

# 大規模無線センサネットワークにおける 中継ノードの省電力化のための非対称通信と Wake-up Radio を併用したモバイルシンク通信方式の提案と評価

岩田 将成 湯 素華 小花 貞夫

**概要：**近年、無線センサネットワークの長期間運用を目的として、有限な電源で動作するセンサノードの省電力化に関する研究が盛んに行われている。大規模な無線センサネットワークでは主にマルチホップ通信が用いられるが、シンクノード付近の中継ノードにトラフィック負荷が集中し、電力消費が増大する問題がある。この問題を緩和する手法としてモバイルシンクが提案されているが、モバイルシンクには、ルーティング情報更新時に発生するノード間の通信オーバーヘッドの問題と、不定期な送信要求の監視によるノード稼働時間増加の問題がある。本稿では、モバイルシンクの問題を、非対称通信と Wake-up Radio を併用することで解決するモバイルシンク通信方式を提案した。提案方式ではノード間の通信オーバーヘッドを非対称通信により削減する。また、ノードを一斉起動せずに、通信発生時に Wake-up Radio を用いてホップ毎にノードを起動させる制御により、ノード稼働時間の削減を図る。シミュレーション評価の結果、ホップ毎の起動タイミング制御は、一斉起動に比べて、全ノードの合計電力消費量を10分の1以下（ノード数 600 の場合）まで低減できることを確認した。また、提案方式の通信エラーに対する耐性評価を行い、ウェイクアップ制御メッセージの連送と再送スロットの追加によりシンクへのフレーム到達率を改善できることを示した。その際、ホップ毎に再送スロット数を制御することで、センサデータの収集時間と電力消費量の増加を抑えつつ、フレーム到達率の向上が可能であることを確認した。

## 1. はじめに

各種センサを備えたセンサノード（以下、ノード）を無線通信により接続し、センサデータをシンクノード（以下、シンク）に収集する無線センサネットワーク（WSN）の、農業における環境モニタリング等への活用が近年注目されている。大規模な WSN では、各ノードは主に電池により動作する為、使用できる電力量が有限であり、マルチホップ通信でデータを収集する際、シンクに近いノードは中継送信のために、早めに電池が枯渇し、ネットワークが切断されてしまう問題が発生する。長期間運用するためには、特に中継ノードの省電力化が必要となる。先行研究では、シンクを移動させることにより、シンク付近の特定の中継ノードへの定常的なトラフィック集中を回避するモバイルシンク [1] や、下り方向の通信量を削減する非対称通信 [2]、ウェイクアップ制御によりノードの稼働時間を削減する Wake-up Radio (WuR) [3] が提案されている。しかし、モバイルシンクでは、シンクの移動に起因して、ルーティング情報更新のためにノード間で通信オーバーヘッドが発生する問題と、不定期な送信要求の監視のためにノードを定期的に稼働させなければならないという問題がある。

本稿では、非対称通信と WuR を併用することでこれらの問題を解決し、ノードを省電力化するモバイルシンク通信方式を提案・評価する。シンクは安定な電力供給があり、各ノードに低消費電力の WuR を備えることを前提とする。

シンクはノードより大きな送信電力でウェイクアップ制御メッセージを送信し、任意のノードに直接届くようにする。また、事前に収集したネットワークのトポロジー情報を元に、各リンク上の送信タイミングを決定し、それに合わせて、通信発生するノードのみ起動させて、順番にデータをネットワークの端からシンクへ転送する。ネットワークシミュレータ ns-2 上に基本提案方式と比較方式を実装し、評価した。その結果、ホップ毎のノードの起動タイミング制御は、ノードの一斉起動に比べて、全ノードの合計電力消費量を10分の1以下（ノード数 600 の場合）まで低減できることを確認した。また、通信エラーを考慮した拡張提案方式の評価を行い、ウェイクアップ制御メッセージの連送と再送スロットの追加によりシンクへのフレーム到達率を改善できることを示した。その際、収集時間と電力消費量の増加を抑えつつ、フレーム到達率を向上させる上で、ホップ毎の再送スロット数制御が有効であることを確認した。

以下、2 章では先行研究を述べ、3 章では基本提案方式を説明する。4 章では基本提案方式のシミュレーション評価について述べる。5 章では、通信エラーを考慮した拡張提案方式について説明し、6 章では拡張提案方式のシミュレーション評価について述べる。7 章では結論を述べる。

## 2. 先行研究

### 2.1 モバイルシンク

大規模 WSN においてマルチホップ通信を用いてシンク

にデータを集める場合、シンク付近の中継ノードにトラフィックが集中するため、特定の中継ノードの電源が早く枯渇する問題がある。モバイルシンク[1]は、シンクを移動させてトラフィックの流れを分散させることにより、各ノードの電力消費量の偏りを抑制する手法であり、シンクの移動に対応したルーティングプロトコルが多数提案されている。図1に、シンクの移動によるトラフィックの変化の様子を示す。数字は各ノードのデータ送信回数を表す。

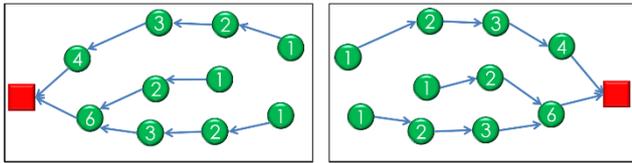


図1 シンクの移動によるトラフィックの変化

- しかし、モバイルシンクには以下の2つの問題点がある。
- 1) シンクの移動に伴うノードのルーティング情報の更新のためにノード間の通信オーバーヘッドが発生
  - 2) シンクからの不定期な送信要求を監視するためのノードの定期的な起動による稼働時間の増加

## 2.2 非対称通信

AROS[2]では、シンクは継続的に電力供給が可能であることに着目し、シンクから各ノードへの下り通信では大送信電力の長距離通信によるワンホップ、シンクに向けた上り通信では小電力の短距離通信によるマルチホップを行う非対称通信を提案している。上り通信ではマルチホップにより送信電力を節約、下り通信ではシンクからのワンホップにより中継しないことでノードの省電力化を図る。

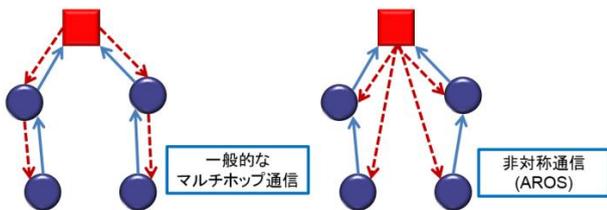


図2 マルチホップ通信と非対称通信の通信経路の比較

## 2.3 Wake-up Radio

Wake-up Radio(WuR)[3]は、各ノードのデータ通信モジュールとは別に、微小な消費電力で動作するウェイクアップモジュールを追加して、データ通信モジュールのスリープ状態から稼働状態への切り替えるタイミングを制御する手法である。ウェイクアップモジュールは、無線によるWake-up Call(WuC)と呼ぶ制御メッセージを常に監視し、データ通信が必要となるときに(つまり WuCを受信した時に)データ通信モジュールを起動する。文献[4]では、受信データの有無の確認のために定期的な通信モジュールの稼働

が必要である duty-cycled MAC プロトコル(X-MAC[5], RI-MAC[6])に比べて、WuR が省電力であることが示されている。

WuC は通信相手ノードのアドレスを含む。WuCを受信したノードは WuC 内のアドレスが自身と一致すれば通信モジュールをスリープ状態から稼働状態へ切り替える。

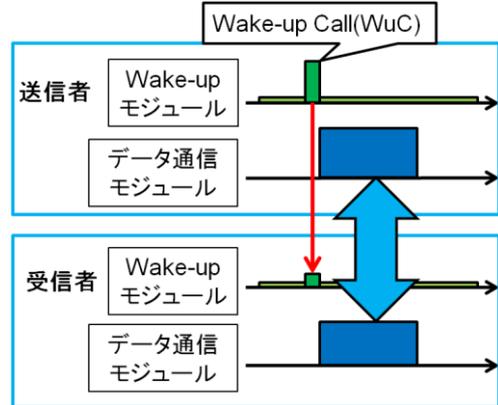


図3 WuRの通信プロセス

## 3. 基本提案方式

### 3.1 概要

モバイルシンクの2つの問題点を解決するため、非対称通信と WuR を併用する通信方式を提案する。提案方式は以下の方針によりモバイルシンクの問題を解決する。

- 1) モバイルシンクが非対称通信により各ノードのルーティングを制御して、ルーティングに関するノード間の通信オーバーヘッドを削減する。また、下記の WuC も非対称通信によりシンクから各ノードに直接届くようにする。
- 2) WuR によって、モバイルシンクからの不定期な送信要求を、ノードのスリープ状態を維持したまま微小消費電力で常に監視し、ノードの稼働時間を削減する。データ収集時には、一斉起動ではなく、ホップ毎に送受信ノードを指定して起動させることにより中継ノードの受信待機による稼働時間を削減する。

上記の方針に基づく提案方式の概念図を図4に示す。

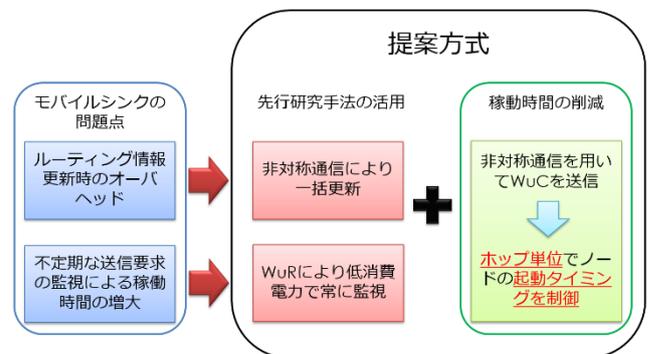


図4 提案方式の概念図

提案方式におけるホップ毎の送受信ノードの起動によって、シンクまでデータを収集する際のデータ収集プロセスについて 3.2 で述べる。また、データ収集プロセスにおいて必要となる、ノードの通信経路及び通信順序を決定するアルゴリズムについて 3.3 で述べる。

### 3.2 データ収集プロセス

提案方式におけるデータ収集プロセスを以下に示す。

- 1) シンクが各ノードの位置情報(既知とする、またはデータ収集のついでに各ノードから収集)に基づいて通信経路、通信順序を決定する。
- 2) 決定した通信順序に従って、ホップ毎に送受信ノードを指定した WuC を送信する。(図 5-左)
- 3) 送受信ノードは起動して、割り当てられた時間(通信可能時間)の間、データ通信を行う。(図 5-右)
- 4) 通信可能時間の経過後、もしくはデータの送信完了後に送受信ノードはスリープ状態に遷移する。
- 5) シンクは通信可能時間の経過後(送受信ノードのスリープ状態への遷移後)に、次のホップの送受信ノードを指定した WuC を送信する。
- 6) 上記 2)から 5)を繰り返すことでシンクまでデータを収集する。

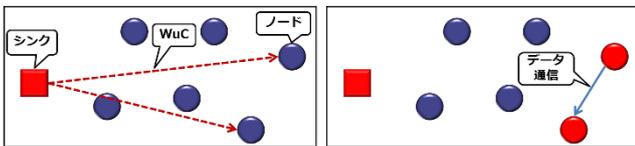


図 5 提案方式におけるデータ収集プロセス

送受信ノードへの通信可能時間の割当はスロット単位で行う。式(1)にスロットの定義を示す。最大伝搬遅延時間とは、電波が空气中を伝わる速さを 30 万 km/s とした場合に、最大通信距離に応じて求められる最大の伝搬遅延時間である。1 スロットにつき、1 個分のデータフレーム(センサデータを含むフレーム)と 1 個分の ACK フレーム(ACK を情報を含むフレーム)の送受信が可能となっている。

$$\begin{aligned}
 &1 \text{ スロット} = \text{データフレームの送信時間} \\
 &\quad + \text{最大伝搬遅延時間}(2\mu\text{s}) \\
 &\quad + \text{SIFS}(10\mu\text{s}) \\
 &\quad + \text{ACK フレームの送信時間} \\
 &\quad + \text{最大伝搬遅延時間}(2\mu\text{s}) \quad \text{式(1)}
 \end{aligned}$$

### 3.3 通信経路・通信順序決定アルゴリズム

提案方式では、ノードの位置情報に基づいたルーティング方式(geographic routing[7])を用いる。シンクが各ノードの位置情報に基づいて通信経路と通信順序を決定する際のアルゴリズムを以下に示す。

- 1) 各ノードに対して、シンクの現在位置との距離の絶対値を求める。
- 2) 各ノードに対して、通信可能範囲内に存在する他のノード(シンク含む)を求める。
- 3) 通信可能範囲内にあるノードの中で、最もシンクに近い(距離の絶対値が最小)ノードを送信先として決定する。
- 4) 2), 3)を繰り返して、全ノードの送信先を決定する。
- 5) シンクを根とする木構造が 1 つ構築される。
- 6) 構築された木構造に対して、post-order で深さ優先探索をした結果を通信順序とする。

## 4. 基本提案方式のシミュレーション評価

### 4.1 概要

ネットワークシミュレータ(ns-2[8])上に提案方式及び以下の 2 つの比較方式を実装し、提案方式の有効性を評価した。

比較方式 1: シンクが WuC を送信して全ノードを一斉に起動後、データ通信によりルーティングと送信タイミングの情報をブロードキャストする。各ノードは受信した情報を元に TDMA[9](Time Division Multiple Access)でデータ送信を行う。送信を完了したノードはスリープ状態となる。

比較方式 2: 全ノードの一斉起動、ルーティング情報のブロードキャストを比較方式 1 と同様に行うが、各ノードは CSMA/CA[10](Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)でデータ送信をする。電波干渉しない位置にあるノードは同時間帯に並行してデータ送信が可能である。

以上の 2 つの比較方式と提案方式の比較により、全ノードを一斉起動させた場合と、ホップ毎に送受信ノードのみを起動させた場合の電力消費量と収集時間の違いを検証する。

### 4.2 シミュレーション条件

表 1 にシミュレーション条件を示す。

周波数には、無線 LAN 等で一般的に使われる 2.4GHz 帯よりも回折性が高く、通信距離の長い 920MHz 帯を使用することとする。ビットレート、変調方式、WuC のアドレス照合時間、通信モジュールの起動時間は文献[11][12][13]を参考に決定した。データフレームサイズは 50byte としたが、この時送信できるセンサデータは 33byte 分となる。文献[14]によると、1 回の測定によって生成されるデータサイズは 3byte であるため、11 回分の温湿度データが送信できる想定となる。シミュレーションは大規模な農地の 1 区画に

対して、リアルタイム性が求められるデータの収集を行うことを想定した。

シンクは停留した状態でデータ収集をするものとし、ノードはシンクの停留場所の半径 600m 以内にランダムに配置した。また、通信エラーは無いという設定で、電力消費量、データ収集にかかる時間(最初の WuC を送信してから全ノードのデータを受信し終わるまでの時間)という指標を用いて、シミュレーションを行った。

表 1 シミュレーション条件

項目	設定値
ネットワークシミュレータ	ns-2
センサノード数	400, 500, 600
WuC サイズ	11byte
データフレームサイズ	50byte(フレームヘッダ 17byte+センサデータ 33byte.)
ACK フレームサイズ	11byte
周波数帯	920MHz
ビットレート	100Kbps
変調方式	OOK(wake-up モジュール) GFSK(通信モジュール)
電波伝搬モデル	TwoRayGround
通信エラー	無し
測定区画	1200m×1200m
シンクノードの位置	(600, 600, 1.5)
ノードの高さ	1.5m
最大通信距離	600m(シンク), 100m(ノード)
送信電力	20mW(シンク), 1mW(ノード)
WuC のアドレス照合時間	7ms
通信モジュール起動時間	5ms
ノード間のデータ到達確認	ACK
シミュレーション回数	300 回

ノードの各状態における消費電力を表 2 に示す。表 2 の値は文献[11][12][13]を参考に決定した。各状態の定義を以下に示す。アイドル、データ受信、データ送信の場合にノード稼働状態と定義する。

- ・スリープ状態:通信モジュールと Micro Control Unit(MCU) はスリープ、ウェイクアップモジュールのみが稼働し、WuC の受信を待機している状態
- ・WuC 受信状態: WuC を受信してウェイクアップモジュールがアドレス照合を行っている状態
- ・稼働状態へ遷移: MCU が稼働し、通信モジュールをスリープから起動させている状態
- ・アイドル: MCU と通信モジュールが稼働しているが送受信を行っていない状態
- ・データ受信: 通信モジュールが受信をしている状態
- ・データ送信: 通信モジュールが送信をしている状態

表 2 各状態におけるノードの消費電力 (ウェイクアップモジュール+通信モジュール+MCU)

スリープ状態	20.7 $\mu$ W	(2.4 $\mu$ W + 3.0 $\mu$ W + 15.3 $\mu$ W)
WuC 受信状態	25.5 $\mu$ W	(7.2 $\mu$ W + 3.0 $\mu$ W + 15.3 $\mu$ W)
稼働状態へ遷移	24402.4 $\mu$ W	(2.4 $\mu$ W + 19mW + 5.4mW)
アイドル	57165.9 $\mu$ W	(2.4 $\mu$ W + 57mW + 163.5 $\mu$ W)
データ受信	62402.4 $\mu$ W	(2.4 $\mu$ W + 57mW + 5.4mW)
データ送信	74402.4 $\mu$ W	(2.4 $\mu$ W + 69mW + 5.4mW)

### 4.3 電力消費量に関する評価

300 回のシミュレーションにより求めた、1 回のデータ収集による全ノードの電力消費量の合計値を平均した結果を表 3 に示す。

表 3 1 回のデータ収集による全ノードの電力消費量の合計値 [J]

ノード数	400	500	600
提案方式	1.7	2.1	2.4
比較方式 1	129.6	195.3	274.0
比較方式 2	13.7	20.9	30.0

表 2 からわかるように、ノードのスリープ状態と稼働状態の消費電力には大きな差があるため、稼働時間の削減による省電力効果は大きい。

また表 3 より、データ収集時の電力消費量に有意な差が確認できる。これは、ノードが稼働する時間が、提案方式の場合は、送受信時のみであるのに対し、両比較方式では、最初の WuC によりノードを起動して稼働状態にしてから送信完了するまでの間であり、不必要な稼働時間が発生するためである。提案方式の起動タイミング制御による稼働時間の削減は、省電力化にきわめて有効と考えられる。

### 4.4 収集時間に関する評価

300 回のシミュレーションにより求めた、1 回のデータ収集にかかる時間を平均した結果を表 4 に示す。

表 4 1 回のデータ収集にかかる時間 [s]

ノード数	400	500	600
提案方式	16.7	20.2	23.7
比較方式 1	11.8	14.0	16.2
比較方式 2	6.5	8.1	10.1

表 4 より、提案方式は両比較方式よりもデータ収集時間が長いことが確認できる。これは、提案方式の場合、ホップ毎に WuC を用いて送受信ノードを起動し、通信をさせており、WuC により起動するまでには、WuC のアドレス照合時間とデータ通信モジュールの起動時間の合計 12ms がかかるためである。また、比較方式 1 が 2 よりも収集時間が長いのは、提案方式では並行したデータ送信をしていないことも要因であると考えられる。

以上のシミュレーションでは、シンクが停留して一定時間で収集をしているが、シンクが移動しながら収集する場

合には、収集時間が性能に影響を及ぼす。移動するシンクに対応するために、収集時間の短縮は今後の課題である。

## 5. 通信エラーを考慮した拡張提案方式

実際の環境下では距離減衰やフェージングにより受信電力が変動し、通信エラーが発生する。基本提案方式では通信エラーが発生した場合に、シンクまで届かないデータが発生するという問題がある。本章では通信エラーに対応するための2つの機能を拡張し、拡張提案方式とする。

### 5.1 WuC 連送機能の追加

シンクから送信される WuC をロスした場合、ノードは起動しないため、データの転送に失敗し、シンクまで届かない。そこで、WuC を1回だけでなく複数回送信（連送）することでノードの起動失敗を防ぐ WuC 連送機能を基本提案方式に追加する。

WuC の連送は、ウェイクアップモジュールが WuC のアドレス照合に費やす時間（7ms）を考慮して、7ms 以上の間隔を空けて行う。この際、送受信ノードの起動タイミングを揃えるために、WuC にシーケンス番号の情報を付加する。送受信ノードは WuC のシーケンス番号を参照して何回目の WuC であるかを確認することにより、同じタイミングでノードを起動し、通信を開始できるようにする。

### 5.2 再送スロットの追加

データフレームや ACK フレームにロスが発生した場合、データフレームの再送が必要となる。しかし、基本提案方式において、通信可能時間として割り当てられるスロット数は、送信ノードの持つデータフレーム数と同数である。よって、再送を行うとスロット数が不足して、全てのデータフレームを送信できなくなるという問題が生じる。

そこで、再送によるスロット数不足を防ぐために、元々のデータフレーム数に応じて用意されるスロット（送信スロット）に加えて、再送のためのスロット（再送スロット）を追加することとする。送信スロット及び再送スロット割り当ての1例の概念図を図6に示す。

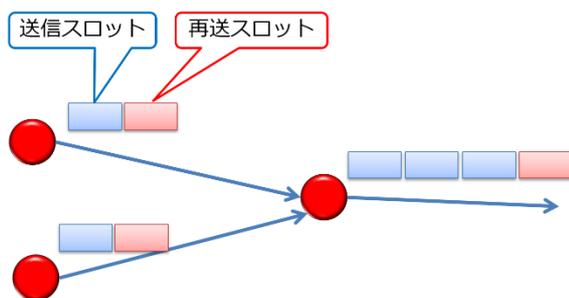


図6 送信スロットと再送スロットの概念図

追加すべき再送スロット数をいくつにするかについて以下に述べる。再送スロット数が多いほど許容される再送回数が増加するため、シンクまでデータを到達させることだけを考えると再送スロット数は多いほうが良い。しかし、再送スロット数が増えるとその分だけ次のホップに対する WuC の送信開始が遅れるため、収集時間が増大する。また、再送スロット数は電力消費量にも影響を及ぼす。受信ノードは最後のデータフレームを受信すると、ACK フレーム送信後にスリープ状態に遷移するため、送信ノードが最後のデータフレームに対する ACK フレームをロスした場合、すでにスリープ状態にある受信ノードに向けて不必要な再送をする場合がある。この際、再送スロット数が多いほど不必要な再送の回数も増加し、電力消費量が増大する。よって、各ホップにおいて何回の再送が必要になるかを推定し、それに応じて適切な数の再送スロットを追加する必要がある。

拡張提案方式では、送受信ノード間の距離に基づいて再送回数を推定し、ホップ毎に再送スロット数の割り当てを制御するようにした。距離に基づいて SNR(Signal-to-Noise Ratio)を推定し、BER(Bit Error Rate)テーブルを参照して求めた BER を用いて、式(2)、式(3)により再送スロット数を決定した。以下の式において、SER はスロットエラーレート(Slot Error Rate)、DATAbits はデータフレームのビット数、ACKbits は ACK フレームのビット数を意味する。

$$SER = 1 - (1 - BER)^{DATAbits + ACKbits} \quad \text{式(2)}$$

$$\text{再送スロット数} = \lceil \text{送信スロット数} \times SER \rceil \quad \text{式(3)}$$

## 6. 拡張提案方式のシミュレーション評価

### 6.1 概要

ns-2 の Nakagami 伝搬モデル[15]を用いて電波のフェージングを模擬し、拡張提案方式のフレーム到達率、収集時間（1回のデータ収集にかかる時間）、電力消費量（1回のデータ収集による全ノードの電力消費量の合計値）の評価を行った。フレーム到達率は、シンクが受信したデータ数を全ノードが送信したデータ数で割った値と定義した。

6.2 では、データフレームと ACK フレームのロスが発生せず、WuC のロスが発生する場合における WuC 連送機能の評価、6.3 では、WuC のロスが発生せず、データフレームと ACK フレームにロスが発生する場合における再送スロット追加の評価をそれぞれ行った。6.4 では、全てに対してロスが発生する場合における拡張提案方式全体の評価を行った。

4章の表1から変更されたシミュレーション条件を表5に示す。

表 5 シミュレーション条件

項目	設定値
センサノード数	600
電波伝搬モデル	Nakagami
測定区画	1600m×1600m
シンクノードの位置	(800, 800, 1.5)
最大通信距離	800m(シンク), 200m(ノード)
送信電力	250mW(シンク), 1mW(ノード)
シミュレーション回数	100回

## 6.2 WuC 連送機能の評価

データフレームと ACK フレームのロスが発生せず, WuC のロスが発生する場合において, WuC の連送回数を 1 から 7 まで変化させた場合のフレーム到達率, 収集時間, 電力消費量のシミュレーション結果の累積分布をそれぞれ図 7, 図 8, 図 9 に示す.

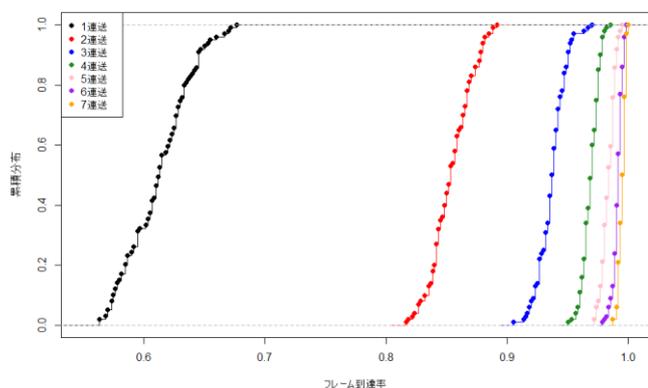


図 7 WuC 連送によるフレーム到達率の変化

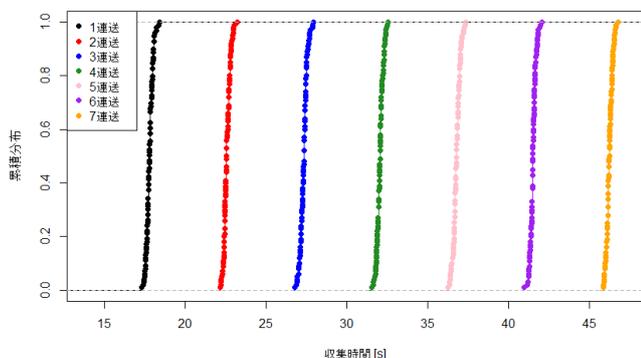


図 8 WuC 連送による収集時間の変化

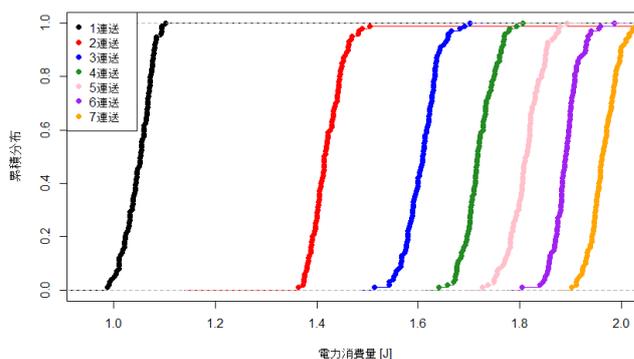


図 9 WuC 連送による電力消費量の変化

図 7 より, 3 連送で 90% 以上, 4 連送で 95% 以上, 6 連送で約 99% までフレーム到達率の向上が可能であることが確認できる. しかし, 図 8 からわかるように, 連送回数増加に伴い収集時間も増大している. 収集時間は連送回数を 1 回増やす毎に, 少なくともノード数×7ms(WuC のアドレス照合時間) 増加する. つまり, 収集対象とするノード数が多いほど収集時間の増加量は増大するという問題がある.

図 9 より, 連送回数の増加に伴い電力消費量も増加していることが確認できる. この電力消費量増加の主な要因は, 連送により起動に失敗するノードが減少し, 正しく稼働するノードが増えたためであると考えられる. しかし, もう 1 つの要因として, WuC のアドレス照合回数の増加が考えられる. WuC を受信したノードは, アドレス照合を行うことで自ノード宛であるかを判別する必要があるが, このアドレス照合処理時には消費電力が増加する(表 2). WuC の連送を行うと, 連送回数分だけアドレス照合回数も増加するため, 電力消費量増大に繋がる. 5 連送, 6 連送, 7 連送において, フレーム到達率の変化が少ないのに対して, 電力消費量では 0.1J ほどの変化があるのは, アドレス照合回数増加によるものだと考えられる.

## 6.3 再送スロット追加の評価

WuC のロスが発生せず, データフレームと ACK フレームにロスが発生する場合において, 再送スロットを常に定数 (0, 1, 2, 3, 4, 5) 分だけ追加した場合と, ホップ毎に再送スロット数を制御した場合でシミュレーションを行った. フレーム到達率, 収集時間, 電力消費量のシミュレーション結果の累積分布をそれぞれ図 10, 図 11, 図 12 に示す.

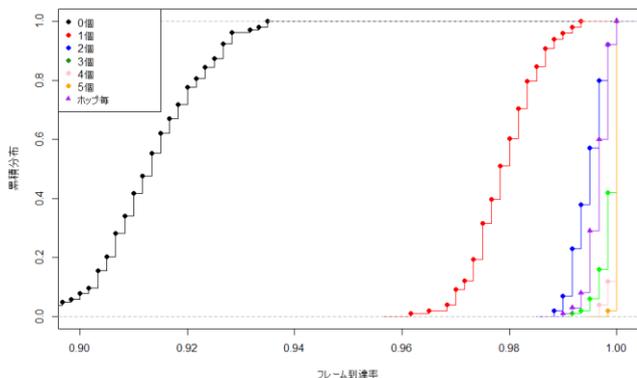


図 10 再送スロット追加によるフレーム到達率の変化

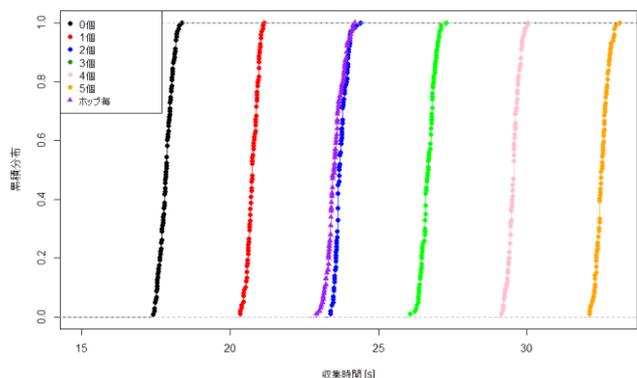


図 11 再送スロット追加による収集時間の変化

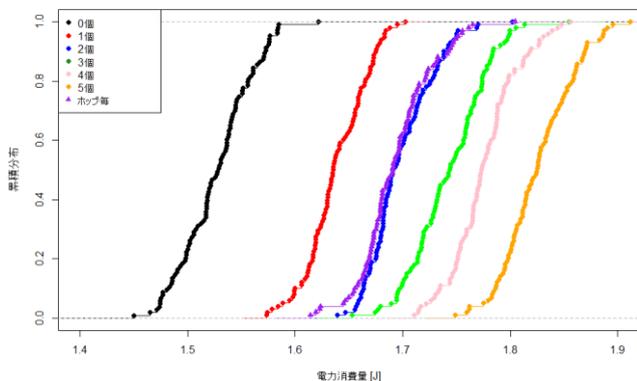


図 12 再送スロット追加による電力消費量の変化

図 10 より、再送スロットを定数個追加した場合、個数が増えるほどフレーム到達率が向上していることが確認できる。また、ホップ毎に制御した場合は、2 個追加した場合よりもフレーム到達率が高く、約 99% のフレーム到達率を達成していることがわかる。

図 11, 図 12 において、再送スロットを 2 個追加した場合とホップ毎に制御して追加した場合を比較すると、ホップ毎に制御した場合の方が収集時間は短く、電力消費量も抑えられていることが確認できる。

#### 6.4 拡張提案方式の評価

全てに対してロスが発生する場合において、WuC 連送回

数を 2 から 7 まで変化させ、かつ再送スロット数をホップ毎に制御した場合と、WuC 連送回数を 5 から 7 まで変化させ、かつ再送スロット数を 0 から 3 までの定数分だけ追加した場合のシミュレーションを行った。

フレーム到達率、収集時間、電力消費量の 100 回分の平均値を求め、収集時間を横軸、フレーム到達率を縦軸にとってプロットしたグラフを図 13、電力消費量を横軸、フレーム到達率を縦軸にとってプロットしたグラフを図 14 に示す。

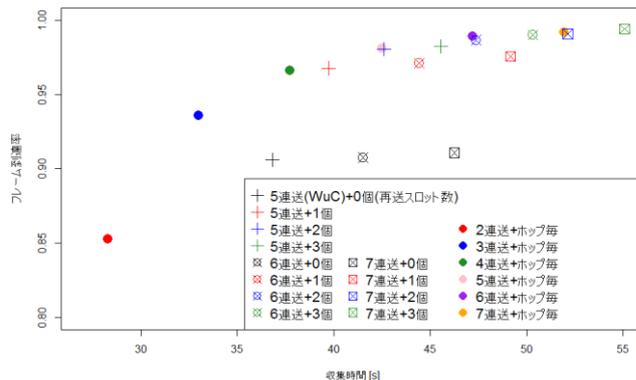


図 13 フレーム到達率と収集時間の関係

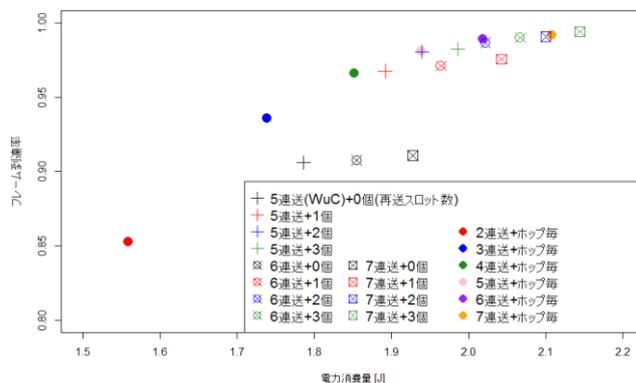


図 14 フレーム到達率と電力消費量の関係

6.2 及び 6.3 の結果から、WuC 連送と再送スロット追加によるフレーム到達率向上は、収集時間と電力消費量に対してトレードオフの関係にあることがわかる。

図 13 において、再送スロット数を定数分追加した場合よりも、ホップ毎に制御した場合の方が、常にフレーム到達率向上に対する収集時間の増加が少ないことが確認できる。同様に、図 14 においても、再送スロット数を定数分追加した場合に比べて、ホップ毎に制御した場合の方が常にフレーム到達率向上に対する電力消費量の増加が少ないことが確認できる。

以上の結果から、収集時間と電力消費量の増加を抑えつつ、フレーム到達率を向上させるためには、ホップ毎の再送スロット数の制御が有効であると考えられる。また、WuC の連送回数に対しても、シンクと送受信ノード間の距

離に基づいたホップ毎の連送回数の制御をすることで、更なる収集時間及び電力消費量の低減が可能であると考えられる。

## 7. おわりに

本稿では、大規模 WSN における中継ノードの省電力化を目的として、非対称通信と Wake-up Radio の併用によりモバイルシンクの問題を解決するモバイルシンク通信方式を提案した。提案方式における、ホップ毎に送受信ノードのみを起動させる制御により、一斉起動を行う場合と比較して、電力消費量を 10 分の 1 以下 (ノード数 600 の場合) まで低減できることをシミュレーションにより確認した。また、通信エラーに対応した拡張提案方式を提案し、通信エラー発生環境下においてもフレーム到達率 99%以上を達成できることを示した。しかし、フレーム到達率の向上は、収集時間及び電力消費量とトレードオフの関係にあることもわかった。このトレードオフに対して、収集時間と電力消費量の増加を抑えつつ、フレーム到達率を向上させる方法として、ホップ毎の再送スロット数の制御が有効であることを示した。

今後は、電波干渉しない送受信ノードの組み合わせを判別して並行送信を行う方式や、ホップ毎にシンクと送受信ノード間の距離に基づいて WuC 連送回数を決定する方式の実装、評価を行い、センサデータの収集時間の短縮を図る予定である。また、ホップ毎の WuC 連送回数及び再送スロット数制御において、通信距離ではなく、実際の電波伝播環境を測定して制御に利用する方式を検討している。また、シンクが移動する場合のシミュレーション評価を行い、各ノードの残余電力量やシンクの移動速度を考慮した通信経路・通信順序決定アルゴリズムの改良などを行う。

## 参考文献

- [1] Can Tunca, Sinan Isik, M. Yunus Donmez, and Cem Ersoy, "Distributed mobile sink routing for wireless sensor networks: A survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.16, no.2, pp.877-897, May 2014
- [2] Jonas Neander, Ewa Hansen, Mikael Nolin and Mats Björkman, "Asymmetric multihop communication in large sensor networks," *Wireless Pervasive Computing, 2006 1st International Symposium on*, January 2006
- [3] Gerd Ulrich Gamm, Matthias Sippel, Milos Kostic and Leonhard M. Reindl, "Low power wake-up receiver for wireless sensor nodes," *ISSNIP, 2010 Sixth International Conference on*, pp.121-126, December 2010
- [4] Joaquim Oller, Ilker Demirkol, Jordi Casademont, Josep Paradells, Gerd Ulrich Gamm and Leonhard Reindl, "Has time come to switch from duty-cycled MAC protocols to wake-up radio for wireless sensor networks?" *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Issue 99, pp.1-1, January 2015
- [5] Michael Buettner, Gary V. Yee, Eric Anderson and Richard Han, "X-MAC a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks," *SenSys '06 Proceedings of the 4th*

- international conference on Embedded networked sensor systems*, pp.307-320, October 2006
- [6] Yanjun Sun, Omer Gurewitz and David B. Johnson, "RI-MAC a receiver-initiated asynchronous duty cycle MAC protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks," *SenSys '08 Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded networked sensor systems*, pp.1-14, November 2008
- [7] Martin Mauve, Jörg Widmer and Hannes Hartenstein, "A survey on position-based routing in mobile ad hoc network," *IEEE Network Volume.15 Issue.6*, pp.30-39, 2001
- [8] The Network Simulator – ns-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [9] Victor Cionca, Thomas Newe and Vasile Dadârlat, "TDMA Protocol Requirements for Wireless Sensor Networks," *Sensor Technologies and Applications, 2008. SENSORCOMM '08. Second International Conference on*, pp.30-35, August 2008
- [10] Jin-Shyan Lee, "An experiment on performance study of IEEE 802.15.4 wireless networks," *2005 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation volume2*, pp.451-458, September 2005
- [11] Christian Hambeck, Stefan Mahlknecht and Thomas Herndl, "A 2.4µW wake-up receiver for wireless sensor nodes with -71dBm sensitivity," *ISCAS, 2011 IEEE International Symposium on*, pp.534-537, May 2011
- [12] 920MHz 帯無線通信モジュール「TY92SS-E2730」データシート, NEC, 2015, <http://jpn.nec.com/engsl/pro/wireless/ty92ss-e.html>
- [13] TMote Sky Datasheet, Moteiv Corporation, 2006, [http://www.eecs.harvard.edu/~konrad/projects/shimmer/reference\\_s/mote-sky-datasheet.pdf](http://www.eecs.harvard.edu/~konrad/projects/shimmer/reference_s/mote-sky-datasheet.pdf)
- [14] Datasheet Humidity Sensor SHT21, SENSIRION, 2014, [http://www.sensirion.co.jp/fileadmin/user\\_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/JPN/Sensirion\\_Humidity\\_SHT21\\_Datasheet\\_V4c\\_J.pdf](http://www.sensirion.co.jp/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/JPN/Sensirion_Humidity_SHT21_Datasheet_V4c_J.pdf)
- [15] Qi Chen, Felix Schmidt-Eisenlohr, Daniel Jiang, Marc Torrent-Moreno, Luca Delgrossi and Hannes Hartenstein, "Overhaul of IEEE 802.11 Modeling and Simulation in NS-2," *MSWiM '07 Proceedings of the 10th ACM Symposium on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems*, pp.159-168, October 2007