

特別研究報告

題目

大規模センサネットワークにおける
クラスタ間マルチホップ通信の性能評価

指導教授

村田 正幸 教授

報告者

木利 友一

平成 18 年 2 月 20 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

大規模センサネットワークにおけるクラスタ間マルチホップ通信の性能評価

木利 友一

内容梗概

非常に小型のセンサノードで構成されるセンサネットワークにおいて、それぞれのセンサノードは小容量のバッテリーで駆動されるため通信可能距離は一般的に短い。したがって、センシングする領域が広くなれば、センサノード同士が互いにパケットを中継するマルチホップ通信が必要とされる。また、多数のセンサノードからなる大規模なセンサネットワークでは、センサノードをいくつかのクラスタにグループ化し、さらに各センサノードが局所的な情報のみに基づき自律分散的に自分の動作を決定できることが望まれる。領域内のすべてのセンサノードの位置などのネットワーク全体の大域的な情報が利用可能であれば、干渉を完全に回避できる送信スケジュールが構成できるが、局所的な情報しか利用できない場合は、通信範囲内にあるセンサノード同士の通信の干渉を避けることはできず、衝突によってパケット損失が発生する。したがって、アプリケーションが確実にパケットを収集することを要求する場合は、再送を行う必要がある。

本報告では大規模なセンサネットワークを対象に、クラスタヘッド間でマルチホップ通信を行った場合の特性をシミュレーションを通じて明らかにする。まず、大域的な情報が利用可能とした場合のクラスタヘッド間マルチホップ通信および比較対象の方式に対して、クラスタヘッドの割合、クラスタ半径などの制御パラメータやデータフュージョンによってネットワーク寿命やパケット収集時間がどのように影響を受けるかを明らかにした。次に局所的な情報のみが利用可能でパケット損失に対する再送を行う場合と比較する。この比較により、大域的な情報の利用が可能な場合に対し、局所的な情報のみに基づいた場合の領域ごとの消費電力の増加、それに伴うパケット収集率の変化、パケット収集時間を調べ、大域的な情報が利用可能な場合に対して、同じデータ量を収集するために 55% 増の電力を必要とし、パケット収集時間も約 4 倍になることを明らかにした。

主な用語

センサネットワーク、クラスタリング、マルチホップ通信、シミュレーション、干渉

目次

| | | |
|-------|----------------------------------|----|
| 1 | はじめに | 6 |
| 2 | 関連研究 | 9 |
| 2.1 | センサネットワークにおけるクラスタリングに関する研究 | 9 |
| 2.2 | センサネットワークにおけるクラスタ間マルチホップ通信に関する研究 | 10 |
| 3 | 対象とするセンサネットワークモデル | 12 |
| 3.1 | ネットワークモデル | 12 |
| 3.2 | 電力モデル | 14 |
| 3.3 | クラスタリング | 14 |
| 3.4 | ルーティング | 16 |
| 4 | 大域的情報を利用したクラスタ間マルチホップ通信 | 19 |
| 4.1 | 干渉のない送信スケジュールの構成 | 19 |
| 4.2 | クラスタヘッド間マルチホップ通信の基本的特性評価 | 22 |
| 4.2.1 | 観測領域が狭い場合 | 24 |
| 4.2.2 | 観測領域が広い場合 | 26 |
| 5 | 局所的な情報のみを利用できる場合のクラスタ間マルチホップ通信 | 42 |
| 5.1 | クラスタ間マルチホップ通信の概要 | 42 |
| 5.2 | CSMA/CA | 42 |
| 5.3 | 大域的情報に基づいたスケジューリングを行う場合との比較評価 | 44 |
| 5.3.1 | 消費電力の比較 | 44 |
| 5.3.2 | パケット収集率の変化の比較 | 47 |
| 5.3.3 | パケット収集時間の比較 | 52 |
| 6 | おわりに | 57 |
| | 謝辞 | 58 |
| | 参考文献 | 59 |

図目次

| | | |
|----|---|----|
| 1 | センサネットワーク | 7 |
| 2 | データフュージョンによるパケットの削減 | 10 |
| 3 | ネットワークモデル | 13 |
| 4 | 干渉が発生する場合 | 13 |
| 5 | クラスタ内マルチホップ通信における次ホップの決定方法 | 17 |
| 6 | クラスタ間マルチホップ通信における次ホップの決定方法 | 18 |
| 7 | 各データ通信方式の概略 | 23 |
| 8 | 半径 60m の観測領域におけるシンクノードからの距離と、ラウンドあたりのセンサノードごとの消費電力の関係 | 25 |
| 9 | LEACH のクラスタを構成しクラスタヘッド間でマルチホップ通信を行う場合において、クラスタヘッドの割合がパケット収集率の変化に与える影響 | 27 |
| 10 | HEED のクラスタを構成しクラスタヘッド間でマルチホップ通信を行う場合において、クラスタヘッドの割合がパケット収集率の変化に与える影響 | 28 |
| 11 | 半径 500m の観測領域におけるシンクノードからの距離と、ラウンドあたりのセンサノードごとの消費電力の関係 | 30 |
| 12 | クラスタヘッドの割合が消費電力に与える影響（データフュージョンを行わない場合） | 32 |
| 13 | クラスタヘッドの割合が消費電力に与える影響（データフュージョンを行う場合） | 33 |
| 14 | 観測領域周縁部のクラスタの状態 | 34 |
| 15 | 各方式でのパケット収集率の変化 | 35 |
| 16 | 第 60 ラウンドにおけるセンサネットワークの状況 | 36 |
| 17 | 第 600 ラウンドにおけるセンサネットワークの状況 | 37 |
| 18 | データフュージョンを行わない場合のパケット収集時間 | 38 |
| 19 | クラスタヘッドの割合がパケット収集時間に与える影響 | 39 |
| 20 | データフュージョンを行う場合のパケット収集時間 | 40 |
| 21 | クラスタヘッドの割合が 95% パケット収集時間に与える影響 | 40 |
| 22 | クラスタヘッドの割合によるパケット収集時間への影響（データフュージョンを行う場合） | 41 |
| 23 | 送信アルゴリズム | 43 |
| 24 | 最大バックオフ回数がデータ収集率の変化に与える影響（データフュージョンが不可能な場合） | 44 |

| | | |
|----|---|----|
| 25 | シンクノードからの距離と，ラウンドあたりのセンサノードごとの消費電力の関係（データフュージョンを行わない場合） | 46 |
| 26 | シンクノードからの距離と消費電力の増加割合の関係（データフュージョンを行わない場合） | 47 |
| 27 | シンクノードからの距離と，ラウンドあたりのセンサノードごとの消費電力の関係（データフュージョンを行う場合） | 48 |
| 28 | シンクノードからの距離と消費電力の増加割合の関係（データフュージョンを行う場合） | 49 |
| 29 | パケット収集率の変化の比較（データフュージョンを行わない場合） | 50 |
| 30 | シンクノードからの距離と再送回数の関係（データフュージョンを行わない場合） | 51 |
| 31 | 初期電力を 20 J にした場合のパケット収集率の変化（データフュージョンを行わない場合） | 51 |
| 32 | パケット収集率の変化の比較（データフュージョンを行う場合） | 53 |
| 33 | パケット収集時間の比較（データフュージョンを行う場合） | 54 |
| 34 | パケット収集時間の比較（データフュージョンを行わない場合） | 55 |
| 35 | シンクノードに直接送信するセンサノードの平均バッファ内パケット数 | 56 |

表目次

| | | |
|---|-------------------------|----|
| 1 | シミュレーションパラメータ | 24 |
|---|-------------------------|----|

1 はじめに

無線技術，半導体技術の飛躍的な進歩により，小型のセンサに無線通信機能を持たせることが可能になった．このような無線通信機能を持つセンサノード同士でネットワークを構成する無線センサネットワークが，災害予測，防災，防犯をはじめ，環境モニタリングや交通管制，情報家電や在庫管理などの多くの分野で注目を浴びている．単一のセンサが感知できるのはセンサ近傍の「点」の情報でしかないが，センサネットワークでは，図1のように各センサノードがセンシングした情報をシンクノードと呼ばれるデータ収集地点に送り，集まったデータをエンドユーザが処理することによって，観測領域全体の「面」としての情報を得ることが可能になる．

その一方で，センサネットワークの普及については未だ多くの課題が残されている．例えばセンサネットワークを構成するセンサノードの数は数百，ときには数千以上に及ぶ．このように大規模になると，センサノードに対してその位置や送受信機の ON/OFF のタイミング，送信電力の制御などのセンサノードとしてのさまざまな動作を，個々に設定することは現実的に不可能であり，センサノード自体が，配置された状況に応じて自律的に決定する仕組みが必要となる．また，多数のセンサノードを動作させても性能を維持できるようなスケラビリティや，数個のセンサノードの故障がネットワーク全体の機能に影響を与えないような対故障性も重要である．

ネットワークを構成する個々のセンサノードに関しても，センサノードの小型化と低コスト化の両立，耐環境性，干渉の少ない無線通信方式などの技術的課題は多い．特に，センサノードは一般に小容量のバッテリーによって動作し，その稼働時間がセンサネットワークとしての機能を維持できる時間に大きな影響を与えるため，センサノードはできる限り消費電力を抑えつつ動作しなければならない．受信時の電波強度は，送信時と比較して送信距離の n 乗 ($n \in \{2, 4\}$) に比例して減衰する．そのため，受信側で正しくパケットを受信するためには，送信電力をセンサノード間距離の n 乗に比例させて大きくしなければならない．電力消費の主な原因はこの送信電力になることから，送信距離を抑えるためのさまざまな方法について提案がされてきた．離れた距離にあるシンクノードに各センサノードが直接通信を行うと，送信距離が長いために電力消費が大きくなってしまう．そこで LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [1] では，センサノード同士で少数のクラスタを構成し，クラスタヘッドのみがシンクへの長距離送信を行うことでこの問題を解決している．クラスタヘッドはセンサノード全体から見ると少数であり，ほとんどのセンサノードはクラスタヘッドへの短距離通信ですむことから，ネットワーク全体の消費電力を抑制することができる．一般にクラスタリングはこのような通信距離を抑制できるというメリットだけでなく，センサノードの故障やクラスタ内でのルーティングの情報などをクラスタ内のみにとどめ，クラ

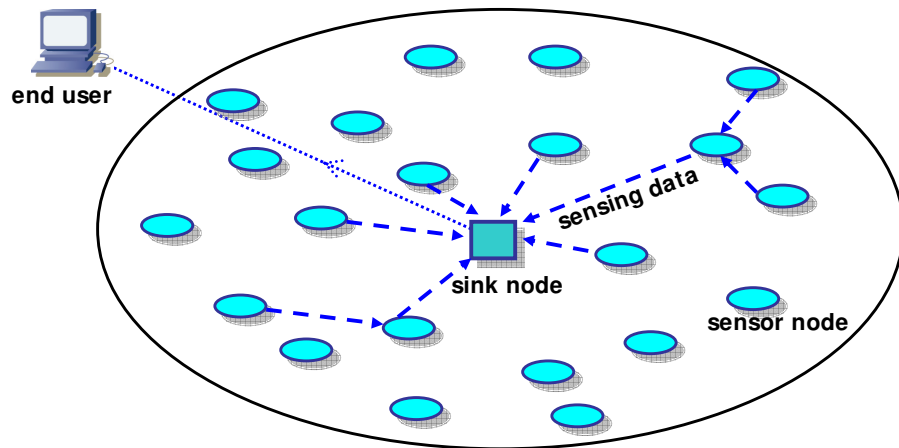


図 1: センサネットワーク

スタ外にはこれらの影響が伝播しないことから，スケーラビリティ，対故障性の点でも望ましい方法であり，クラスタの構成方法に関してはLEACH以外にも様々な研究がなされている [2-6]．しかしながら，センシング領域がセンサノードの最大通信距離より大きくなると，LEACHのようにクラスタヘッドとシンクノードが直接通信を行う方式は適用することができない．例えば現在センサネットワーク用の規格として注目を浴びている ZigBee の最大通信距離は 100m 程度とされているが，気温・湿度といった環境情報のセンシングなど，数百，数千 m という範囲のセンシングが必要となるアプリケーションでは，最大通信距離の問題により，シンクノードと直接通信ができるのは一部のセンサノードのみに限られてしまう．したがってこのような広い領域をセンシングする場合，領域の周辺部に位置するセンサノードで発生したパケットを，よりシンクノードに近いセンサノードがマルチホップ通信を用いて中継する必要がある．

以上からクラスタを構成した後マルチホップ通信を行う方法が，大規模なセンサネットワークでは望ましいと考えられ，既にクラスタヘッド間でマルチホップ通信を行い，シンクノードまでセンシングデータを届けるセンサネットワークを対象にした研究がいくつかなされている．それらの研究では，ネットワーク全体の消費電力に着目することでセンサネットワークの稼働時間の長期化を目指したり，クラスタヘッド間の消費電力の偏りの抑制に主眼

をといった方式を提案している．しかしながら，クラスタヘッド間でマルチホップ通信を行った場合に，消費電力やデータ収集時間がクラスタの大きさなどの制御パラメータによってどのような影響を受けるかが十分明らかにされているとはいえない．特に，観測領域中のどの領域でセンサノードの電力枯渇が発生し，それがセンサネットワークの情報収集にどのような影響を与えるかは重要な問題であると考えられるが，その影響の程度は詳しく調べられているわけではない．また，従来の研究はセンサノード間通信の干渉がないという仮定が置かれていることが多いが，高密度にセンサノードが置かれる大規模なセンサネットワークにおいて，各センサノードが局所的な情報しか利用することができなければ，頻繁に干渉が発生することが予想される．したがって，このような干渉によるパケット損失や再送による負荷の増加の影響を明らかにする必要がある．

本報告では，複数のクラスタを構成しクラスタ間およびクラスタ内でマルチホップ通信を行うセンサネットワークを対象とする．まず，ネットワーク全体のセンサノードの位置といった大域的情報が利用可能な場合のクラスタヘッド間マルチホップ通信の基本的な性能を調べる．大域的情報が利用可能であれば，各センサノードからシンクノードへのパケット収集の過程において完全に干渉を避けるような送信スケジュールの構成が可能になる．このときのパケット収集時間やどの領域でどの程度の電力が消費されるか，そして領域ごとの消費電力とセンサネットワークの稼働時間との関係を調べることで，クラスタ間およびクラスタ内でマルチホップ通信を行った場合の基本的特性を明らかにする．

次に，干渉が避けられない場合を考え，再送を行うメカニズムを取り入れた場合の性能を調べる．センサノードが多数かつ高密度に配置されるような大規模なセンサネットワークでは，メッセージ量，収集時間の点から，大域的な情報を取得するのは現実的に困難である．各センサノードは局所的な情報のみに基づいて動作しなければならず，干渉のない送信スケジュールを構築することができない．パケットを確実にシンクノードに届ける必要があるアプリケーションを仮定すれば，干渉に伴うパケット損失が発生した場合には再送が必要であり，そのために消費電力や遅延が増大する．このような要因によって，性能面でどの程度の劣化が生じるかの評価を行う．

本報告の内容は以下のとおりである．まず2章でセンサネットワークにおけるクラスタリング，クラスタ間マルチホップ通信の関連研究を挙げる．3章では本報告で対象とするセンサネットワークについて説明する．4章で，大域的情報を利用できる場合について，他の方式との比較により，センサネットワークの基本的性能を明らかにする．また，制御パラメータの性能への影響も示す．5章では，局所的情報のみが利用可能で干渉が避けられない場合のセンサネットワークの性能を示す．6章でまとめと今後の課題について述べる．

2 関連研究

2.1 センサネットワークにおけるクラスタリングに関する研究

センサネットワークにおいて、消費電力を抑えるためにクラスタを構成する方法として提案されたものの1つがLEACH [1]である。LEACHではクラスタヘッドから1ホップで到達できるようなセンサノードから構成されるクラスタを構成する。各センサノードはあらかじめ設定された確率 P でクラスタヘッドに立候補し、クラスタヘッド広告を観測領域全体へとブロードキャストする。クラスタヘッドでないセンサノードはその広告を受信し、受信電波強度に基づいて自分の属するクラスタを決定する。クラスタヘッドはクラスタ内の非クラスタヘッドノードからパケットを収集し、それらのパケットを図2のように1つのパケットに融合(データフュージョン)させた後、シンクノードへと送信する。クラスタヘッドのみがシンクノードへの長距離通信を担当し、ほかの大多数のセンサノードはクラスタヘッドへの短距離通信でよいことから、全体としての消費電力の低減を実現することができる。また、クラスタヘッドは非クラスタヘッドノードに対して、直接シンクノードと通信を行うことにより大きな負荷を負うため、ラウンドと呼ばれる周期ごとに再クラスタリングを行うことでクラスタヘッドの役割をセンサノード間で交替させ、クラスタヘッドになる回数を等しくするアルゴリズムも導入されている。

LEACHではセンサノードからクラスタヘッドへの通信は1ホップで行われるが、それをマルチホップ通信とすることで干渉範囲を抑え、できるだけ多くの同時並行通信を行うプロトコルとしてHIT (Hybrid Indirect Transmission) [5]が提案されている。HITはセンサノード間で同期が取れていることを前提にしており、LEACHに類似したクラスタリングを行った後、センサノード間で位置や隣接ノードなどの情報を複数回交換することにより、隣接クラスタ間でも干渉を起こさない送信スケジューリングやルーティングをセンサノードが自律的に行う。[5]の著者はHITを用いることによって、LEACHに対して送信電力だけでなくパケットの収集に要する遅延も改善できると述べている。

また、LEACHの用いているクラスタの構成法ではクラスタの位置や大きさに偏りが生じるが、このような偏りによって、負荷が集中するセンサノードの消費電力が大きくなり、結果としてセンサネットワークの稼働時間を短くしてしまう。そこで[6]では各クラスタの大きさを一定にするような中央制御型のアルゴリズムを提案している。また[3]で提案されているHEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed clustering)では、各センサノードがクラスタヘッドになる確率を初期電力 E_{max} とその時点での残余電力 $E_{residual}$ の比の関数とし、より残余電力のあるセンサノードがクラスタヘッドに立候補しやすくしている。さらにクラスタを構築する過程で自身がクラスタヘッドに立候補した後であっても、隣接ノード中により優れたクラスタを構成できるクラスタヘッドを発見すれば、自身はクラスタヘッドの役割

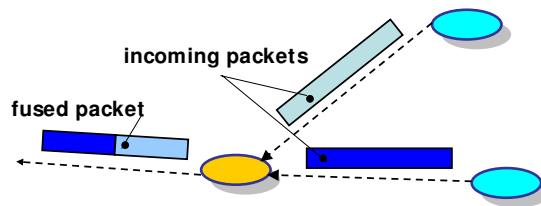


図 2: データフュージョンによるパケットの削減

を放棄し、そのクラスタヘッドに属することで、エリア全体に対するクラスタヘッドの一樣配置を実現している。

送信距離を小さくすることで消費電力を抑制しようという考えから、PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) [7] ではクラスタではなく、最も近いセンサノード同士を結んだチェーンを構成する。また、このチェーンをクラスタ内に取り入れた TPC (Two-Phase Clustering) [2] も提案されている。TPC ではクラスタを構成後、クラスタ内でチェーンを構成することで消費電力を抑えることができる。チェーンを構成する欠点はホップ数の増大による遅延の増加であるが、TPC ではこの遅延に対して上限を設けることも可能にしている。

2.2 センサネットワークにおけるクラスタ間マルチホップ通信に関する研究

クラスタの構成法に対して数は多くないものの、センサネットワークにおけるクラスタ間マルチホップ通信に関する研究もいくつかなされている。観測領域を複数の正方形領域に分割し、その頂点に位置するクラスタヘッド間でマルチホップ通信を行う方式として [8] がある。また、シンクノードが中央制御でクラスタヘッドを選択し、センサノードにクラスタを構成させる LEACH-C [9] のクラスタリングを行い、各クラスタに存在するクラスタヘッド間でマルチホップ通信を行う研究として [10] がある。しかし前者はネットワーク全体における消費電力のみしか評価しておらず、また、クラスタヘッドの位置に対して特殊な条件を置いているため、一般的なマルチホップ通信の性能を表すものではない。一方後者はクラスタ数を 4 つに制限したマルチホップ通信ネットワークが対象であり、大規模なネットワークでマルチホップ通信を用いた場合の振る舞いは明らかではない。

[11] では、クラスタヘッド間マルチホップ通信を行う場合にシンクノードに近いクラスタヘッドのパケットの中継負荷が大きくなるという hot spot problem に着目し、円形の観測領域をレイヤと呼ばれる 2 つの同心円に分割し、内側のレイヤ内のクラスタサイズを小さくすることで各クラスタヘッドの消費電力を等しくする UCS (Unequal Clustering Size) を提

案している．また，[12] では観測領域を複数のレイヤに分割し，coverage-time を最長にする各レイヤのクラスタ半径や中継確率などの最適パラメータを導出している．これらはネットワーク全体としての消費電力やクラスタヘッドの消費電力に主眼が置かれており，その他の性質についてはほとんど述べていない．

3 対象とするセンサネットワークモデル

本章では、本報告で対象とする各モデルについて述べる。まず 3.1 節において、対象とするネットワークおよびセンサについて述べ、通信の流れと干渉条件について簡単に説明する。3.2 節では、センサノードの電力消費モデルを定義する。3.3 節でクラスタリングの方法について具体的に説明し、最後に、マルチホップ通信を行う際の次ホップとなるセンサノードの決定基準を 3.4 節で述べる。

3.1 ネットワークモデル

本報告で対象とするセンサネットワークについて説明する。まずセンサノードによってセンシングが行われる観測領域は円形であるとする。シンクノードは、その中心である座標 $(0, 0)$ に配置される (図 3)。センサノードは観測領域内のランダムな位置に一様に配置され、移動はしないものとする。すべてのセンサノードは同じ初期電力、計算能力、通信能力を有し、データフュージョンを行うことができる。各センサノードはさらに、通信相手との距離によって送信電力を変更する送信電力制御機能を持つ。この機能によって通信範囲が必要以上に広がることを防ぎ、干渉範囲を小さくすることができる。また、全てのセンサノードは同期しているものとする。すなわち、各センサノードは固定長のタイムスロットに合わせてパケットの送受信を行う。通信に用いる無線チャネルは、センサノード間通信のためのチャネルと、クラスタヘッド間通信のためのチャネルであり、それぞれ全ネットワークで同一とする。そのため、異なるクラスタに属しているセンサノード間であっても干渉が発生し得る。

受信ノードが複数のセンサノードのパケットを同時に受信した場合には、結果として正しくパケットを受信できない状況が発生する。これをパケットの干渉と呼ぶ。この干渉を考慮するために、本報告では [5] で用いられている干渉モデルを用いる。今、図 4 のようにセンサノード n_i が距離 r_i だけ離れたセンサノード u_i に送信するのと同時に、センサノード n_j が r_j だけ離れたセンサノード u_j に送信する場合を考える。このときセンサノード u_i は、 n_i から r_i の距離に位置すると同時にセンサノード n_j から r_j 以内の距離にあるため、センサノード n_i 、センサノード n_j 双方のパケットを同時に受信してしまうことになる。この結果センサノード u_i は正しくパケットを受信できない。この状況を式で表せば式 (1) のようになる。つまり、この式を成立させるようなセンサノード n_i, n_j が同時にパケットを送信した場合にパケットの干渉が発生する。

$$d(u_i, n_j) < r_j \quad (1)$$

なお、 $d(u_i, n_j)$ はセンサノード u_i とセンサノード n_j 間の距離を表している。

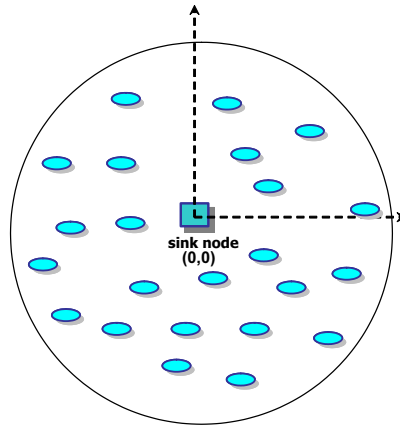


図 3: ネットワークモデル

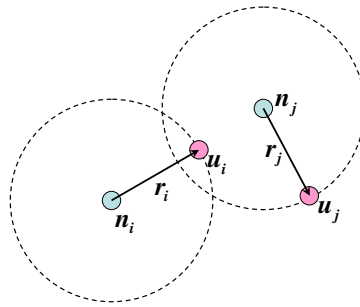


図 4: 干渉が発生する場合

次に通信の概略を説明する．観測領域内の全てのセンサノードから，シンクノードがそれぞれ1つのパケットを収集するのに必要なタイムスロットをサイクルと定義する．データ伝送はまず，各サイクルの最初に全センサノードが一斉に各々のセンシングを行うことから始まる．センシングされた情報は，各センサノードのバッファに蓄えられる．センシングが終わり、データ通信フェーズに移行すると，各センサノードは自分でセンシングし，生成したパケットおよび中継パケットを届けるため，次のホップとなるセンサノードへとパケットを送信する．シンクノードがすべてのセンサノードからのパケットを収集すると，新たなサイクルが開始される．この動作が周期的に繰り返される．

3.2 電力モデル

センサノードは小容量のバッテリーを用いてセンシングやパケットの送受信などを行う。センサネットワークとしての稼働時間はセンサノード自体の稼働時間に依存するため、センサノードの各動作で消費する電力量を定める電力モデルが、ネットワークとしての機能を維持できる期間に大きな影響を与えることになる。本報告においては [1] と同じく、センシングによる消費電力は無視できるものとし、パケットの送受信でのみ電力が消費され则认为る。 k [bits] を d [m] 離れたセンサノードまで送信するとき要する消費電力は式 (2) で、 k [bits] 受信する際に要する消費電力は式 (3) で与えられるものとする。

$$E_{T_x} = E_{elec}k + \epsilon_{amp}kd^2 \quad (2)$$

$$E_{R_x} = E_{elec}k \quad (3)$$

1 bit のデータを送受信するための回路駆動用電力が定数 E_{elec} [J/bit] であり、1 bit のデータを 1 m の距離だけ送信する際に増幅器で消費される電力が定数 ϵ_{amp} [J/bit/m²] である。また、 k [bits] のデータを 1 つのパケットにデータフュージョンするために式 (4) の電力を消費するものとした。

$$E_f = E_{fuse}k \quad (4)$$

ここで E_{fuse} [J/bit/signal] は 1 bit のデータに対してデータフュージョンを行うのに消費される電力である。

3.3 クラスタリング

本報告で用いるクラスタの構成方法は、LEACH [1] で採用されているクラスタリング手法と HEED [3] で採用されているクラスタリング手法である。

LEACH ではまず、各センサノードがクラスタヘッドに立候補するかどうかを決定する。センサノード n は 0 から 1 までのランダムな数を選び、それが $T(n)$ より小さければ、そのラウンドにおけるクラスタヘッドに立候補する。 $T(n)$ は (5) 式で定められる。

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \times (r \bmod \frac{1}{P})} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 P は LEACH における制御パラメータであり、全センサノードに対するクラスタヘッドの割合を表す。 G は直前 $\frac{1}{P}$ ラウンドの間クラスタヘッドに立候補していないセンサノードの集合である。この $T(n)$ によって、各センサノードは $\frac{1}{P}$ ラウンドに一回だけクラスタヘッドに立候補することが保証される。クラスタヘッドに立候補したセンサノードは、ク

ラストヘッド広告をブロードキャストする．他のノードは，そのラウンドにおいて，受信したクラスタヘッド広告の中からもっとも受信強度の強い広告を送信したクラスタヘッドに属し，クラスタを形成する．

HEED で採用されているクラスタリングでは，LEACH と異なり，各ノードはクラスタを構成する過程で N_{iter} 回の繰り返しを必要とする．ただし， $N_{iter} = O(1)$ であることが保証されている．クラスタを構成する際，あらかじめクラスタリングの最初の段階におけるクラスタヘッドの割合 C_{prob} を設定しておく．各センサノードはラウンドの最初に，自身がクラスタヘッドに立候補する確率 CH_{prob} を式 (6) によって計算する．

$$CH_{prob} = \min \left(C_{prob} \times \frac{E_{residual}}{E_{max}}, p_{min} \right) \quad (6)$$

$E_{residual}$ はその時点でのセンサノードの残余電力を表し， E_{max} は初期電力を表す．詳細は省くが， p_{min} は E_{max} に反比例して決められる値であり， $N_{iter} = O(1)$ を保証するために用いられている．

HEED ではクラスタヘッドについて，2 つの状態を定めている． $tentative_CH$ は暫定クラスタヘッドの状態であり， $Final_CH$ が最終的なクラスタヘッドの状態である．クラスタヘッドに立候補したノードは，クラスタヘッドの集合 S_{CH} に加わり，自身の状態を含めたクラスタヘッド広告をブロードキャストする．状態として $Final_CH$ をブロードキャストしたノードは，そのラウンドでクラスタヘッドになることが確定する．一方， $tentative_CH$ をブロードキャストしたノードは，自身よりもクラスタ内通信コストを小さくするようなクラスタヘッドが周囲に存在すれば，クラスタヘッドの役割を放棄し，他のクラスタヘッドに属することができる．以下に i 回目 ($i < N_{iter}$) の繰り返しでのセンサノードの動作を示す．

1. 自身のものも含め，クラスタヘッド広告を1つでも受信できたセンサノードは， S_{CH} からクラスタ内通信コストを最小にするクラスタヘッド CH を自身のクラスタヘッドに選び，1(a)，1(b) を実行する
 - (a) CH が自分自身であれば， CH_{prob} の値に応じて 1(a)i，1(a)ii のどちらかの動作を取る
 - i. CH_{prob} が 1 に達していれば， $Final_CH$ を含めたクラスタヘッド広告をブロードキャストする．
 - ii. CH_{prob} が 1 未満であれば， $tentative_CH$ を含めたクラスタヘッド広告をブロードキャストする
 - (b) CH が自分自身でなければ， CH_{prob} の値に応じて 1(b)i，1(b)ii のどちらかの動作を取る

- i. CH_{prob} が 1 に達していれば, $Final_CH$ を含めたクラスタヘッド広告をブロードキャストする
 - ii. CH_{prob} が 1 未満であれば, 0 から 1 のランダムな数字 r を選び, $r < CH_{prob}$ のときにのみ暫定クラスタヘッドに立候補し, $tentative_CH$ を含めたクラスタヘッド広告をブロードキャストする.
2. クラスタヘッド広告がまったく受信できず, かつ CH が 1 に達していれば, センサノードは $Final_CH$ を含めたクラスタヘッド広告をブロードキャストする.
 3. CH_{prob} が 1 に達していれば終了.
 4. CH_{prob} を 2 倍にして, 1. から繰り返す.

なお, [3] ではクラスタ内通信コストとして 3 種類のコストの提案をしているが, 本報告ではクラスタの大きさを一定にすることを目指し, minimum degree cost を用いた.

全センサノードが上記の処理を終了した時点で, クラスタリングは終了する. HEED では残余電力によってクラスタヘッドに立候補する確率が決まるため, LEACH に比べて各センサノード間での残余電力のバランスが取れる. また, 暫定クラスタヘッドは, より良いクラスタを構成できるようなクラスタヘッドが周囲にあれば, そのクラスタヘッドに属することができる. そのため, クラスタヘッドが隣り合う確率は非常に小さくなり, クラスタは観測領域全体に一様に分布する.

3.4 ルーティング

クラスタ間マルチホップ通信を用いるにあたり, どのセンサノードにパケットを中継させるかという, 中継ノードの決定が必要になる. 実際に中継させるセンサノードを決める際の指標としては, 中継ノードまでの距離, 候補ノードの残余電力などさまざまなものが考えられるが, 本報告においては単純に中継ノードまでの距離のみを基準とした.

まず, クラスタ内でのマルチホップ通信における中継ノードの決定方法に関して, パケットを送信するセンサノードを n_s , センサノードの最大通信距離を r_{max} , 中継ノードを n_i , n_s のクラスタヘッドを CH_{n_s} と表す. n_s はクラスタヘッドまでのマルチホップ通信を行うために

$$d(n_i, CH_{n_s}) < d(n_s, CH_{n_s}) \quad (7)$$

$$d(n_s, n_i) < d(n_s, CH_{n_s}) \quad (8)$$

$$d(n_s, n_i) \leq r_{max} \quad (9)$$

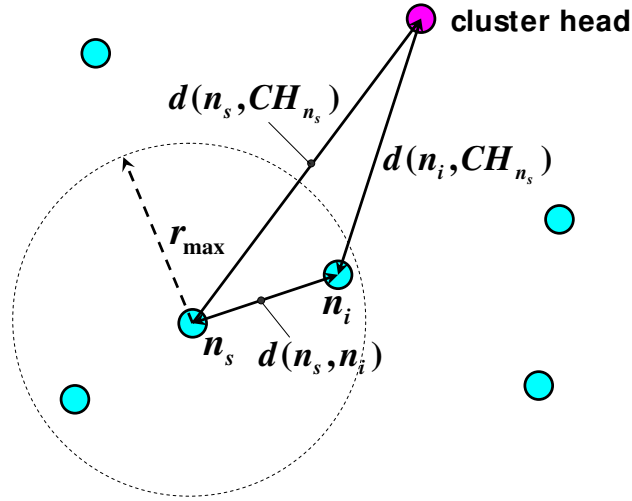


図 5: クラスタ内マルチホップ通信における次ホップの決定方法

の 3 つの式を成立させる n_i の中で最も n_s に近いノードを次ホップのセンサノードとして選ぶ。式 (7) は中継ノードが送信ノードよりクラスタヘッドに近い位置にあること、式 (8) は送信ノードがクラスタヘッドに送信するより中継ノードに送信した方が距離が短くなること、式 (9) は中継ノードがセンサノードの最大通信距離以内であることを表現している。ここで、 n_i は n_s と同じクラスタに属するノードである。そのような n_i が存在せず、 $d(n_s, CH_{n_s}) \leq r_{max}$ であれば、 n_s の次ホップとなるセンサノードはクラスタヘッド CH_{n_s} となる。図 5 に n_s の次ホップとして n_i が選ばれる場合を示した。

クラスタヘッド間でのマルチホップ通信における中継ノードの決定方法も、上記のものとはほぼ同じである。シンクノードを S と表すと、パケット送信を行うクラスタヘッド CH_s に対して、

$$d(CH_i, S) < d(CH_s, S)$$

$$d(CH_s, CH_i) < d(CH_s, S)$$

$$d(CH_s, CH_i) \leq r_{max}$$

の 3 式を成立させる CH_i の中で最も CH_s に近いクラスタヘッドを中継ノードとして選ぶ。そのような CH_i が存在せず、 $d(CH_s, S) \leq r_{max}$ を満たすのであれば、次ホップはシンクノードとなる。図 6 に CH_s の次ホップとして CH_i を選ぶ場合の例を示す。

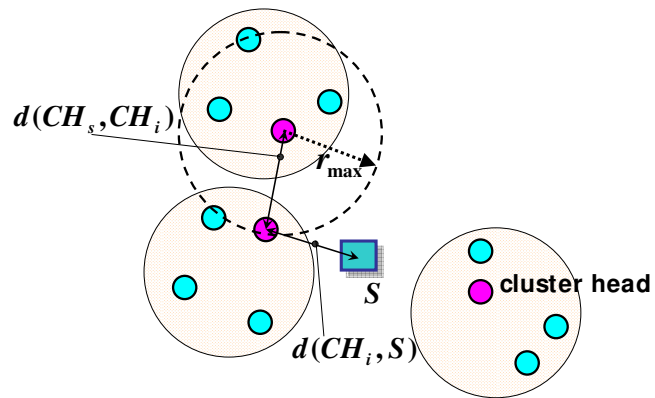


図 6: クラスタ間マルチホップ通信における次ホップの決定方法

4 大域的情報を利用したクラスタ間マルチホップ通信

本章では、各センサの位置情報といったネットワークの大域的情報が得られている場合の、マルチホップ通信の基本的な振る舞いについて調べる。

4.1 干渉のない送信スケジュールの構成

3.1節で述べたように、各センサノード間の距離を用いて、干渉条件を記述することができる。本章での仮定のように全てのセンサノードの位置情報が得られていれば各センサノード間の距離が分かるため、まったくパケットの干渉の起こらないような送信スケジュールを構成することができ、TDMA (Time Division Multiple Access) による通信が可能となる。本章のシミュレーションにおいては、各センサノードはこの送信スケジュールに従い、割り当てられたタイムスロットに、次ホップとなるノードへパケットを送信する。これらの送信は干渉が起こらないことが保証されており、また伝送誤りがないことを仮定している。そのため、送信したパケットは誤りなく次ホップとなるノードが受信でき、あらかじめ定められたスケジュールどおりに全センサノードのパケットがシンクノードへと到着する。

本報告では、[5]で提案されている、干渉のない送信スケジュールを自律分散的に構築する方法を参考としたスケジューリングを行なう。各ホップでデータフュージョンが可能かどうかによって、送信スケジュールを構築する戦略が異なる。たとえばデータフュージョンを行わなければ、パケットが集中するシンクノードの受信チャンネルがボトルネックとなるため、その部分に空き時間を作らないようなスケジューリングが望ましい。すなわち、シンクノードからのホップ数が小さいセンサノードを優先してパケット送信を行わせることで、初期段階の空き時間を回避することができる。一方、各ホップでデータフュージョンが可能であれば、センサノードは自身の上流にあるセンサノードからのパケットを受信後、データフュージョンを行うことでそれらのパケットと自身の持つパケットを1つのパケットにまとめ、次ホップとなるセンサノードに送信するという方法がパケット収集時間を最短にする。このように、データフュージョンの有無でスケジューリングの方針が異なるので、それぞれのスケジューリングの方法を簡単に説明する。

データフュージョンを行わない場合の送信スケジューリング

まず、説明のためにアルゴリズム中に現れる各集合の定義を述べる。

$BLOCK_{n_i}$ センサノード n_i とブロックの関係にあるセンサノードの集合。ここで、“センサノード n_i とブロックの関係にあるセンサノード” とは、センサノード n_i と同時に通信

を行うとパケットの干渉を引き起こしてしまうセンサノードのことである． $BLOCK_{n_i}$ は次の式で表すことができる．

$$BLOCK_{n_i} = \{ n_j \mid d(u_i, n_j) < d(u_j, n_j) \text{ or } d(u_j, n_i) < d(u_i, n_i) \text{ or } u_i \}$$

ここで， n_i が非クラスタヘッドであれば n_j も非クラスタヘッドであり， n_i がクラスタヘッドならば n_j もクラスタヘッドであるとする．また， u_i, u_j はそれぞれ，センサノード n_i ，センサノード n_j の次ホップとなるセンサノードを表す． u_i が $BLOCK_{n_i}$ に入っているのは，センサノードは送信と受信を同時にできないためである．

READY 残余電力のあるセンサノードの集合

WAIT_t タイムスロット t で送信可能なパケットを持つセンサノードの集合

NEXT 次のタイムスロットから送信が可能になるセンサノードの集合

干渉の起こらない送信スケジュールは以下のような手順で構成できる．

1. 各ノード n_i について $BLOCK_{n_i}$ を計算する．
2. 集合 **READY** を残余電力の残っているセンサノードの集合として初期化し，シンクノードからのホップ数の順に並べておく．これにより，できるだけシンクノードに近いセンサノードが優先して送信を行うようにする．
3. $t = 1$ とし，**READY** = ϕ となるまで，3(a) から 3(e) を繰り返す
 - (a) **READY**の中から，パケットを持つセンサノードの集合を **WAIT_t** とする
 - (b) **NEXT**を ϕ として初期化する．
 - (c) **WAIT** = ϕ となるまで，3(c)i から 3(c)v を繰り返す
 - i. **WAIT** からセンサノード n_i を取り出し，センサノード n_i のパケットの送信時間を t とする．
 - ii. センサノード n_i の次ホップとなるセンサノード u_i は， n_i からのパケットの受信によって新たに送信すべきパケットを得ることになるので，次のタイムスロットで送信が可能となる．そこで，**NEXT** = **NEXT** \cup $\{u_i\}$ とする．ただし， u_i がシンクノードの場合はこの処理は行わない．
 - iii. **WAIT** からセンサノード n_i を消去する
 - iv. センサノード n_i がパケットを持っていないければ，**READY** からセンサノード n_i を消去する

v. センサノード n_i が送信中に $BLOCK_{n_i}$ 中のセンサノードがパケットを送信するとパケットの干渉を引き起こしてしまう．それを防ぐために $WAIT = WAIT - BLOCK_{n_i}$ とする．

(d) $READY = READY \cup NEXT$ とする．

(e) t をインクリメントする

データフュージョンを行う場合の送信スケジューリング

データフュージョンが各ホップで可能であるとすれば，

1. 各センサノードは自身の上流に位置するセンサノードがパケットを送信するのを待つ．
2. 自身のセンシング情報と受信パケットとのデータフュージョンを行う．
3. 次のホップとなるセンサノードへとパケットを送信する

という戦略が，送信回数およびパケット収集時間を最小とする．この戦略に従って干渉のない送信スケジュールを構成するアルゴリズムを次に示す．センサノード集合の名前およびその定義は上述のものに従うが，さらに新たなセンサノード集合 $DOWN_{n_i}$ を定義する． $DOWN_{n_i}$ はセンサノード n_i を次ホップのセンサノードとして指定しているセンサノードの集合である．

1. 各センサノード n_i について $BLOCK_{n_i}$ を計算する．
2. 集合 $READY$ を残余電力の残っているセンサノードの集合として初期化する．
3. $t = 1$ とし， $READY = \phi$ となるまで，3(a) から 3(c) を繰り返す
 - (a) $READY$ の中から， $DOWN_{n_i} = \phi$ であるセンサノードの集合を $WAIT$ とする
 - (b) $WAIT = \phi$ となるまで，3(b)i から 3(b)v を繰り返す
 - i. $WAIT$ からセンサノード n_i を取り出し，そのセンサノード n_i のパケットの送信時間を t に割り当てる．
 - ii. $WAIT$ からセンサノード n_i を消去する
 - iii. $READY$ からセンサノード n_i を消去する
 - iv. センサノード n_i の次ホップとなるセンサノード u_j について， $DOWN_{u_j}$ からセンサノード n_i を削除する

- v. センサノード n_i が送信中に $BLOCK_i$ 中のセンサノードがパケットを送信するとパケットの干渉を引き起こしてしまう．それを防ぐために $WAIT = WAIT - BLOCK_{n_i}$ とする．

(c) t をインクリメントする

基本的なアルゴリズムはデータフュージョンを行わない場合と同じであるが，センサノードの送信が可能になるのは，そのセンサノードの上流に位置する全てのセンサノードが送信を終えた後であるためセンサノード n_i には $DOWN_{n_i}$ が空集合になってからでないと送信タイムスロットを割り当ててはならない．また，センサノード n_i に送信タイムスロットを割り当てた場合は，センサノード n_i は送信済みとして， n_i の次ホップとなるセンサノード u_i について， $DOWN_{u_i}$ からセンサノード n_i を削除する処理が必要になる．

4.2 クラスタヘッド間マルチホップ通信の基本的特性評価

クラスタヘッド間マルチホップ通信の性能の基本的な特性を明らかにするため，クラスタ間マルチホップを行う LEACH+multihop，HEED+multihop (図 7(a)) の比較対象として，以下の 3 種の方法を考える．

- 各センサノードが直接シンクノードと通信を行う方法 (direct)

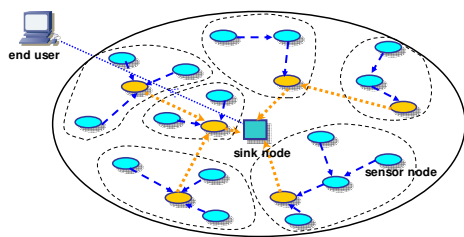
図 7(b) のように，各センサノードが中継ノードを介することなく，直接シンクノードに対して通信を行う．

- クラスタリング後，クラスタヘッドが直接シンクノードへパケットを送信する方法 (LEACH)

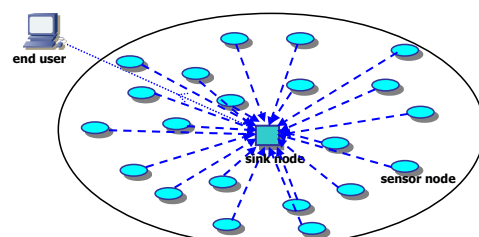
まずセンサノードによるクラスタを構成する．クラスタ内のセンサノードは各クラスタに 1 つ存在するクラスタヘッドへセンシングしたパケットを送信し，クラスタヘッドはそれを受信後，直接シンクノードへと送信する．この方法を図 7(c) に示す．これは LEACH の用いている方法である．

- クラスタリングを行わずに，センサノード間によるマルチホップ通信によってシンクノードにパケットを送信する方法 (multihop)

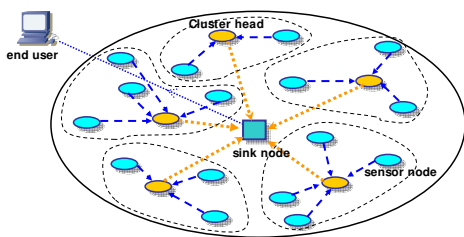
クラスタリングを行わず，各センサノードは 3.4 節の方法で決められる次のホップへとパケットを送信し，いくつかの中継ノードを経てシンクノードへパケットを送るという方法である．図 7(d) にこの方法の概略を示す．



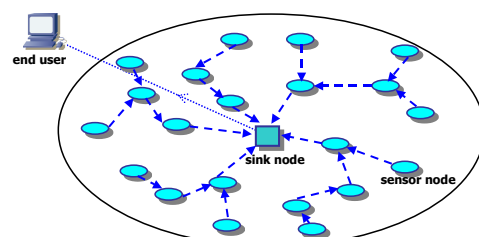
(a) 本研究で対象とするクラスタ間マルチホップ通信



(b) 各センサノードが直接シンクノードへ送信する方法



(c) クラスタ内ノードはクラスタヘッドへ送信し、クラスタヘッドから直接シンクノードへ送信する方法



(d) クラスタを構成せずにシンクノードへマルチホップ通信を用いて送信する方法

図 7: 各データ通信方式の概略

表 1: シミュレーションパラメータ

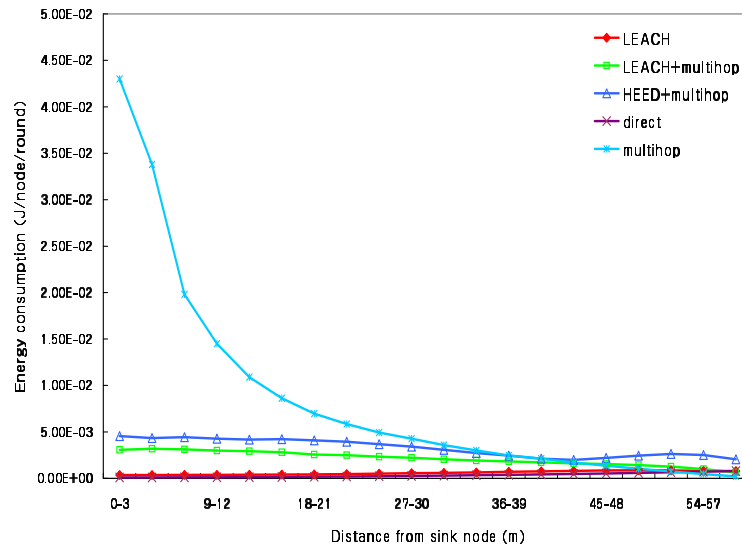
| パラメータ | 値 |
|-------------------------|---------------------------|
| センサノード数 | 500 |
| 初期電力 (データフュージョンを行う場合) | 0.5 J |
| 初期電力 (データフュージョンを行わない場合) | 2 J |
| 最大通信距離 | 300 m |
| E_{elec} | 50 nJ/bit |
| ϵ_{amp} | 100 pJ/bit/m ² |
| E_{fusion} | 5 nJ/bit/signal |
| パケットサイズ | 2000 bits |

クラスタヘッド間でマルチホップ通信を行った場合の基本的特性を、シミュレーションにより他の3つの方法と比較評価する。用いたシミュレーションパラメータは表1のとおりである。また、各試行の結果はノードの位置によって大きく結果が異なるため、100回の試行の平均を取ったものをシミュレーション結果として示した。

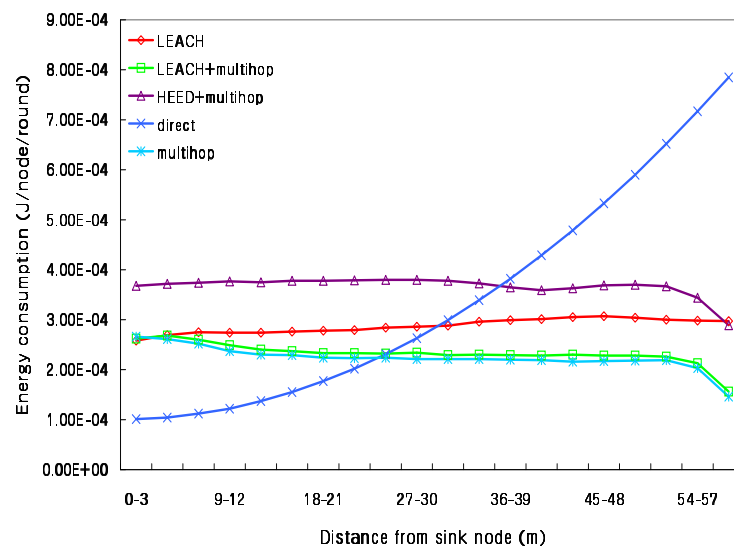
4.2.1 観測領域が狭い場合

既に述べたように、センサノードには通信が可能な距離に制限がある。したがって、各センサノードが直接シンクノードと通信を行う場合や、LEACHのようにクラスタヘッドがシンクノードと直接通信を行うようなモデルでは、観測領域の広さはセンサノードの通信可能距離に制限される。たとえば、LEACHを提案している[1]では、センサノードの通信可能距離内に収まる50m×50mの狭い領域のみを対象としている。シンクノードからの距離と、ラウンドあたりのセンサノードごとの消費電力の関係を図8に示す。ここでラウンドとは、クラスタリングを行ってから再クラスタリングを行うまでの間隔であるが、本報告においてはシンクノードが全センサノードからパケットを受信するまでの時間、つまり1サイクルと等しいものとしている。また、全センサノードに対するクラスタヘッドの割合は5%に設定した。

データフュージョンを行わない場合は、クラスタを構成しないで各センサノード間でマルチホップ通信を行うと、シンクノードに近いセンサノードの電力消費が著しく大きい。これは外側のセンサノードのパケットを全てシンクノードへと中継する必要があるためである。一方、LEACH、あるいはdirectはマルチホップ通信を用いる3種の方式に対し、ほぼ全ての



(a) データフュージョンを行わない場合



(b) データフュージョンを行う場合

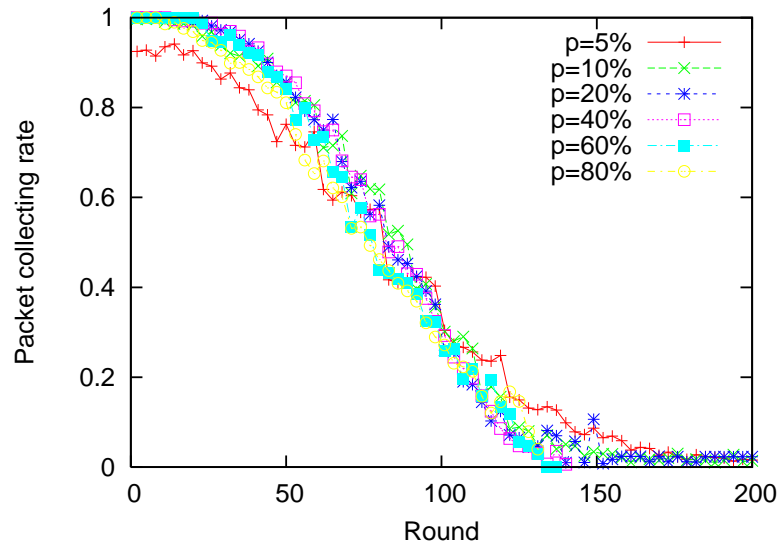
図 8: 半径 60m の観測領域におけるシンクノードからの距離と、ラウンドあたりのセンサーノードごとの消費電力の関係

領域で消費電力を抑えることができている。したがって、観測領域が狭い場合は、LEACHあるいは direct の方が電力面では優れていることになる。

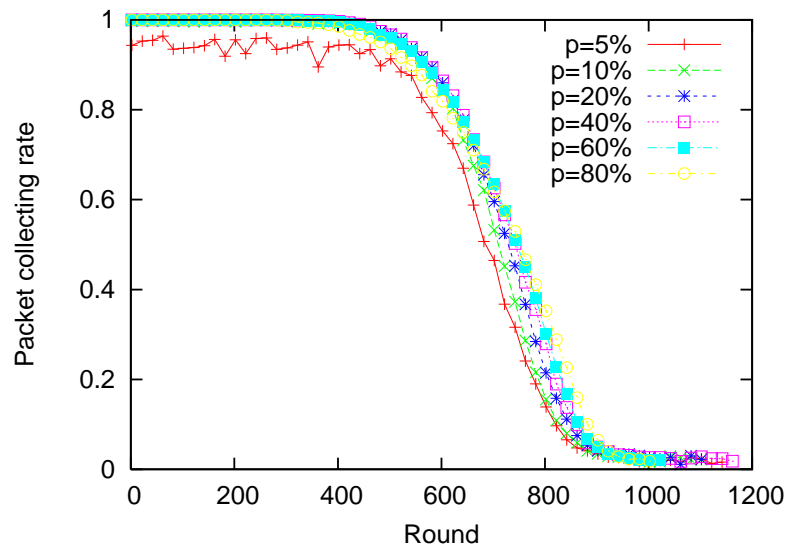
一方、各ホップでデータフュージョンを行った場合の消費電力を表すグラフが図 8(b) である。この場合はマルチホップ通信を行っても消費電力を抑えることが可能になる。この大きな要因は中継すべきパケットと自分がセンシングしたパケットを、データフュージョンによって 1 つのパケットにできるためにセンサノードの送信回数が抑えられ、パケットの中継に要する負荷がなくなるためである。マルチホップ通信によって通信距離は小さくなるため、結果としてシンクノードへ 1 ホップで送信する場合よりも消費電力が抑えられる。ただし図 8(b) を見てわかるとおり、観測領域が狭い場合にはその差はごくわずかである。

4.2.2 観測領域が広い場合

次に観測領域を半径 $R = 500\text{m}$ に拡大した結果を示す。全センサノード数に対するクラスタヘッドの割合によって、どのような影響があるのかが明らかでないため、まず適切なクラスタヘッドの割合を決定する。パケット収集率を全パケット中でシンクノードが受信できたパケットの割合と定義し、クラスタリング方法として LEACH, HEED を用いてクラスタヘッド間マルチホップ通信を行う場合で、クラスタヘッドの割合を変えたときの電力枯渇によるパケット収集率の変化をそれぞれ図 9, 図 10 に示す。横軸はラウンド数、縦軸は、全センサノード数に対して、一つのサイクルでシンクノードが収集できたパケット数の割合である。図 10 における l は、HEED の制御パラメータであるクラスタ半径を表す。ラウンドが進むにつれて電力が枯渇するノードが増えること、さらに中継ノードとして動作すべきセンサノードの電力枯渇によって経路が確保できないために、対象領域の周縁部に位置するセンサノードもパケットを送りにくくなることから、グラフは次第に下降していく。LEACH で採用しているクラスタリングを行う場合、あまりにクラスタヘッドが少ないとクラスタヘッド間通信のコネクティビティが保てないが、コネクティビティが確保できる程度にクラスタヘッドがあれば、クラスタヘッドの割合はパケット収集率に関してはほとんど影響を及ぼさないことがわかった。以下のシミュレーションではわずかではあるがパケット収集率を長く保てている、クラスタヘッドの割合 20% を用いることとする。HEED のクラスタを構成する場合は、データフュージョンを行う場合に限って、クラスタヘッドの割合が大きいほどパケット収集率を長期間保てるという結果となった。しかし、あまりにクラスタヘッドの割合が大きいとスケラビリティなどの点でクラスタリングを行う意義を失うため、以下では LEACH と同じく、クラスタヘッドが全体の 20% になるようにクラスタ半径を調整してシミュレーションを行った。

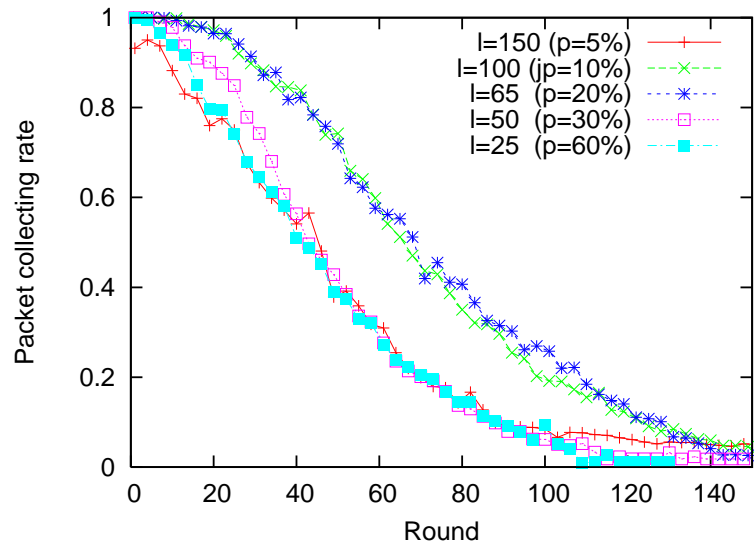


(a) データフュージョンを行わない場合

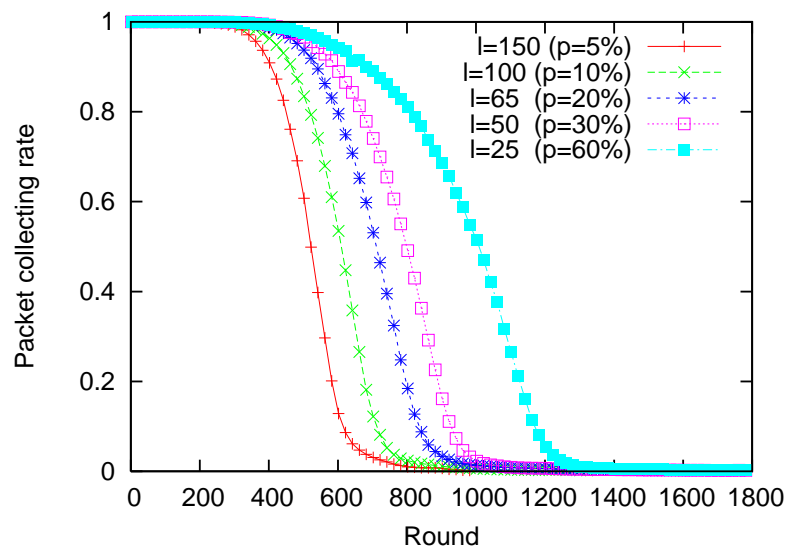


(b) データフュージョンを行う場合

図 9: LEACH のクラスタを構成しクラスタヘッド間でマルチホップ通信を行う場合において、クラスタヘッドの割合がパケット収集率の変化に与える影響



(a) データフュージョンを行わない場合



(b) データフュージョンを行う場合

図 10: HEED のクラスタを構成しクラスタヘッド間でマルチホップ通信を行う場合において、クラスタヘッドの割合がパケット収集率の変化に与える影響

消費電力

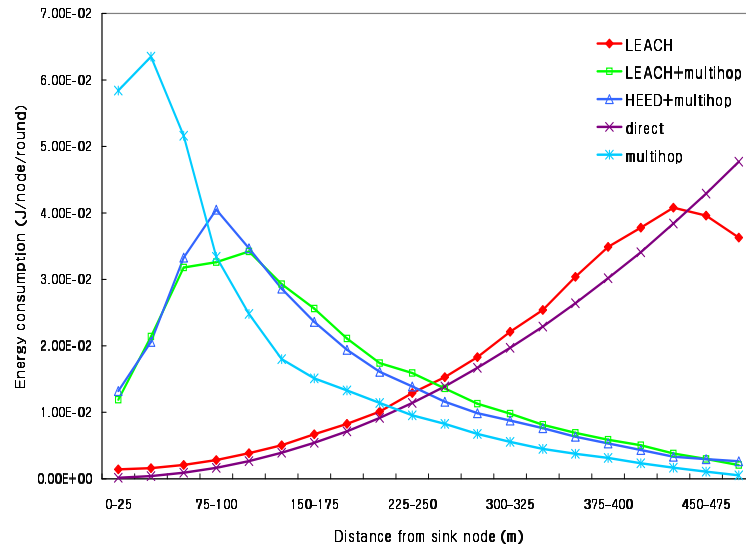
シンクノードまで到達できない領域が存在するとマルチホップ通信との性能面での比較が難しいので、1ホップでシンクノードとの通信を行う方式では、最大通信距離を500mとした。この場合の消費電力を図11に示す。図11(a)では、クラスタリングせずにセンサノード間でマルチホップを行った場合が、最も電力消費の大きい領域(シンクノードから25m-50mの領域)を生むということがわかる。これはシンクノードに近いセンサノードが、自分より外側の多数のセンサノードの packets を中継しなければならないためである。一方、クラスタリングを行い、クラスタヘッド間でマルチホップを行う場合は、クラスタを構成しない方式に比べて電力消費が抑えられている。また、電力消費が最大となる場所がシンクノードから100m程度離れた位置になっている理由は以下のとおりである。

- 観測領域全体でクラスタヘッドの密度は一定なため、面積としては小さい内側の領域にクラスタヘッドが存在する確率が小さく、直接シンクノードとの通信を行うことが多い。
- シンクノードに直接通信を行う場合、通信距離が長いために電力を多く消費する。

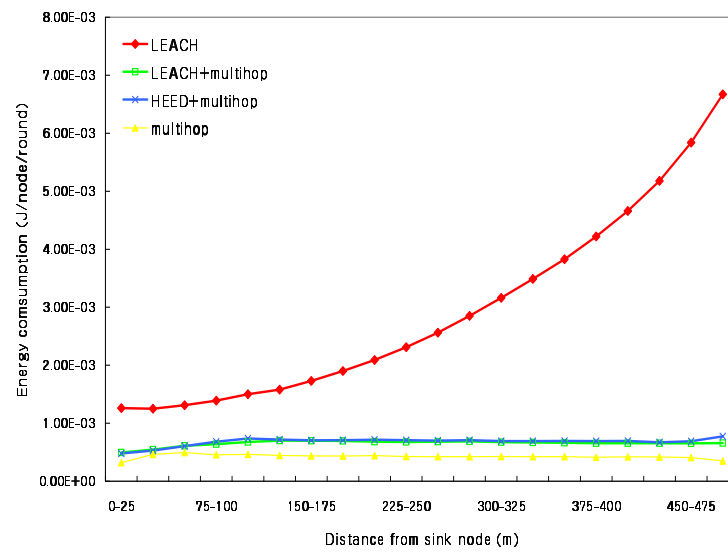
マルチホップ通信を用いる場合とは対照的に、センサノードから直接シンクノードへ通信を行う LEACH, direct では、シンクノードから遠い領域ほど通信距離が長くなるために消費電力が大きくなる。LEACH と direct を比較して前者のほうがほとんどの領域で消費電力が大きくなっているが、これはクラスタリングによるオーバーヘッドが原因であると考えられる。

図11(b)は、各ホップでデータフュージョンを行った場合の消費電力をプロットしたものである。なお、direct は他の4種の方法に比べてあまりにも電力消費が激しく、他の方法の傾向がグラフから伝わりにくいと判断し、除外した。LEACH が図11(a)と同様にシンクノードから遠いセンサノードほど消費電力が大きくなっているのに対し、マルチホップ通信を用いると全てのエリアで一様の消費電力となることが分かる。さらにその消費電力は LEACH に比べて小さく抑えられており、データフュージョンが可能な場合は積極的にマルチホップ通信を用いるのが望ましいということが分かった。

図12はクラスタヘッドを変えた場合の消費電力に対する影響を示したものである。クラスタリング方法として LEACH, HEED の両方を示した。この図から、同じクラスタヘッドの割合であれば同じ消費電力の傾向を示すことが明らかとなった。クラスタヘッドの割合が大きいほど、よりシンクノードに近いセンサノードがクラスタヘッドになる確率は大きくなり、上流全てのセンサノードの packets を中継しなければならないことから、その領域の消費電力が大きくなる。一方でクラスタヘッドの割合を小さくするとクラスタサイズが大きくなる。そのため、クラスタヘッドはクラスタ内センサノードからの packets の収集に



(a) データフュージョンを行わない場合



(b) データフュージョンを行う場合

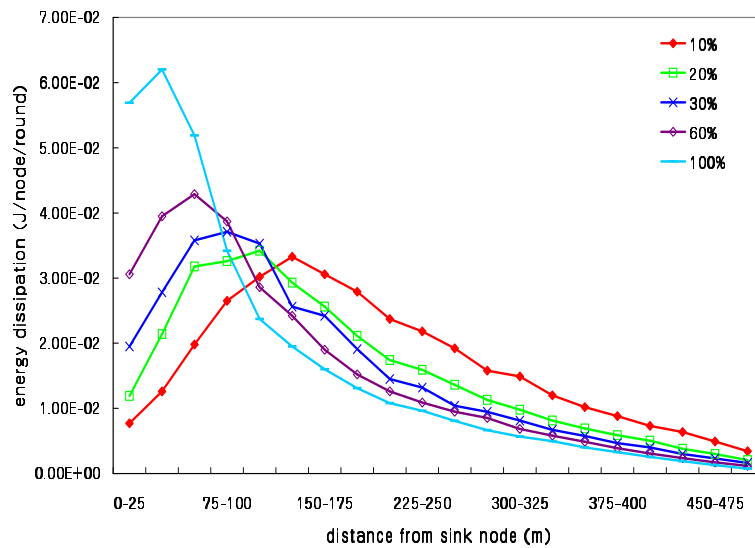
図 11: 半径 500m の観測領域におけるシンクノードからの距離と、ラウンドあたりのセンサーノードごとの消費電力の関係

よって大きな電力を消費するが、クラスタヘッドの割合が大きい場合と比較すると、消費電力の偏りを小さくすることができる。

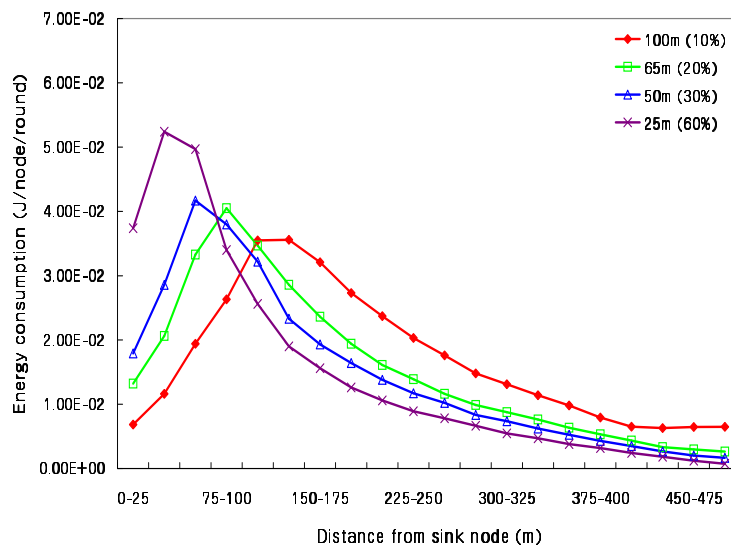
クラスタリングを行ってマルチホップ通信をする場合の、消費電力へのクラスタヘッドの割合の影響を図 13 に示す。ただし、これは各ホップでデータフュージョンを行う場合である。クラスタリング手法として LEACH を用いてマルチホップ通信を行った場合には、センサノードの位置による消費電力の違いはほとんどない。一方 HEED を用いた場合には、シンクノードから離れた位置にあるセンサノードの消費電力が大きくなる。これは観測領域周縁部に位置するクラスタが、図 14 のように観測領域の円と重なる領域が小さくなるためにセンサノード数も少なくなり、その少ないセンサノード間でクラスタヘッドを交代していくためである。各センサノードのクラスタヘッドになる頻度が大きくなるため、消費電力も増大する。また、クラスタヘッドの割合を小さくしたほど、つまりクラスタ半径を大きくするほど全体的に消費電力が大きくなる傾向がある。この理由は、HEED ではクラスタ構成中にクラスタ半径だけクラスタヘッド広告をブロードキャストする必要があるためである。LEACH ではクラスタ半径に関係なくクラスタヘッド広告をブロードキャストするため、このような傾向は見られない。以上から、データフュージョンが可能な場合には、クラスタリングの方法によって消費電力の傾向が異なってくることがわかる。

パケット収集率の変化

パケット収集率はネットワーク寿命を意味するため、どれだけ高いパケット収集率を維持できるかということが重要となる。ラウンドごとのパケット収集率を図 15 に示す。図 15(a) が各ホップでデータフュージョンを行わず、一つ一つのパケットを次のホップへと中継する場合であるが、各方式におけるパケット収集率の変化は 80 ラウンド程度まではほぼ同じ軌跡を描くことが分かる。しかし、各方式の電力が枯渇するセンサノードの位置には違いが生じる。それを表すのが図 16(a) と 16(b) であり、これらの図は LEACH+multihop および LEACH の第 60 ラウンドのネットワーク状況を描いたものである。中央にある大きな円がシンクノードをあらわし、小さな円それぞれがセンサノードを表現している。センサノードを結ぶ線分がリンクを表しており、破線がクラスタヘッド間あるいはクラスタヘッドとシンクノードを結ぶリンク、そうでないものがクラスタ内通信のリンクを示す。クラスタヘッドは非クラスタヘッドよりも濃く表記し、電力の枯渇したセンサノードは色を変えて示している。図 16(a) を見ると、シンクノードに近い位置に電力が枯渇したセンサノードが集中していることが分かる。シンクノードに近い位置にあるセンサノードから電力が枯渇していくため、ラウンドが進むにつれてその領域の情報を得ることができなくなり、また、中継ノードがなくなることから観測領域周縁部の情報を得ることも次第に難しくなっていく。そのた

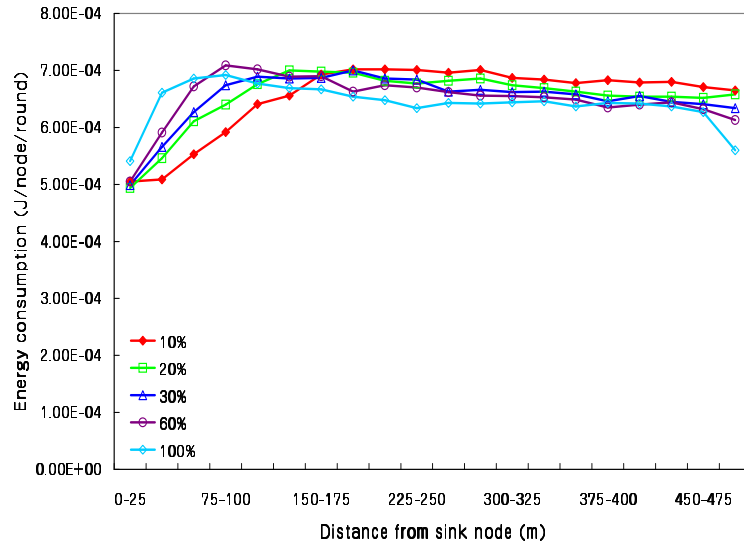


(a) LEACH+multihop

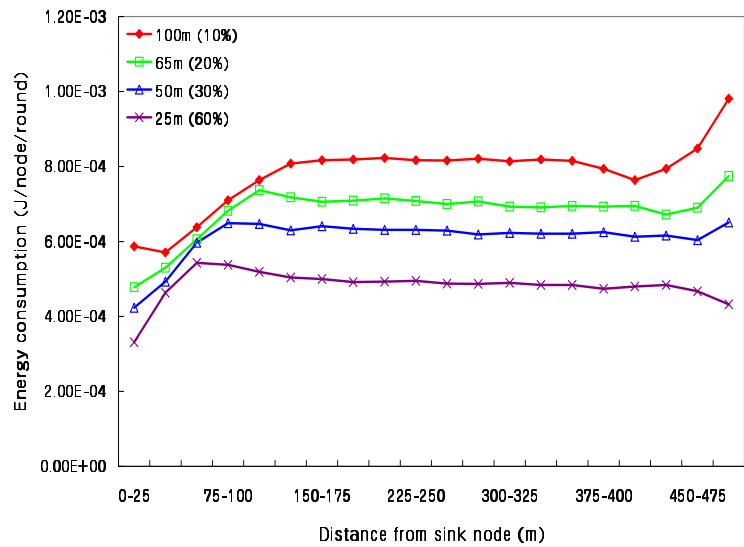


(b) HEED+multihop

図 12: クラスタヘッドの割合が消費電力に与える影響 (データフュージョンを行わない場合)



(a) LEACH+multihop



(b) HEED+multihop

図 13: クラスタヘッドの割合が消費電力に与える影響 (データフュージョンを行う場合)

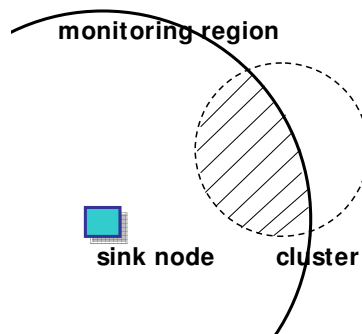
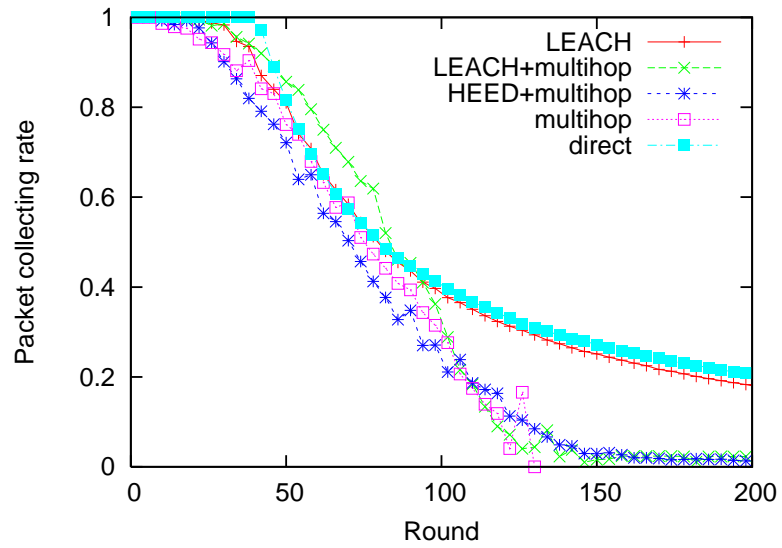


図 14: 観測領域周縁部のクラスタの状態

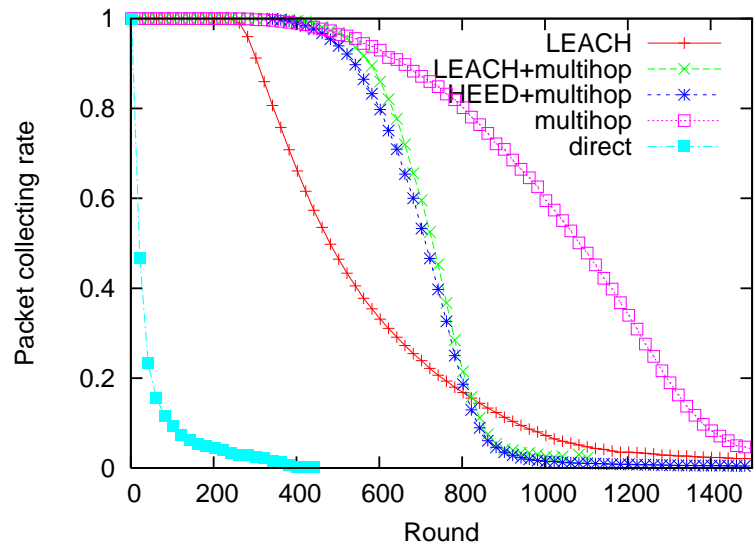
め、パケット収集率は大きな傾きで降下を続ける。

LEACH や direct では、長距離の通信が必要な観測領域周縁部のセンサノードから電力が枯渇していく。これらはセンサノードから 1 ホップで直接シンクノードと通信を行うため、図 16(b) のようにシンクノードから離れているセンサノード全てに大きな送信電力の負荷がかかる。そのため、これらのノードの電力枯渇により、パケット収集率は早い段階から降下する。ラウンドの進行につれてパケット収集率の下降はなだらかになるが、これはシンクノードに近い位置にあるセンサノードしか残余電力がない状況を示している。これらのセンサノードはシンクノードに近い場合送信電力も小さく、長期間稼動が可能である。しかし、センサネットワークは通常、観測領域全体からパケットを収集する必要があるが、このような偏りは望ましいものではない。以上から、データフュージョンを用いない場合には、マルチホップ通信を用いようとも、あるいは 1 ホップで通信を行おうとも、センサノード間での消費電力の偏りという問題は避けられないことがわかった。

データフュージョンを行う場合は、クラスタリングを行わないマルチホップ通信が、パケット収集率の点で最も優れていることが図 15(b) から分かる。データフュージョンが可能であれば、他のセンサノードのパケットを中継する際、自身の持つパケットと他のセンサノードのパケットをデータフュージョンし、1 つのパケットにしてから次のホップに送信する。つまり、パケット中継のために各センサノードが負う負荷は、データフュージョンを行うための消費電力のみとなり、単純に中継する場合に比べ、中継時の負荷が大きくなるということはない。各ホップの距離が最も小さいのがクラスタリングを行わずにマルチホップを行う方式であり、そのためにパケット収集率を長い間高く保っている。クラスタリングを行うと、クラスタヘッドに立候補したセンサノードは次のホップとしてクラスタヘッドを指定するため、その距離はクラスタリングをしない場合に比べて長くなり、パケットの送信に要する消費電力が大きくなってしまふ。例えば、90% のパケット収集率を維持できるラウンド



(a) 各ホップで単に中継する場合



(b) 各ホップでデータフュージョンを行う場合

図 15: 各方式でのパケット収集率の変化

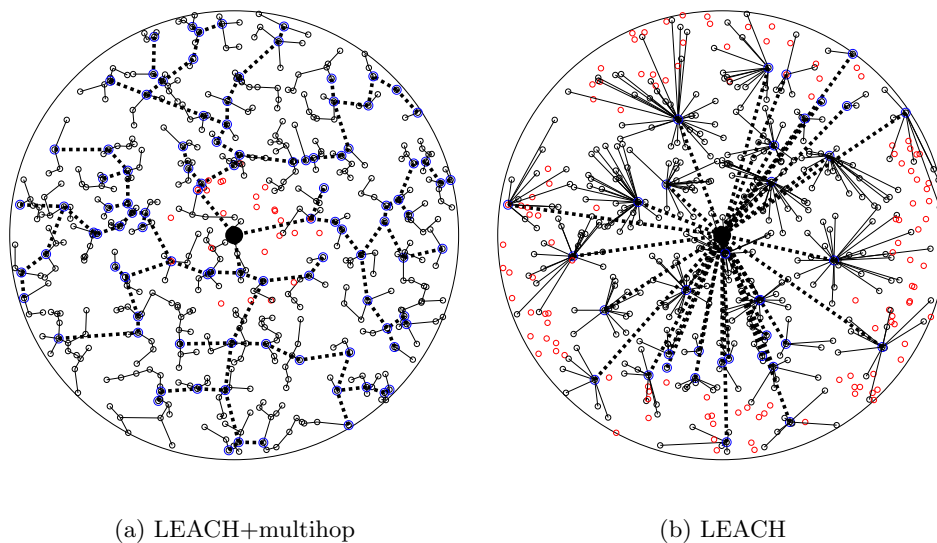


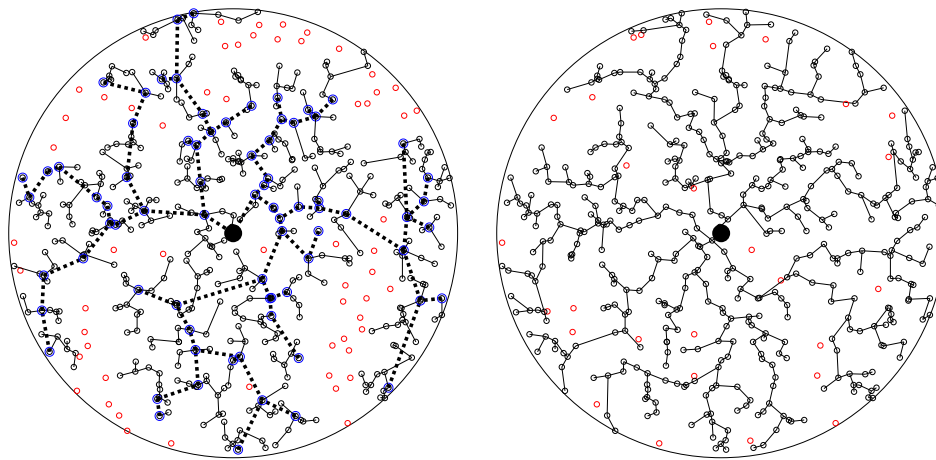
図 16: 第 60 ラウンドにおけるセンサネットワークの状況

数を比較すると、クラスタリングをしない場合が 660 ラウンドとなるのに対して、クラスタリングを行うとその 88% しか保てない。ただし、LEACH では 68%、direct ではわずか 2% となる。さらに、電力の枯渇状況を図 17 に示すが、各ホップでデータフュージョンが可能な場合にマルチホップ通信を行うと、電力が枯渇するセンサノードが偏る LEACH、direct に比べて、これらのセンサノードが観測領域全体に分散する。つまり、マルチホップ通信を行うとセンシングが不可能となる領域が生じにくいといえる。

パケット収集時間

図 18 はデータフュージョンを行わない場合のパケット収集時間を表すグラフである。センサノード数が 500 であるからシンクノードが受信するパケット数も 500 であり、パケット収集の最短時間は 500 タイムスロットとなる。direct および LEACH では、この最短時間を達成しており、パケット収集時間の点では最適となっている。direct では、各センサノードに他のセンサノードと同時に通信を行わないように 1 タイムスロットを割り当てるだけで良く、LEACH についても、あるクラスタヘッドがシンクノードと通信を行う間、他のクラスタではクラスタヘッドがクラスタ内ノードからのパケット収集を行えるため、最短のパケット収集時間が達成できるような干渉のないスケジューリングが可能である。

一方マルチホップ通信を行う場合は、クラスタリングを行う、行わないに関わらず、時間が進むにつれてシンクノードが受信するパケットの数が直線的に伸びなくなる。これは、シ



(a) LEACH+multihop

(b) multihop

図 17: 第 600 ラウンドにおけるセンサネットワークの状況

シンクから離れた位置にあるセンサノードが生成したパケットがシンクに届くまでに時間がかかるためである。干渉を避けるため、センサノードは送信を待つようにスケジュールが組まれていることが多く、それがパケット収集時間に大きな影響を与えている。クラスタを構成した場合、わずかにパケット収集時間が短くなるのは、クラスタヘッド間通信によってシンクノードへのホップ数が小さく抑えられるためである。

データフュージョンを行わない場合の、パケット収集時間に及ぼすクラスタヘッドの割合の影響を表したのが図 19 である。図から読み取れるように、クラスタヘッドの割合はパケット収集時間にほとんど影響を与えない。クラスタヘッドの割合が小さいほうがクラスタヘッド間のホップ数が小さくなるため、わずかに収集時間が短くなる程度である。

各ホップでデータフュージョンを行う場合は、図 20 のように、マルチホップ通信を用いたほうがパケット収集時間は良い値を示している。なお、direct は他の方式と比較してパケット収集に圧倒的に時間がかかるため除外した。これは各センサノードが次ホップとしてシンクノードを共有するため、同時に複数の通信ができないためである。図を見ると、クラスタリングを行いクラスタヘッド間でマルチホップ通信をする方式がパケット収集時間を最も短くしているが、この理由は、

- マルチホップ通信を行うことにより送信距離が小さくなるため、その通信による干渉範囲も小さく抑えることができ、観測領域内で多数の同時通信が可能。
- クラスタヘッド間通信を行うことでホップ数を削減することができる。

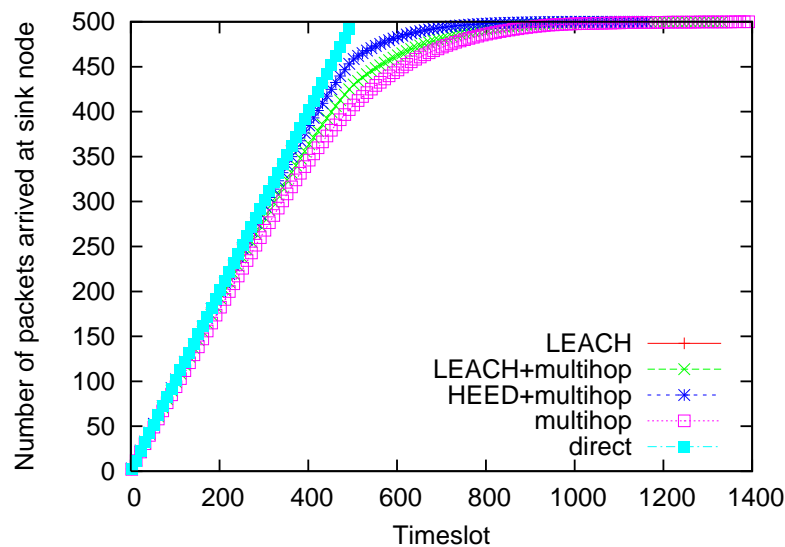
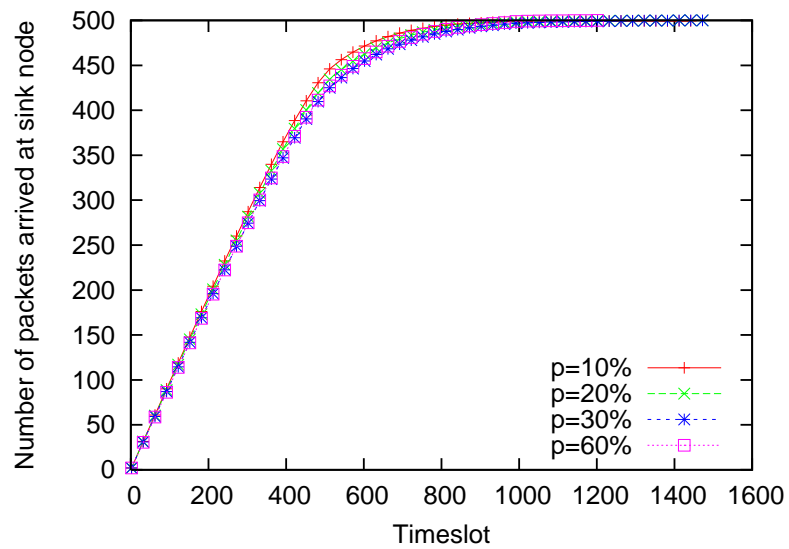


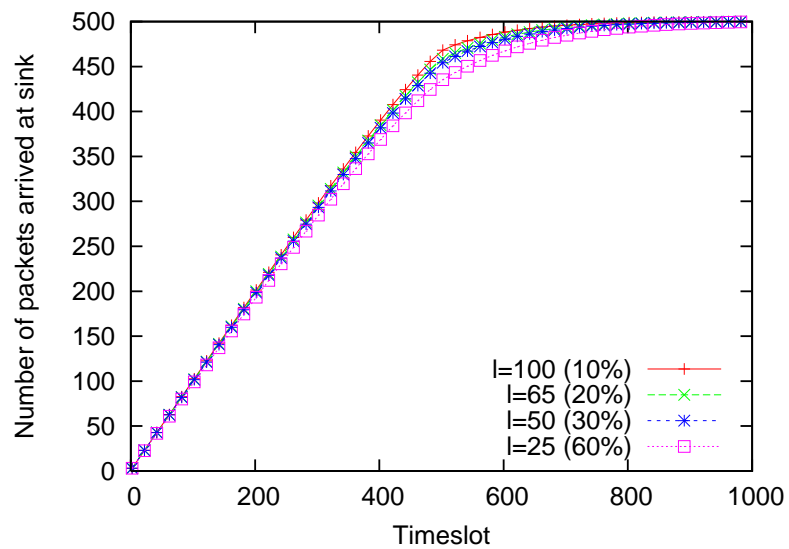
図 18: データフュージョンを行わない場合の packets 収集時間

- 次ホップとしてシンクノードを共有するラスト 1 ホップノードの数が少ない

という 3 点で表せる．クラスタリングを行わない場合はホップ数が大きくなってしまい，図 20 では packets 収集時間が 2 倍になってしまっている．また，LEACH は全てのクラスタヘッドがラスト 1 ホップノードの役割を果たすため，クラスタヘッドの割合を p とすると pN 個のクラスタヘッドがシンクノードの受信チャネルで競合することになる． p を小さくするとラスト 1 ホップノードの数が減るため，packets 収集時間は改善するが， p をあまりに小さくすると，クラスタヘッドの受信チャネルで競合が発生することになり，packets 収集時間は逆に悪化する．これを表したのが図 21 である．LEACH でもっとも packets 収集時間が小さくなっているのは，クラスタヘッドの割合が 8% のときであるが，LEACH+multihop と比べると 2 倍以上の時間がかかっている．図 22 にクラスタを構成後，マルチホップ通信をする場合のクラスタヘッドの割合が packets 収集時間に与える影響を表すグラフを示すが，クラスタヘッドの割合が小さいほど packets 収集時間は早くなる．クラスタヘッドの割合が小さいときはクラスタ内のホップ数が増加するが，それ以上にクラスタヘッド間通信のホップ数を減少させることができる．その結果が，packets 収集時間の向上につながったと考えられる．



(a) LEACH



(b) HEED

図 19: クラスタヘッドの割合がパケット収集時間に与える影響

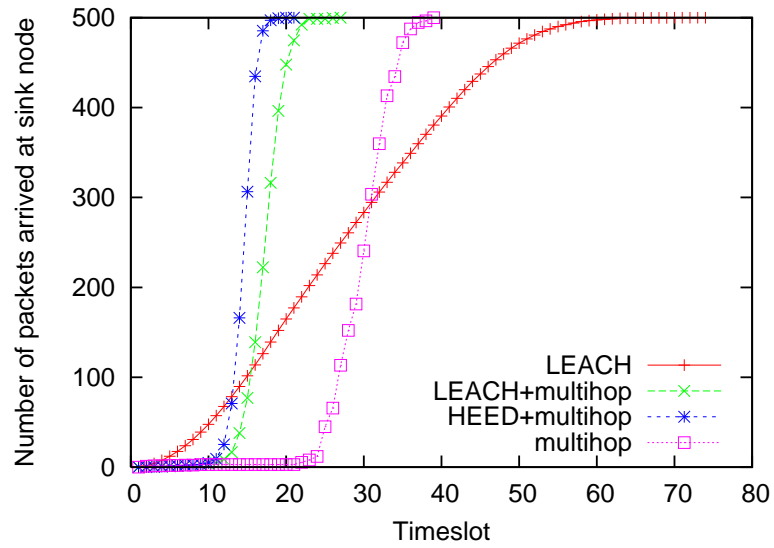


図 20: データフュージョンを行う場合の packets 収集時間

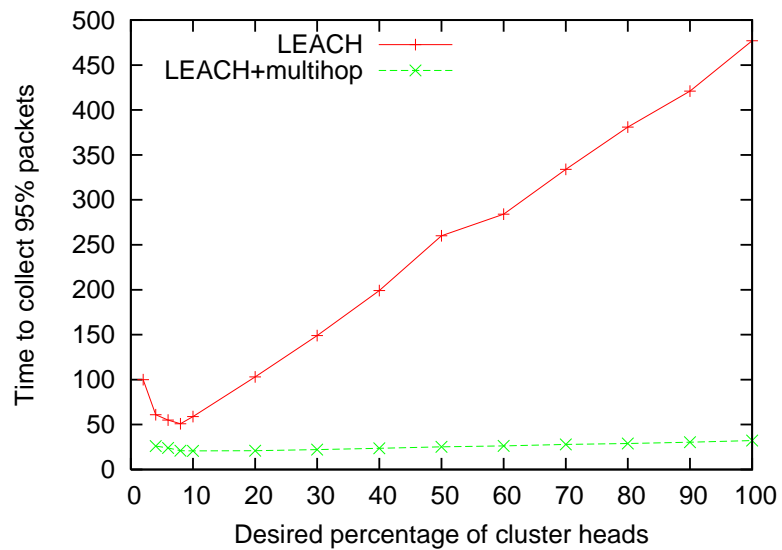
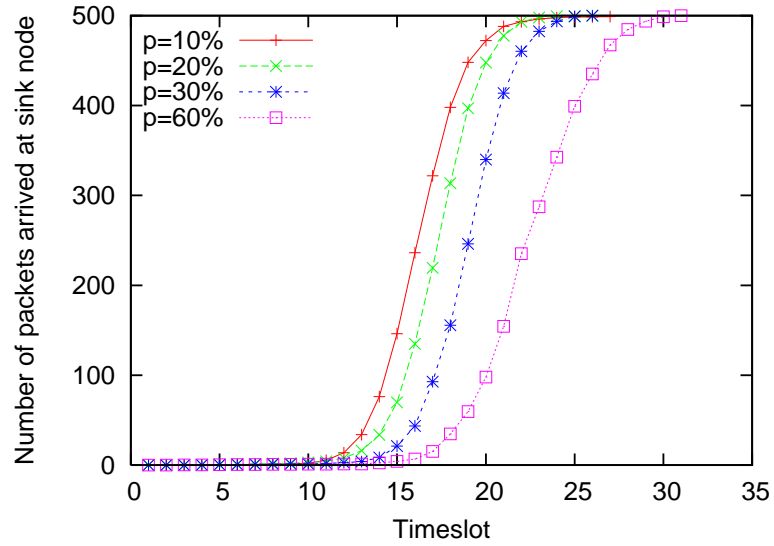
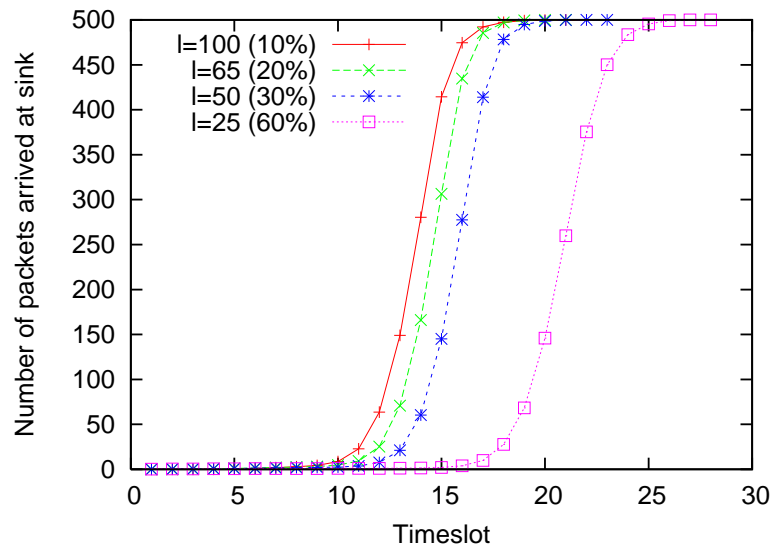


図 21: クラスタヘッドの割合が 95% packets 収集時間に与える影響



(a) LEACH



(b) HEED

図 22: クラスタヘッドの割合によるパケット収集時間への影響 (データフュージョンを行う場合)

5 局所的な情報のみを利用できる場合のクラスタ間マルチホップ通信

4章では大域的情報を利用して干渉のない送信スケジュールの構成などを行った。しかし、大域的情報を伝播させるための時間およびそのメッセージ量を考慮すると、多数のセンサノードから構成される大規模なセンサネットワークで大域的情報を利用するのは困難である。したがって干渉を完全に避けるような送信スケジュールを構築するのは実際には不可能である。アプリケーションによってパケットを確実にシンクノードに届けることが要求されるのならば、干渉によってパケット損失が発生した場合には再送を行う必要がある。そこで本章では、このような再送の影響を考慮して再送機構を取り入れた場合に、大域的情報が利用できる場合と比較してどの程度性能が劣化するかを評価する。

5.1 クラスタ間マルチホップ通信の概要

局所的な情報のみが利用でき、大域的情報が利用できない場合には干渉を避けることは不可能である。たとえばクラスタ内で干渉のない送信スケジュールを構成できたとしても、各センサノード同士のクラスタ内通信に用いるチャンネルを共通としているため、隣接クラスタに属するセンサノードとの間で干渉が起こり得る。干渉によって送信スケジュールに沿った送信が行えなかった場合は、再度送信を行う必要があるが、そのパケットの送信とスケジュールに沿ったパケットの送信との間で干渉が発生してしまう場合があり、結果として干渉を回避するスケジュールは存在意義を失ってしまう。そこで、局所的な情報のみを利用できる場合はスケジュールに基づいた TDMA ではなく、CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) によるマルチプルアクセスを行うものとする。すなわち、各センサノードはサイクルの最初にセンシングを行い、センサノード間およびクラスタヘッド間で CSMA/CA による通信を経て、最終的に各センサノードの生成したパケットが全てシンクノードに到着すればサイクルは終了するものとする。

5.2 CSMA/CA

本報告で用いた CSMA/CA は IEEE 802.15.4 [13] を参考にしたものである。各センサノードはそれぞれ BE (Backoff Exponent) という変数を保持する。この変数はチャンネルの空きを評価する前のランダムな待ち時間の長さを決定するのに用いられる変数である。図 23 にその送信アルゴリズムを示す。

Step 1: 各センサノードは BE を $minBE$ で初期化する。

Step 2: 0 から $2^{BE} - 1$ の間の範囲のランダムなタイムスロット数だけ待つ。

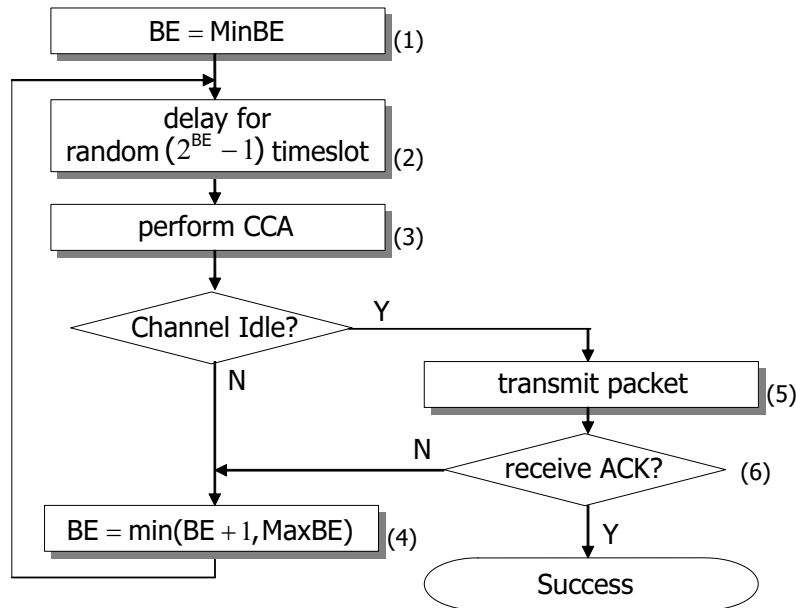


図 23: 送信アルゴリズム

- Step 3: チャンネルを監視し、空いているかを調査する。他のセンサノードが既に通信中であれば Step 4 へ、そうでなければ Step 5 へ進む。
- Step 4: BE を 1 だけインクリメントする。ただし、インクリメント後の値が $MaxBE$ を超える場合には BE の値は $MaxBE$ となる。その後 Step 2 から繰り返す。
- Step 5: チャンネルが空き状態にあれば、センサノードはパケットの送信を行う。
- Step 6: センサノードは ACK が戻ってくるのを待つ。ACK が受信できれば送信は成功である。一方 ACK が受信できなかった場合はパケットの衝突が起こったと判断して Step 4 へ進む。

通常、CSMA/CA ではバックオフを行う回数の上限を定め、その上限に達すると送信失敗としてそれ以上送信を行わないが、本報告においてはセンサノード間通信の干渉による再送の影響に注目するため、送信が成功するまで何度でもバックオフが可能であるとしている。もしこの回数を有限にした場合、図 24 のように小さいラウンド数のときの影響が大きい。ラウンド数が小さいときはセンサノードの数が多く、干渉する数も多くなる。そのため、送信失敗と判断するセンサノードも多く、結果としてシンクノードに到達するパケット数は小さくなってしまふ。IEEE 802.15.4 では最大バックオフ回数を 4 回と規定しているが、この値をそのまま適用すると、データ収集率が 1 となることはなかった。

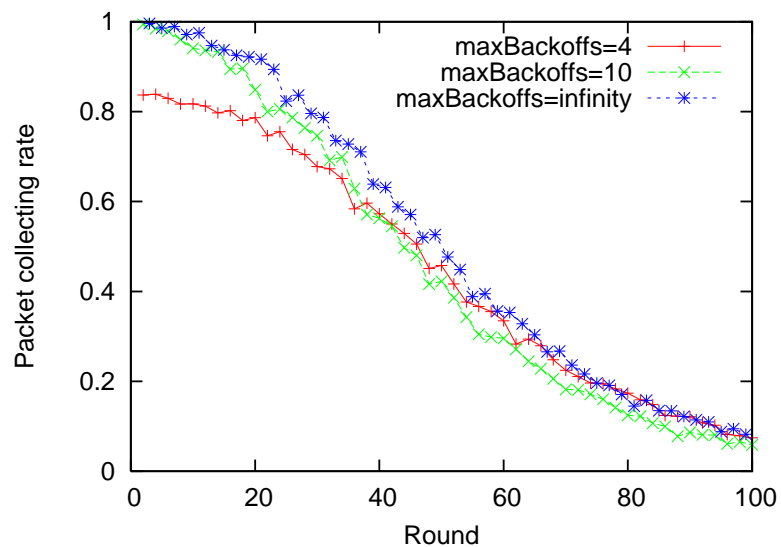


図 24: 最大バックオフ回数がデータ収集率の変化に与える影響 (データフュージョンが不可能な場合)

他に本報告では, $MinBE$, $MaxBE$ の値は, それぞれ IEEE 802.15.4 のデフォルト値である 3, 5 に設定した.

5.3 大域的情報に基づいたスケジューリングを行う場合との比較評価

無線ネットワークにおいて通信の衝突を回避するためには CSMA/CA を用いることが一般的であるが, その場合でも隠れ端末問題などによって衝突は完全には避けられず, 再送信の必要が生じる. また, CSMA/CA ではキャリアセンスの前にランダムな待ち時間が必要である. これらの要因によって, 大域的情報が利用可能であった場合に対して, 消費電力やパケット収集時間が悪化することが予想される. そこで, この劣化の程度の評価を行う. 対象として用いるのは CSMA/CA を導入した HEED+multihop, 4 章で用いた干渉のない送信スケジュールに沿って通信を行う HEED+multihop および LEACH+multihop である.

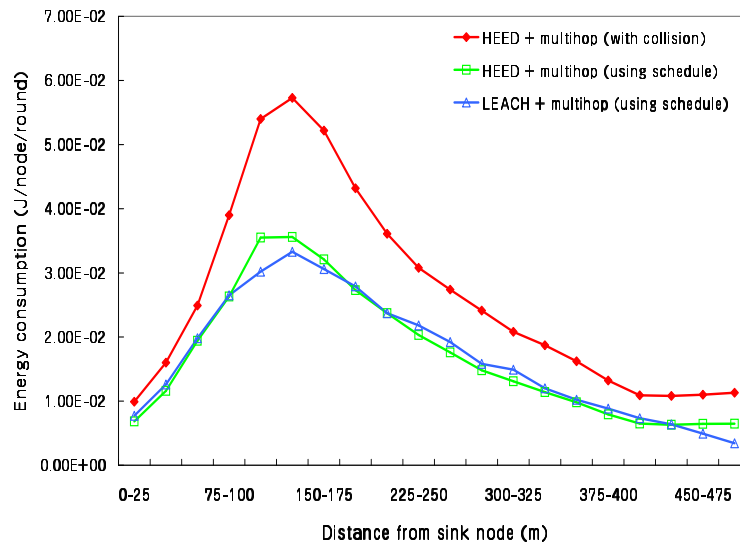
5.3.1 消費電力の比較

データフュージョンを行わない場合の位置別消費電力の比較を図 25 に示す. l は HEED の制御パラメータであるクラスタ半径を表し, クラスタヘッドの割合がそれぞれ 10%, 20% になるように調節している. 結果を見ると, 全ての位置で局所情報のみに基づいた場合が大

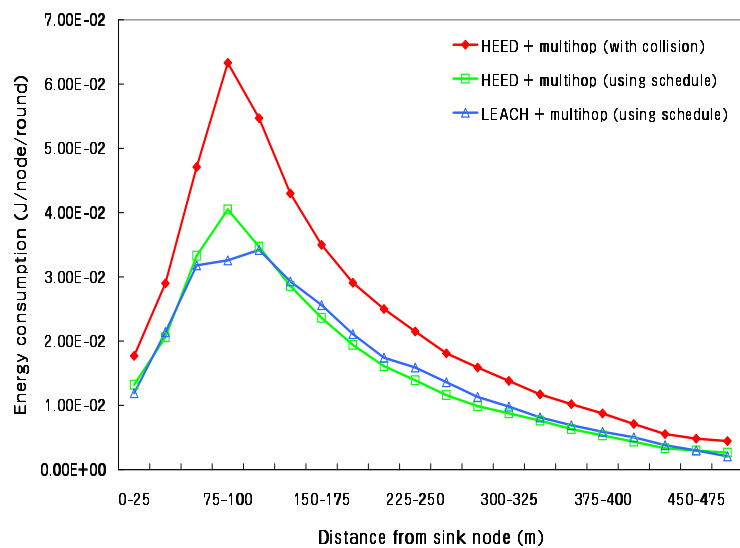
域的情報を用いることができる場合より消費電力が大きくなっている．この大きな原因は，パケットの衝突およびそれに伴う再送であると考えられる．CSMA/CA を用いたとしても隠れ端末問題などによって完全に衝突を回避できるわけではない．この場合，衝突時のパケット送信，そして再送時のパケット送信と少なくとも2度の送信が必要になる．位置がシンクノードに近くなるほど中継されるパケットも多くなり，衝突が増加する．パケットの中継量が最大なのはラスト1ホップノードであるが，クラスタヘッドの割合が小さいほどラスト1ホップノードとシンクノードへの距離が長くなり，通信電力が増加する．これらの要因によって，クラスタヘッドの割合が10%のときはシンクノードから125mから150mまでの区間，クラスタヘッドの割合が20%のときは75mから100mの区間が最も消費電力が高くなる．これらの区間は，大域的情報を利用したときに消費電力が最大となる区間と一致する．現実的に問題となるのは，センサノードの電力枯渇によって，このエリアのセンシングが不可能になることであり，ルーティングやクラスタの構成法によって，このような電力の偏りを均一化することが重要である．

図26は大域的情報を利用できる場合の電力 E_{global} と局所情報のみを利用した場合の消費電力 E_{local} について， $\frac{E_{local}-E_{global}}{E_{global}}$ を増加割合と定義しプロットしたものであるが，シンクノードから離れたエリアほどこの増加割合が大きくなっていく．これは衝突の起こらない送信スケジュールに従った場合には，シンクノードから離れた位置にあるセンサノードは中継する必要がないため消費電力，つまり分母が小さいためと考えられる．全エリアを平均すると，局所情報のみを利用する場合は大域的情報が利用可能な場合に比べ，55%前後の消費電力の増加となることが分かった．

図27が各ホップでデータフュージョンを行う場合の位置別消費電力の比較結果である．図25と同様，局所情報のみに基づいた場合の方が大域的情報を用いることができる場合より消費電力が大きくなっているが，その増加の割合は比較的小さく抑えられている．これは，データフュージョンによって送信回数が抑えられ，衝突の回数自体も小さくなるためである．図28は消費電力の増加割合を表したものであるが，衝突回数が小さければ送信回数自体も各エリアで等しいため，図26と比較すれば分るとおり領域ごとの増加割合の偏りも小さくなる．全領域を平均すると，約15%程度の増加であった．このように，データフュージョンが可能であれば，センサネットワークが局所情報のみに基づいた動作を行っても，その消費電力の増加は小さく抑えることができる．そのため，データフュージョンが可能なアプリケーションであれば，最大限データフュージョンを利用することがセンサネットワークの長寿命化につながる．



(a) $l = 100\text{m}$ ($p = 10\%$)



(b) $l = 65\text{m}$ ($p = 20\%$)

図 25: シンクノードからの距離と, ラウンドあたりのセンサノードごとの消費電力の関係 (データフュージョンを行わない場合)

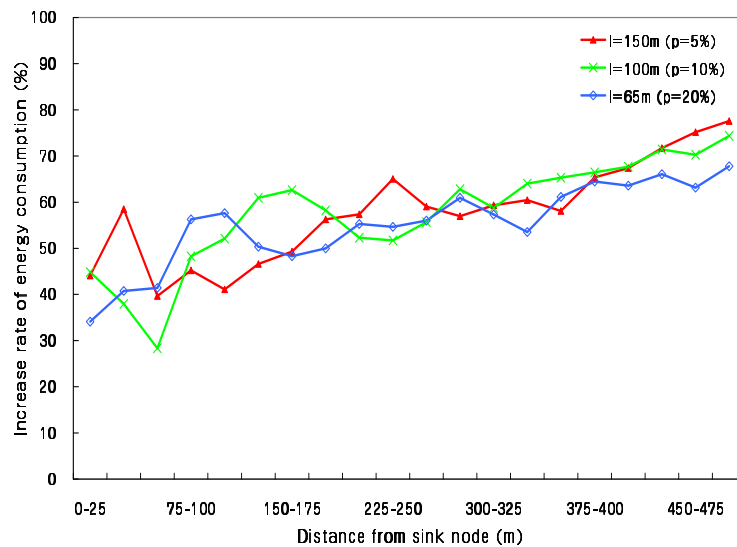
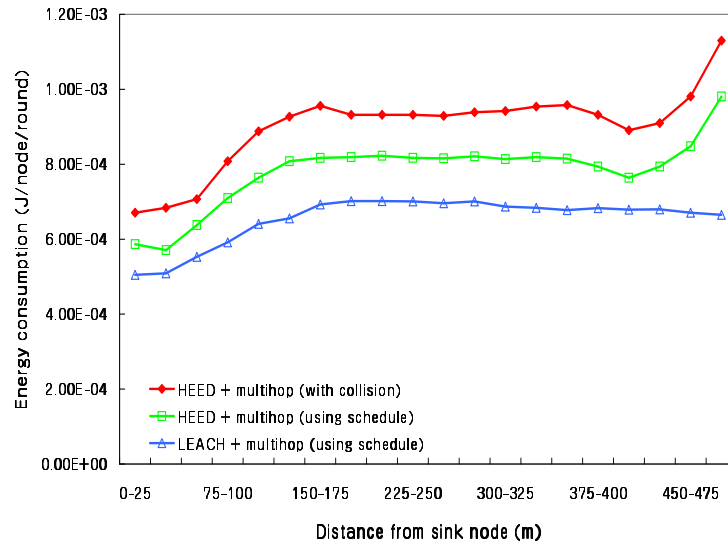


図 26: シンクノードからの距離と消費電力の増加割合の関係 (データフュージョンを行わない場合)

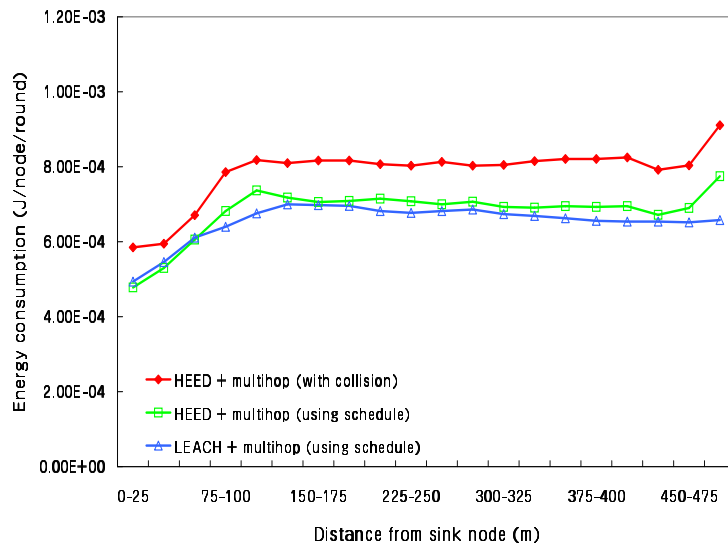
5.3.2 パケット収集率の変化の比較

前述の結果から、局所情報のみに基づいた場合の方がパケット収集率の立下りも早くなることが予想される。図 29 にデータフュージョンを行わない場合のパケット収集率を示した。データフュージョンを行わない場合は、もともとシンクノードに近いセンサノードに多くのパケットが集中する傾向があるが、局所情報のみに基づいて動作する場合はさらに、パケットの衝突もシンクノードに近いエリアに多く集中する(図 30)。この衝突に伴うパケット再送での消費電力によって、パケット収集率の降下は早い。シンクノードに近いセンサノードほどパケット送信時に衝突が起こりやすいため、その電力の枯渇が他のセンサノードに比べて早く起こる。これらのセンサノードはパケット中継という役割を担うため、シンクノードから離れたセンサノードも、中継するセンサノードがなくなるためにシンクノードへのパケット送信が難しくなる。90%のパケット収集率を維持するラウンド数を比較すると局所的な情報のみに基づいた場合のラウンド数は、クラスタヘッドが 10% のとき、大域的情報が利用可能な HEED+multihop の 90% 維持ラウンド数に対して 73%、それよりもパケット収集率の良い LEACH+multihop に対しては 54% 程度しかパケット収集率を保てず、クラスタヘッドが 20% のときも、それぞれ 71%、49% しか保てないことが分かった。

現在は各センサノードの初期電力を 2 J としてシミュレーションを行っているが、実際にはより多くの初期電力を与えることが可能である。干渉のない送信スケジュールに従った場



(a) $l = 100\text{m}$ ($p = 10\%$)



(b) $l = 65\text{m}$ ($p = 20\%$)

図 27: シンクノードからの距離と、ラウンドあたりのセンサノードごとの消費電力の関係 (データフュージョンを行う場合)

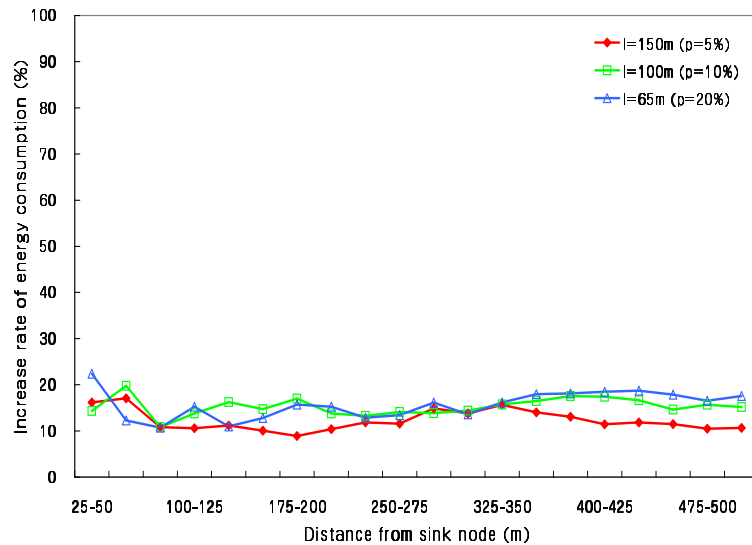
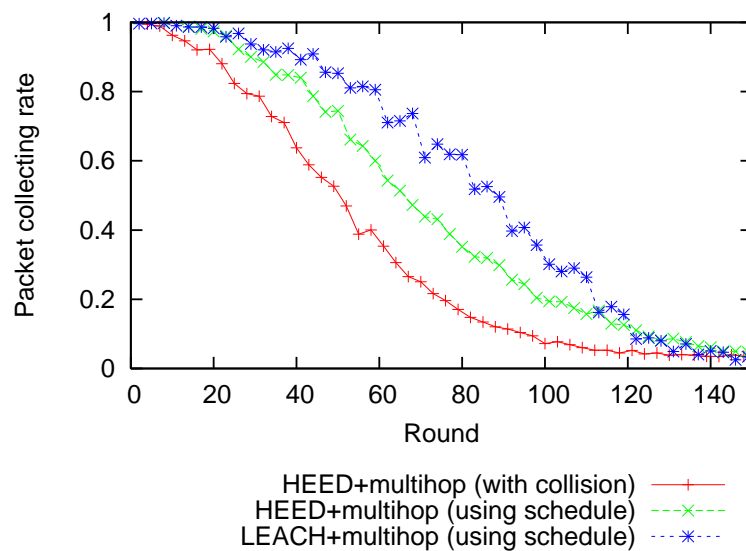


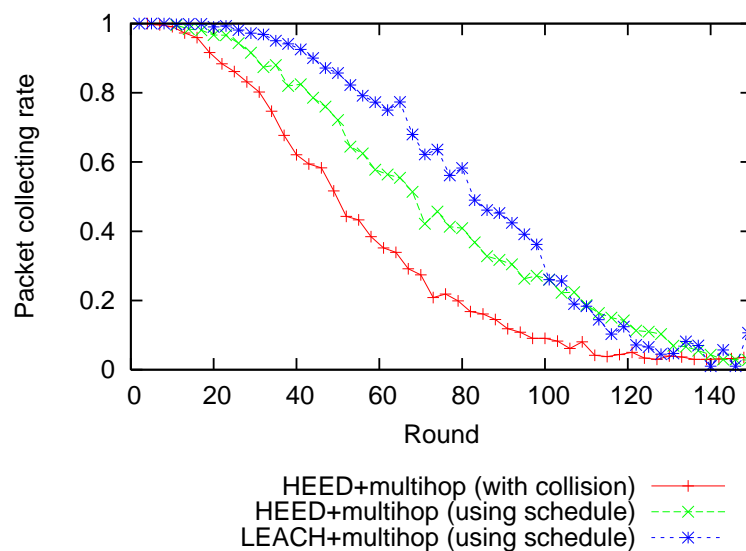
図 28: シンクノードからの距離と消費電力の増加割合の関係 (データフュージョンを行う場合)

合は各ラウンドで再送はまったく必要ないのに対し、局所的な情報しか利用できない場合は、毎ラウンドで図 30 で表される回数の再送が必要である。つまり、センサネットワークの稼働時間が長いほど、送信回数の差、つまり消費電力の差は大きくなっていく。したがって、初期電力が大きいほど、両者のパケット収集率が立下がる時間の差は大きくなる。図 31 に、初期電力を 10 倍の 20 J にしたときのパケット収集率の変化を示すが、実際に立下り時間の差が大きくなっていることがわかる。

図 32 は各ホップでデータフュージョンを行う場合のパケット収集率の比較であるが、図 29 に対して、大域的情報が利用可能な場合の HEED+multihop, LEACH+multihop の性能が逆転している。これは HEED のクラスタリングに要するオーバーヘッドが大きいことによるものである。ここでも 90% のパケット収集率を維持するラウンド数を比較すると、局所情報のみに基づいて動作する場合のラウンド数は、大域的な情報を利用できる HEED+multihop, LEACH+multihop に対して、クラスタヘッドの割合が 10% のときにそれぞれ 81%, 67%, クラスタヘッドの割合が 20% のときにそれぞれ 81%, 76% のラウンド数となった。クラスタヘッドの割合が大きい方が性能の劣化が小さいのは、割合が大きいほどクラスタヘッド間の通信距離が小さくなり、それに伴い再送に要する電力も小さくなることである。単にパケット収集率だけを評価すれば、クラスタヘッドの割合は大きいほどパケット収集率は維持しやすい。ただしあまりに大きくするとスケーラビリティが維持しにくいいため、両者の



(a) $l = 100\text{m}$ (10%)



(b) $l = 65\text{m}$ (20%)

図 29: パケット収集率の変化の比較 (データフュージョンを行わない場合)

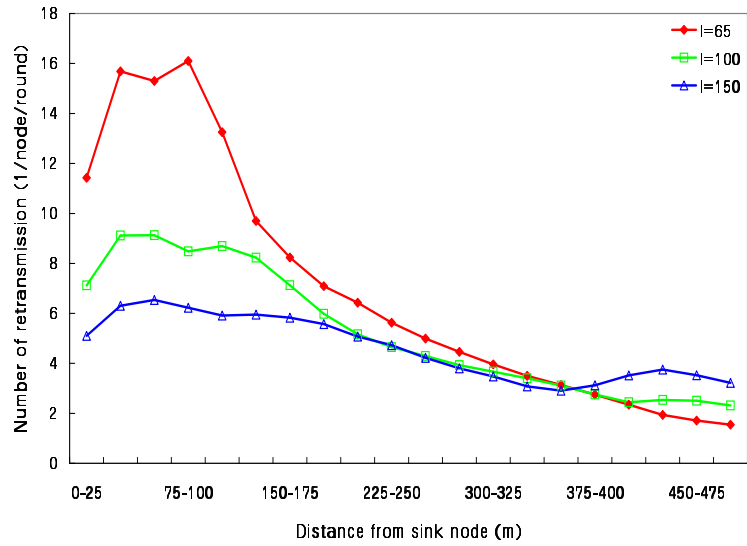


図 30: シンクノードからの距離と再送回数の関係 (データフュージョンを行わない場合)

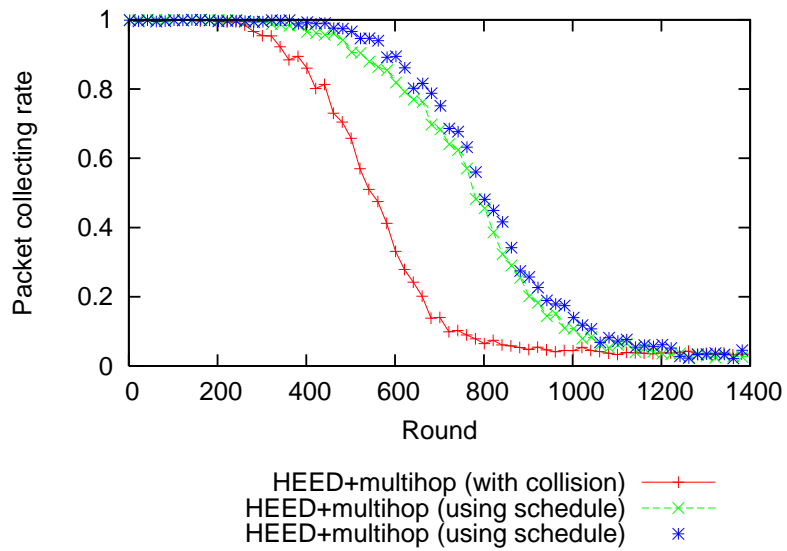
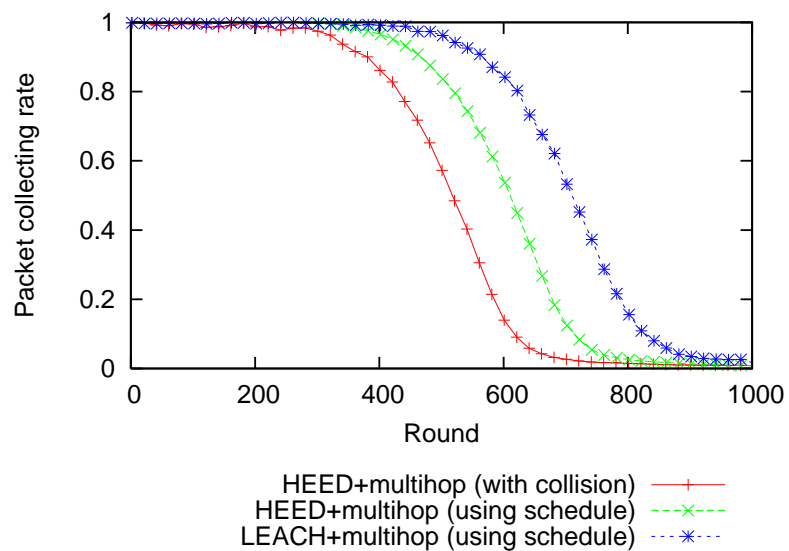


図 31: 初期電力を 20 J にした場合の packets 収集率の変化 (データフュージョンを行わない場合)

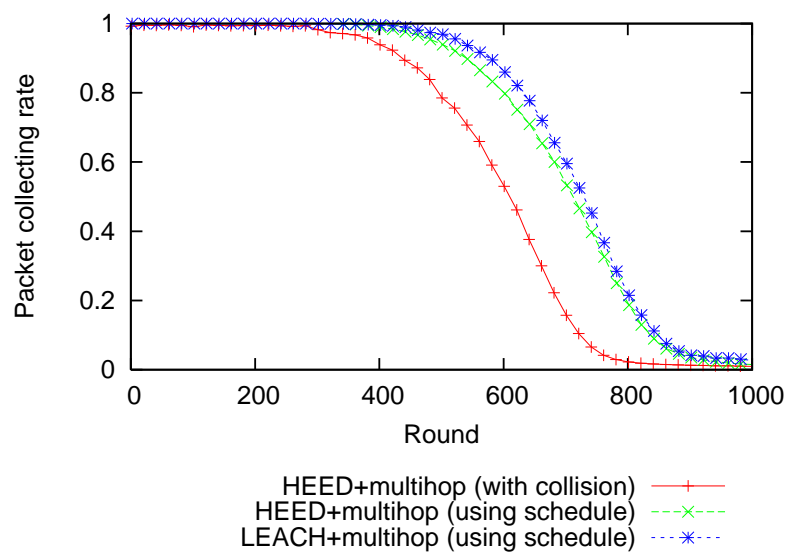
バランスを取る必要がある。

5.3.3 パケット収集時間の比較

局所情報のみに基づいて動作する場合は、パケットの衝突をできるだけ避けるために CSMA/CA を用いている。CSMA/CA ではチャンネルの空き状態を評価する前にランダムな待ち時間が必要なため、送信スケジューリングに従う場合に比べてパケット収集時間が大きく悪化する。図 33, 34 に、それぞれデータフュージョンを行わない場合とデータフュージョンを行う場合のパケット収集時間を示すが、どちらも干渉のないスケジュールに従う場合に比べて収集時間は著しく悪化する。90% のパケットを収集する時間を大域的な情報が利用可能な場合と比較しても、データフュージョンを行わない場合で 4.6 倍、データフュージョンを行う場合で 4 倍の時間がかかる。多数のセンサノードが高密度に配置される大規模なセンサネットワークでは、センサノードが送信を試みる場合に他のセンサノードの送信によってチャンネルが使用中であることが非常に多くなり、何度もバックオフが必要になる。具体的な値を挙げると、データフュージョンが可能な場合であっても、1 回のパケット送信あたり、平均 0.3 回程度のバックオフを必要としている。データフュージョンを行わない場合であれば、1 回のパケット送信あたり最大 20 回程度のバックオフが必要になる。シンクノードに近いエリアほどパケット送信の頻度が多いため、バックオフ回数も多くなり、パケット収集時間が悪化するという結果に陥る。また、送信を待っている間にも上流からはパケットが送信されてくる。データフュージョンが可能であれば、バッファに蓄えられるパケット数も小さく抑えることができるが、データフュージョンを行わない場合場合は複数のパケットを 1 つにまとめることをしないため、大きなバッファが必要となる。図 35 はデータフュージョンを行わない場合において、ラスト 1 ホップノードのバッファ内パケット数を平均したものをタイムスロットごとにプロットしたもののだが、スケジューリングに従った場合と比較して約 1.5 倍のバッファが必要となる。個々のセンサノードはコスト面から見ても大きさの面から見てもメモリ容量に制約があるため、バッファの容量もできるだけ小さく抑える必要がある。現在のモデルではバッファ長を無限としているが、バッファ長が有限であれば受信側センサノードのバッファあふれによるパケット損失も発生する。そのため、再送回数が増加し、これはネットワークの稼働時間、パケット収集時間双方に大きな影響を与えることが予想される。

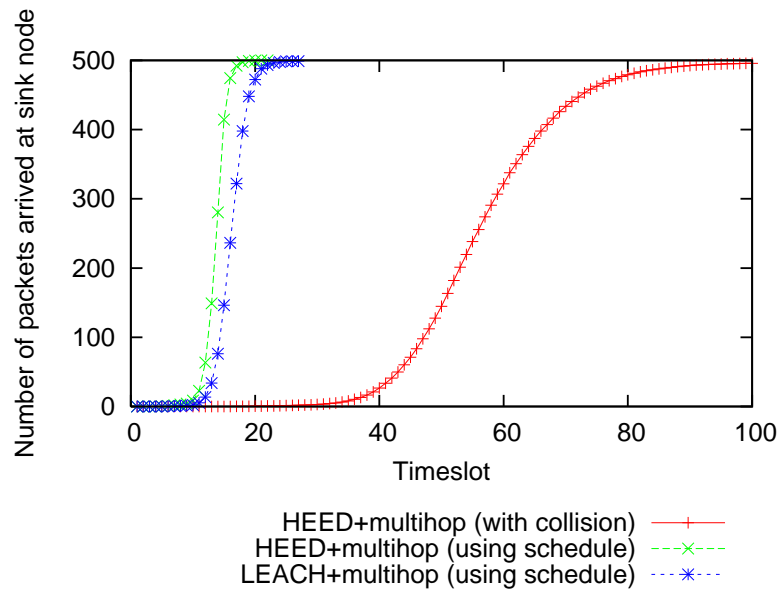


(a) $l = 100m$ ($p = 10\%$)

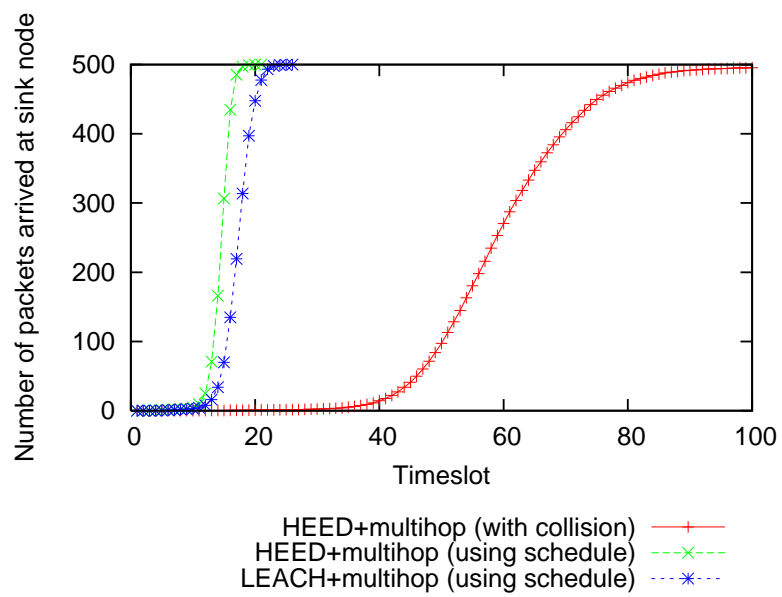


(b) $l = 65m$ ($p = 20\%$)

図 32: パケット収集率の変化の比較 (データフュージョンを行う場合)

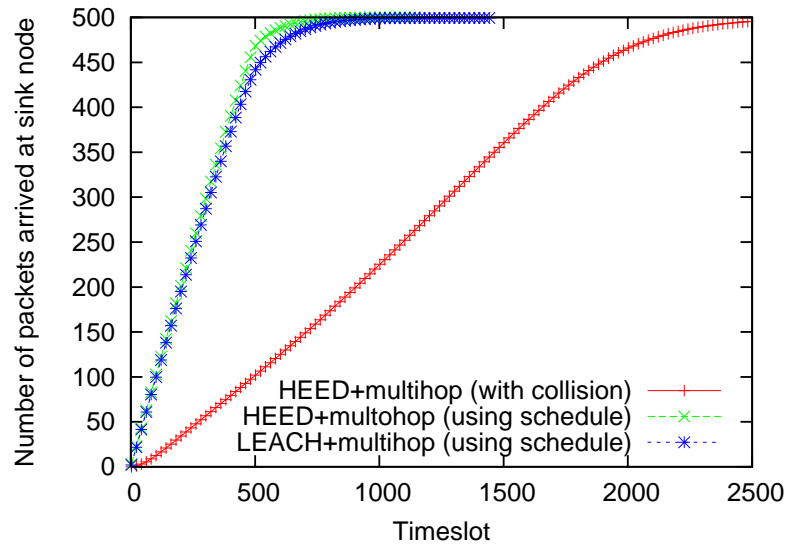


(a) $l = 100m$ ($p = 10\%$)

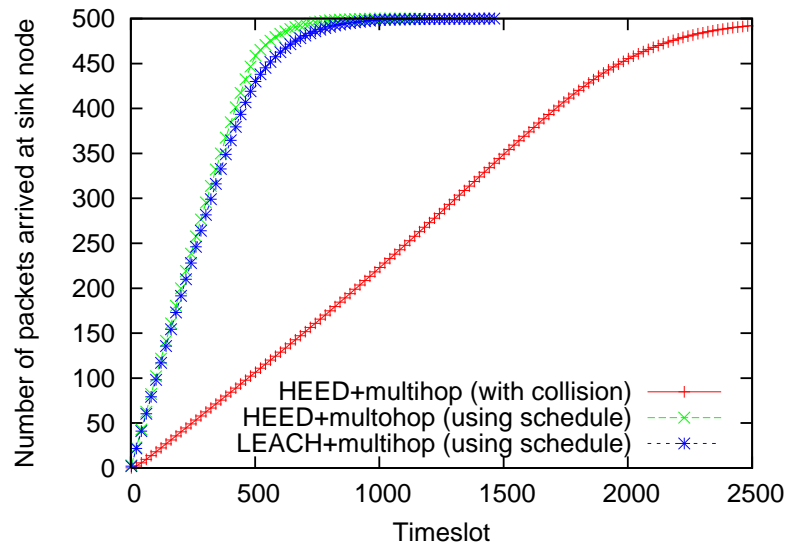


(b) $l = 65m$ ($p = 20\%$)

図 33: パケット収集時間の比較 (データフュージョンを行う場合)

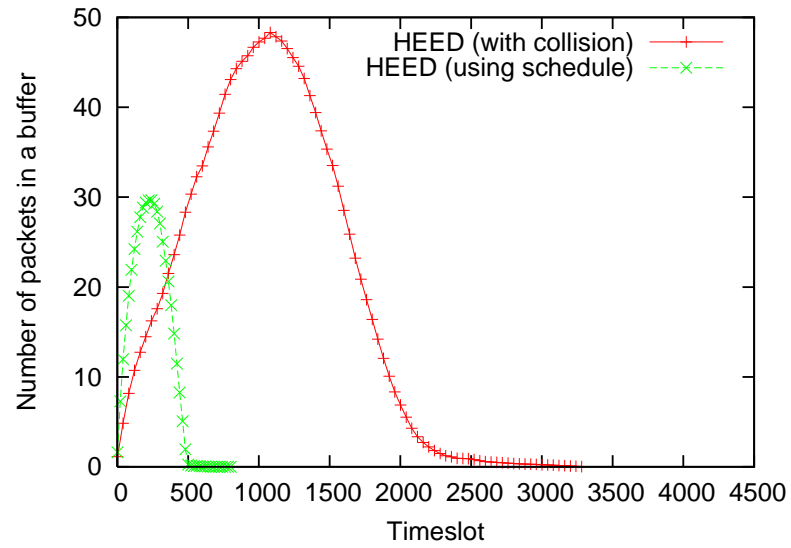


(a) $l = 100m$ ($p = 10\%$)

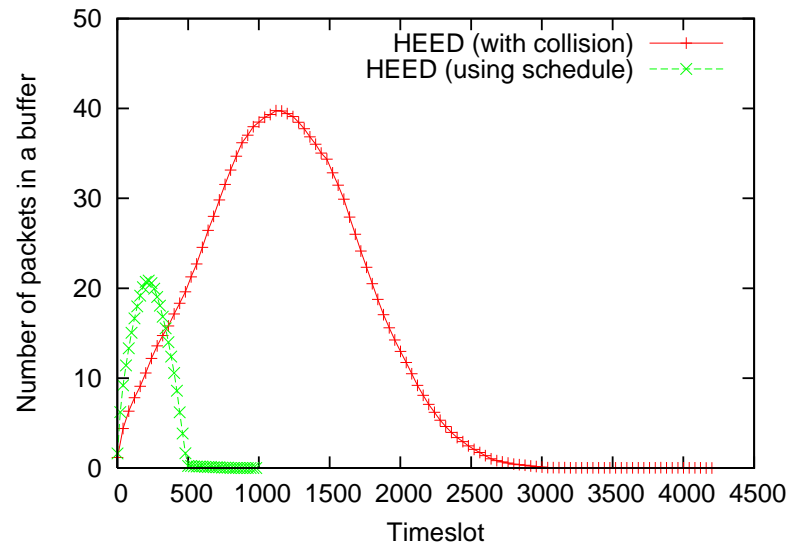


(b) $l = 65m$ ($p = 20\%$)

図 34: パケット収集時間の比較 (データフュージョンを行わない場合)



(a) $l = 100m$ ($p = 10\%$)



(b) $l = 150m$ ($p = 20\%$)

図 35: シンクノードに直接送信するセンサノードの平均バッファ内パケット数

6 おわりに

本報告では、まず大規模なセンサネットワークを対象に、パケット収集の際にクラスタ内およびクラスタヘッド間でマルチホップ通信を用いた場合の基本的な性能の傾向を調査した。その結果、各ホップでデータフュージョンが可能であれば、1ホップでシンクノードにパケットを送信する方法に比べ消費電力を大幅に抑えることができ、パケット収集時間も短くなることが分かった。データフュージョンを行わない場合は、シンクノードに近いセンサノードにパケットの中継負荷が集中するため、クラスタの構成方法やルーティング方法に工夫が必要なことも明らかになった。さらに本報告では、ネットワークの大域的情報が利用できる場合と比較して、局所的な情報しか利用できない場合には、データフュージョンを行った場合であっても平均 15% 消費電力が増加し、データフュージョンを行わない場合には平均 55% の増加となることを示した。また、90% のパケット収集率を維持するラウンド数についても、データフュージョンを行う場合で大域的情報が利用可能な場合の 85% 程度のラウンド数しかパケット収集率を保つことができず、データフュージョンを行わない場合には 65% しか 90% のパケット収集率を維持できないという結果となった。パケット収集時間についてもデータフュージョンを行う場合で約 4 倍、行わない場合では約 4.6 倍となることを明らかにした。

本報告において、干渉を避けるスケジューリングができず、再送を回避できなければ性能に大きな影響を与えることが分かった。再送の原因としては、干渉以外に無線伝送時のエラー発生がある。今後の課題としてはこの影響を考慮した性能の評価が挙げられる。それ以外の課題として、データ発生モデルをより現実的にすることがある。現在はサイクルの最初だけにパケットが発生するというモデルを用いているが、実際にはアプリケーションによってさまざまなデータ発生モデルが考えられる。このモデルの違いによって、センサネットワークの稼働時間などは大きな影響を受けることが予想される。また、小さなセンサノードでは大きなバッファを確保することは難しく、データ発生モデルによってはバッファ内スケジューリングや優先制御、バッファ情報の交換などの工夫が必要になる。これらの課題を考慮した新たな方式の提案を行いたい。

謝辞

本報告を終えるにあたり，御指導，御教授をいただきました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授に深く感謝いたします．また，本報告において直接御指導いただきました大阪府立大学の菅野正嗣助教授には，様々な相談に乗っていただき，多くの助言をいただきました．心よりお礼申し上げます．また，平素から適切なお助言をいただいた大阪大学大学院情報科学研究科の若宮直紀助教授，大阪大学サイバーメディアセンターの長谷川剛助教授，大阪大学大学院経済学研究所の荒川伸一助手に深く感謝いたします．最後に，本報告のために多くの時間を割いて相談に乗っていただき，支えていただいた村田研究室，中野研究室の皆様方に心からお礼申し上げます．

参考文献

- [1] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, “Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks,” in *Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 2000)*, pp. 1–10, Jan. 2000.
- [2] W. Choi, P. Shah, and S. K. Das, “A framework for energy-saving data gathering using two-phase clustering in wireless sensor networks,” in *Proceedings of the First Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services (MobiQuitous 2004)*, (Boston), pp. 203–212, Aug. 2004.
- [3] O. Younis and S. Fahmy, “Distributed clustering in ad-hoc sensor networks: A, hybrid, energy-efficient approach,” in *Proceedings of INFOCOM 2004*, vol. 1, (Hong Kong, China), pp. 629–640, Mar. 2004.
- [4] H. Chan and A. Perrig, “ACE: An emergent algorithm for highly uniform cluster formation,” in *Proceedings of the First European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN 2004)*, Jan. 2004.
- [5] B. J. Culpepper, L. Dung, and M. Moh, “Design and analysis of hybrid indirect transmissions (HIT) for data gathering in wireless micro sensor networks,” *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 8, pp. 61–83, Jan. 2004.
- [6] S. Ghiasi, A. Srivastava, X. Yang, and M. Sarrafzadeh, “Optimal energy aware clustering in sensor networks,” *Sensors Magazine*, vol. 2, pp. 258–269, July 2002.
- [7] S. Lindsey, C. Raghavendra, and K. M. Sivalingam, “Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics,” *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 13, pp. 924–935, Sept. 2002.
- [8] A. A. Papadopoulos and J. A. McCann, “Connectionless probabilistic (CoP) routing: an efficient protocol for mobile wireless ad-hoc sensor networks,” in *Proceedings of the 24th International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC 2006)*, (Phoenix, Arizona), pp. 73–77, Apr. 2005.

- [9] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, “An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 1, pp. 660–670, Oct. 2002.
- [10] J. Neander, E. Hansen, M. Nolin, and M. Björkman, “Asymmetric multihop communication in large sensor networks,” in *Proceedings of International Symposium on Wireless Pervasive Computing 2006 (ISWPC 2006)*, (Phukeet, Thailand), Jan. 2006.
- [11] S. Soro and W. B. Heinzelman, “Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering,” in *Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS 2005)*, Apr. 2005.
- [12] T. Shu, M. Krunz, and S. Vrudhula, “Power balanced coverage-time optimization for clustered wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 6th ACM international symposium of Mobile ad hoc networking and computing (MobiHoc 2005)*, (Urbana-Champaign), pp. 111–120, May 2005.
- [13] IEEE, *802.15.4–2003 IEEE Standard for Information Technology–Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*, Oct. 2003.