

# 修 士 論 文

センサネットワークにおける省電力化のための  
経路制御およびアクセス制御に関する研究

平成 23 年度修了

三重大学大学院工学研究科

博士前期課程 電気電子工学専攻

通信工学研究室

新家 晃



# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 背景	1
1.2 本研究の目的	3
1.3 本論文の構成	4
<b>第2章 無線センサネットワーク</b>	<b>5</b>
2.1 概要	5
2.2 用途	6
2.3 センサネットワークの技術と課題	8
2.3.1 センサノード技術	8
2.3.2 ネットワーク技術	10
2.3.3 システム技術	11
2.4 省電力化に関する既存研究	13
2.4.1 アクセス制御プロトコル	13
2.4.2 経路制御プロトコル	17
<b>第3章 省電力化のための経路制御およびアクセス制御</b>	<b>22</b>
3.1 アクセス制御	23
3.1.1 送信時間制御	23
3.1.2 間欠動作	25
3.2 経路制御	27
3.3 動作例	29

3.3.1 経路構築 . . . . .	29
3.3.2 データ及び確認応答送信 . . . . .	31
3.3.3 間欠動作 . . . . .	33
<b>第 4 章 特性評価結果</b>	<b>34</b>
4.1 シミュレーションパラメータ . . . . .	34
4.2 AWGN 環境での特性評価 . . . . .	36
4.3 フェージング環境での特性評価 . . . . .	40
4.4 フレームフォーマットにおける各スロット期間の最適化 . . . . .	42
<b>第 5 章 結論</b>	<b>48</b>
5.1 本論文のまとめ . . . . .	48
5.2 今後の課題と展望 . . . . .	49
<b>参考文献</b>	<b>50</b>
<b>謝 辞</b>	<b>56</b>
<b>研究業績</b>	<b>57</b>

## 目 次

2.1 センサネットワークの構成例 . . . . .	5
2.2 万博アメダス . . . . .	6
2.3 クラスタリング . . . . .	12
2.4 S-MAC の動作 . . . . .	14
2.5 B-MAC の動作 . . . . .	15
2.6 X-MAC の動作 . . . . .	16
2.7 SPIN の動作 . . . . .	18
2.8 Directed diffusion の動作 . . . . .	19
2.9 Greedy Forwarding の動作 . . . . .	20
2.10 Greedy Forwarding における問題点 . . . . .	21
3.1 フレームフォーマット . . . . .	24
3.2 センサノード配置 . . . . .	30
3.3 経路構築手順 . . . . .	30
3.4 経路例 . . . . .	31
3.5 データ及び確認応答送信手順 . . . . .	32
3.6 間欠動作例 . . . . .	33
4.1 制御パケット数 . . . . .	37
4.2 データ収集率 . . . . .	38
4.3 消費電力 . . . . .	39
4.4 制御パケット数（フェージング環境下） . . . . .	40

4.5 データ収集率（フェージング環境下）	41
4.6 新フレームフォーマット	42
4.7 スロット期間の変化による消費電力推移	43
4.8 スロット期間変化によるパケット到達率推移	44
4.9 スリープ割合対パケット到達率	46
4.10 スリープ割合対データ収集遅延	47

## 表 目 次

2.1 センサネットワークの通信方式 . . . . .	10
3.1 経路テーブル . . . . .	28
4.1 シミュレーション諸元 . . . . .	35
4.2 MICAZ 電力モデル . . . . .	35

# 第1章

## 序論

### 1.1 背景

近年，インターネット技術と無線通信技術は急速に進展し，身の回りの様々な物や機器がネットワーク化されている．そして，いつでも，どこでも，何でも，誰でもネットワークに接続し，情報の自在なやり取りを行うことができるユビキタス社会の実現に向けて，「ユビキタスセンサネットワーク」が注目されている．センサネットワークは，センサが人・モノの状況や周辺環境等を正確に感知・認識し，センサ同士がネットワークを介して情報をやり取りすることにより，状況や環境に即した最適なサービス提供に結びつけられる [1]．例えば，温度センサや人感知センサをオフィスビルや店舗の様々な場所に配置し，センサが収集した情報をもとに空調や照明などの管理・制御を行うことができる．他にも，河川の洪水，森林火災などの環境観測と予報での利用，医者と患者の行動監視，薬品の管理，生態医療などの医療・福祉関連での利用，住宅等の防犯・防災のための利用など広範な分野での情報コミュニケーション技術の支援強化が期待されている．

センサネットワークは，無線通信機能とセンサ機能を併せ持つセンサノードと，センサノードが収集した情報を集約し，外部システムに提供するシンクノードで構成される．一般にセンサノードの通信範囲は限られているため，シンクノードまで情報を届けるためにマルチホップ通信が用いられる．また，センサノードはバッテリー駆動であることが多く，メンテナンスが難しい場所に配置されることも予想されるため，ネットワークの長期間稼働を実現するには，センサノードの

省電力化が重要な課題となる [2,3]. この課題に対してこれまでに様々な研究がなされており, 経路制御の観点からの研究とアクセス制御の観点からの研究に大別される. 経路制御に関する研究では, 観測情報をシンクノードに転送するために必要となる電力を最小化する経路を探索する方法 [13,14], 各センサノードの消費電力を均等にすることでネットワーク全体の稼働時間を伸ばす方法などが考えられている [15–18]. また, アクセス制御に関する研究では, センサノードが定期的に省電力状態に移行する方法(間欠動作)が提案されており, センサノード寿命の延長に有効であることが示されている [4–11].

上記の既存研究における経路制御では, 最適な経路を見つけるために様々な種類の制御パケットをネットワーク内で交換する必要がある. 制御パケットは通常フラッディングにより伝送されるため, 多量の制御パケットが発生し, 大きなオーバーヘッドとなる可能性が高い. さらに, 最適な経路を見つけるためには複雑な計算を行う必要があり, 現実にご利用可能なセンサノード及び無線帯域などの資源の制約から困難となる場合も想定される. 一方, アクセス制御では, 間欠動作を行うために制御パケットの交換や, プリアンブル送信が必要であり, こちらも大きなオーバーヘッドとなる可能性が高い. また, 既存研究ではそれぞれ経路制御, アクセス制御を個別に検討されている場合が多いが, 実際にネットワークを構築する際には経路制御, アクセス制御を相互に調整する必要がある. そのため, 既存法の LEACH [12] のように経路制御とアクセス制御を包括して行うことが望ましいと考えられる.

そこで, 本稿では制御パケットによるオーバーヘッドの抑制を行うとともにネットワーク層の経路制御とメディアアクセス層の送信時間制御を包括して制御するクロスレイヤメカニズムについて検討を進める.

## 1.2 本研究の目的

本研究ではセンサネットワークの省電力化を目的としている。省電力化を実現するために経路制御，アクセス制御に用いる制御パケットによるオーバヘッドの抑制とパケット衝突回避，効率の良いデータ収集，間欠動作を行う。提案法では，経路構築の際に既存法の多くで用いられているような制御パケットの「フラッディング」を使用せず，少量の制御パケットで経路構築を可能とする。これにより経路構築時の通信量を削減し，省電力化を行う。さらに独自のフレーム構造を用いることにより，パケットの種類およびシンクノードからのセンサノードまでのホップ数に基づいて当該ノードにおけるフレーム内の通信期間を制限する。これにより，異なるホップ数を持つセンサノード間ではパケット衝突を完全に回避でき，パケットの再送による消費電力を削減できる。この制御にはパケットの種類とホップ数（経路情報）を用いるため，アクセス制御のためにパケット交換などを行う必要がない。また，シンクノードから遠方のセンサノードから順にデータ送信を行う期間を設けることでデータを中継するセンサノードにおいて，中継するデータと自身のデータをまとめて送信できるようにする。これにより効率のよいデータ収集を可能とする。そして，このフレーム構造を用いて，自身が関与しない通信期間では省電力状態となるような間欠動作を行うことで待機状態の消費電力を削減する。

### 1.3 本論文の構成

第 2 章において本研究の対象であるセンサネットワークのについて説明する．第 3 章では，本論文で提案する省電力化のための経路制御およびアクセス制御手法について説明し，シミュレーション評価により有効性を検証する．最後に第 4 章で本論文のまとめと今後の課題について述べる．

## 第2章

# 無線センサネットワーク

### 2.1 概要

無線センサネットワークとは、光や温度などの特定の事象を観測するセンサ機能と無線通信機能を併せ持つバッテリー駆動のセンサノードを散在させ、それらが協調して環境や物理的状況を採取することを可能とする無線ネットワークのことである。図 2.1 にセンサネットワークの構成を示す。センサネットワークは、多数のセンサノードと、センサノードからの情報を収集するシンクノードによって構成される。各センサノードは互いに無線で情報のやり取りを行う。各センサノードは、他のセンサノードの情報を中継する機能を有し、センシングされた情報はマルチホップでシンクノードに送信される。シンクノードは、インターネットなどの広域ネットワークに接続しているため、ユーザはシンクノードにアクセスすることでセンサノードが収集した情報を得ることができる [19]。

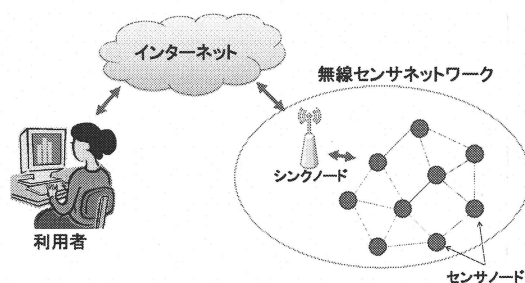


図 2.1 センサネットワークの構成例

## 2.2 用途

センサネットワークの用途を大きく分けると定期観測とイベント検知に大別される。

### ● 定期観測

定期観測では設置したセンサノードが定期的に観測データを情報収集ノードであるシンクノードへ送信する。これにより周辺の情報を知ることができる。定期観測の応用として、気温・降雨量・風速などの環境モニタリング、電気・水道・ガスの自動検診などが考えられる [20-22]。実用例としては、2005年に開催された愛・地球博で設置された万博アメダスがある。万博アメダスでは愛・地球博長久手会場内の約20ヶ所に設置した観測ポイントで10分おきに観測した温度・湿度・CO<sub>2</sub>濃度・雨量・日射・風向風速といった環境データを自動的に収集し、インターネットを介してリアルタイムに公開した [23]。

環境データ観測表示システム「EXPOアメダス」システム概念図

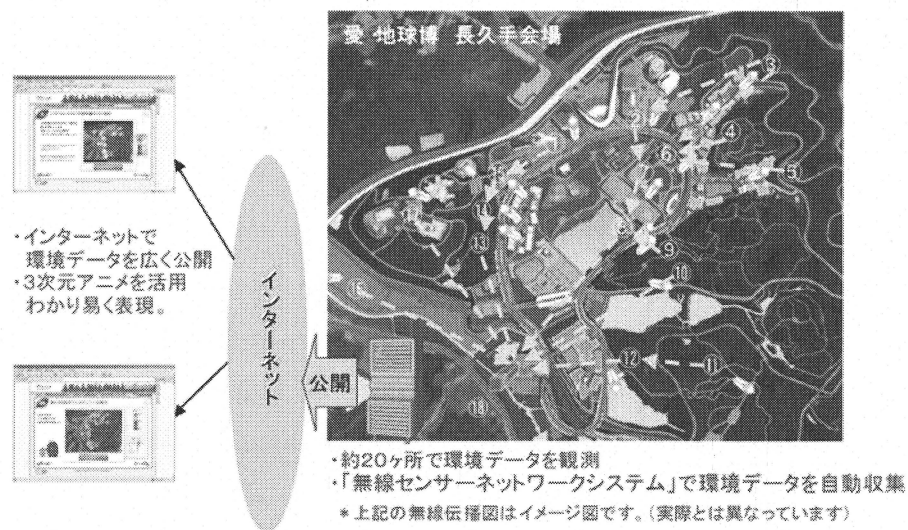


図 2.2 万博アメダス

### ● イベント検知

イベント検知ではセンサノードがある情報を検知した場合や観測した値が

一定の値を超えたり下回った場合またにそれを通知する．イベント検知の応用として，火災，防犯，放射線，地震検知などが考えられる [24-26]．実用例としてはホームセキュリティシステムがある．既に製品化されており，住宅の火災や侵入者を検知して，利用者に E メールなどで通知する [27]．

## 2.3 センサネットワークの技術と課題

センサネットワークの構築に必要となる技術と課題について記載する。

### 2.3.1 センサノード技術

センサネットワークにおいては多数のセンサノードが多目的に使われる。そのため新しい種類のセンサノードの開発が求められる。また、センサノード個々のメンテナンスに労力を費やしてはいられず、メンテナンスの負担を軽減する技術が必要となる。また、どこにでも置けるようにするため小型化や省電力化が必要となる。

- センシング技術

センサネットワークにおいては各々のセンサノードが多目的に使用されるため、多種の成分をセンシングできるよう高度化や高精度化が求められる。このため、センサネットワークに適したセンサノードが求められ、新しい種類の計測用センサの開発や、人などを認識する認識用センサの認識率向上が必要となると同時に、計測用センサと認識用センサのデータを融合して使用することが必要となる。また、野外だけでなく地球観測で極地に置かれるなど、特異な場所に設置されることも考慮し、耐環境性が求められる。さらに、センサネットワークではセンサノードが多数存在するため、メンテナンスフリーでセンサノードが長持ちするように、計測値のずれを自動で補正するキャリブレーション技術や省電力化が必要となる。また、場所を選ばず多数のセンサノードを置くために小型化、相互干渉の防止、センサノード同士の連携などが求められる。

- プロセッサ技術

センサノードそのものが小型化、省電力化を必要とするのと同様に、センサノードに用いるプロセッサにも小型化、低電力化、電力制御の技術が必要となる [28]。

- 電源

センサノードを置くだけで使えるようにするには電源を自前で持つ必要がある。その際には前項でも触れたようにメンテナンスの負担を軽減するため、電源の寿命が使用期間に耐えうるだけのものでなくてはならない。そのためには効率の良い二次電池や燃料電池，環境エネルギーの利用が必要となる。また外部よりワイヤレス供給にて電源を確保することも考えられる [29,30].

- 小型化，低価格化技術

設置場所にとらわれずにセンサノードを設置する上では，その小型化が重要になる。集積回路技術の発展により，センサ部分や無線装置自体の小型化技術は進んでおり，低価格化にも大きく貢献している。例えば，RFID(Radio Frequency Identification) であれば，アンテナ部を除けば米粒以下にまで小型化が既に実現している。

### 2.3.2 ネットワーク技術

#### ● 無線技術

センサネットワークでは一般に通信頻度や通信量は少ない．そのため無線通信方式には表 2.1 に示すような，低速で消費電力の小さいものが用いられる．

表 2.1 センサネットワークの通信方式

方式名称	微弱無線	特定省電力無線	ZigBee	Bluetooth	高速無線 PAN UWB	低速無線 PAN
規格	独自	独自	IEEE802.15.4	IEEE802.15.1	IEEE802.15.3a	IEEE802.15.4a
伝送速度	2Kbps	2.4Kbps	250Kbps	1Mbps	480Mbps	数十 Kbps 以上
利用周波数帯域	307.74MHz 316.74MHz	429MHz	2.4GHz (868MHz) (915MHz)	2.4GHz	3.1GHz ~10.6GHz	2.4GHz 868MHz 915MHz 3.1GHz~ 10.6GHz
伝送距離	30m	30m~300m	10m~75m	10m~100m	10m(110Mbps) 4m(200Mbps)	10m 以上
消費電力 (通信/待機)	66mW /3.3mW	50mW /0.3mW	<60mW (通信)	<120mW /4.2mW	<100mW (通信)	6.2mW (測距, 通信)

#### ● ノード制御

センサネットワークにおいてはセンサノードを置くだけでセンシングが行えることが必要となる．また，センサノード自身が自分の置かれている位置を正確に検出することで，何処の環境情報を送っているかを明確にする必要がある．さらに，多数のセンサノードを用いるため，それぞれのセンサノードが位置情報を連携して活用したり，センサノード同士の時間を同期させたりすることで，センサノードの持つ情報精度を飛躍的に上げることができる．センサノードの位置や時刻を推定する方法としては，すべてのセンサノードに GPS デバイスを搭載することが考えられるが，ノードのサイズ，消費電力が増大し，またノード数が莫大となるとコストも高くなるため，現実的ではない．そのため，GPS を用いない時刻同期，位置推定法が必要である [31-36]．これらの実現とセンサノードを無駄なく配置する最適ノード配置や多数のセンサノードを識別し大規模に管理することでセンサノードを置く場所を一つ一つ考える必要がなくなる．

- ネットワーク制御技術

センサノードを設置する方法としては、防災や軍事用途などのために空中から散布する場合から、一つずつ人手で設置する場合まで様々である。さらに、その設置環境も、屋外、室内、地下など多様である。このような設置方法、設置環境に柔軟に対応するためにはセンサノードが自律的にネットワークを構築することが必要である。そのために、センサネットワークではモバイルアドホックネットワーク技術が用いられる。モバイルアドホックネットワーク (MANET: Mobile Ad Hoc Network) は通信機能を有するノードの集まりであり、ノードのみによってノード相互の通信を実現する技術である。ノードは新たに追加されたり、退去したり、移動するダイナミックな環境を想定する。原則として、特別な役割をもつノードは存在せず、どのノードも同様の役割をもち対等の関係にある。移動通信における基地局、無線 LAN のアクセスポイントといったインフラストラクチャを必要としないため、場所を選ばずノードが集まった時点で即座にネットワークが構築される。MANET の重要な技術として経路制御、メディアアクセス制御があり、これらはセンサネットワークにおいても重要な技術である。

### 2.3.3 システム技術

センサから集めた情報を使用しサービスを提供するためには、そこから大量の情報をリアルタイムに収集する技術（データ収集技術）と、収集したデータを目的に応じて分析する技術（データ分析技術）が必要となる。

- データ収集技術

センサノードの情報は、温度、湿度などのように一定間隔ごとに発生される場合と、警報や異常値のように不定期に発生される場合がある。定期的に発信される情報については、センサノードはデータを中継する際に情報を追加しつつ転送することが必要となる [37-39]。例えば、図 2.3 に示すクラスタリング方式ではネットワーク内を複数のクラスタにわけ、各クラスタでクラスタヘッドと呼ばれるノードにクラスタ内のノードのデータを収集し、クラ

スタヘッドがまとめてデータの転送を行う。これにより効率の良いデータ収集が可能である。一方、警報のようなイベント的な情報については、決められた時間内にそのデータをセンタまで通知したり、大量に警報が発生した際の対処方法などの検討が必要である。

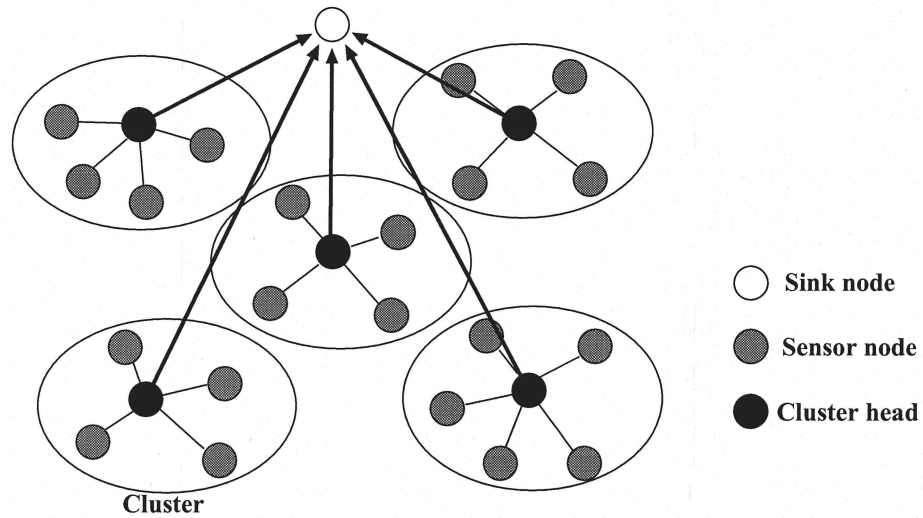


図 2.3 クラスタリング

- データ分析技術

センサで検知した人やモノの動きや、温度などの変化といった、大量に蓄積されるデータからその意味を分析する技術も重要である [40]。また、分析結果に基づいて、利用者の状況に応じた適切な情報を提供したり、機器の制御を行うことも必要である。

## 2.4 省電力化に関する既存研究

センサネットワークは多くのノードから構成されるため、バッテリーを交換することはコストが大きくなる。そのため、ネットワークを長期稼働させるために、消費電力を抑制することが重要な課題となる。特にメッセージの送受信を行わない時でもノード自体が送受信可能なアクティブ状態であれば電力を余分に消費することになる。通信を行う期間が比較的短いセンサネットワークにおいては送受信を行わない期間は極力無線インターフェイスはスリープ状態になることが望ましい。そのため、チャンネルがビジー状態かアイドル状態かを判断し、チャンネルアクセスを制御するアクセス制御プロトコルで無線インターフェイスの制御をおこなうことが有効である。また、アクセス制御以外にも経路制御を用いた省電力化が考えられる。方法としては、パケットをシンクノードまで運ぶ消費電力が最小となる経路を選択する方法やノードの残存電力を考慮して経路を選択する方法、制御パケットの数を減らす方法などが考えられる。

以降に、アクセス制御プロトコル、経路制御プロトコルそれぞれについて記述する。

### 2.4.1 アクセス制御プロトコル

アクセス制御プロトコルは大別すると、コンテンション方式とスケジューリング方式に別けられる [41]。スケジューリング方式では、通信タイミングをタイムスロットで予め決めるため、ランダムアクセスを行うコンテンション方式と比較してノードの消費電力は抑えることができる。しかし、スケジューリング方式ではタイムスロットで通信を行うため高精度な時刻同期が要求される。また、適切なタイムスロット数に分割するためにネットワーク全体のノード数の把握が必要となり、ノードが追加された場合にタイムスロットの再編成が必要となる。コンテンション方式ではランダムにノードのアクティブ・スリープ状態を切り替え通信を行う。そのため、スケーラビリティは優れている。しかし、送受信のタイミングが把握できないためノードをスリープにすることができる時間の比率はスケジューリング方式と比べて低くなる。したがって、自ノードの通信に直接関係ない時間をスリープさせることができるかが消費電力低減の鍵となる。

コンテンション方式の代表的なものとして S-MAC [6], B-MAC [7], WiseMAC [8], X-MAC [9] などがある。

### ● S-MAC

S-MAC では各ノードは周期的にリッスン状態とスリープ状態を繰り返すことにより、消費電力を削減する。リッスン状態では、通信路が使用中かどうかを判定するために、搬送派の検知を行う。スリープ状態では電波の送受信を停止し、次のリッスン状態までのタイマーを設定する。ノードはリッスン／スリープのスケジュールを決めるため、まず、隣接ノードのスケジュールの受信を試み、受信できなければ自身でスケジュールを自律的に作成する。そして、自ノードのスケジュールを SYNC メッセージにより隣接ノードへ定期的にブロードキャストする。これにより隣接ノード同士がリッスン／スリープスケジュールを同期させることが可能である。S-MAC では複数のノードによる通信路の競合を解決するために、IEEE802.11 と同様に CSMA に基づくメディアアクセス方式を用いる。この方式では、RTS/CTS パケットを用いて通信路の予約を行う。RTS または CTS をオーバヒアリングしたノードは NAV(Network Allocation Vector) の値に基づき、他ノードの通信期間にスリープ状態となる。これにより、リッスン状態を継続した場合に比べて、消費電力を削減できる。

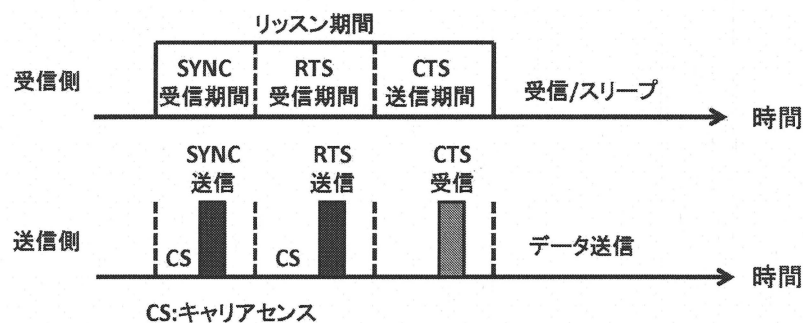


図 2.4 S-MAC の動作



は、送信時に必ず動作周期以上のプリアンプルの送信が必要な問題を改善すると同時に、アドレス情報から受信に関係ないノードはデータパケットの受信を待たずにスリープ状態に戻ることが可能となり、1 ホップ内に存在する送信先以外のノードをアクティブ状態にさせてしまう問題を解決している。

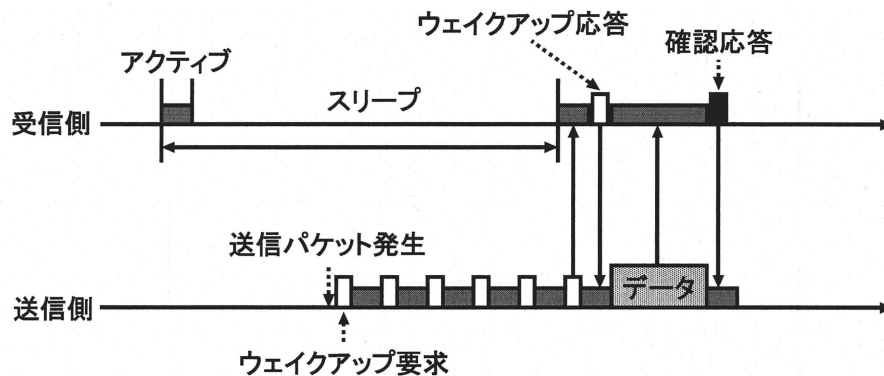


図 2.6 X-MAC の動作

スケジューリング方式の代表的なものとして LEACH [12], TRAMA [10], LMAC [11] などがある。

- LEACH

LEACH は、TDMA をセンサネットワークに適応させた方式である。LEACH では先のデータ収集技術で述べたようなクラスタリング方式を採用している。このクラスタリングにおいて、LEACH では各ノードは自分のクラスタヘッドに対して TDMA でデータを送信する。TDMA を用いることで、各ノードが割り当てられた時間以外はスリープ状態となることができる。また、LEACH では特定のノードがクラスタヘッドになるのではなく、すべてのノードに均等にクラスタヘッドの役目を課する仕組みとすることで、特定のノードに通信不可が集中して、消費電力が多くなることをさける。

- TRAMA

Traffic Adaptive Medium Access(TRAMA) は TDMA ベースの方式である。TRAMA では、各ノードが自身から 2 ホップの範囲内に存在する近隣ノードのトポロ

ジー情報を把握し、各スロットにおける近隣ノードの優先度を計算する。これにより送信ノード、受信ノードが決定され、それ以外のノードはスリープ状態となることができる。また、定期的にトラヒック情報を交換することによって動的にスロットを割り当てる。

- LMAC

LMAC は TDMA ベースの方式である。各時間スロットでは事前に決められた制御ノードのみがデータを送信可能とする。制御ノードはスロットの開始時に受信ノード一覧を送信し、これに該当しないノードはスリープ状態となることができる。

#### 2.4.2 経路制御プロトコル

経路制御プロトコルは大きく分けてフラット型、階層型、位置情報型の3つがある [42]。フラット型では一般的にすべてのノードは同じ規則に従って動作する。それに対して階層型ではネットワーク内に異なる規則で動作するノードが存在する。また、位置情報型は位置情報を用いて経路制御を行う方法である。各ノード位置の把握には GPS や近隣ノードとの相対座標を用いる。

フラット型の代表例として SPIN [43], Directed diffusion [44], Rumor routing [45] などがある。

- SPIN

データ転送に先立って情報の内容を表すメタデータを送信して、データ転送の要否を確認する。これにより冗長なデータ転送による電力消費を抑制するとともに、データの到達性を保証できる。図 2.7 に SPIN の動作例を示す。始めに、データ送信を行うセンサノード A は ADV (メタデータ) を近隣ノードであるセンサノード B に送信する。ADV には、各センサノードがセンシングしている対象の属性のみが含まれており、センシングデータよりもデータ量が少ない。次に ADV を受信したセンサノード B はセンサノード A が持つデータが必要であるかを判断し、必要であれば REQ (送信要求) をセンサノード A に向けて送信する。そして、REQ を受け取ったセンサノード A は

REQ の送信元であるセンサノード B に向けてデータを送信する．データを受け取ったセンサノード B は同様の方法で ADV, REQ の交換を行いデータ転送を行う．このようにして，データ送信，転送の前に ADV, REQ の交換を行うことで冗長なデータを抑制する．

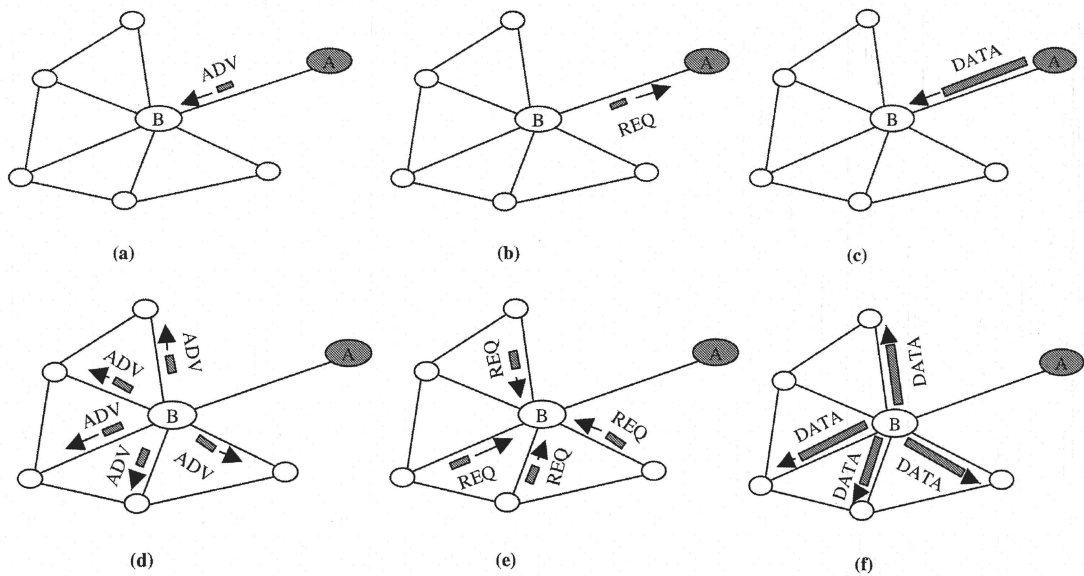


図 2.7 SPIN の動作

- Directed diffusion

Directed diffusion は，定期観測向けのプロトコルである．Directed diffusion では，まず，シンクノードが条件や収集間隔，期間を記述した interest と呼ばれるクエリーをフラッディングする（図 2.8(a)）．各ノードは，interest を送信してきたノードを gradients として記憶する（図 2.8(b)）．interest に記載された条件に合致するノードは，観測データを gradients に対して送信する．観測データは gradients をたどることによって最終的にシンクノードに到達する．シンクノードは，観測データが転送されてきた経路のうち，遅延が最小である経路を選択し，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（図 2.8(c)）．

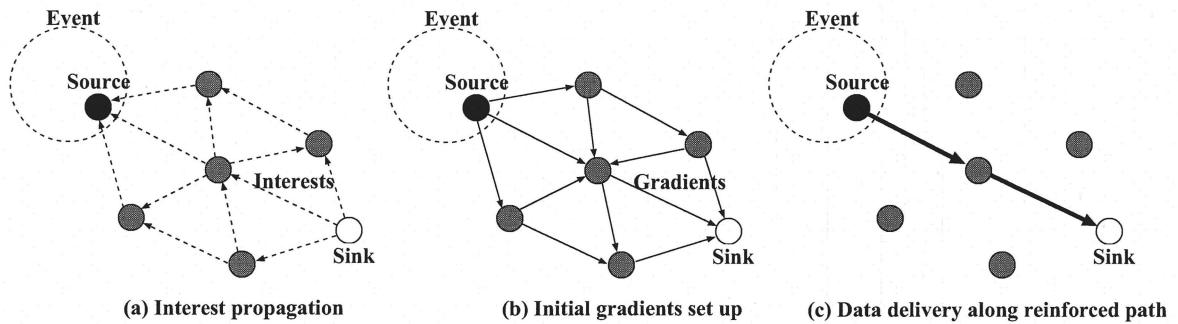


図 2.8 Directed diffusion の動作

階層型の代表的なものとしては, LEACH [12], HEED [46], PEGASIS [47] などがある.

- LEACH

LEACH はアクセス制御プロトコルの例として挙げたが, クラスタリング方式を用いた階層型のプロトコルである. LEACH では, 各々のセンサが自律していくつかのクラスタを形成する. それぞれのクラスタには, クラスタ内のすべてのセンサからのデータを集約し, ベースステーションへ遠距離送信する役割を担うクラスタヘッドが一つずつ存在する. 遠距離送信を行うクラスタヘッドはその他のセンサよりも多量の電力を消費する. そのため特定のセンサがクラスタヘッドの役割をずっと担い続けるとそれらのセンサから電池切れを起こしてしまう. そこで LEACH では, ランダムにクラスタヘッドの役割を交代することによって, 特定のセンサの電池切れを防いでいる.

- HEED

LEACH では確率に基づいてそれぞれのセンサが独立してクラスタヘッドになることを決定するため, クラスタの位置や大きさ, ラウンドごとのクラスタ数に偏りが生じる. この偏りによって負荷の分散が完全になされず, 特定のセンサの消費電力が大きくなってしまい, その結果センサネットワークシステムの寿命が短くしてしまう. そこで考案されたのが HEED (Hybrid, Energy-Efficient Distributed clustering) である. HEED では, 電力残量を考慮しつつ各

クラスタの大きさを一定にするようなアルゴリズムを提案している．各センサがクラスタヘッドになる確率を初期電力とその時点での残余電力から決めることで，より残余電力のあるセンサがクラスタヘッドに立候補しやすくしている．

位置情報型の代表例として Greedy Forwarding [48], GPSR [49], GAF [50] などがある．

- Greedy Forwarding

Greedy Forwarding では，まず，各ノードは近隣ノードに対して自分の位置情報を定期的に通知する．ノードがデータ転送をする場合，宛先ノードの位置に最も近い近隣ノードに対してデータの転送を行う（図 2.9）．データを受信したノードは，さらに宛先ノードの位置に最も近い近隣ノードにデータを転送する．このような処理を繰り返すことにより，最終的に宛先ノードまでデータを届けることができる．

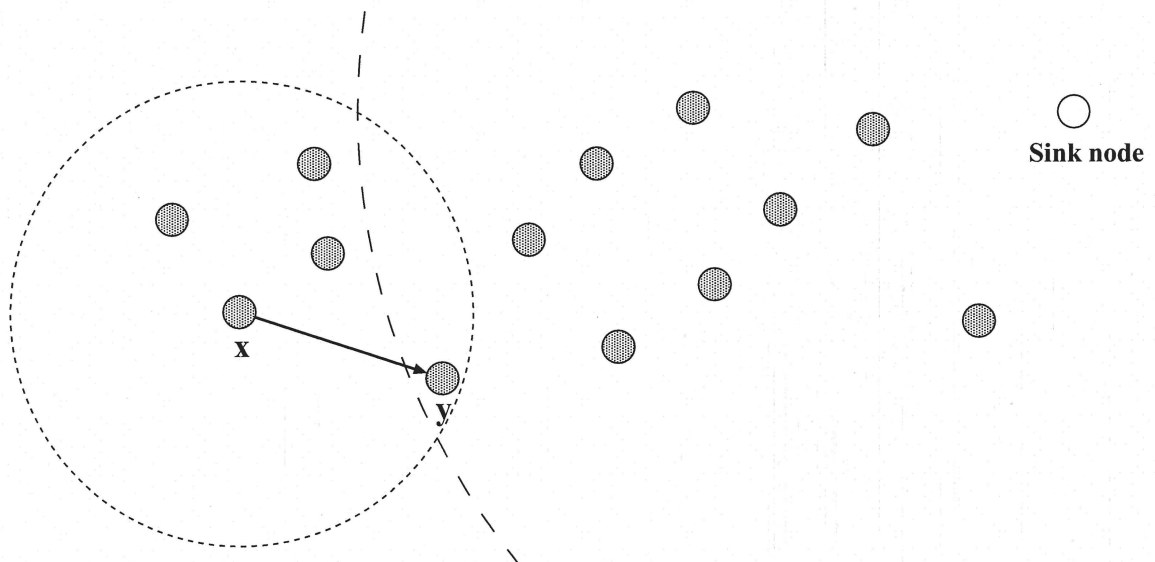


図 2.9 Greedy Forwarding の動作

- GPSR

GPSRはGreedy Forwardingの改良型プロトコルである。Greedy Forwardingでは図2.10のような状況においてセンサノード $x$ は自身よりシンクノードから遠いセンサノード $w, y$ を辿る経路を用いることが出来ないという問題が存在した。GPSRでは図2.10のような状況において、一時的に迂回経路を選択するようなモードに切り替えるような方法をとることでこの問題を解決している。

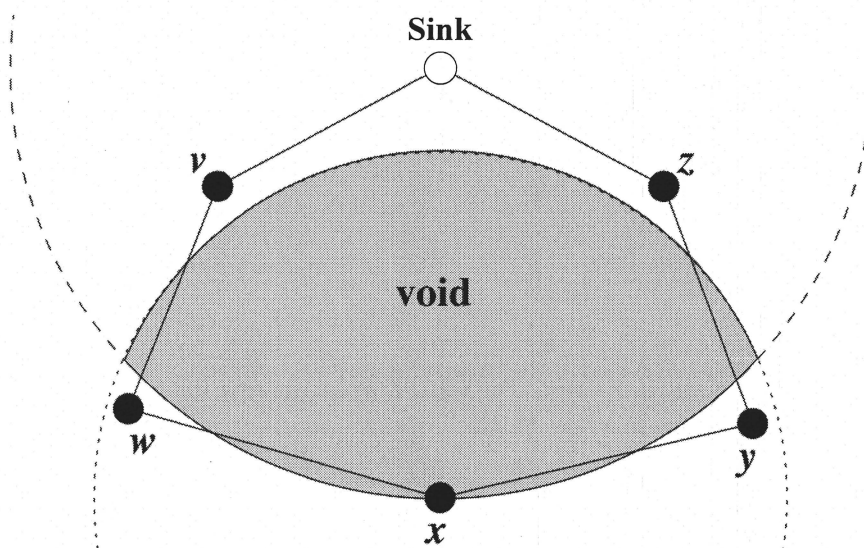


図 2.10 Greedy Forwarding における問題点

- GAF

GAFではノード位置に応じてノードのグループ分けを行う。そして各グループ内においてルーティングの役目を担うアクティブノードを1台選出し、それ以外のノードをスリープさせる。アクティブノードを残存電力に応じて動的に交代させることにより、GAFではネットワーク全体の省電力化と全ノードの消費電力の均衡化を実現する。

## 第3章

# 省電力化のための経路制御およびアクセス制御

本章では省電力化を実現するための制御パケットによるオーバヘッドの抑制とパケット衝突回避，効率の良いデータ収集，間欠動作の方法を提案する．提案法ではアクセス制御，経路制御を包括して行うことでこれらを実現する．アクセス制御において，経路制御の際に用いるホップ数という情報を使用して送信時間制御を行うことで，効率の良いデータ収集と間欠動作を実現する．このような方法をとることで従来法で用いられる間欠動作のための制御パケットの交換が不必要となる．また，ホップ数が大きいシンクノードから遠方のセンサノードからホップ数の小さいシンクノードに近いセンサノードへとデータを転送していくことで効率の良いデータ収集が可能となる．さらに，送信時間の分離により，異なるホップ数を持つセンサノード間ではパケットの衝突を完全に回避できる．経路制御においては，フラッディングを用いない経路構築法によって制御パケットの数を削減する．

本研究ではセンサノードが定期的にデータをシンクノードに向けて送信し，データ収集を行うシステムを考える．シンクノードがデータを受信した場合，確認応答をデータの送信先のセンサノードに返信し，センサノードはシンクノードから確認応答が受信できない場合データの再送を行う．

### 3.1 アクセス制御

提案法ではパケット衝突の回避，効率の良いデータ収集，間欠動作をおこなうためにすべてのセンサノードに対して送信時間制御を取り入れる．ここでは始めに送信時間制御の詳細について記し，次に送信時間制御を用いた間欠動作の詳細について記す．

#### 3.1.1 送信時間制御

提案法における送信時間制御では，まず，経路構築に用いる「制御パケット」，センサノードが検知したデータを載せた「データパケット」，シンクノードが確認応答を行う際に用いる「確認応答パケット」のそれぞれが衝突することを防ぐために，パケットの種類によって送信時間の分離を行う．次に異なるホップ数を持つセンサノード間でのパケット衝突を防ぐために各センサノードのシンクノードからのホップ数によって送信時間の分離を行う．さらに効率の良いデータ収集を行うために，ホップ数が大きい（シンクノードから遠方の）センサノードから送信時間を与えることで，各センサノードはデータの中継の際に，自身のデータと自身よりもシンクノードから遠いセンサノードのデータをまとめて送信することを可能とする．そしてこれらの送信時間制御によって各時間において通信を行う必要があるセンサノードが限定されるため，それに該当しないセンサノードは低消費電力状態となることで間欠動作を行う．

以上のような送信時間制御を行うために提案法では次に示すフレームフォーマットを用いる．

#### フレームフォーマット

提案方式では，図 3.1 に示されるフレームを採用することにより，パケットの種類およびシンクノードからセンサノードまでのホップ数に基づいて各センサノードが利用可能な時間スロットを制限する．各センサノードの利用可能な時間スロットを制限することにより，各センサノードが低消費電力状態となることが可能な時間を設け，間欠動作を行うことで待機時の消費電力の低減をはかる．なお，ネッ

ネットワークで想定する最大ホップ数を  $N$  とし、フレーム内に  $N$  個のデータスロットと確認応答スロットを定義する．各センサノードは送信するパケットの種類やシンクノードからのホップ数によりパケット送信が可能なスロットが定められており、定められたスロット時間内でのみパケット送信が可能である．

センサノードがパケット送信を行う際、当該センサノードの利用可能な各スロット期間内でランダム遅延時間後にパケット送信を行う、これにより同一スロット期間内で異なるセンサノードから送信されるパケットが衝突することを防ぐ．

以下に各スロットの詳細を記す．

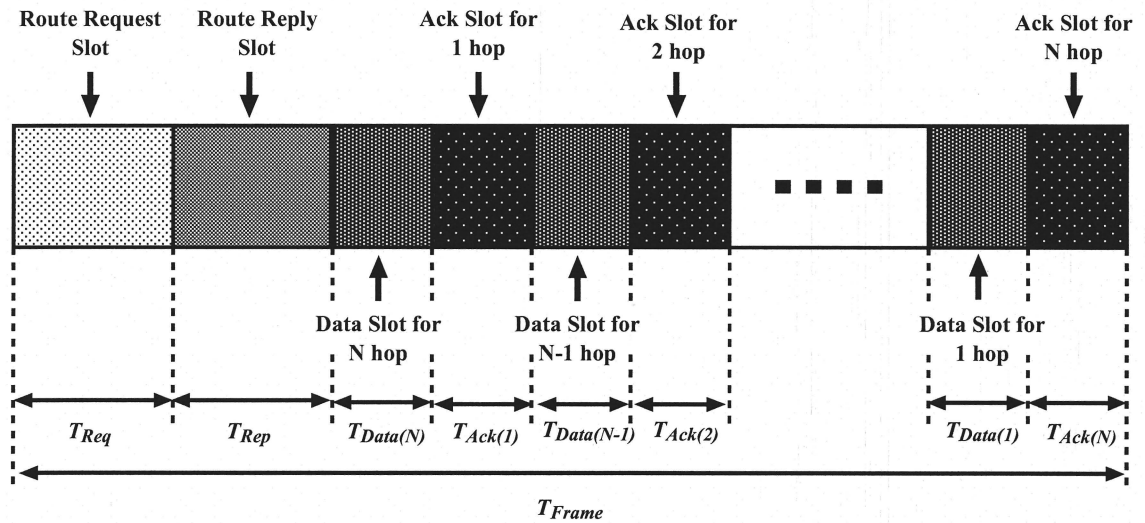


図 3.1 フレームフォーマット

- 経路要求スロット

センサノードが有効な経路を持たない場合、近隣センサノードに対して、当該センサノードが経路探索のための制御パケットをブロードキャストを用いて送信するためのスロットである．

- 経路応答スロット

経路要求スロットにおいて近隣センサノードより経路探索のための制御パケットを受信した場合、有効経路を持つセンサノードが、有効経路のホップ数を経路応答パケットにより返信するためのスロットである．

- データスロット

センサノードがシンクノードに向けて観測情報を含んだデータパケットを送信、転送するためのスロットである。データスロットはシンクノードからのホップ数  $n$  に応じてサブスロットに分割される。各サブスロットでは当該センサノードが自身のデータパケットと下流センサノードのデータパケットを次ホップの上流センサノードへ送信する。1 フレーム内で全センサノードのデータパケットをシンクノードへ送信するために、ホップ数が多い下流のセンサノード用スロットをフレームの前方に配置し、ホップ数が少ない上流のセンサノード用スロットを後方に配置する。ホップ数により送信時間を分けることで、異なるホップ数のセンサノード間のパケット衝突数の削減が可能となる。さらに、自身が関与しないスロットにおいて低消費電力状態になることで消費電力の削減が可能となる。

- 確認応答スロット

シンクノードに到着したデータパケットに対して、データをシンクノードが受信したことを通知する確認応答パケットを送信、転送するためのスロットである。確認応答スロットはデータスロットと同様にシンクノードからのホップ数  $n$  に応じてサブスロットに分割される。各サブスロットでは当該センサノードが自身の下流センサノード宛の確認応答パケットを次ホップの下流センサノードへ送信する。1 フレーム内で全センサノードへ確認応答パケットを送信するために、ホップ数が少ない上流のセンサノード用スロットをフレームの前方に配置し、ホップ数が多い下流のセンサノード用スロットを後方に配置する。データスロットと同様にホップ数により送信時間を分けることにより、パケット衝突数と消費電力の削減が可能となる。

### 3.1.2 間欠動作

前項の送信時間制御を用いた間欠動作について記す。提案法で用いるフレームフォーマットの各スロットにおいて通信を行うセンサノードは制限される。そのため通信を行う必要がないセンサノードは低消費電力状態となることで待機時の

消費電力の削減が可能である。次に各スロットでのセンサノードの動作について記す。

経路要求スロットではシンクノードへの有効経路を持たないセンサノードが経路要求を行う可能性があるため、すべてのセンサノードはアクティブとなる。経路応答スロットでは直前の経路要求スロットにおいて経路要求を受け、それに対して経路応答を行うセンサノードと経路要求を行ったセンサノードがアクティブとなり、それ以外のセンサノードはスリープとなる。 $n$  ホップ用のデータスロットにおいては、データを送信する  $n$  ホップのセンサノードと受信する  $n-1$  ホップのセンサノードがアクティブとなり、それ以外のセンサノードはスリープとなる。ただし、ネットワークの末端に位置するセンサノードではデータを中継する必要がないため、データパケットを受信するためのデータスロットにおいてはアクティブにはならない。ネットワークの末端に位置するセンサノードの判別方法については次に記載する。

#### 末端ノードの判別方法

1. 現在の周期から  $k$  周期以内に経路応答パケットを送信した。
2. 現在の周期から  $k$  周期以内に自ノード宛のデータパケットを受信した。

これらのどちらかに当てはまるセンサノードをネットワークの末端ノードと判断する。

また、 $n$  ホップ用の確認応答スロットにおいては、確認応答を送信する  $n-1$  ホップのセンサノードと受信する  $n$  ホップのセンサノードがアクティブとなり、それ以外のセンサノードはスリープとなる。ただし、確認応答パケットはデータパケットをシンクノードが受信した次周期の確認応答スロットを用いて送信されるため、それ以外の周期については使用されない。そのため、各センサノードはデータパケットを送信した次周期以外の確認応答スロットにおいてスリープ状態となる。

## 3.2 経路制御

提案方式では制御パケット数削減のために、制御パケットのフラッディングを必要としない経路制御を導入する。これによりフラッディングを用いた従来法と比較し大幅な制御パケット数の削減が見込める。本稿で提案する経路制御方式では、各センサノードが近隣の上流側（シンクノードに向かう側）のセンサノードと経路情報を交換することにより、当該センサノードからシンクノードへの経路を構築する。また、シンクノードへの経路を有しているセンサノードは下流側（シンクノードから遠ざかる側）のセンサノードに経路を通知することにより、下流側に経路を拡張する。この結果、提案する経路制御方式では、シンクノードを頂点としたツリー型の経路が構築される。

以下に経路制御の詳細について記す。

### 経路制御パケット

提案方式では2種類の経路制御パケットを用いて経路構築を行う。

- 経路要求（RREQ：Route Request）パケット

RREQ パケットは、センサノードがシンクノードまでの有効な経路を持たない場合、近隣センサノードに対して経路要求を行うために用いる制御パケットである。

- 経路応答（RREP：Route Reply）パケット

RREP パケットは、RREQ パケットを受信したセンサノードがシンクノードまでの有効経路を持っている場合に、自身のホップ数を RREQ パケットの送信元センサノードに返信する際に用いる制御パケットである。

### 経路構築手順

提案方式では、有効経路を持たないセンサノードは、近隣のセンサノードに向けて RREQ パケットを経路要求スロットでブロードキャストする。次に RREQ パケットを受信した有効経路を持つ近隣のセンサノードは、RREQ パケットを送信

したセンサノードに対して RREP パケットを経路応答スロットで返信する．RREP パケットを受信したセンサノードは，RREP パケットを返信したセンサノードに対して経路構築を行う．センサノードが複数の RREP パケットを受信した場合，最小のホップ数のものを選択する．また，最小のホップ数の RREP パケットが複数受信された場合は，その中で最も早く受信されたものを選択する．表 3.1 はセンサノードが持つ経路テーブル例である．経路テーブルは目的地のアドレス，目的地までのホップ数，次ホップのアドレス，経路のライフタイム，アクティベーションフラグによって構成される．経路テーブルは RREP パケットを受信する度に更新される．

上記の動作を繰り返し行うことにより，上流ノードから下流ノードへと経路情報を伝搬していくことが可能となる．また，制御パケットのフラッディングを行うことなく経路構築ができるため，制御パケット数の削減が可能となる．

### 経路再構築

提案方式ではデータパケットを送信した後のシンクノードからの確認応答パケットが  $k$  回連続して確認できない場合，その経路を無効とし経路の再構築を行う．経路の再構築は上記の経路構築手順と同様に行う．

表 3.1 経路テーブル

<b>Destination</b>	-
<b>Hop Count</b>	-
<b>Next Hop</b>	-
<b>Life Time</b>	-
<b>Activated</b>	-

### 3.3 動作例

提案方式を用いた場合の経路構築とデータ送信，間欠動作の例について述べる．本例では，図 3.2 のようなセンサノード配置を仮定する．図 3.2 では，センサノードは点線で記載されているセンサノードとのみ通信できるものとする．また，最大ホップ数  $N = 3$  とする．

#### 3.3.1 経路構築

図 3.2 のセンサノード配置の場合の経路構築例を図 3.3 に示す．図 3.3 では，ブロードキャスト packets を細い実線の矢印で記し，ユニキャスト packets を太い実線の矢印で記す．なお，破線で記されている矢印は，宛先センサノードが自センサノードではないが受信可能なユニキャスト packets を示している．

図 3.3 では，起動時は全センサノードが有効経路を持たない一方で，シンクノードは有効経路を持っている．経路要求スロットにおいて，センサノード 1～5 が近隣センサノードに向けて，RREQ packets のブロードキャストを行う．次に有効経路を所持しているシンクノードが，センサノード 1 及び 2 に向けて RREP packets をユニキャストで返信する．なお，センサノード 1～5 も RREQ packets を受信しているが有効な経路を持たないため，RREP packets の返信は行わない．RREP packets を受信したセンサノードは経路テーブルに経路情報を書き込む．1 フレーム間でここまでの動作が実施され，シンクノードから 1 ホップのセンサノードの経路構築が完了する．

次フレームの経路要求スロットでは，経路を持たないセンサノード 3, 4, 5 が RREQ packets を再びブロードキャストする．経路応答スロットにおいて前フレームで経路情報を獲得したセンサノード 1, 2 は，それぞれセンサノード 3 に RREP packets をユニキャストで返信する．センサノード 3 ではセンサノード 1, 2 のホップ数が同一のため，最初に受信したセンサノード 1 の経路をテーブルに書き込む．後続フレームにおいても，同様の動作を行いセンサノード 4 及びセンサノード 5 が経路情報を得る．提案方式ではこのような動作に従いシンクノードに近いセンサノードから順に経路構築を行う．

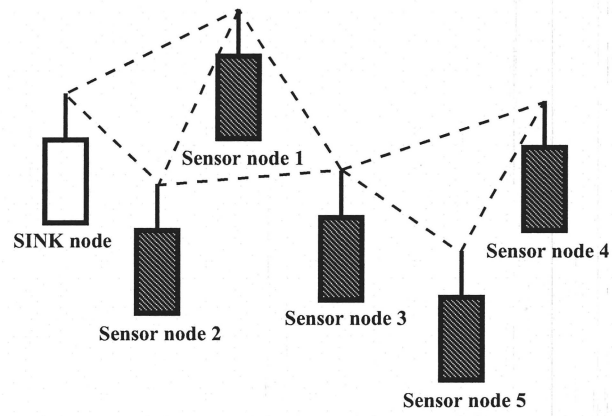


図 3.2 センサノード配置

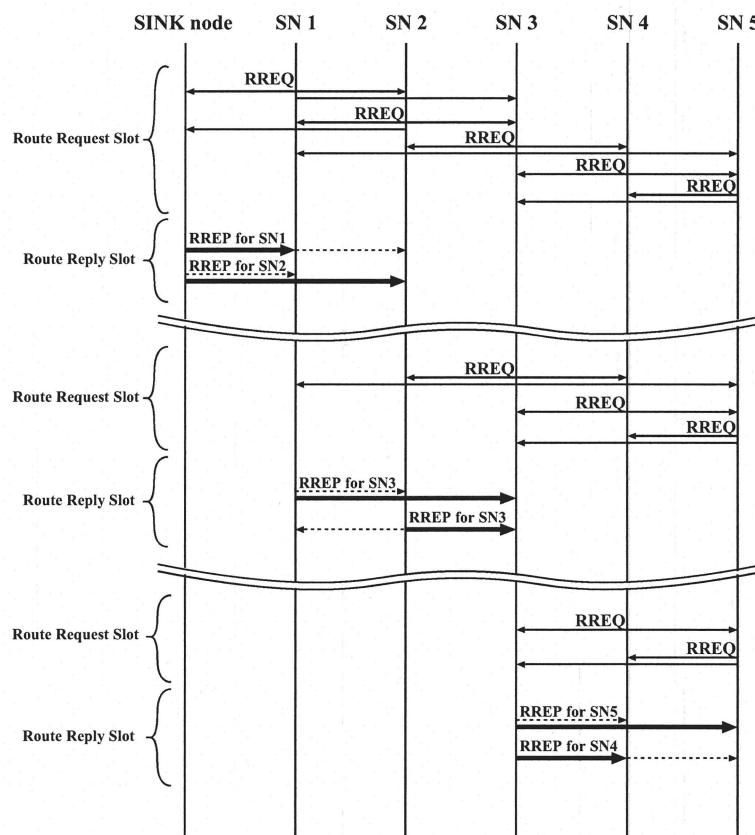


図 3.3 経路構築手順

### 3.3.2 データ及び確認応答送信

図 3.5 に、図 3.2 のセンサノード配置を仮定した場合のデータ送信手順例を示す。図 3.5 では、ユニキャスト packets を太い実線で記し、宛先が自ノードではないが受信可能なユニキャスト packets を破線で記している。また、図 3.4 のような経路構築が行われたとする。

図 3.5 では、3 ホップ用のデータスロットにおいて、センサノード 4, 5 がセンサノード 3 に向けてデータを送信する。次に 2 ホップ用のデータスロットにおいて、センサノード 3 がセンサノード 2 に向けて、自らのデータとセンサノード 4, 5 のデータを送信する。最後に 1 ホップ用のデータスロットにおいて、センサノード 1, 2 がシンクノードにデータを送信する。センサノード 1 は自らのデータとセンサノード 3, 4, 5 のデータを送信する。

次フレームでシンクノードは 1 ホップ用の確認応答スロットにおいて、センサノード 1, 2 に向けて確認応答 packets の送信を行う。なお、シンクノードはセンサノード 1 に対して、センサノード 3, 4, 5 宛の確認応答 packets も送信する。次の 2 ホップ用の確認応答スロットにおいてセンサノード 1 はシンクノードからの確認応答 packets をセンサノード 3 へ転送する。最後に 3 ホップ用の確認応答スロットにおいてセンサノード 3 はセンサノード 4, 5 に確認応答 packets を転送する。上記動作により、各センサノードは自らの送信したデータ packets がシンクノードに到着したことを確認可能となる。なお、確認応答 packets を受信できない場合、次フレームにおいてデータ packets の再送を行う。

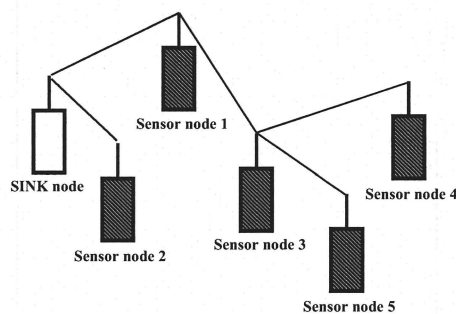


図 3.4 経路例

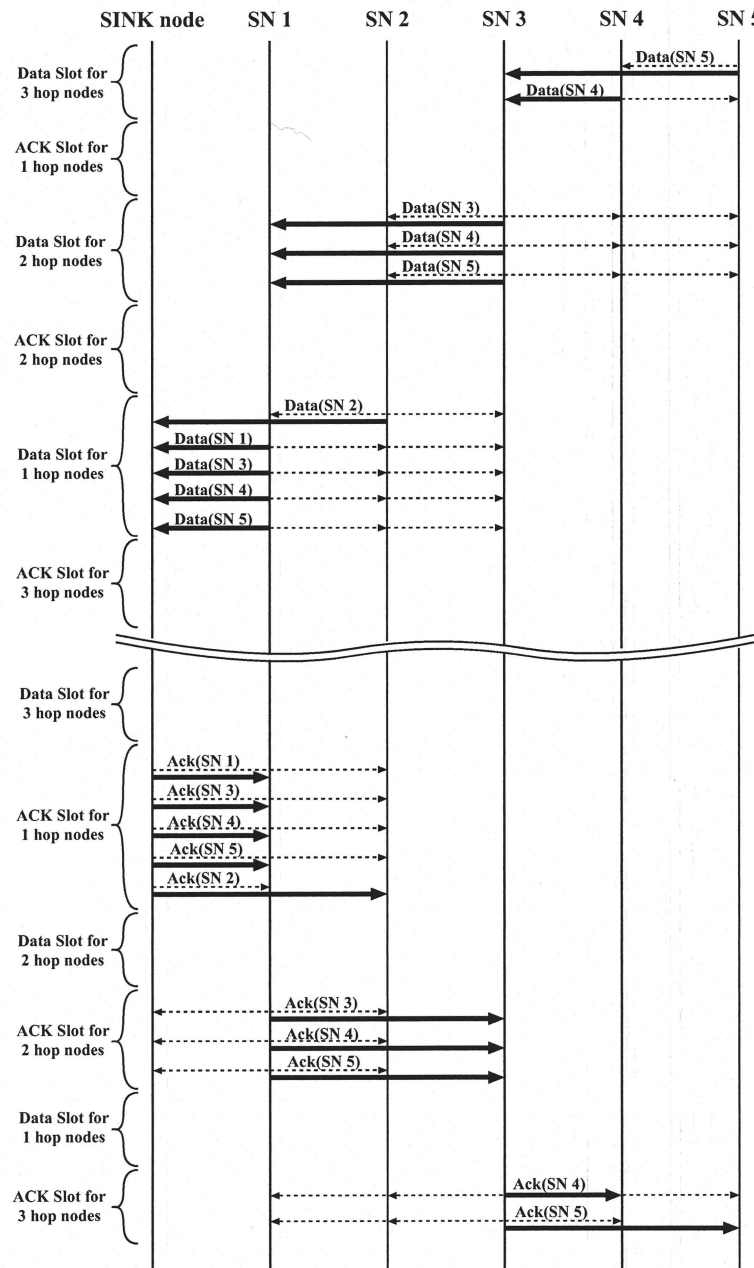


図 3.5 データ及び確認応答送信手順

### 3.3.3 間欠動作

図 3.4 のように経路が構築された場合の間欠動作の例を図 3.6 に示す。まず，すべてのセンサノードは経路要求スロットにおいてアクティブとなる。経路応答スロットでは現在すべてのセンサノードが経路情報を持っているため，直前の経路要求スロットにおいて経路要求は行われず，すべてのセンサノードはスリープとなる。次の 3 ホップ用のデータスロットにおいてはデータパケットを送信するセンサノード 4, 5 と受信するセンサノード 3 がアクティブとなる。次の 1 ホップ用の確認応答スロットにおいては確認応答パケットを受信するセンサノード 1, 2 がアクティブとなる。この際，確認応答パケットを送信するのはシンクノードであるがシンクノードでは一般に電源が確保できることが考えられるため間欠動作は行わない。以降のデータスロット，確認応答スロットにおいても送信側，受信側のセンサノードがアクティブとなり，それ以外のセンサノードはスリープとなるような動作を行う。これにより，図 3.6 のような動作となる。

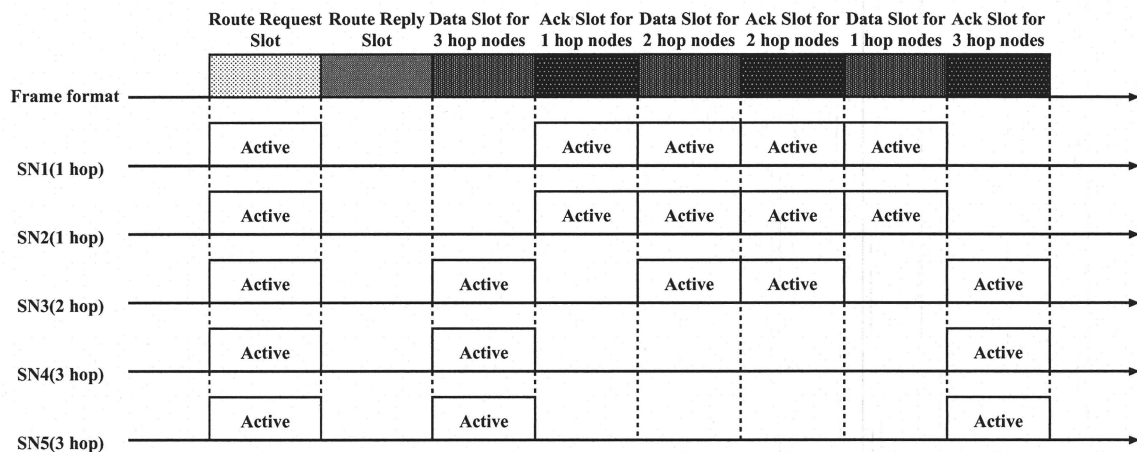


図 3.6 間欠動作例

## 第4章

### 特性評価結果

本章では本研究の特性評価で用いたシミュレーションパラメータおよび，AWGN（白色ガウス雑音）環境とフェージング環境での特性評価，提案法におけるフレームフォーマットの各スロット期間の最適値について記す．

#### 4.1 シミュレーションパラメータ

特性評価で用いたシミュレーションパラメータの設定値を表 4.1 に示す．評価にはネットワークシミュレータ QualNet [52] を用いた．提案法のフレームフォーマットの各スロット期間には通信に必要な時間以上に余裕を持たせて長く設定した．消費電力には表 4.2 に示す Crossbow 社の MICA2 [53] のモデルを用いた．この表からセンサノードの状態（送信，受信，アイドル，スリープ）によって消費電力が決定する．

Simulator	Qualnet
Simulation time	24 [h]
Simulation trial	100 [times]
Field size	1000 × 1000 [m]
Number of nodes	50 - 200 [nodes]
Node placement	uniform
Node mobility	None
Wireless device	IEEE 802.11.b
Transmission rate	2M [bps]
Transmission range	370 [m]
Propagation model	Free space
Data transmission interval	360 [s]
$T_{Frame}$	60 [s]
$T_{Req}$	10 [s]
$T_{Rep}$	10 [s]
$T_{Data}(n)$	2 [s]
$T_{Ack}(n)$	2 [s]
Maximum hops $N$	10 [hop]
Lifetime of route	600 [s]
Energy model	MICAZ(Table 4.2)

表 4.1 シミュレーション諸元

Radio Mode	Power @ 3 [V]
TX(0dBm)	48.0 [mW]
TX(-1dBm)	45.0 [mW]
TX(-3dBm)	42.1 [mW]
TX(-5dBm)	39.1 [mW]
TX(-7dBm)	36.0 [mW]
TX(-10dBm)	32.9 [mW]
TX(-15dBm)	29.8 [mW]
TX(-25dBm)	26.6 [mW]
RX	56.5 [mW]
Idle	2.79 [mW]
Sleep	30 [ $\mu$ W]

表 4.2 MICAZ 電力モデル

## 4.2 AWGN 環境での特性評価

提案方式の有効性を評価するために AWGN 環境で既存方式との比較評価を行った。比較対象の一つは経路制御に AODV [51] を用いたものである。AODV では RREQ パケットのフラッディングにより目的地を探索するが、センサネットワークにおいて目的地はシンクノード一つであるため、この探索は不必要となる。そこで、AODV の RREQ による経路要求を省き、シンクノードからの経路情報のフラッディングによって経路構築を行う方法 (AODV without RREQ) を比較対象として加えた。AODV w/o RREQ では初期の経路構築をシンクノードからの経路情報のフラッディングにより行い、その後の経路修復は既存の AODV と同じ方法で行う。また、比較対象では同時刻にデータパケットが発生した際に頻繁にパケット衝突が起こるため、一定期間 ( $T_{Frame}$ ) の中でランダムな時間にデータパケットが発生するものとした。

図 4.1 は各センサノードが 1 データ送信あたりに用いた経路制御パケット数の平均値である。結果より提案法が他の 2 方式と比較して制御パケット数の大幅な削減が確認できる。既存方式の AODV が経路構築時に制御パケットのフラッディングを行っているため、センサノード数が増えた場合にパケット数が増大する。また、AODV w/o RREQ では経路の初期構築に用いる制御パケットの数は少ないが、経路の信頼性が低いため経路の再構築が必要となり、結果として制御パケット数が多くなった。一方、提案方式では制御パケットを近隣センサノードにのみ送信するため、制御パケットの数を削減することができたと考えられる。

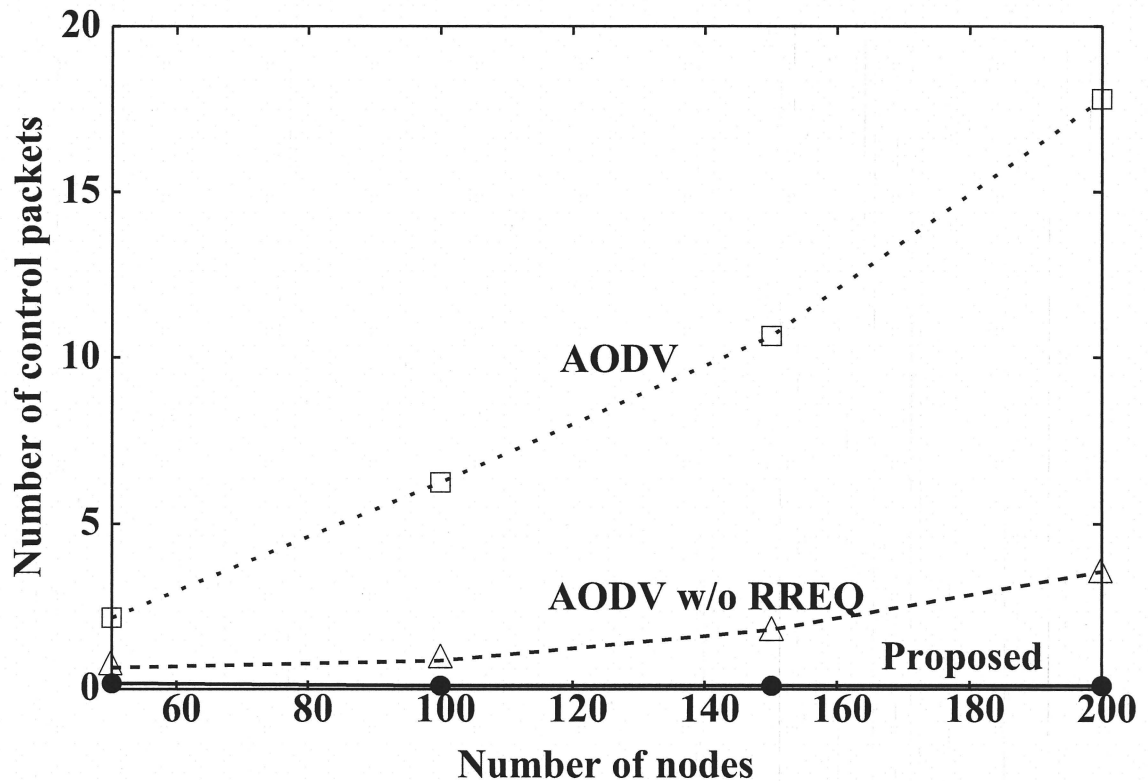


図 4.1 制御パケット数

次に図 4.2 にデータ収集率を示す。データ収集率はシンクノードのデータ受信数をセンサノードのデータ送信数で正規化した値である。AODV および AODV w/o RREQ ではセンサノードが増えるとデータ収集率の減少が見られるが、提案方式ではセンサノード数が増えた場合にも高いデータ収集率を維持していることが確認できる。提案方式ではホップ数による送信時間制御によりパケット衝突数が減少し、データ収集率が向上したと考えられる。

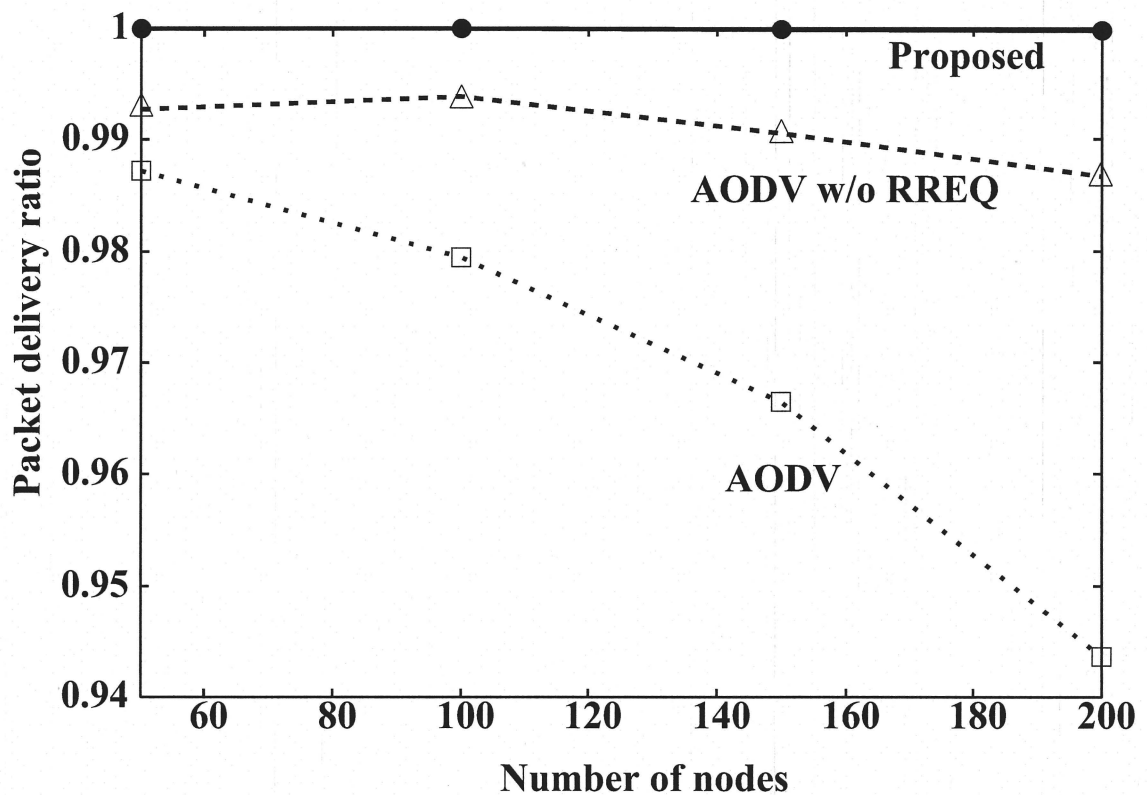


図 4.2 データ収集率

図 4.3 は各センサノードの消費電力の平均値である。結果から、提案法を導入することで消費電力を約 75%削減できることが確認できた。

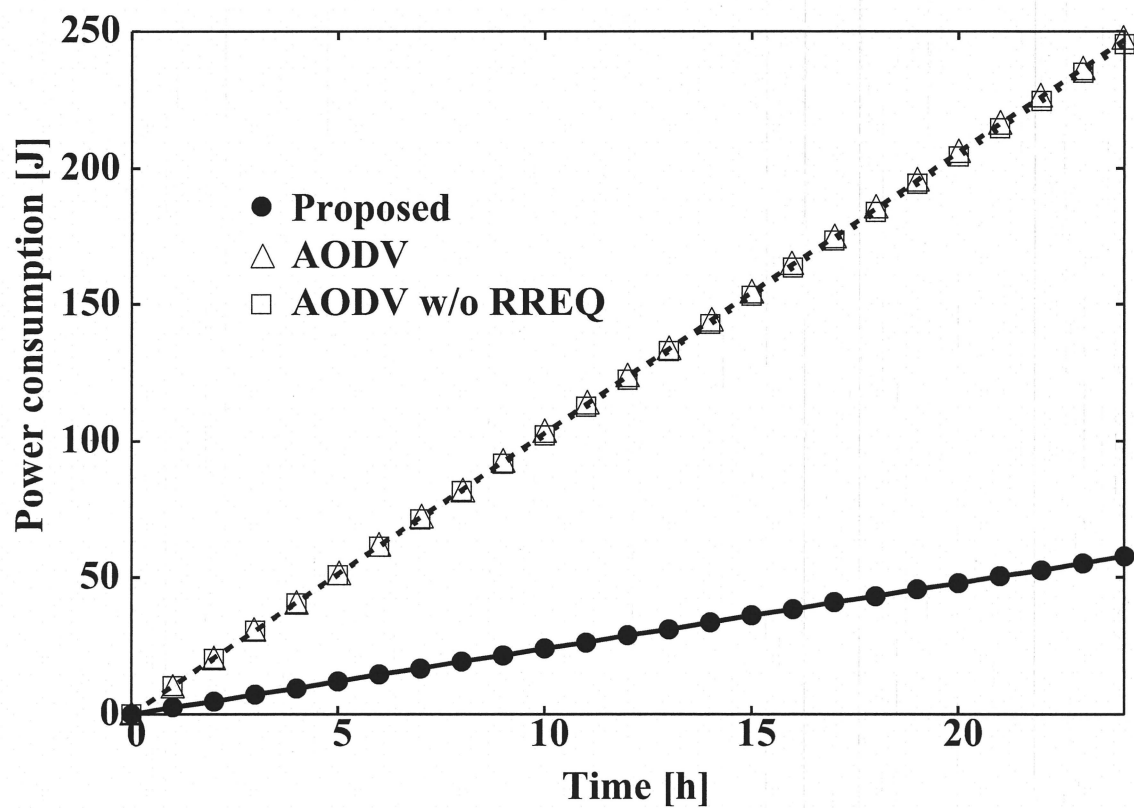


図 4.3 消費電力

### 4.3 フェージング環境での特性評価

提案方式の有効性を評価するために、より実環境に近い状況を想定したフェージング環境で既存方式との比較評価を行った。比較対象には AWGN 環境での特性評価で挙げたものと同様のものを用いた。

図 4.4 に制御パケット数を、図 4.5 にデータ収集率を示す。結果から、フェージング環境下において既存法が大幅に劣化しているのに対して提案法はあまり劣化が見られないことが分かる。これは経路の再構築を行う際に提案法では経路制御パケットの送信期間とデータおよび確認応答パケットの送信期間が分離してあるためスムーズな経路再構築が行えたことによるものと考えられる。

この二つの結果から提案法がフェージング環境においても高い性能があることが確認できる。

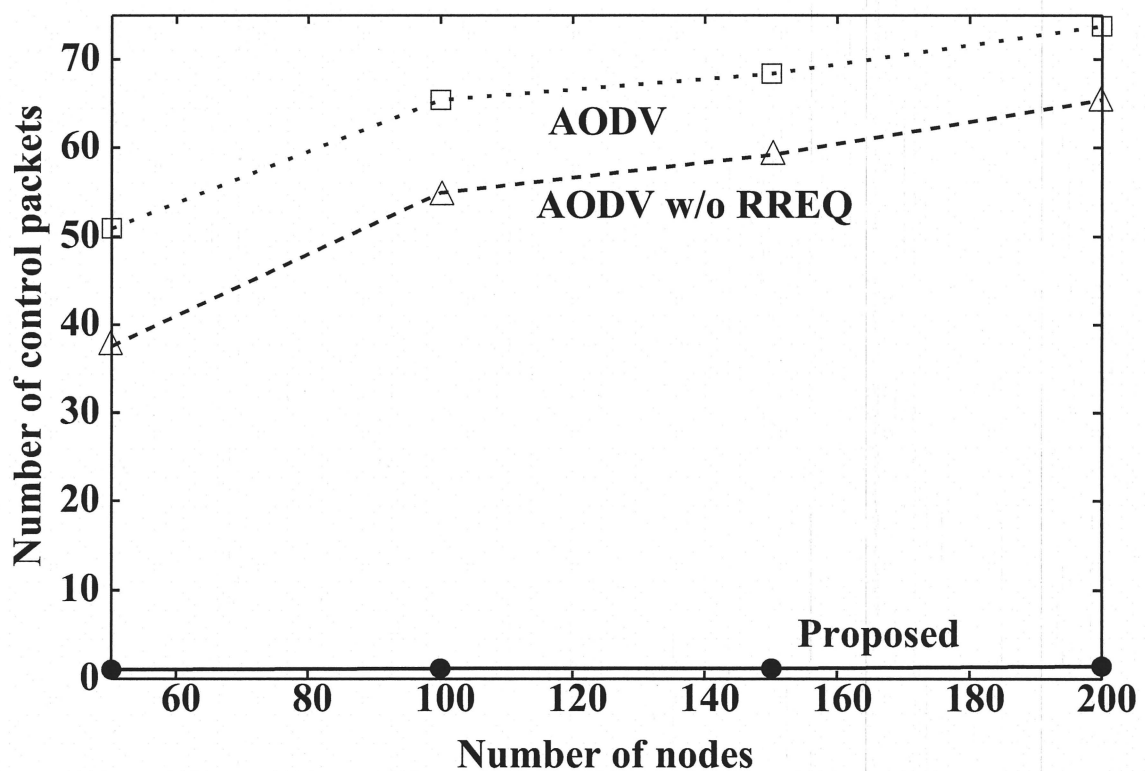


図 4.4 制御パケット数（フェージング環境下）

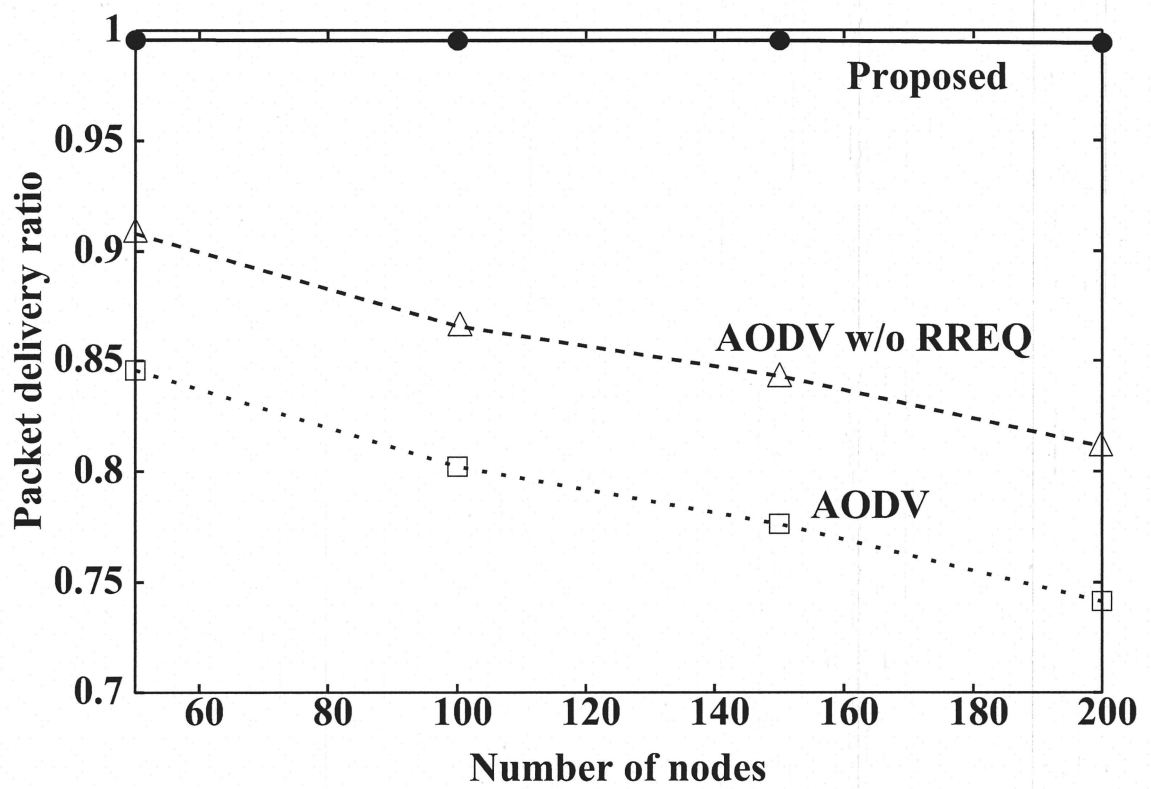


図 4.5 データ収集率（フェージング環境下）

#### 4.4 フレームフォーマットにおける各スロット期間の最適化

これまでの評価ではフレームフォーマットの各スロット期間に通信に必要な時間以上に多くの時間を割り当てていた。そこで、各スロット期間を最適化することで提案法が消費電力をどの程度削減可能であるかを検証する。図4.6に示すようにフレームフォーマット内にアクティブ期間とスリープ期間を設けた。フレーム長  $T_{Frame}$  に占めるアクティブ部分  $T_{Active}$  の割合を小さくすることで省電力化が可能であるが、小さくしすぎた場合には、スロット期間内で通信を完了することが出来なくなる。そのため、スロット期間を最適化する必要がある。

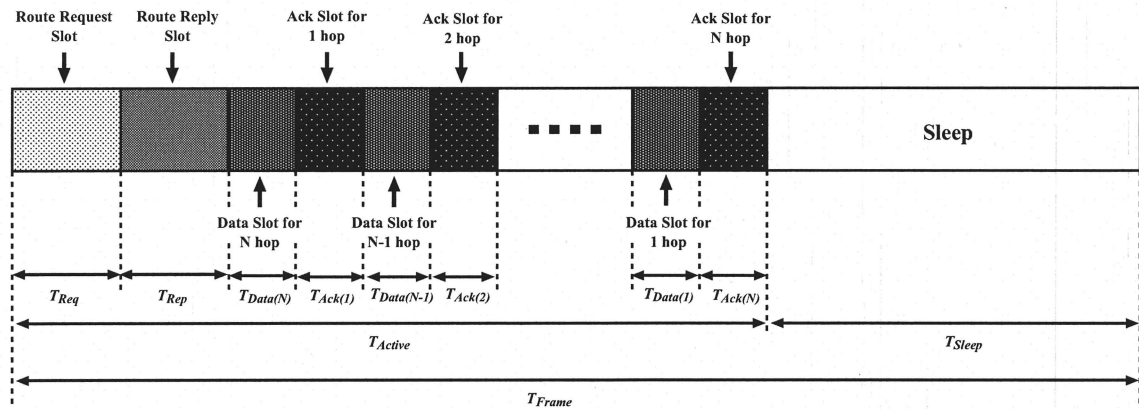


図 4.6 新フレームフォーマット

$T_{Frame}$  を 60[s] で固定し，アクティブ期間内のスロット期間を変化させたときの評価を行った．ただしフレームフォーマットの最大ホップ数  $N$  は 10 とし，各スロット期間は同一の値とした．また，センサノードの数は 50 とした．

図 4.7 に消費電力の変化を示す．結果からスロット期間を減少させていくにつれて，消費電力も減少していくことがわかる．スロット期間が 0.7[s] 以下になるとネットワークのトポロジによっては割り当てられたスロット期間の間に通信が完了しないという問題が発生した．これは提案法ではシンクノードに近いノードは自身のデータパケットの他に多数の下流ノードのデータパケットを転送しなければならないため，割り当てられたスロット期間では通信を終えることが出来ないためである．このことから今回のシミュレーション条件下では各スロット期間が 0.8[s] のときが最適値であると考えられる．

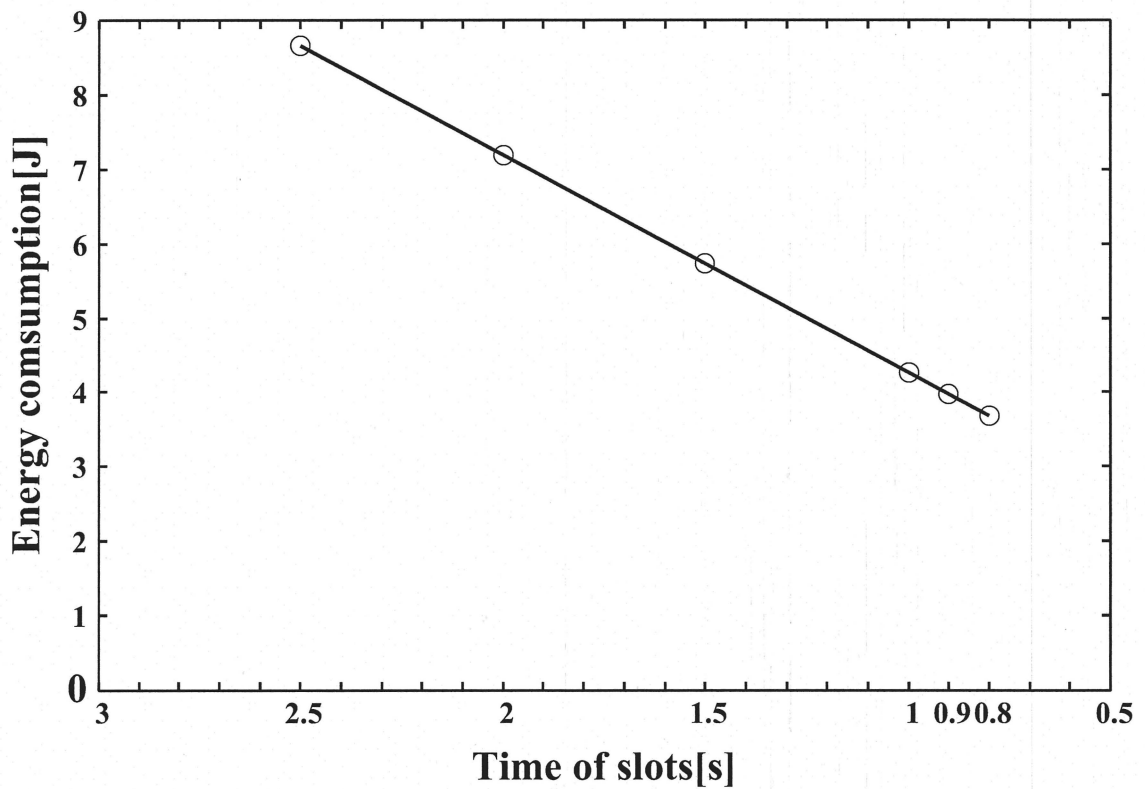


図 4.7 スロット期間の変化による消費電力推移

図 4.8 にパケット到達率について示す. この結果から, 各センサノードが割り当てられた期間内で通信が完了できる場合であれば, 高いパケット到達率となることがわかった. このことから, 提案法のアクセス制御方式はスロット期間を短くした場合においても高い効果を発揮するということが推測できる.

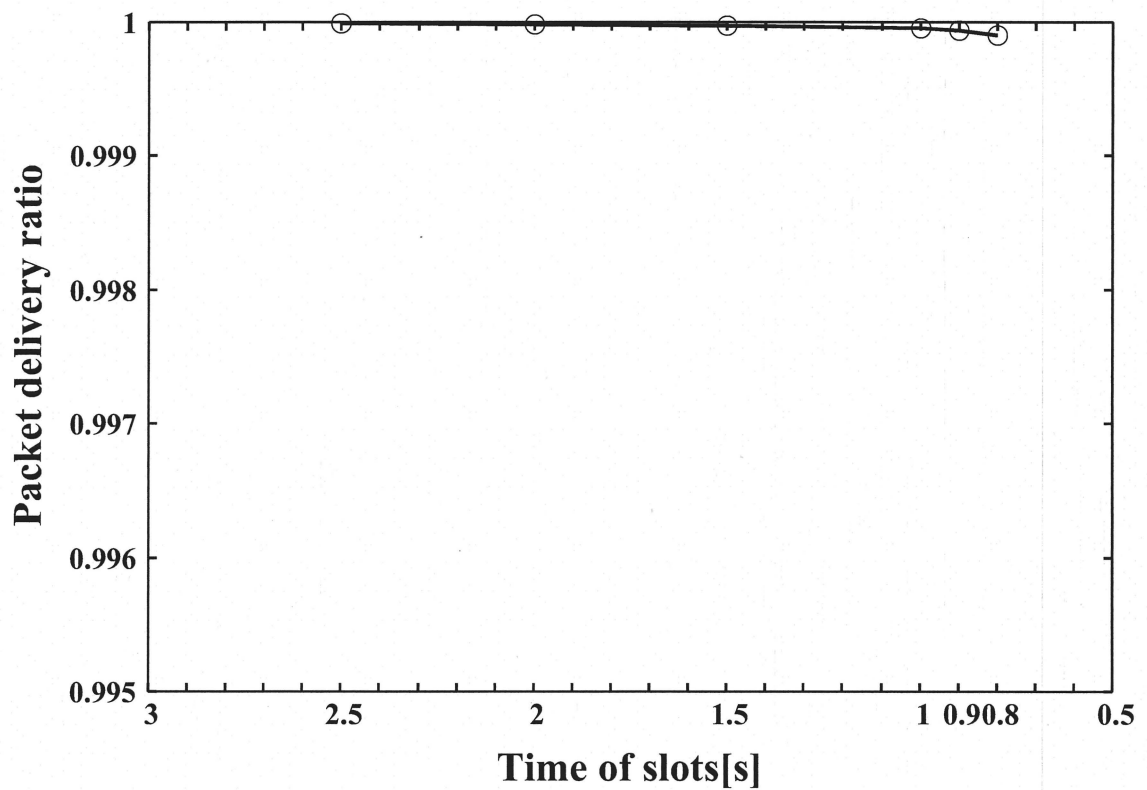


図 4.8 スロット期間変化によるパケット到達率推移

次に提案法の性能を評価するために既存法である S-MAC と比較した。S-MAC の経路制御には AODV w/o RREQ を用いた。S-MAC では SYNC パケットを近隣ノード交換することで局所的な同期を行うが、今回比較対象として用いる S-MAC では全ノードが同期していると仮定し、SYNC パケットの送信による電力消費などは考慮しないものとした。また、アクティブ期間を 0.025[s] で固定とし、サイクル周期を変化させることでスリープ状態となる時間を変化させた。0.025[s] はアクティブ期間として必要な最小期間が経路制御における RREQ パケットのためのランダム遅延の 0.02[s] であるため、少し余裕を持たせて設定した。

図 4.9 は横軸をシミュレーション時間におけるセンサノードの平均スリープ割合、縦軸をパケット到達率としたものである。この結果から S-MAC では提案法と同程度のスリープ期間を設けた場合に、パケットの収集が困難であることがわかる。これは S-MAC ではサイクル周期を長くすることでスリープ期間を増やすことができるが、サイクル周期を長くした場合にデータを送信できる機会が減るため、遅延が大きくなり、その結果ネットワーク内に流れるパケットの数が増えるため特性が劣化するものと考えられる。

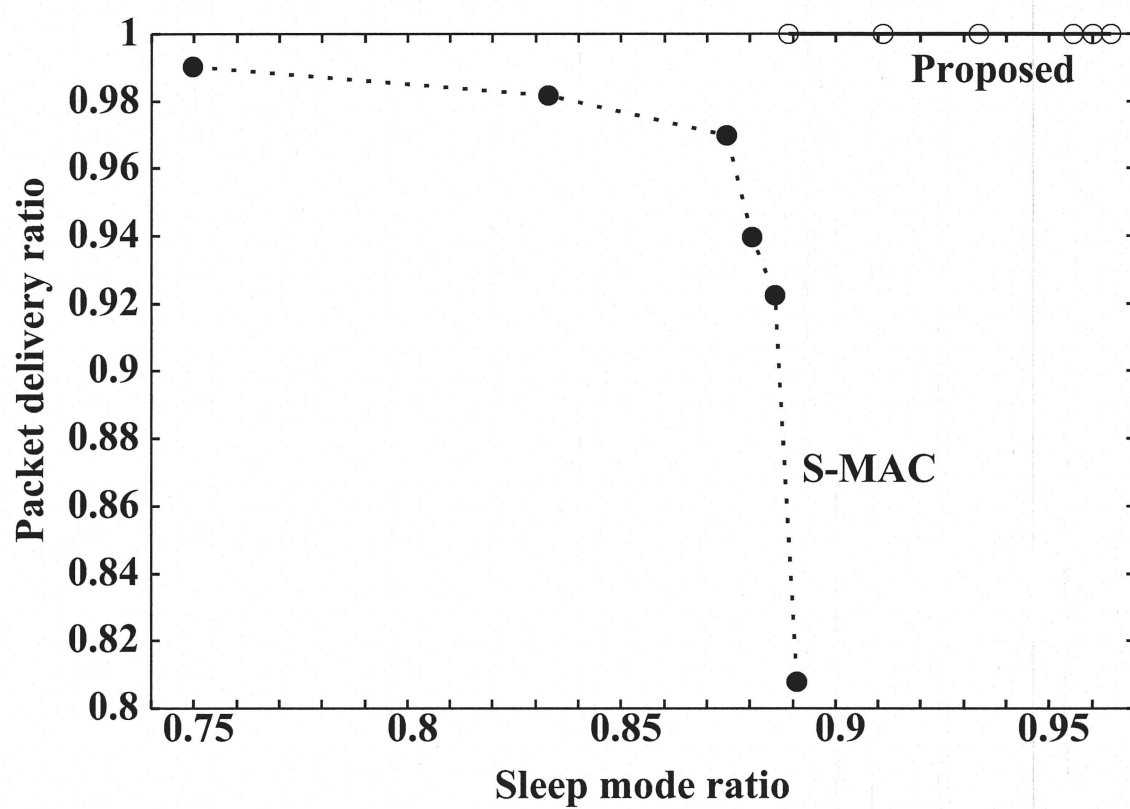


図 4.9 スリープ割合対パケット到達率

図 4.10 は横軸をシミュレーション時間におけるセンサノードの平均スリープ割合、縦軸をデータパケット収集の遅延時間としたものである。結果から S-MAC では前述のように、スリープ割合が増えるにつれて遅延が大きくなっていることがわかる。それに対して提案法ではスリープ割合が大きくなると遅延が小さくなっている。これは、提案法のフレームフォーマットが各スロット期間を短くすることで早いデータ収集が可能となるような構造をしているためである。

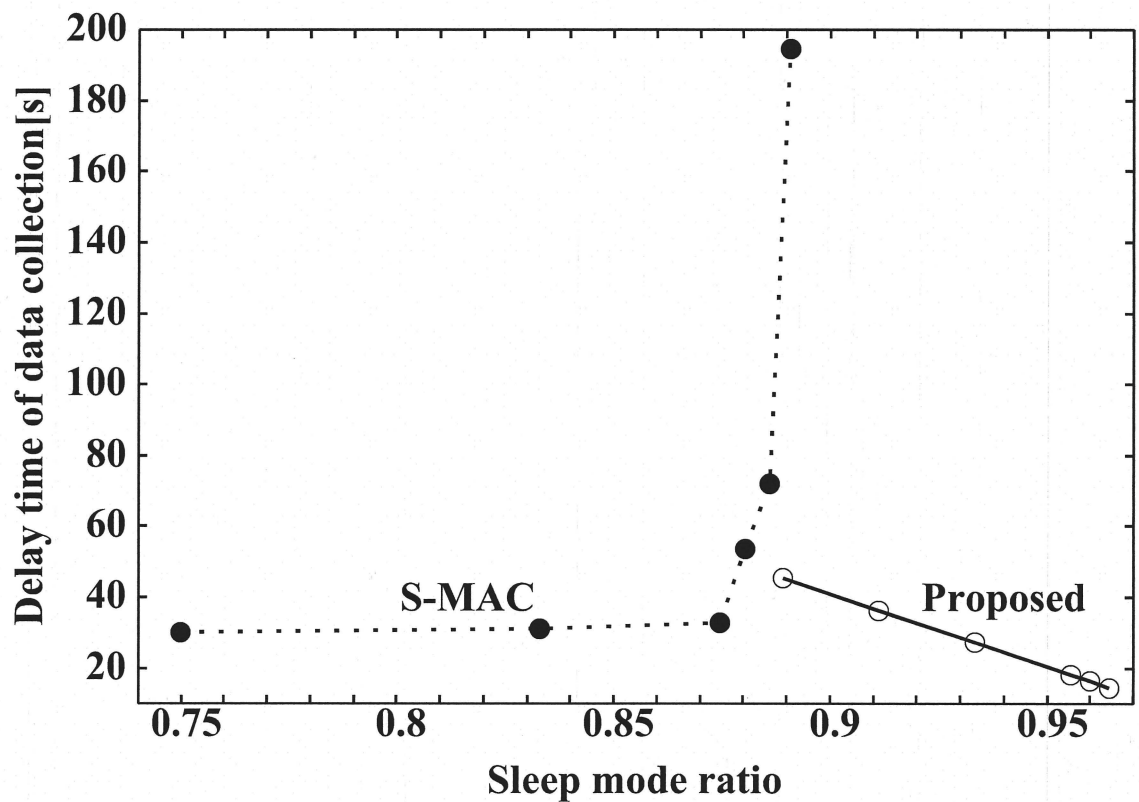


図 4.10 スリープ割合対データ収集遅延

## 第5章

### 結論

#### 5.1 本論文のまとめ

本論文では，センサネットワークの省電力化を目的とした経路制御およびアクセス制御を提案した．提案法における経路制御では既存法の多くで用いられているような制御パケットの「フラッディング」を使用せず，近隣ノードとの制御パケットの交換で経路構築を可能とするような方法を用いた．また，アクセス制御方式では，独自のフレームフォーマット構造を用いてパケットの種類とシンクノードからのホップ数による通信期間制御を行いパケットの衝突回避を可能とした．さらに，このアクセス制御の枠組みを用いて間欠動作を取り入れ，待機時の消費電力削減を可能とした．シミュレーション結果から，提案法を用いることで従来の方式よりも少ない制御パケットで経路構築ができ，また，パケットの衝突回避によって高いパケット到達率を達成できることが確認できた．さらに，フレームフォーマットの各スロットを調整することでスリープ期間を全体の96%程度と高い値にした場合においても非常に高いパケット到達率を保つことができることがわかった．これらの結果から提案法は確実なデータ収集を可能としつつ，高い省電力化性能を提供できるということがいえる．

## 5.2 今後の課題と展望

今回、提案法では時間分割型のアクセス制御を取り入れている．時間を用いた細かな制御を行うためには各センサノードの時間同期がとれていることが前提条件となる．そのため今後は時間同期のための制御を取り入れていく必要がある．また，フレームフォーマットの各パラメータについても検討していく必要があると考えられる．まず，今回のシミュレーションでは最大ホップ数  $N$  には余裕を持たせてネットワークの大きさ以上に大きな値としていたため，実際には用いないスロットも存在していた．この余分なスロットを取り除くことでデータ収集の遅延をさらに小さくすることが可能である．このことからネットワークの最大ホップ数を把握できるような制御も取り入れていく必要がある．さらに，センサネットワークの特性上シンクノード付近のセンサノードの通信量が大きくなることが考えられることから，各ホップ数用のスロット時間を調整することも必要である．特に通信量の大きなシンクノードから 1 ホップや 2 ホップのセンサノード用には長い通信期間を設け，通信量の少ないシンクノードから遠方のセンサノード用には短い通信期間を与えることでさらに省電力化が可能であると考えられる．

## 参考文献

- [1] 総務省, “情報通信白書平成 17 年度版,”.
- [2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “A survey on sensor networks, ” IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 8, pp. 102 – 104, Aug. 2002.
- [3] D. Ganesan, A. Cerpa, W. Ye, Yan Yu, J. Zhao, and D. Estrin, “Networking issues in wireless sensor networks, ” ACM Journal of Parallel and Distributed Computing, vol. 64 , no. 7, pp. 799 – 814, Jul. 2004.
- [4] A. El-Hoiydi, “Spatial TDMA and CSMA with Preamble Sampling for Low Power Ad Hoc Wireless Sensor Networks,” in proc. of ISCC 2002, pp. 685 – 92, Jul. 2002.
- [5] C. C. Enz, A. El-Hoiydi, J-D. Decotignie, and V. Peiris, “WiseNET: An Ultralow-Power Wireless Sensor Network Solution,” IEEE Computer, vol. 37, no. 8, pp. 62 – 70, August. 2004.
- [6] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, “Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks,” IEEE/ACM Trans. Net., vol. 12, no. 3, pp. 493 – 506, Jun. 2004.
- [7] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, “Versatile low power media access for wireless sensor networks, ” in proc. of the second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), pp. 95 – 107, 2004.
- [8] A. El-Hoiydi and J.-D. Decotignie, “WiseMAC: An Ultra Low Power MAC Protocol for the Downlink of Infrastructure Wireless Sensor Networks “ , Ninth IEEE Symposium on Computer Communications, pp. 244 – 251, July. 2004.

- [9] M. Buettner, G. Yee, E. Anderson and R. Han, “X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks”, ACM SenSys, pp.307 – 320, 2006.
- [10] V. Rajendran, K. Obraczka, and J. J. Garcia-LunaAceves, “Energy-efficient collision-free medium access control for wireless sensor networks,” in Proc. of the first international conference on Embedded networked sensor systems SenSys 2003, vol. 12, no. 1, pp. 181 – 192, 2003.
- [11] L. F. W. van Hoesel and P. J. M. Havinga, “A Lightweight Medium Access Protocol for Wireless Sensor Networks,” in INSS, 2004.
- [12] W. B. Heinzelman, A. Pchandrakasan and H. Balakrishnan, “An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks,” IEEE transactions on wireless Communications, vol. 1, no. 4, pp.660 – 670.
- [13] Q. Cao, T. He, L. Fang, T. F. Abdelzaher, J. A. Stankovic, and S. Son, “Efficiency Centric Communication Model for Wireless Sensor Networks,” in Proc. of the IEEE INFOCOM, pp. 1 – 12, 2006.
- [14] J. -H. Chang and L. Tassiulas, “Maximum lifetime routing in wireless sensor networks,” IEEE/ACM Trans. on Networking, vol. 12, no. 4, pp. 609 – 619, Aug. 2004.
- [15] C. -S. Ok, P. Mitra, S. Lee, and S. Kumara, “Distributed Energy Balanced Routing for Wireless Sensor Networks,” Computers & Industrial Engineering, vol. 57, no. 1, pp. 125 – 135, Aug. 2009.
- [16] R. Madan and S. Lall, “Distributed Algorithms for Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks,” IEEE Trans. Wireless Comm., vol. 5, no. 8, pp. 2185 – 2193, Aug. 2006.
- [17] J. Gao and L. Zhang, “Load Balanced Short Path Routing in Wireless Networks,” IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems, special issue on Localized Comm., vol. 17, no. 4, pp. 377 – 388, Apr. 2006.

- [18] G. Yang, J. Zheng, J. Shi, H. Chen, “Energy Balance Hierarchical Data Aggregation Mechanism for Wireless Sensor Network,” WASE International Conference on Information Engineering 2009, vol. 1, pp.310 – 313, 2009.
- [19] 小牧省三, 間瀬憲一, 松江英明, 守倉正博, 無線 LAN とユビキタスネットワーク, 丸善株式会社, February. 2004.
- [20] 伊藤昌毅, 片桐由希子, 石川幹子, 徳田英幸, “Airy Notes: 緑地計画のための無線センサネットワークによる環境モニタリング,” 情報処理学会論文誌, vol. 49, no. 1, pp. 69 – 82, 2008.
- [21] X. Jiang, M. V. Ly, J. Taneja, P. Dutta, and D. Culler, “Experiences with a High-Fidelity Wireless Building Energy Auditing Network,” in Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM, 2009, pp. 113 – 126, 2009.
- [22] Y. Kim, T. Schmid, Z. M. Charbiwala, J. Friedman, and M. B. Srivastava, ”NAWMS: Nonintrusive Autonomous Water Monitoring System,” in ACM SenSys, 2008.
- [23] 万博アメダス, [http://www.nec.co.jp/effort/ubiquitous/2005\\_0819/](http://www.nec.co.jp/effort/ubiquitous/2005_0819/)
- [24] S. Brennan, A. Mielke, and D. Torney, “Radiation detection with distributed sensor networks,” IEEE Computer Magazine, vol. 37, pp.57 – 59. Jan. 2004.
- [25] M. Suzuki, S. Saruwatari, N. Kurata, H. Morkawa, “A high-density earthquake monitoring system using wireless sensor networks ”, in Proc. of the 5th international conference on embedded networked sensor systems, pp. 373 – 374. ACM, 2007.
- [26] L. Yu, N. Wang, X. Meng, “Real-time forest fire detection with wireless sensor networks,” International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2005, vol.2, pp. 1214 – 1217, Sept. 2005.
- [27] Home Security System, <http://www.obias.co.jp/>
- [28] V. Ekanayake, C. Kelly, and R. Manohar, “An Ultra Low-Power Processor for Sensor Networks,” in Proc. of the ASPLOS, Oct. 2004.

- [29] T. Umeda, H. Yoshida, S. Sekine, T. Suzuki and S. Otaka, "A 950-MHz rectifier circuit for sensor network tags with 10-m distance," *IEEE J. Solid - State Circuits* 41 (2006), pp. 35 – 41, 2006.
- [30] 松田 隆志 , 太田 敏史 , 門 洋一 , 張 兵, "同一周波数で給電と通信を行う二次元通信センサネットワークシステム," 電子情報通信学会技術研究報告. USN, ユビキタス・センサネットワーク vol.110, no. 378, pp. 49 – 52, 2011.
- [31] N. Bulusu, J. Heidemann, D. Estrin, "GPS-less Low Cost Outdoor Localization for Very Small Devices," *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 7, no. 5, pp. 28 – 34, Oct. 2000.
- [32] A. Savvides, C. C. Han, and M. B. Srivastava, "Dynamic fine grained localization in ad-hoc networks of sensors," in *Proc. of the 5th International Conference on Mobile Computing and Networking, Mobicom 2001*, pp. 166 – 179, Rome, Italy, July. 2001.
- [33] A. Savvides, H. Park, and M. B. Srivastava, "The Bits and Flops of the N-hop Multilateration Primitive For Node Localization Problems, " in *Proc. of the ACM Int. Workshop Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA)*, Atlanta, GA, 2002, pp. 112 – 121, Sep. 2002.
- [34] J. Elson, L. Girod and D. Estrin, "Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts," in *Proc. of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI '02)*, pp. 147 – 163, 2002.
- [35] S. Ganeriwal, R. Kumar and M. B. Srivastava, "Timing- sync Protocol for Sensor Networks," in *Proc. of the First International Conference on Embedded Network Sensor Systems 2003*, ACM Press, pp. 138 – 149, 2003.
- [36] M. Maroti, B. Kusy, G. Simon and A. Ledeczi, "The Flooding Time Synchronization Protocol," in *Proc. of the Second International Conference on Embedded Networked Sensor Systems 2004*, ACM Press, pp. 39 – 49, Nov. 2004.
- [37] J. Zhao, R. Govindan and D. Estrin, "Computing aggregates for monitoring wireless

- sensor networks,” in Proc. of the 1st IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, pp.139 – 148, 2003.
- [38] I. Solis and K. Obraczka, “The Impact of Timing in Data Aggregation for Sensor Networks,” in IEEE ICC 2004, vol. 6, pp. 3640 – 3645, Paris, France, Jun. 2004.
  - [39] S. Madden, M. J. Franklin, J. M. Hellerstein, and W. Hong, “TAG: a Tiny Aggregation Service for Ad Hoc Sensors Networks,” in Proc. of Annual Symposium on Operating System Design and Implementation (OSDI), USA, pp. 1312 – 1462, 2002.
  - [40] 鏡 慎吾, 石川正俊, ”センサフュージョン – センサネットワークの情報処理構造 –,” 電子情報通信学会論文誌 A, vol. J88-A, no. 12, pp. 1404 – 1412, 2005.
  - [41] R. Yaday, S. Varma, and N. Malaviya, “ A Survey of MAC Protocols for Wireless Sensor Networks,” UbiCC journal, vol. 4, no. 3, Aug. 2009.
  - [42] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, “ Routing Techniques in Sensor Networks: A survey,” IEEE communications, vol. 11, no. 6, pp. 6 – 28, Dec. 2004.
  - [43] W. Heinzelman, J. Kulik and H. Balakrishnan, “ Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks,” in Proc. of the International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom ’ 99), pp. 174 – 185, 1999.
  - [44] F. Silva, J. Heidemann, R. Govindan, and D. Estrin, “Directed diffusion,” in Proc. of the 6th annual international conference on mobile computing and networking ACM New York, NY, USA, pp. 56 – 67, 2000.
  - [45] D. Braginsky and D. Estrin, “Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks,” in Proc. of the First Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA), Atlanta, USA, 2002, pp. 22 – 31, 2002.
  - [46] O. Younis and S. Fahmy, “Distributed clustering in ad-hoc sensor networks:A Hybrid, Energy-efficient Approach,” IEEE Transaction on Mobile Computing, vol. 3, no. 4, pp. 366 – 379, 2004.

- [47] S. Lindsey, C. Raghavendra and K. Sivalingam, "Data Gathering Algorithms in Sensor Networks using Energy Metrics," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 13, no. 9, pp. 924 – 935, 2002.
- [48] B. Karp, "Geographic routing for wireless networks," in Ph.D. Dissertation, Harvard University, Cambridge, MA, Oct. 2000.
- [49] B. Karp and H. T. Kung, "GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks," in Proc. ACM Mobicom'00, pp. 243 – 254, Boston, MA, Aug. 2000.
- [50] Y. Xu, J. Heidemann, and D. Estrin, "Geography-informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing," in Proc. of the Seventh Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), Rome, Italy, July, 2001, pp. 70 – 84, 2001.
- [51] C. E. Perkins, E. M. Belding-Royer, and S. Das, "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," IETF RFC 3561, Jul. 2003.
- [52] Network Simulator Qualnet, <http://www.scalable-networks.com/>
- [53] Crossbow Technology, Inc. MICAz ZigBee Series (MPR2400), <http://bullseye.xbow.com:81/Products/productdetails.aspx?sid=164>.

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、多忙な時間を割いてご指導ならびに御助言を下さった小林英雄教授、森香津夫教授、内藤克浩助教に深く感謝いたします。また、研究室の設備などでご協力くださった山本好弘技術職員、ならびに通信工学講座学生諸氏に深く感謝いたします。

## 研究業績

- 新家 晃, 内藤 克浩, 森 香津夫, 小林 英雄, “センサネットワークのための経路制御法の検討”, 平成 21 年度電子情報通信学会東海支部卒業研究発表会, OA3-3 2010 年 3 月.
- Akira Niinomi, Katsuhiko Naito, Kazuo Mori, Hideo Kobayashi, “Simple Tree Based Routing for Data Collection Networks”, in Proc. of International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing 2010, Nov. 4-6, 2010.
- 新家 晃, 内藤 克浩, 森 香津夫, 小林 英雄, “衝突回避を目的としたセンサネットワーク用経路制御及びアクセス制御手法情報処理学会”, モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会, 2011 年 3 月.
- 新家 晃, 内藤 克浩, 森 香津夫, 小林 英雄, “センサネットワークにおける省電力化のための経路制御およびアクセス制御手法”, 平成 23 年度電気関係学会東海支部連合大会, B2-5 2011 年 9 月.
- 新家 晃, 内藤 克浩, 森 香津夫, 小林 英雄, “センサネットワークにおける省電力化のための経路制御およびアクセス制御手法”, 電子情報通信学会技術研究報告 ユビキタス・センサネットワーク研究会, 2012 年 1 月.