輳を回避することが遅延にも有効であると思われる。したがって、提案方式における負荷の高いノードにタイムスロットを割当てるとは低遅延を実現できることが分かる。

5. ま と め

本稿では、IEEE 802.15.4 ビーコンモードのクラスタ・ツリー型のマルチホップネットワークにおける各ノードのタイムスロット割当ての順序付けとセンサに接続していない中継ルータおよびコーディネータでは新たな基準としてトラフィックに応じて割当てをすることにより、省電力化を実現する方式を提案した。また、計算機シミュレーションにより、IEEE 802.15.4 と提案方式の評価の比較することで、IEEE 802.15.4 よりも低消費電力と高配信率と低遅延を維持できることを示した。さらに、様々なクラスタ・ツリートポロジのパターンでシミュレーション評価を行うことで、提案方式のトポロジの違いによって比較をし、子ノード数が平等ではないトポロジにおいて、子ノード数が多い負荷の高いノードを優先的にタイムスロットを割当てることによって、総消費電力への影響は少ないが、高配信率と低遅延を実現できることが分かった。

参 考 文 献

- 1) IEEE Standard for Part 15.4: Wireless Medium Access Control Layer (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS), Sep. 2006.
- 2) I. Rhee, A. Warriar, A. Aia and J. Min, “Z-MAC: a Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks, ” Proc. the 3rd ACM SenSys, pp. 90-101, Nov. 2005.
- 3) Gahng-Seop Ahn, Emiliano Miluzzo, Andrew T. Campbell, Se Gi Hong, Francesca Cuomo, “Funneling-MAC: A Localized, Sink-Oriented MAC For Boosting Fidelity in Sensor Networks, ” *SenSys'06*, November 1-3, 2006, Boulder, Colorado, USA. Copyright 2006 ACM 1-59593-343-3/06/0011
- 4) 川本, 威, 朱, 廣瀬, 小室, 阪田, 原, “ZigBee ビーコンネットワークにおけるセンサデータ発生頻度に応じた CSMA/TDMA 選択方式, ” 信学技報, AN2009-68, Mar.2010
- 5) 長井, 廣瀬, 川本, 小室, 阪田, 原, “無線マルチホップセンサネットワークにおける省電力化のためのタイムスロット割当て方式, ” 総合大会, Mar.2011