

# 無線センサネットワークにおける モバイルシンクへのデータ転送効率化のための プッシュ型およびプル型接続状況共有手法の統合について

吉村 武<sup>1</sup> 松尾 和哉<sup>1</sup> 神崎 映光<sup>1</sup> 原 隆浩<sup>1</sup> 西尾 章治郎<sup>1</sup>

**概要:** 本稿では, 観測領域内を自由に移動する多数のモバイルシンクが存在する無線センサネットワークにおいて, モバイルシンクへのデータ転送を効率的に行う手法を提案する. 提案手法では, 各センサノードにおけるモバイルシンクとの接続状況に基づき, データの転送先を決定する. 接続状況に関する情報の共有方法として, 筆者らがこれまでに提案したプッシュ型およびプル型の手法を統合し, 接続状況が良好なセンサノードからの通知とデータを保持するセンサノードからの情報要求を併用する. ここで, 通知と要求それぞれにおけるフラッディングの範囲を, プッシュ型やプル型より小さく設定することで, 従来手法における高いデータ転送効率を維持しつつ, 情報共有のためのトラフィックを削減する.

## On Integration of Push-based and Pull-based Connectivity Status Sharing Methods for Efficient Data Forwarding toward Mobile Sinks in Wireless Sensor Networks

TAKESHI YOSHIMURA<sup>1</sup> KAZUYA MATSUO<sup>1</sup> AKIMITSU KANZAKI<sup>1</sup> TAKAHIRO HARA<sup>1</sup> SHOJIRO NISHIO<sup>1</sup>

### 1. はじめに

近年, 無線通信技術の発展やセンサの小型化に伴い, 無線通信機能を備えたセンサノードのみで構成される無線センサネットワークへの関心が高まっており [1], [2], 街中の環境把握や気象予測, 生態調査を始めとする, 様々な分野への応用が期待されている. 無線センサネットワークにおいて, 各センサノードが観測した情報 (以下, データ) を収集する方法として, 観測対象となる領域内を移動するシンクノードであるモバイルシンクを用いる研究が, 近年盛んに行われている [6], [7]. モバイルシンクは領域内を移動しながら, 通信範囲内に存在するセンサノードから直接データを収集する.

ここで, 近年広く普及しているカーナビゲーションシステムやスマートフォンといった, 無線通信機能を備えたデバイスを, モバイルシンクとして活用することを考える. これらのデバイスは環境内に多数存在するため, 各センサ

ノードから効率よくデータ収集が行えるものと考えられる. しかし, カーナビゲーションシステムを搭載した車やスマートフォンを所持する人は領域内を自由に移動する. また, 例えば車の場合, 移動範囲が道路上に限定され, さらに, 混雑する道路が時間帯によって異なるなど, モバイルシンクの移動には特性があるものと考えられる. このような環境では, モバイルシンクと直接通信できないセンサノードが発生する. これらのセンサノードが取得したデータは, マルチホップ通信によってモバイルシンクへ転送する必要がある.

このような環境における効率的なデータ転送方法として, 筆者らはこれまでに, モバイルシンクとの接続状況に基づくデータ転送先決定手法である DFBR (Data Forwarding based on Beacon Reception Rate) を提案している [5]. DFBR では, 各センサノードが, モバイルシンクが定期的に発信するビーコンを受信した回数に基づいて, 自身とモバイルシンクとの接続状況が良好か否か判断する. また, 各センサノードの接続状況に関する情報を隣接

<sup>1</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻

するセンサノード間で共有することで、データの転送先を決定する。DFBRR では、接続状況に関する情報の共有方法として、プッシュ型のアプローチをとる DFBRR-ADV (DFBRR with Advertisement-based information sharing) およびプル型のアプローチをとる DFBRR-REQ (DFBRR with Request-based information sharing) を提案している。DFBRR-ADV では、モバイルシンクとの接続状況が良好なセンサノードが、一定期間ごとに周辺のセンサノードに接続状況に関する情報を通知する。一方、DFBRR-REQ では、データを取得したセンサノードが、周辺のセンサノードに接続状況に関する情報を要求する。これらの手法は、接続状況に関する情報を共有するための通知や要求といった制御パケットを、ホップ数を制限したフラッディングを用いて送信している。そのため、モバイルシンクと直接通信できないセンサノードからの高信頼なデータ転送を実現するためには、このフラッディングの範囲を大きく設定し、より多くのセンサノード間で接続状況に関する情報を共有する必要がある。しかし、フラッディングの範囲を大きくすると、そのためのトラフィックが増大するという問題がある。

そこで本稿では、DFBRR において、データ収集の信頼性を維持しながら、接続状況共有のためのトラフィックを削減することを目的とし、DFBRR-ADV および DFBRR-REQ を統合したプッシュ・プル統合型の接続状況共有手法として、DFBRR-HYB を提案する。DFBRR-HYB では、DFBRR-ADV 同様、モバイルシンクとの接続状況が良好なセンサノードが、一定期間ごとに接続状況に関する情報を通知する。この通知にはフラッディングを用いるが、その範囲を DFBRR-ADV より小さく設定することで、通知に要するトラフィックを削減する。この場合、通知を受信できないセンサノードが多く発生するが、これらのセンサノードがデータを取得した場合、DFBRR-REQ と同様、周辺のセンサノードに接続状況に関する情報を要求する。このときの要求にもフラッディングを用いるが、要求する範囲を DFBRR-REQ より小さく設定することで、要求に要するトラフィックの増大を抑える。このように DFBRR-HYB では、接続状況に関する情報の通知および要求を組み合わせることで、多くのセンサノードによる接続状況に関する情報の保持を実現しつつ、情報共有のためのトラフィックを削減する。

以下では、第 2 章で関連研究について述べ、第 3 章で DFBRR における想定について述べる。第 4 章で従来手法について述べ、第 5 章で提案手法について述べる。第 6 章でシミュレーション実験の結果を述べる。最後に第 7 章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

## 2. 関連研究

文献 [4] では、無線センサネットワークにおいて、センサ

ノード間のデータ転送経路を効率的に構築する手法を提案している。この手法では、データを要求するユーザがシンクノードとなり、データに対する要求をフラッディングする。要求を受信したセンサノードは、要求に一致するデータを取得した場合、要求が中継されてきた経路に沿って、該当するデータをシンクノードに向けて転送する。シンクノードは、データが転送されてきた経路のうち、遅延が最小である最適な経路を選択し、それ以降に同様のデータを要求する際には、その経路を利用してデータを取得する。この手法は、データの転送先となるシンクノードが任意の位置において発生する点で、移動が制御できないモバイルシンクへのデータ転送を行う本研究と類似している。しかし、シンクノードからのデータ要求があることを想定している点が本研究と異なる。

文献 [3] では、無線センサネットワークにおいて、自由に移動するモバイルシンクを用いた効率的なデータ収集手法を提案している。この手法では、各モバイルシンクを根とした木構造のネットワークを形成する。この木構造ネットワークは、モバイルシンクごとに個別に形成するため、多数のモバイルシンクが頻繁に移動する場合、通信経路の維持や管理にかかる通信量が増大する可能性がある。一方、本研究では、個々のモバイルシンクを区別せず、モバイルシンクと頻繁に通信可能なセンサノードへデータを転送するための経路を構築するため、各モバイルシンクの移動が頻繁な場合でも、経路の維持にかかるコストに大きな影響はない。

## 3. 想定環境

本章では、DFBRR で想定するモバイルシンクおよびセンサノードについて説明する。また、センサノード間で共有される接続状況についても説明する。

### 3.1 モバイルシンク

観測対象となる領域内に多数のモバイルシンクが存在するものとする。各モバイルシンクはデータ収集以外の目的で自由に移動するが、その移動には特性があり、モバイルシンクが集中して存在する領域が時間的に変化するものとする。各モバイルシンクは定期的にビーコンを発信し、通信範囲内に存在するセンサノードからデータを収集する。

モバイルシンクに到達したデータは、携帯電話網を用いた集約や、車車間通信およびモバイルアドホックネットワークなどを用いた共有によって利用されるものとする。本稿では、モバイルシンクに到達したデータの集約については扱わず、センサノードが取得したデータを、多数存在するモバイルシンクのいずれかに転送することを目的とする。

### 3.2 センサノード

センサノードは観測対象となる領域内に多数配置されており、無線通信範囲に対して密に配置されているものとする。各センサノードは、計算能力、メモリ容量、通信範囲などにおいて同等の性能をもつものとする。

各センサノードは温度や湿度といった環境情報を定期的に取得し、取得したデータを自身の記憶領域に蓄積する。センサノードの記憶容量には制限があり、蓄積したデータがこの容量を超過した場合は、古いデータから破棄するものとする。また、取得したデータには生存時間が設定され、生存時間を超過したデータは破棄されるものとする。

各センサノードは、常に通信帯域を監視しており、通信範囲内にいるセンサノード(以下、隣接ノード)が送信したパケット、およびモバイルシンクが発信したビーコンを受信できるものとする。またモバイルシンクが発信するビーコンを受信した際、自身の記憶領域にデータが蓄積されている場合、そのデータをモバイルシンクに送信する。データを受信したモバイルシンクは、送信元のセンサノードに対し受信確認を返信し、この受信確認を受信した時点で、そのデータの転送は成功したものとみなす。

### 3.3 接続状況

各センサノードは、モバイルシンクが発信するビーコンの受信頻度に基づき、自身の接続状況を認識する。具体的には、センサノードが一定期間  $T_b$  内にビーコンを受信した回数が、予め定められたしきい値  $N_b$  を超えると、接続状況が良好であるものと判断する。ここで、接続状況が良好であるとは、そのセンサノードがいずれかのモバイルシンクと頻繁に直接通信可能であることを意味する。

また、各センサノードは、後述する接続状況共有手法によって転送先リストと呼ばれる情報を保持し、周辺のセンサノードにおける接続状況を把握する。転送先リストには、隣接ノードの識別子、接続状況が良好なセンサノードまでのホップ数、およびこれらの情報を転送先リスト上で登録(または更新)した時刻から成る接続状況情報が格納される。各接続状況情報は、記録されている隣接ノードの方向で、ホップ数分だけ先に存在するいずれかのセンサノードにおいて接続状況が良好であることを意味する。各接続状況情報には生存時間が設定されており、生存時間を超過した情報は破棄される。

## 4. 従来手法

DFBRR では、モバイルシンクと直接通信できないセンサノードがモバイルシンクへデータを転送するために、接続状況情報をセンサ間で共有する必要がある。そのための手法として、著者らは文献 [5] において、プッシュ型のアプローチをとる DFBRR-ADV およびプル型のアプローチをとる DFBRR-REQ を提案している。本章では、これら

の手法における接続状況の共有方法、および共有した接続状況情報を用いたデータの転送方法について述べる。

### 4.1 DFBRR-ADV

各センサノードは、一定期間  $T_b$  ごとに自身の接続状況を確認し、良好であると判断した場合、予め設定された通知範囲  $H_{adv}$  ホップの範囲内に接続状況通知パケットをフラッディングする。接続状況通知パケットには、パケットを生成したセンサノードの識別子、パケットのシーケンス番号、パケットを生成したセンサノードからのホップ数、およびパケットの送信元であるセンサノードの識別子を含む。このパケットを受信したセンサノードは、以下の手順に従って、自身の転送先リストを更新する。

- パケットを送信した隣接ノードを含む接続状況情報を保持していない場合、受信したパケットに含まれる情報のうち、パケットを送信した隣接ノードおよびホップ数を、新たな接続状況情報として追加する。
- 接続状況情報を既に保持している場合、受信したパケットに含まれるホップ数が現在保持しているもの以下であれば、接続状況情報内のホップ数を受信したものに更新し、登録時刻を現在時刻に更新する。

### 4.2 DFBRR-REQ

モバイルシンクへ送信すべきデータを所持し、かつ転送先リストに接続状況情報を保持していないセンサノードは、接続状況要求パケットを生成し、予め設定された要求範囲  $H_{req}$  ホップの範囲内にフラッディングする。接続状況要求パケットには、パケットを生成したセンサノードの識別子、パケットのシーケンス番号、パケットを生成したセンサノードからのホップ数、およびパケットの送信元であるセンサノードの識別子を含む。また、各センサノードは、要求リストと呼ばれる情報を保持し、接続状況要求パケットの識別子とホップ数、および送信元センサノードの識別子を一時的に記録する。

接続状況要求パケットを受信したセンサノードは、フラッディングを継続する際、パケットに含まれる情報を要求リストに追加する。ただし、自身の接続状況が良好な場合はフラッディングを停止し、接続状況応答パケットを接続状況要求パケットの送信元センサノードに返信する。接続状況応答パケットには、接続状況要求パケットの識別子、接続状況が良好なセンサノードからのホップ数、およびパケットの送信元であるセンサノードの識別子を含む。

接続状況応答パケットを受信したセンサノードは、4.1 節における接続状況通知パケットを受信したセンサノードと同様に転送先リストを更新し、要求リストに含まれる情報に対応した送信元センサノードにパケットを転送する。この動作を繰り返すことで、接続状況応答パケットが接続状況要求パケットを生成したセンサノードに到達する。

### 4.3 データ転送

データを取得したセンサノードは、最後にビーコンを受信した時刻からの経過時間がビーコン発信間隔以内であれば、自身の通信範囲内にモバイルシンクが存在すると判断し、モバイルシンクへデータを転送する。モバイルシンクからの受信確認を受信できた場合、そのデータは転送成功となり、自身の記憶領域から取り除く。

モバイルシンクが自身の通信範囲内にいない場合、あるいは受信確認を受信できない場合、取得したデータの複製を  $k$  個作成し、自身の保持する転送先リストに基づき、接続状況が良好なセンサノードに向けてデータ packets を転送する。ここで、データ packets には、データ、データを生成したセンサノードの識別子、データを生成したセンサノードからのホップ数、データ packets を送信したセンサノードの識別子、データを取得した時刻、および packets 複製数を含む。なお、ホップ数の初期値は 1 に設定する。

- 転送先リスト内の接続状況情報の数が  $k$  個以上の場合、ホップ数が小さいものから順に  $k$  個の接続状況情報を選択し、それぞれに対応する隣接ノードにデータ packets を送信する。このとき、すべてのデータ packets の packets 複製数は 1 に設定する。
- 転送先リスト内の接続状況情報の数が  $k$  個未満の場合、すべての接続状況情報を選択した後、選択した総数が  $k$  個になるまで再度転送先リストからランダムに接続状況情報を選択する。その後、選択した接続状況情報に対応する隣接ノードに、データ packets を送信する。このとき、各隣接ノードに送信するデータ packets の packets 複製数は、その隣接ノードに対応する接続状況情報を選択した回数に設定する。

データ packets を受信したセンサノードは、モバイルシンクが自身の通信範囲内に存在する場合、データ packets を転送する。モバイルシンクが自身の通信範囲内に存在しない場合は、データ packets 内のホップ数が  $H_{req}$  または  $H_{adv}$  に達していないならば、ホップ数の値を 1 だけ増加させ、データを取得したセンサノードと同様の手順に従って転送先リストを用いたデータ転送を行う。ここで、転送先リストから選択する接続状況情報の数はデータ packets 内の packets 複製数とする。

図 1 に、 $k = 2$  であり、センサノード  $a$  が取得したデータを転送先リスト内の接続状況情報に基づいて転送する動作を示す。まず、センサノード  $a$  の転送先リスト内には、接続状況情報が一つしか存在しないため、packets 複製数を 2 としたデータ packets を隣接ノード  $b$  へ転送する。センサノード  $b$  は、転送先リストからホップ数の小さい二つの転送先  $c, d$  を選択し、受信したデータ packets を転送する。

このように、DFBRR では、センサノードが取得したデータの複製を作成し、複数のセンサノードへ送信する。これ

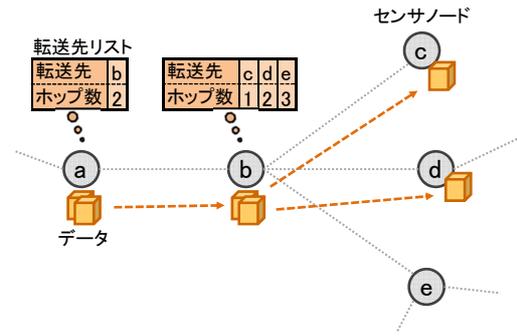


図 1 データ転送 ( $k = 2$ )

Fig. 1 Data forwarding ( $k = 2$ ).

により、モバイルシンクの移動特性が変化し、一部の接続状況情報が無効になった場合でも、いずれかの複製が高確率でモバイルシンクに到達する。

## 5. 提案手法 : DFBRR-HYB

従来手法では、接続状況情報を共有するために、接続状況通知 packets または接続状況要求 packets を、周辺のセンサノードにフラッディングする。データ収集の成功率を向上させるためには、多くのセンサノードにおいて接続状況情報を共有することが望ましい。しかし、そのためにはフラッディングの範囲 ( $H_{adv}$  および  $H_{req}$ ) を大きく設定する必要があり、その際のトラフィックが非常に大きくなる。

そこで、本稿で提案する DFBRR-HYB では、接続状況通知 packets および接続状況要求 packets を併用し、またそれぞれの通知範囲  $H_{adv}^{hyb}$  および要求範囲  $H_{req}^{hyb}$  を小さく設定することで、データ収集の信頼性を維持しながら、接続状況情報共有のためのトラフィックを削減する。

### 5.1 提案手法の概要

提案手法では、従来手法と同様に、3.2 節で述べた方法に従って、各センサノードの接続状況を判断する。接続状況に関する情報は、5.2 節で述べる方法を用いて共有し、各センサノードにおいて転送先リストを生成する。データ取得時は、5.3 節で述べる手順に従い、モバイルシンクへデータを転送する。

### 5.2 接続状況の共有

以下では、DFBRR-HYB における接続状況の通知および要求の詳細を述べる。

#### 5.2.1 接続状況通知

各センサノードは、一定期間  $T_b$  ごとに自身の接続状況を確認し、良好であると判断した場合、 $H_{adv}^{hyb}$  ホップの範囲内に接続状況通知 packets をフラッディングする。接続状況通知 packets に含まれる情報は、DFBRR-ADV のものと同様である。接続状況通知 packets を受信したセンサノードは、DFBRR-ADV と同様の手順により、転送先リ

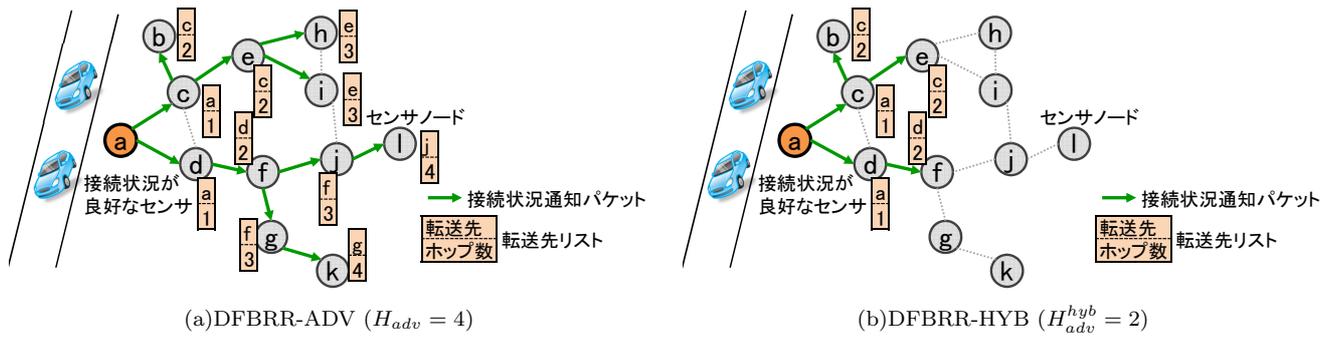


図 2 接続状況通知の比較

Fig. 2 Comparison of connectivity advertisement.

ストを更新する。

図 2 に、DFBR-ADV と DFBR-HYB における接続状況通知の動作例を示す。図 2(a) は DFBR-ADV ( $H_{adv} = 4$ )、図 2(b) は DFBR-HYB ( $H_{adv}^{hyb} = 2$ ) における接続状況通知である。いずれの図においても、センサノード  $a$  が自身の接続状況が良好であると判断し、接続状況通知パッケージをフラッディングする。図に示すとおり、DFBR-HYB では、接続状況通知パッケージのフラッディング範囲を小さく設定するため、DFBR-ADV と比較して通知に要するトラヒックが減少する。しかし、ノード  $h$  や  $i$  など、接続状況情報を取得できないセンサノードが発生する。

### 5.2.2 接続状況要求

モバイルシンクへ送信すべきデータを所持し、かつ転送先リストに接続状況情報を保持していないセンサノードは、接続状況要求パッケージを生成し、 $H_{req}^{hyb}$  ホップの範囲内にフラッディングする。接続状況要求パッケージを受信したセンサノードは、自身の接続状況が良好な場合、DFBR-REQ と同様、接続状況応答パッケージを生成し、接続状況要求パッケージの送信元センサノードに返信する。一方、接続状況が良好でない場合は、自身の転送先リストを確認し、接続状況情報を保持していない場合は、DFBR-REQ と同様に、要求リストを更新し、フラッディングを継続する。接続状況情報を一つ以上保持している場合は、それらの中で最小のホップ数  $H_{min}$  と、受信した接続状況要求パッケージに含まれるホップ数  $H_{cur}$  の値に基づき、次式を満たす場合、接続状況応答パッケージを生成し、接続状況要求パッケージの送信元センサノードに返信する。このとき返信するパッケージにおいて、接続状況が良好なセンサノードからのホップ数は、 $H_{min} + 1$  に設定する。

$$H_{min} + H_{cur} \leq H_{adv}^{hyb} + H_{req}^{hyb}. \quad (1)$$

上式を満たさない場合、DFBR-REQ と同様、要求リストを更新し、フラッディングを継続する。

図 3 に、DFBR-REQ および DFBR-HYB における接続状況要求の動作例を示す。図 3(a) は DFBR-REQ ( $H_{req} = 4$ )、図 3(b) は DFBR-HYB ( $H_{req}^{hyb} = 2$ ) にお

ける接続状況要求である。いずれの図においても、センサノード  $a$  の接続状況が良好な状態であり、図 3(b) では、図 2(b) に示す接続状況通知パッケージがフラッディングされた状態である。センサノード  $j$  は送信すべきデータを所持しているが、モバイルシンクと直接通信できず、かつ転送先リスト内に接続状況情報が存在しないため、接続状況要求パッケージをフラッディングする。この要求に対し、図 3(a) では、接続状況が良好なセンサノード  $a$  が接続状況応答パッケージを返信する。図 3(b) では、すでに接続状況情報を所持しており、(1) 式を満たすセンサノード  $e, f$  が接続状況応答パッケージを返信する。このように、DFBR-HYB では、接続状況情報をすでに所持しているセンサノードが応答を返すことによって、接続状況情報を広範囲に拡散できる。また、接続状況要求パッケージのフラッディング範囲を DFBR-REQ より小さく設定しているため、図 3(b) におけるセンサノード  $k$  など、不要な要求パッケージの拡散を削減する。

### 5.3 データ転送

従来手法と同様の手順により、データ転送を行う。このとき、データパッケージを受信したセンサノードは、モバイルシンクが自身の通信範囲内に存在しない場合、データパッケージ内のホップ数が  $H_{adv}^{hyb} + H_{req}^{hyb}$  に達していないならば、自身の転送先リストに従ったデータ転送を行う。

## 6. 性能評価

本章では、提案手法の性能評価のために行ったシミュレーション実験の結果を示す。本実験では、ネットワークシミュレータ Scenargie 1.6\*<sup>1</sup>を用いた。

### 6.1 評価環境

実験では、 $300[\text{m}] \times 300[\text{m}]$  の二次元平面上に 400 台のセンサノードをランダムに配置した。各センサノードは 60[秒] ごとにデータを取得し、データサイズは 32[byte] と

\*<sup>1</sup> Scenargie1.6 Base Simulator Revision 10864, Space-Time Engineer, <https://www.spacetime-eng.com/>

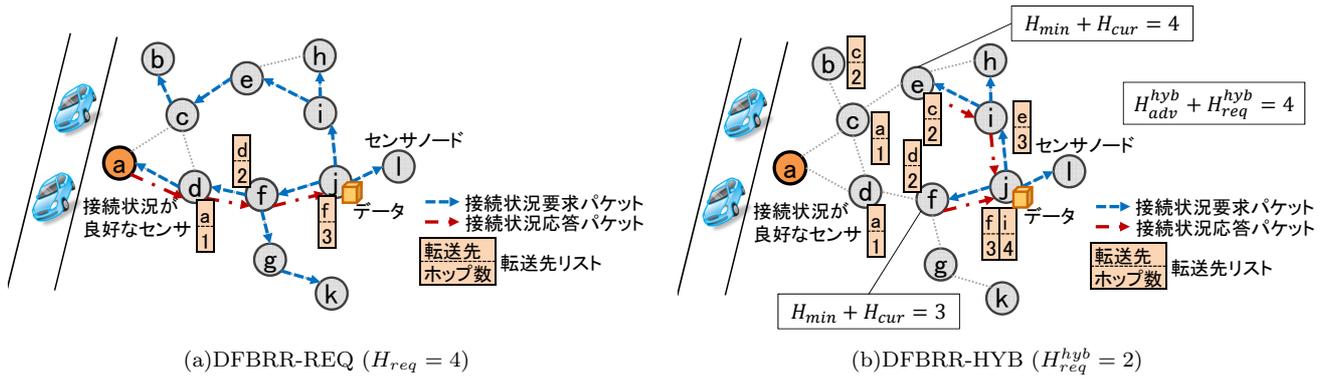


図 3 接続状況要求の比較

Fig. 3 Comparison of connectivity request.

した。データは取得した時刻から 60[秒] 経過すると破棄される。各センサノードは、データ 10 個分の記憶領域をもつものとし、記憶領域に格納した時刻が古いデータから破棄するものとする。接続状況を確認する期間  $T_b$  は 10[秒] とし、接続状況が良好であると判断するビーコン受信回数のしきい値  $N_b$  は 10 回とした。接続状況情報の生存時間は 20[秒] とし、データパケットの複製数  $k$  は 2 とした。センサノードとモバイルシンクは、電波伝播距離が 20[m] 程度となる送信電力でパケットを送信するものとした。

モバイルシンクは 30 台存在するものとし、1[秒] ごとにビーコンを発信する。モバイルシンクは、シミュレーション開始時に図 4(a) における点線で囲まれた八つの領域内にランダムに配置した。各モバイルシンクは、点線で囲まれた八つの領域のうち、自身の存在する領域内、あるいは上下左右の領域内からランダムに次の目的地を選択し、[10, 20][m/秒] の範囲内でランダムに選択した速度で直線的に移動する。目的地に到着したモバイルシンクは、3 秒間停止した後、次の目的地の決定と移動を繰り返す。また、モバイルシンクの移動特性を変化させるため、シミュレーション開始から 900[秒] が経過すると、目的地の候補となる領域を図 4(b) の点線で囲まれた七つの領域に変更した。移動特性の変化時に、図 4(a) における点線で囲まれた八つの領域のうち左下あるいは右上にある領域で停止していた、あるいはその領域内を目的地として移動していたモバイルシンクは、現在の移動を中止し、上下左右の領域のうち現在いる位置に最も近い領域内からランダムに目的地を選択し、移動するものとした。

以上の環境で 1800[秒] のシミュレーションを行い、60[秒] ごとの以下の指標について評価した。

- データ収集率  
過去 60 秒間に発生したデータのうち、モバイルシンクに収集されたデータの割合。
- トラヒック  
過去 60 秒間に送信されたメッセージサイズの総和。

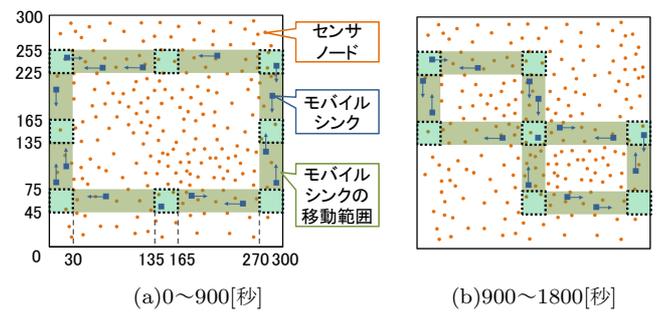


図 4 モバイルシンクの移動範囲

Fig. 4 Moving area of mobile sinks.

## 6.2 比較手法

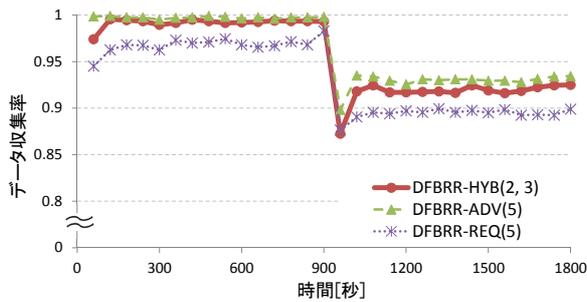
実験では、第 4 章で述べた DFBR-ADV と DFBR-REQ、および第 5 章で述べた DFBR-HYB の性能を比較した。また、それぞれの手法における通知や要求の伝播範囲を変化させ、それらが性能に与える影響を調査した。本章では、説明のため、通知範囲  $H_{adv}$  を  $h_{adv}$  ホップに設定した DFBR-ADV を DFBR-ADV( $h_{adv}$ )、要求範囲  $H_{req}$  を  $h_{req}$  ホップに設定した DFBR-REQ を DFBR-REQ( $h_{req}$ )、通知範囲  $H_{adv}^{hyb}$  および要求範囲  $H_{req}^{hyb}$  をそれぞれ  $h_{adv}$  ホップ、 $h_{req}$  ホップに設定した DFBR-HYB を DFBR-HYB( $h_{adv}, h_{req}$ ) と表記する。

## 6.3 評価結果

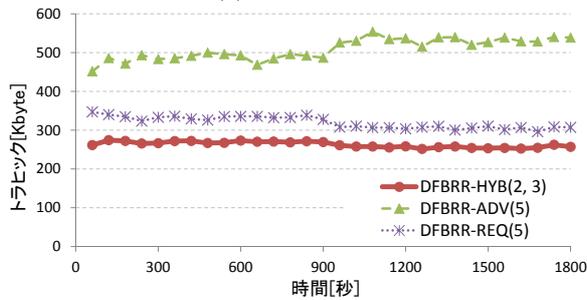
### 6.3.1 同一ホップ数での比較

まず、DFBR-HYB における通知範囲および要求範囲の総計を、DFBR-ADV における通知範囲  $H_{adv}$  および DFBR-REQ における要求範囲  $H_{req}$  と等しくした場合の性能を比較した。ここでは、総計を 5 ホップに設定し、DFBR-ADV(5)、DFBR-REQ(5)、および DFBR-HYB(2, 3) の性能を比較した。シミュレーション結果を図 5 に示す。グラフの横軸はシミュレーション開始からの経過時間を表し、縦軸はそれぞれ、図 5(a) はデータ収集率、図 5(b) はトラヒックを表す。

図 5(a) より、モバイルシンクの移動特性が安定している状態では、DFBR-HYB におけるデータ収集率が



(a) データ収集率



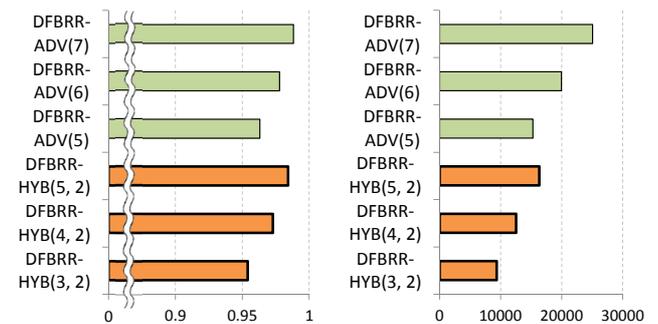
(b) トラフィック [Kbyte]

図 5 性能比較

Fig. 5 Performance comparison.

DFBR-REQ より高く、DFBR-ADV に近い値を示すことがわかる。DFBR-REQ におけるデータ収集率が他の手法と比較して低くなるのは、DFBR-REQ における接続状況要求パケットがデータ取得時のみ送信されるためである。この要求の際に、応答を受信できなかったセンサノードは、データの生存時間内に接続状況情報を取得することが難しいため、データ転送に失敗してしまう。一方、DFBR-ADV では、データ取得時に接続状況情報を所持していなかったとしても、後から接続状況通知パケットを受信できる可能性が高いため、データ収集率が高い。DFBR-HYB も DFBR-REQ と同じ理由でデータ収集率が低下するが、接続状況通知パケットにより接続状況情報がある程度拡散されており、これらセンサノードが接続状況情報を受信できない状況が DFBR-REQ に比べ発生しにくい。その結果、DFBR-HYB におけるデータ収集率の低下は DFBR-REQ より小さくなる。

また、モバイルシークの移動特性が変化してから再び安定するまでの期間 (図 5(a) の 960[秒] 付近) においては、すべての手法でデータ収集率が低下する。このとき、DFBR-HYB におけるデータ収集率の低下は従来手法と比較して若干大きいことがわかる。これは、モバイルシークの移動特性変化後に通知範囲外になったセンサノードが、移動特性変化前の接続状況情報を所持していた場合、そのセンサノードは通知による新しい接続状況情報を得られず、データパケットを誤って転送してしまう。このように DFBR-HYB では、通知と要求それぞれの範囲を小さくしたために、モバイルシークの移動特性変化直後のデータ



(a) データ収集率

(b) トラフィック

図 6 通知範囲による影響

Fig. 6 Effects of hop limit for advertisement.

収集率が大きく低下してしまう。

図 5(b) より、DFBR-HYB におけるトラフィックは、従来手法より小さくなるのがわかる。無線センサネットワークでは、フラッディングの範囲 (ホップ数) を増加させると、トラフィックが指数関数的に増加する。DFBR-HYB では、通知や要求の伝播範囲を小さく設定することで、フラッディング範囲増加に伴うトラフィックの増大を抑制できる。

### 6.3.2 フラッディング範囲による影響

次に、通知や要求をフラッディングする範囲を変化させたときの、各手法における性能の変化を評価した。なお、データ収集率およびトラフィックの時間的な推移は、フラッディングの範囲にかかわらず図 5 と同様の傾向を示したため、本項では、シミュレーション期間全体におけるデータ収集率およびトラフィックを示し、手法間における性能の差異を議論する。

まず、DFBR-ADV と DFBR-HYB において、通知範囲を変化させた場合の結果を図 6 に示す。なお、DFBR-HYB における要求範囲は 2 ホップに設定した。

図 6(a) より、通知範囲の増加に伴い、どちらの手法もデータ収集率が高くなるのがわかる。これは、接続状況情報を共有する範囲を拡大することで、接続状況情報を取得できず、データ転送が行えなかったセンサノードの数が減少するためである。

図 6(b) より、通知範囲の増加に伴い、どちらの手法もトラフィックが増加することがわかる。また、通知範囲が等しい DFBR-HYB(5,2) と DFBR-ADV(5) を比較すると、前者のトラフィックが後者とほぼ同等の値となるのがわかる。これは、接続状況通知パケットが広範囲にフラッディングされており、多くのセンサノードが接続状況情報を保持し、頻繁に情報を更新しているため、データを取得したときに接続状況要求パケットのフラッディングがほぼ発生せず、またその伝播範囲も小さく抑えられるためである。これらの結果より、DFBR-HYB では、通知範囲を DFBR-ADV と同程度にしても、トラフィックを大きく増加させることなく、データ収集率を向上させることがわ

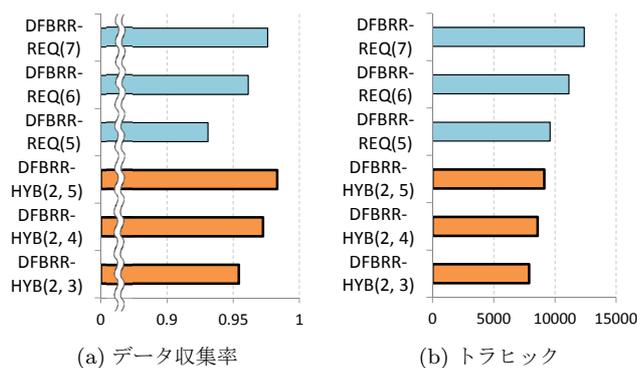


図 7 要求範囲による影響

Fig. 7 Effects of hop limit for request.

かる。

次に、DFBR-REQ と DFBR-HYB において、要求範囲を変化させた場合の結果を図 7 に示す。なお、DFBR-HYB における通知範囲は 2 ホップに設定した。

図 7(a) より、通知範囲を増大させた場合と同様に、要求範囲の増加に伴い、どちらの手法もデータ収集率が高くなることがわかる。

図 7(b) より、要求範囲の増加に伴い、どちらの手法もトラフィックが増加することがわかる。ここで、DFBR-HYB における要求範囲を増加させた場合のトラフィックの増加量が、DFBR-REQ と比較して小さい。また、要求範囲が等しい DFBR-HYB(2,5) と DFBR-REQ(5) を比較すると、前者のトラフィックが後者より小さくなることがわかる。これは、接続状況通知パケットを受信したセンサノードは接続状況情報を要求しないため、接続状況要求パケットがフラッディングされる機会が減少することに起因する。また、接続状況通知パケットによって接続状況情報を保持するセンサノード数が一定の範囲内に存在しており、これらのセンサノードが接続状況要求パケットに応答する。そのため、接続状況要求パケットの伝播が抑制され、トラフィックが減少している。これらの結果より、DFBR-HYB は、DFBR-REQ と比較して、フラッディング範囲の増加に伴うトラフィックの増加を削減できることがわかる。

## 7. おわりに

本稿では、無線センサネットワークにおいて、筆者らがこれまでに提案したモバイルシンクとの接続状況に基づくデータ転送先決定手法である DFBR における接続状況情報共有手法として、プッシュ・プル統合型の DFBR-HYB を提案した。DFBR-HYB では、接続状況を共有するために行うフラッディングの範囲を小さく設定することで、従来手法と比較してトラフィックの増大を抑制できる。また、通知および要求を併用することによって、接続状況情報を必要とするセンサノードへ適切に情報が伝播し、データ収集の成功率を高く維持できる。

DFBR では、モバイルシンクの移動特性が変化した場

合、転送先リストの更新が間に合わず、一時的にデータ収集率が低くなる。そこで今後は、このようなデータ収集率の低下を抑制するため、移動特性の変化を迅速に検知する方法や、誤った接続状況情報に基づいて転送されたデータパケットを適切なセンサノードへ再転送する方法について検討する予定である。さらに、DFBR-HYB は接続状況情報の共有時に依然としてフラッディングを用いているため、大規模なネットワークにおいては、接続状況を共有するためのトラフィックが増大してしまう可能性がある。そこで、フラッディングを用いずに、より効率的に接続状況を共有する方法について検討する予定である。

## 謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金・基盤研究(S)(21220002) および国家課題対応型研究開発推進事業一次世代 IT 基盤構築のための研究開発－「社会システム・サービスの最適化のための IT 統合システムの構築」(2012 年度～2016 年度)、日本学術振興会科学研究費補助金・若手研究(B)(23700078) による成果である。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] Akkaya, K. and Younis, M.: A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks, *Ad Hoc Networks*, Vol.3, No.3, pp.325–349 (2005).
- [2] Akyidiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. and Cayirci, E.: A Survey on Sensor Networks, *IEEE Communications Magazine*, Vol.40, No.8, pp.102–114 (2002).
- [3] Fodor K. and Vidács, A.: Efficient Routing to Mobile Sinks in Wireless Sensor Networks, *Proc. Int'l Conf. on Wireless Internet (WICON 2007)*, pp.1–7 (2007).
- [4] Intanagonwiwat, C., Govindan, R. and Estrin, D.: Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks, *Proc. ACM Mobi-com 2000*, pp.56–67 (2000).
- [5] Kanzaki, A., Yamamoto, A., Hara, T. and Nishio, S.: Data Forwarding Method Based on Status of Connection with Multiple Mobile Sinks in Wireless Sensor Networks, *Proc. Int'l Conf. on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA 2012)*, pp.170–177 (2012).
- [6] Luo, J., Panchard, J., Piorkowski, M., Grossglauser, M. and Hubaux, J.-P.: MobiRoute: Routing Towards a Mobile Sink for Improving Lifetime in Sensor Networks, *Proc. IEEE/ACM DCSS 2006*, pp.10–11 (2006).
- [7] Seino, W., Sakashita, S., Yoshihisa, T., Hara, T. and Nishio, S.: A Communication Protocol to Improve Fairness and Data Amount on Sensor Data Collection with a Mobile Sink, *Proc. Int'l Conf. on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA 2010)*, pp.33–40 (2010).