

修 士 論 文

バッテリーレス無線センサネットワークにおける データ収集プロトコル

Directional Flooding for Data Collection
on Batteryless Wireless Sensor Networks

指導教官 森川 博之 教授



東京大学大学院工学系研究科
電気系工学専攻

氏 名 37-086543 デラジャト エコ リアント

提 出 日 平成 22 年 2 月 9 日

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	2
1.2	本論文の構成	5
第 2 章	バッテリーレス無線センサネットワーク	6
2.1	はじめに	7
2.2	バッテリーレス無線センサネットワークの必要性及び制約	7
2.3	関連研究	8
2.3.1	Solar Biscuit	8
2.3.2	Simple Data Dissemination Protocol (SDDP)	11
2.3.3	フラッディングの効率化	15
2.4	おわりに	16
第 3 章	Directional Flooding for Data Collection (DFDC)	17
3.1	はじめに	18
3.2	動作の概要	18
3.3	動作の詳細	21
3.4	おわりに	23
第 4 章	評価	24
4.1	はじめに	25
4.2	シミュレーション評価	25
4.2.1	シミュレーションシナリオ	25
4.2.2	既存プロトコルとの比較	27
4.2.3	センサノードの配置がランダムの場合	32
4.2.4	センサノードに障害が生じる場合	33

4.2.4.1	障害が生じるセンサノードがトポロジーの中央に存在する場合	33
4.2.4.2	障害が生じるセンサノードがランダムである場合	35
4.2.5	電力の状態が変化する場合	37
4.2.6	シンクノードの配置が中央にある場合	38
4.2.7	シンクノードが複数ある場合	39
4.2.7.1	シンクノード数が4つ(隅4つ)ある場合	39
4.2.7.2	シンクノード数が5つ(隅4つ, 中央1つ)ある場合	40
4.3	実装評価	41
4.3.1	省資源性の評価	41
4.3.2	実環境での評価	42
4.4	おわりに	47
第5章	結論	48
5.1	本研究の主たる成果	49
5.2	今後の課題	50
	謝辞	51
	参考文献	53
	発表文献	56

目次

1.1	無線センサネットワークの適用先の例	3
2.1	バッテリーレス無線センサノードのプロトタイプ Solar Biscuit	8
2.2	Solar Biscuit のハードウェア構成	9
2.3	充電時間に対する電気二重層キャパシタの電圧	11
2.4	SDDP (Simple Data Dissemination Protocol)	12
2.5	迂回路	13
2.6	小刻み経路	14
3.1	迂回路に対する操作	19
3.2	小刻み経路に対する操作	20
3.3	DFDC : 動作フロー	21
3.4	DFDC : 受信時の動作フロー	22
4.1	センサノードの配置	27
4.2	DFDC と既存プロトコルとの比較	28
4.3	シンクノードからの距離に応じた DFDC と SDDP との比較 ($M = 50$)	28
4.4	シンクノードからの距離に応じた DFDC と SDDP との比較 ($M = 60$)	29
4.5	シンクノードからの距離に応じた DFDC と SDDP との比較 ($M = 70$)	29
4.6	シンクノードからの距離に応じた DFDC と SDDP との比較 ($M = 80$)	30
4.7	シンクノードからの距離に応じた DFDC と SDDP との比較 ($M = 90$)	30
4.8	シンクノードからの距離に応じた DFDC と SDDP との比較 ($M = 100$)	31
4.9	センサノードの配置がランダムの場合の収集率	32
4.10	障害が生じるセンサノードが中央である場合の収集率 (DFDC)	33
4.11	障害が生じるセンサノードが中央である場合の収集率 (SDDP)	34

4.12	障害が生じるセンサノード中央である場合の収集率 ($M = 40$, DFDC と SDDP の比較)	34
4.13	障害が生じるセンサノードがランダムである場合の収集率 (DFDC) . .	35
4.14	障害が生じるセンサノードがランダムである場合の収集率 (SDDP) . .	36
4.15	障害が生じるセンサノードがランダムである場合の収集率 ($M = 40$, DFDC と SDDP の比較)	36
4.16	電力の状態が変化する場合の収集率	37
4.17	シンクノードの配置が中央にある場合の収集率	38
4.18	シンクノード数が 4 つある場合の収集率	39
4.19	シンクノード数が 5 つある場合の収集率	40
4.20	PAVENET モジュール	41
4.21	PIC18F4620	42
4.22	センサノードの配置	43
4.23	センサノードの最も安定した通信範囲	44
4.24	実験の様子	44
4.25	実験結果 ($D = 20cm, 40cm, 60cm$)	45
4.26	実験結果 ($D = 10cm, 30cm, 50cm$)	46
4.27	実験結果とシミュレーション結果との比較 ($D = 50cm$)	46

■ 表目次

2.1	センサノードの状態別消費電流	10
2.2	スリープ時の消費電流の内訳	10
2.3	電気二重層キャパシタの平均充電電流	10
4.1	シミュレーションパラメータ	26
4.2	DFDC と SDDP が利用したメモリの容量	41
4.3	実験パラメータ	43

第 1 章

序論

1.1 研究背景

無線センサネットワークは戦闘地域での敵の規模や位置などの監視といった軍事目的に端を発し、近年では人の行動や屋外・屋内の環境の状況を把握し、その場のユーザニーズに即した情報提示やサービス提供を目的とした研究が多くなされている（図 1.1）。例として環境モニタリングや、侵入者の発見などのホームセキュリティが挙げられる。分散的に様々な環境に配置される無線センサノードは、電力資源として 1 次電池を用いることが一般的である。1 次電池は電力が限られるため、センサノード間の無線通信を行なうのに必要とする消費電力をいかに削減するかが重要な課題である [1]。そのため、MAC プロトコルやルーティングプロトコルを中心とした省電力通信プロトコルの研究がされてきた [2, 3, 4]。

しかしながら、電池を使用している限り最終的にはセンサノードは動作不能となる。電池交換のコストや環境への負荷を考えると、屋外のアプリケーションでは電池をセンサノードに具備することは現実的ではない。そこで、バッテリーレスで環境から得たエネルギーで直接センサノードを動かす方法が考えられる。バッテリーレス無線センサネットワークの適用先は、農場における農作物への日照状況の測定や土壌の水分含有量の測定、森林のエコシステムの状態の臨界指標として用いられる林冠閉鎖率の測定といった、絶対的な確実性を必要とせず、時間的制約の穏やかなアプリケーションを想定している。バッテリーレス無線センサノードは環境からのエネルギーがある限り永続的に動作できる反面、電力資源が設置した環境に依存し、必ずしも電力が安定しているとは限らないという制約がある。そのため、いつでも通信できるという前提を持つ既存の通信プロトコル [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] をそのまま適用することが困難となる。このようなバッテリーレス無線センサネットワークのリンクの不安定さに対し、文献 [9] では、バッテリーレス無線センサネットワーク向けのデータ収集プロトコルとして「SDDP (Simple Data Dissemination Protocol)」を提案している。SDDP はセンサデータをネットワーク全体にフラッディングすることによって、リンクが不安定でも確率的にシンクノードに配送することができる。ここで SDDP は標準的に使用されているフラッディングプロトコルと異なり、既に受信したことがあるパケットに対して送受信の重複を許容する。センサデータの送受信を冗長に行うことで、標準のフラッディングプロトコルに比べて、ネットワーク全体に伝播されるパケットが多くなり、シンクノードにセンサデータを配送する確率が高くなる。

しかしながら、SDDP では、シンクノードからの距離が遠いセンサノードからのセンサデータが冗長な経路で配送されることによるデータ収集の非効率性が問題になる。冗長

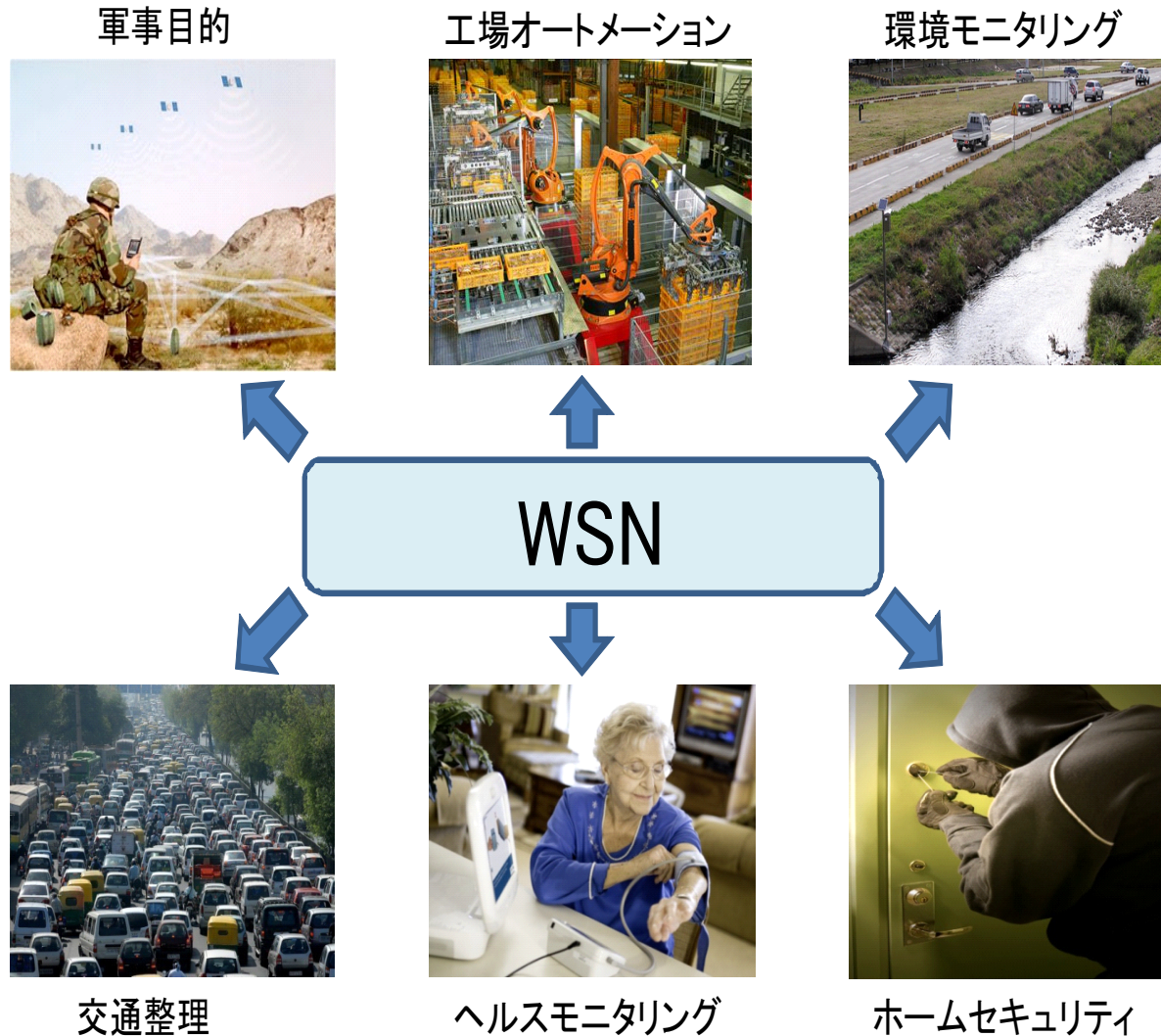


図 1.1 無線センサネットワークの適用先の例

な経路は，迂回路と小刻み経路に分類できる．迂回路は，センシングを行なったセンサノードとシンクノードを結んだ最短距離から離れたセンサノードがパケットを中継することで発生する冗長な経路である．小刻み経路は，送信元のセンサノードの至近距離にあるセンサノードがブロードキャストされたパケットを中継することによって発生する，距離が短いホップの連続で構成される冗長な経路である．このような SDDP の問題に対し，本論文では，あらかじめセンサノードに設定された位置情報を用いてデータの送信方向を指定可能なフラッディングを利用することで効率的なデータ収集を行なう「DFDC (Directional Flooding for Data Collection)」を示す．位置情報を取得する方法として

は、GPS を具備したユーザやロボットがセンサノードを実環境に配置する前に位置情報を取得し、得られた位置情報をセンサノードに書き込むことや、事前に各センサノードをどこに配置したいかを計画し、配置したい場所の位置情報をセンサノードに書き込むことを想定している。

DFDC では SDDP における冗長な経路の問題に対し、以下の 3 つの操作を追加することで効率的なデータ収集を実現する。1 つ目は、迂回路に対する操作である。各センサノードはパケットが迂回していると判断した場合にパケットを破棄する処理を行なう。迂回路の判定では、パケットに含まれる送信元のセンサノードの位置情報を用いて送信元のセンサノードからシンクノードまでの距離を算出し、算出した距離と自センサノードからシンクノードまでの距離を比較して算出した距離の方が小さい場合を迂回路とする。

2 つ目は、小刻み経路に対する操作である。それぞれのセンサノードで近くにあるセンサノードからのパケットを破棄する処理を行なう。まず、パケットを受信した際、パケットに含まれる送信元のセンサノードの位置情報を用いて送信元のセンサノードと自センサノードの距離を算出する。算出した距離とあらかじめ設定した閾値を比較し、算出した距離が閾値より大きければセンサデータをバッファに保存し、小さければパケットを破棄する。

3 つ目の操作は長い経路を経たと想定されるパケットを破棄する処理である。各センサノードは自分のセンシングしたセンサデータをフラッディングする直前に、パケットに対して、シンクノードへの距離に応じてライフタイムを設定する。シンクノードから近いセンサノードは値が小さいライフタイムを、シンクノードから遠いセンサノードは値が大きいライフタイムを設定する。各センサノードはパケットのライフタイムを監視し、ライフタイムが切れたパケットをバッファから破棄する。DFDC の評価方法として、DFDC を PAVENET[10] モジュールとシミュレータ上に実装し、SDDP との性能を比較した。シミュレーション評価では、DFDC は SDDP より最大 4 倍の効率でデータを収集できることが示された。実装評価では、実験とシミュレーションの結果は共に DFDC の方が SDDP よりも高いデータ収集率が得られた。

1.2 本論文の構成

本論文は，以下の各章によって構成される．

第 1 章 序論

第 2 章 バッテリレス無線センサネットワーク

第 3 章 Directional Flooding for Data Collection (DFDC)

第 4 章 評価

第 5 章 結論

第 2 章では，バッテリレス無線センサネットワークの必要性及び制約について述べた後，既存のバッテリレス無線センサネットワーク向けのデータ収集プロトコル「Simple Data Dissemination Protocol (SDDP)」及びその問題点について述べる．

第 3 章では，第 2 章で述べた SDDP の問題を解決できる，位置情報を利用したバッテリレス無線センサネットワーク向けのデータ収集プロトコル「Directional Flooding for Data Collection (DFDC)」を提案する．次いで，DFDC の動作の概要および動作の詳細を示す．

第 4 章では，第 3 章で提案した DFDC の性能評価を示す．DFDC の評価方法として，シミュレーションおよび実装によって行なう．

最後に，第 5 章で本研究の成果についてまとめ，今後の展望を記す．

第 2 章

バッテリーレス無線センサ ネットワーク

2.1 はじめに

本章では，バッテリレス無線センサネットワークの必要性について述べ，電源の制約が通信プロトコルにどのような影響を与えるかを議論する．その後，関連研究およびその問題点について述べる．

2.2 バッテリレス無線センサネットワークの必要性及び制約

無線センサネットワークでは，センサノードがバッテリで駆動することは一般的であるが，バッテリの電力が限られたため，最終的にはセンサノードが動作不能となる．環境モニタリングアプリケーションのような電源の供給が困難である屋外で用いる場合には，バッテリで駆動する数多くのセンサノードが使用されると想定されるため，動作不能となったセンサノードの回収やバッテリの交換といったメンテナンスを行なうためのコストを考慮しなければならない．ネットワークの規模が大きければ大きいほど必要なコストが大きくなる．このように環境モニタリングにおいては最終的に使用不能となるバッテリをセンサノードに具備することは現実的ではない．

そこで，環境からエネルギーを得るデバイスをセンサノードに具備し，バッテリレスでセンサノードを動かす手法が考えられる．環境からエネルギーを得る技術として，太陽電池，温度差による発電素子，振動エネルギーによる発電などが既に存在する [11, 12, 13]．バッテリレス無線センサノードは環境からのエネルギーがある限り永続的に動作できる反面，電力資源が設置した環境に依存し，1 次バッテリと異なり電力が必ずしも安定しているとは限らないという制約がある．例えば，太陽からエネルギーを得る太陽電池を用いた場合は，日照状況によって電力の供給量が変化し，振動からエネルギーを得るデバイスを用いた場合には，振動源の動作によって電力の供給量が変化する．

このようにバッテリレス無線センサネットワークでは，電力が不安定であるため，いつでも通信できるという前提を持つ既存の省電力の MAC プロトコル及びルーティングプロトコル [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] をバッテリレス無線センサネットワークへ適用することが困難となり，時間的にばらつきのある間欠通信で動作させる通信プロトコルが必要となる．

2.3 関連研究

2.2 節で述べたバッテリレス無線センサネットワークの必要性および制約に対し，これまでの研究は，太陽電池を具備したバッテリレス無線センサノードのプロトタイプ「Solar Biscuit」[14] と，Solar Biscuit 上で動作する非階層的なデータ収集プロトコル「Simple Data Dissemination Protocol (SDDP)」[9] の実装と評価を行なった．本節では，Solar Biscuit および SDDP について簡単に説明する．

2.3.1 Solar Biscuit

図 2.1 に Solar Biscuit の外観を，図 2.2 に Solar Biscuit のハードウェア構成を示す．Solar Biscuit は電源部と処理通信部という 2 つの機構から構成される．電源部は太陽電池，低内部抵抗型電気二重層キャパシタ (FT0H105Z, NEC Tokin)，低ドロップ型電圧レギュレータ (LP2992IM5-3.3, National Semiconductor)，トリセット回路が搭載されている．ここで使用した太陽電池は，44mm × 44mm の単結晶シリコン太陽電池モジュールである．損失の少ない 5V, 1F の電気二重層キャパシタは 2 次電池と異なり，エネルギーの蓄積に科学的な反応を用いていないため，数万回以上の充放電に耐えることができる [15]．電圧レギュレータは，処理通信部に供給される電圧を制限する目的で用いられ

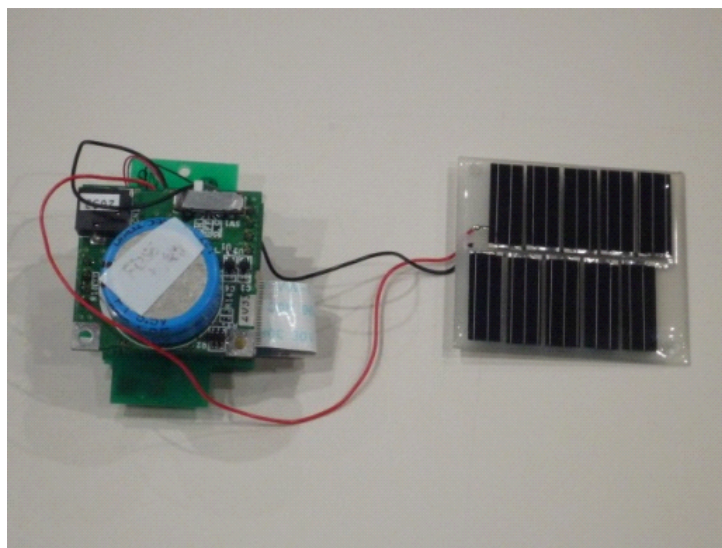


図 2.1 バッテリレス無線センサノードのプロトタイプ Solar Biscuit

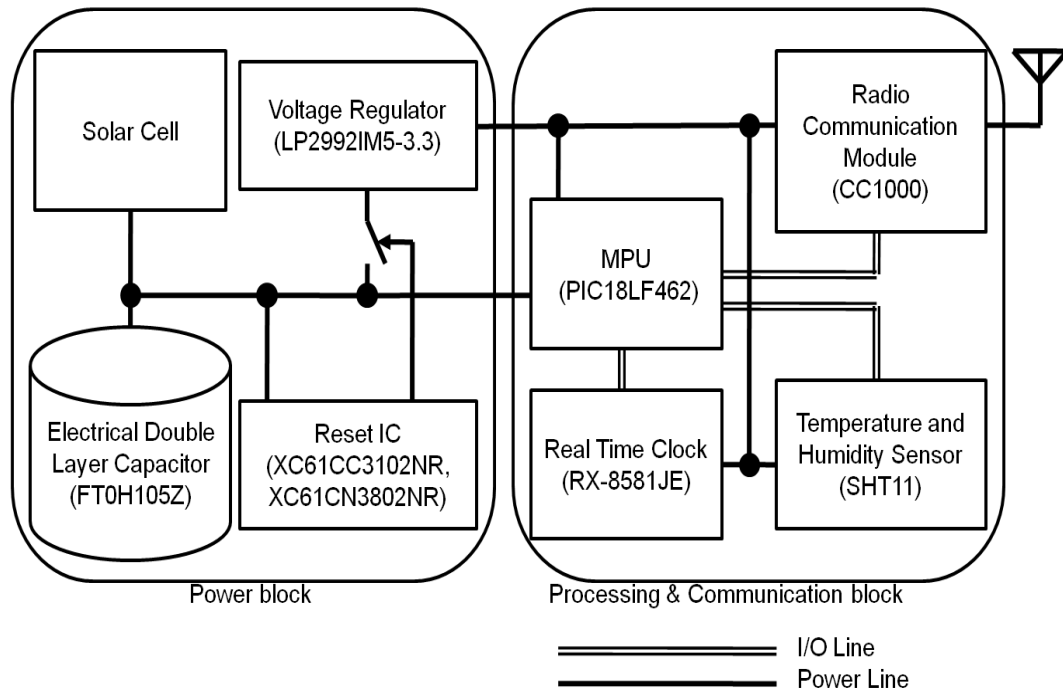


図 2.2 Solar Biscuit のハードウェア構成

る．リセット回路は，ヒステリシスを持たせて動作開始時の電圧降下による処理通信部の停止を防ぐために用いられる．

処理通信部はマイクロプロセッサ (PIC18LF4620, Microchip), 315MHz 帯の微弱無線通信モジュール (CC1000, Texas Instruments), 温湿度センサ (SHT11, Sensirion), とリアルタイムクロック (RX-8581JE, EPSON) が搭載されている．マイクロプロセッサは無線通信モジュールや温湿度センサを制御する．リアルタイムクロックはセンサデータのタイムスタンプのための計時やスリープから復帰するためのタイマとして用いられる．

センサノードの状態別の消費電流を表 2.1 に示す．ここで，受信状態および送信状態とは，それぞれ連続的なセンサデータの受信と送信を行う状態のことを表す．スリープとは，マイクロプロセッサおよび無線モジュールのメモリ，レジスタの状態を保存したまま動作を停止した状態のことを表す．スリープ時の消費電流の内訳を表 2.2 に示す．表 2.2 から分かるように，スリープ時の消費電流の大半は電気二重層キャパシタの漏れ電流である．また，スリープ時のマイクロプロセッサと無線通信モジュールが消費する電流はわずか $6\mu\text{A}$ である．

表 2.1 センサノードの状態別消費電流

A state of a sensor node	Current
Receiving (MPU:Active, RF:Receiving)	16.8 [mA]
Sending (MPU:Active, RF:Sending)	9.39 [mA]
Sleep (MPU:Sleep, RF:Sleep)	530 [μ A]

表 2.2 スリープ時の消費電流の内訳

Leak current on a capacitor	459 [μ A]
Standby current on a voltage regulator	65 [μ A]
Leak current on CPU and RF	6 [μ A]

表 2.3 電気二重層キャパシタの平均充電電流

Illuminance	Average charging current
20,000lx (Clear sky)	12.7 [mA]
10,000lx (Obscured sky)	7.40 [mA]
5,000lx (Clouded sky)	3.75 [mA]

Solar Biscuit では，動作可能な時間を以下の式で求めることができる．

$$T_{uptime} = \frac{C}{I}(V_{high} - V_{low}) \quad (2.1)$$

ここで，電気二重層キャパシタの仕様より $C = 1$ ，リセット回路の特性より $V_{high} = 3.51$ ， $V_{low} = 2.64$ である．これらの値と表 2.1 に示す状態別消費電流の値を式 2.1 に代入すると，受信待機時 51 秒，送信時 92 秒，スリープ時 1640 秒となる．

Solar Biscuit ではリセット回路の特製により，キャパシタの電圧が 2.64V を下回ると，電圧レギュレータへの電源供給の動作が停止する．そのため，継続的で安定な電源供給の動作を実現するために，キャパシタの電圧が 3V から 4V の間になるように電気二重層キャパシタの充放電を繰り返さなければならない．Solar Biscuit では，電気二重層キャパシタの充放電の必要な時間は具備した太陽電池が受光する照度によって変化する．図 2.3 に照度を変化させたときの充電時間と電気二重層キャパシタの電圧の関係を，表 2.3 に照度を変化させたときの電気二重層キャパシタの平均充電電流を示す．ここで，20,000lx

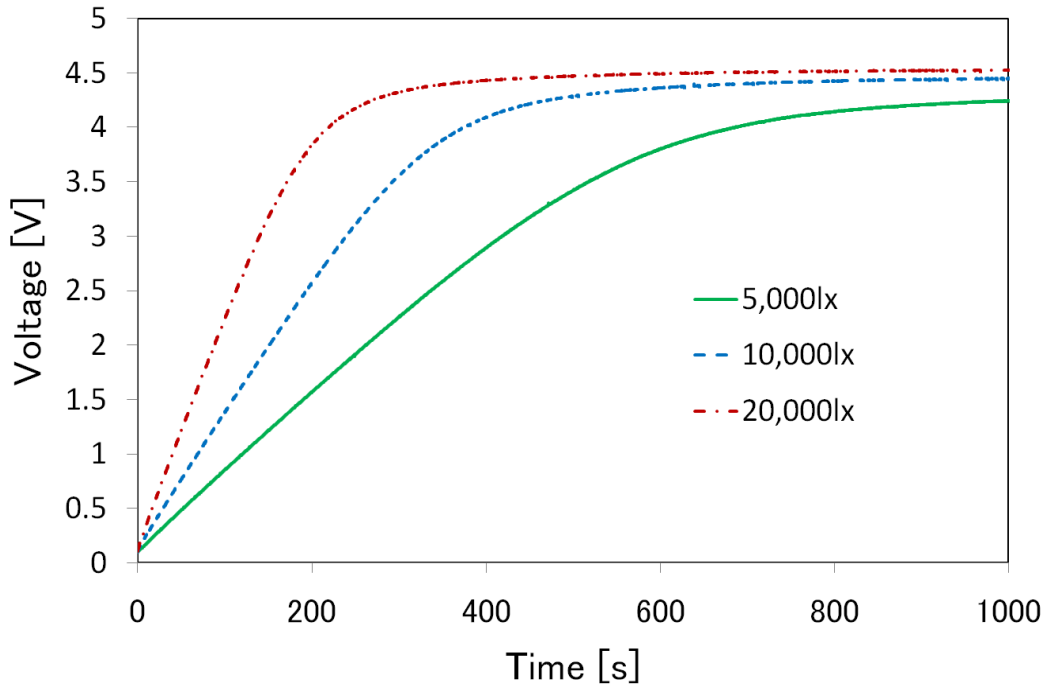


図 2.3 充電時間に対する電気二重層キャパシタの電圧

は晴天時，10,000lx は薄曇り時，5,000lx は曇天時の照度に相当する．図 2.3 から分かるように，電気二重層キャパシタの電圧が 3V から 4V に上昇するための必要な時間は，20,000lx の場合は 79 秒，10,000lx の場合は 135 秒，5,000lx の場合は 267 秒である．

2.3.2 Simple Data Dissemination Protocol (SDDP)

バッテリレス無線センサネットワークの時間によって得られる電力が変動，空間的に電力が偏在，によるリンクの不安定さに対し，文献 [9] では，バッテリレス無線センサネットワーク向けのデータ収集プロトコルとして「SDDP (Simple Data Dissemination Protocol)」を提案している．SDDP はセンサノードの電力状態に応じて動作し，センサデータをネットワーク全体にフラッディングすることによって，リンクが不安定でも確率的にシンクノードに配送することができる．ここで SDDP は標準的に使用されているフラッディングプロトコルと異なり，既に受信したことがあるパケットに対して送受信の重複を許容する．標準のフラッディングプロトコルではシーケンス番号の仕組みを導入し，各センサノードがパケットを受信した際，パケットに含まれるシーケンス番号を参照して

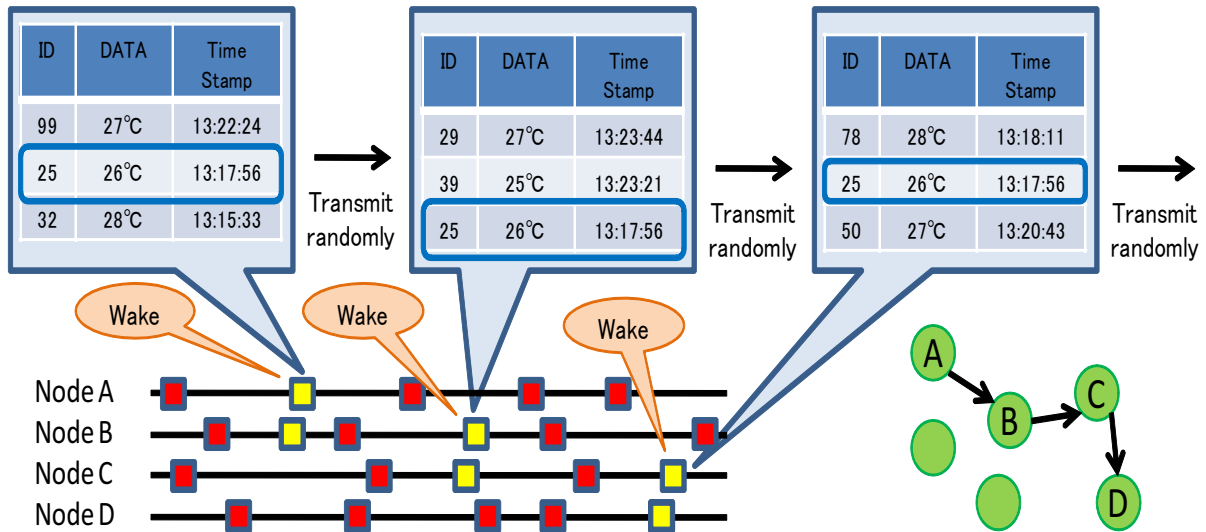


図 2.4 SDDP (Simple Data Dissemination Protocol)

既に受信したことがあるパケットであれば、そのパケットを破棄する。一方、SDDP ではシーケンス番号の仕組みを利用せず、各センサノードが受信した全てのパケットを受信する。このように SDDP では 1 つのパケットに対して各センサノードが冗長に送受信を行うことによって、標準のフラッディングプロトコルに比べて、ネットワーク上のパケットが多くなり、シンクノードにセンサデータを配送する確率が高くなる。

図 2.4 にセンサノード A からセンサノード D へセンサデータが配送されときの SDDP の動作例を示す。SDDP では、各センサノードはバッファを持っており、自らがセンシングしたセンサデータ及び他のセンサノードから受信したセンサデータをバッファに保存する。また、各センサノードは自分の電力状態に応じてスリープをし、起きたときにバッファからランダムに 1 項目のセンサデータを選択し、ブロードキャストする。他のセンサノードからセンサデータを受信した際にバッファが溢れた場合、バッファからランダムに 1 項目のセンサデータを削除する。以上の操作を繰り返すことによって、ルーティング木の構築やメタ情報の広告などを必要とせず、センサデータは確率的にネットワークに伝播し、センサデータを収集するシンクノードに届くことが可能となる。さらに SDDP は単純であるため、省資源で実装可能という特徴も持っている。

しかしながら、SDDP では、シンクノードからの距離が遠いセンサノードからのセンサデータが冗長な経路で配送されることによるデータ収集の非効率性が問題になる。冗長な経路は、迂回路と小刻み経路に分類できる。迂回路は、センシングを行なったセンサノード

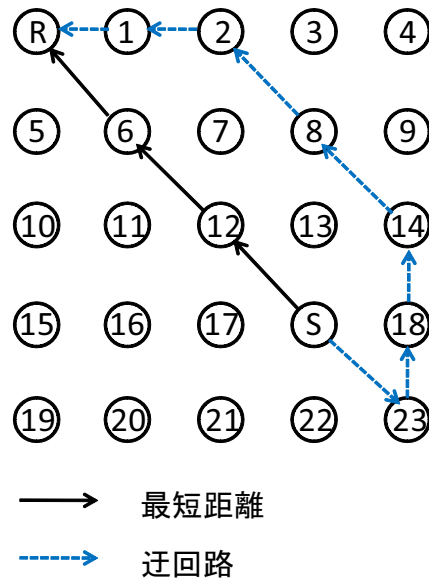


図 2.5 迂回路

ドとシンクノードを結んだ最短距離から離れたセンサノードがパケットを中継することで発生する冗長な経路である。図 2.5 に迂回路の例を示す。センサノード S からシンクノード R にセンサデータを配送するのに、 $S \rightarrow 12 \rightarrow 6 \rightarrow R$ という 3 ホップから成る経路は最短経路である。しかしながら、センサノード S からシンクノード R まで、 $S \rightarrow 13 \rightarrow \dots$

$1 \rightarrow R$ という 7 ホップから成る経路でセンサデータが配送された。このとき、センサノード S はシンクノード R に対して自センサノードの位置より離れるセンサノード 13 にセンサデータを配送したため、シンクノード R にセンサデータを配送するのに、距離が長くなる。この経路 $S \rightarrow 13 \rightarrow \dots \rightarrow 1 \rightarrow R$ は迂回路という。

小刻み経路は、送信元のセンサノードの至近距離にあるセンサノードがブロードキャストされたパケットを中継することによって発生する、距離が短いホップの連続で構成される冗長な経路である。図 2.6 に小刻み経路の例を示す。図 2.6 では、センサノードの通信範囲を見ると、 $S \rightarrow 3 \rightarrow R$ または $S \rightarrow 2 \rightarrow R$ という経路でセンサデータを配送するのは効率的である。しかしながら、センサノード S からセンサノード R まで、センサデータが経路 $S \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow R$ で配送された。この経路 $S \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow R$ は小刻み経路という。

SDDP では、迂回路と小刻み経路が発生することによってシンクノードまでのホップ数が増え、それに伴ってセンサデータが到達する確率は低くなる。

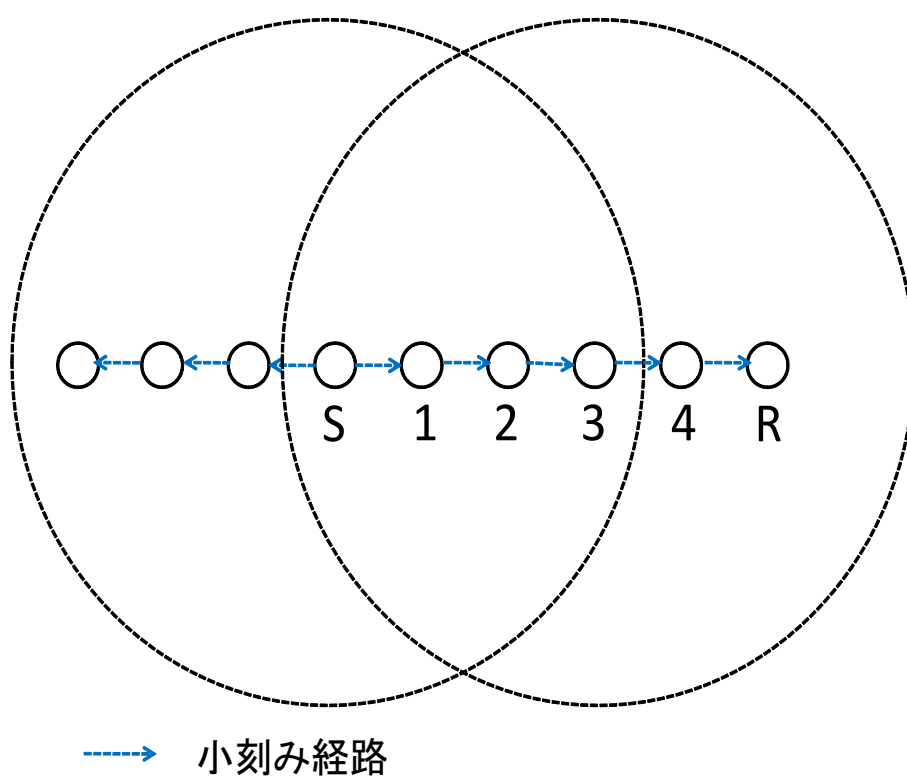


図 2.6 小刻み経路

2.3.3 フラッディングの効率化

2.3.2 で述べたように SDDP はセンサデータをネットワーク全体にフラッディングすることによって、リンクが不安定でもセンサデータを確率的にシンクノードに配送することができる。SDDP では、フラッディングが重要な役割を持っている。そのため、フラッディングを効率化することができれば、SDDP の効率も良くなり、より多くのセンサデータを収集することができる。ここまで信頼性や遅延や無駄な消費電力といった様々な課題を着目し、フラッディングの効率化を図る研究は多くなされてきた。しかしながら、既存の研究をそのまま SDDP に付け加えてバッテリレス無線センサネットワークへ適用することができない。本節では、フラッディングの効率化を図る研究をいくつか紹介し、既存の研究をそのままバッテリレス無線センサネットワークへ適用できない理由を述べる。

フラッディングを効率化する手法としては、ローカル情報を用いるか否かによって分類できる。ローカル情報を用いて効率化を図る研究として、[16, 17, 18, 19, 20, 21] が挙げられる。Trickle[16] と Deluge[17] では各センサノードが広告機構を用いて、定期的にコードのメタデータをブロードキャストすることにより、隣接センサノードのコードの情報を知ることができる。更新が必要とするセンサノードが存在する場合、新しいコードを持つセンサノードが古いコードを持つセンサノードに対して新しいコードを送信する。このように Trickle と Deluge では、ローカルな広告機構を用いることで、より信頼性のあるコードの伝播を行なうことができる。RBP[18] では、Important リンクを特定し、隣接センサノードの密度と得られた Implicit ACK の数に応じて再送の回数を変えることによって信頼性の向上を図る。Smart Gossip[19] では、各センサノードの重要度を特定し、送信する確率を決定する。あるセンサノードに対して多くのセンサノードが依存する場合、そのセンサノードの重要度が高く、より高い確率で送信する。[20] では、遅延を小さくし、より迅速なフラッディング手法を提案している。[20] では、Energy Optimal Tree の他に Opportunistic リンクを設ける。次のセンサノードにパケットを送信する際に、Energy Optimal Tree のリンクでセンサデータを送信する場合と Opportunistic リンクで送信する場合の必要な遅延を予測する。それぞれの必要な遅延を予測した結果、Energy Optimal Tree のリンクを用いた場合に比べて Opportunistic リンクを用いた場合の方が小さければ、Opportunistic リンクを利用してパケットを送信する。[21] では、各ノードは自ノードの通信範囲内にある距離が遠いセンサノードに対し、直接データを送るか他のノードを用いて中継して送るかを必要な消費電力によって決定する。直接送信するより、近くにあるセンサノードを中継ノードとして用いる場合の方が必要な消費電力が

少なければ、送信電力を調整して近くにあるセンサノードにパケットを送信する。文献 [16, 17, 18, 19, 20, 21] では、Hello メッセージや広告パケットといった制御パケットは重要な役割を担うが、電源が不安定であるバッテリレス無線センサネットワークではその制御パケットの伝播が保証されない。

ローカル情報を用いない研究としては、[22, 23] がある。文献 [22, 23] では、遅延を小さくし、より迅速なフラッディング手法を提案している。Flash Flooding[22] では、キャプチャ効果を活かして並列のパケットの伝送を行なうことにより、遅延を小さくする。[23] では、センサノードのアクティブ時間を延長することにより迅速なフラッディングを実現する。このように [22, 23] では、受け取ったパケットの再送やセンサノードのアクティブ時間の延長を導入することによってより迅速なフラッディングを行なうことができるが、代わりにその操作によって発生する消費電力が大きくなる。そのため、得られる電力が少ないバッテリレス無線センサネットワークへ [22, 23] のようなプロトコルを適用することができなくなる。

文献 [20] を除き、前述したプロトコルは各センサノードがいつでもアクティブ状態であるという前提を持つが、電源が不安定であるバッテリレス無線センサネットワークではその前提が成り立たなくなる。一方、[20] は Low-duty-cycle 無線センサネットワーク向けのプロトコルであるが、各センサノードは隣接センサノードと動作するスケジュールの交換が必要であるため、電源が不安定であるバッテリレス無線センサネットワークではスケジュールの交換どころか、いつアクティブ状態になるかというスケジュールすら不規則になってしまい、把握できなくなる。

2.4 おわりに

本章では、バッテリレス無線センサネットワークの必要性および制約について述べると共に、バッテリレス無線センサノードのプロトタイプである「Solar Biscuit」について紹介した。また、既存のバッテリレス無線センサネットワーク向けのデータ収集プロトコルである「Simple Data Dissemination Protocol (SDDP)」とその問題点について詳述した。第3章では、SDDP の問題点を解決するために提案する「Directional Flooding for Data Collection (DFDC)」について述べる。

■ 第 3 章

Directional Flooding for Data Collection (DFDC)

3.1 はじめに

第 2 章では、バッテリーレス無線センサネットワーク向けの既存のデータ収集プロトコルである「Simple Data Dissemination Protocol (SDDP)」とその問題点を述べた。SDDP の問題に対し、本研究では位置情報を用いて効率的にセンサデータを配送する「Directional Flooding for Data Collection (DFDC)」を提案する。本章では、SDDP の問題を解決するための DFDC の具体的なアプローチ、また DFDC の全体の動作の詳細について述べる。

3.2 動作の概要

第 2 章で述べた SDDP の問題に対し、本研究では、あらかじめセンサノードに設定された位置情報を用いてセンサデータの送信方向を指定可能なフラッディングを利用することで効率的なデータ収集を行なう「DFDC (Directional Flooding for Data Collection)」を提案する。位置情報を取得する方法としては、GPS を具備したユーザやロボットがセンサノードを実環境に配置する前に位置情報を取得し、得られた位置情報をセンサノードに書き込むことや、事前に各センサノードをどこに配置したいかを計画し、配置したい場所の位置情報をセンサノードに書き込むことを想定している。バッテリーレス無線センサネットワークの適用先は、農場における農作物への日照状況の測定や土壌の水分含有量の測定、森林のエコシステムの状態の臨界指標として用いられる林冠閉鎖率の測定といった、絶対的な確実性を必要とせず、時間的制約の穏やかなアプリケーションを想定している。

DFDC では SDDP における冗長な経路の問題に対し、以下の 3 つの操作を追加することで効率的なデータ収集を実現する。1 つ目は、迂回路に対する操作である (図 3.1 参照)。各センサノードはパケットが迂回していると判断した場合にパケットを破棄する処理を行なう。操作の手順は以下の通りである。

1. センサデータを受信したセンサノードからシンクノードまでの距離を算出する。算出した結果を $d_{receiver}$ とする。
2. 受信したパケットに含まれる送信元のセンサノードの位置情報を用いて、送信元のセンサノードからシンクノードまでの距離を算出する。算出した結果を d_{sender} とする。

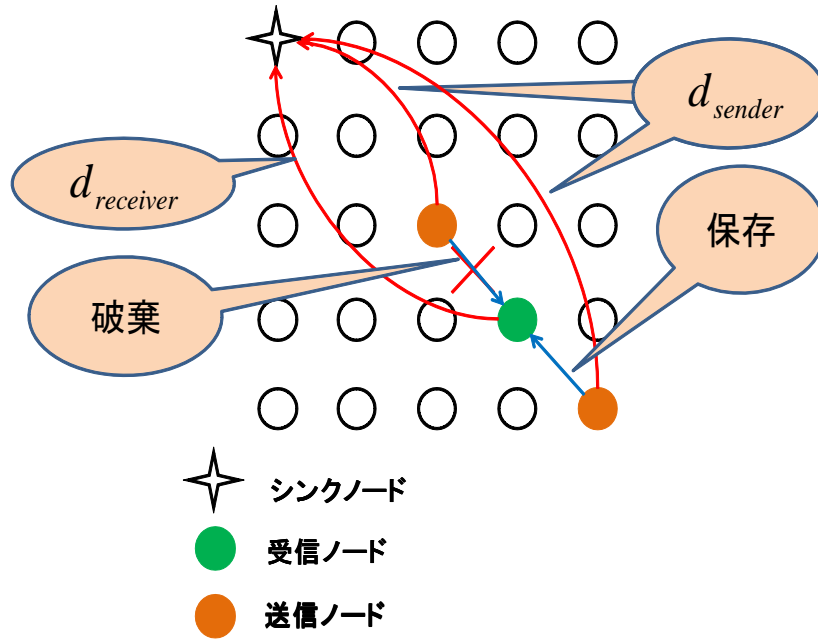


図 3.1 迂回路に対する操作

3. 算出した $d_{receiver}$ と d_{sender} を比較する。
4. $d_{receiver} < d_{sender}$ であれば、センサデータをバッファに保存する。
5. $d_{receiver} > d_{sender}$ であれば、受信したパケットを破棄する。

このように、各センサノードは自センサノードよりシンクノードに対する距離が近いセンサノードからのパケットを受け取らないようにし、経路方向を限定することにより、迂回路を減らすことができる。

2つ目は、小刻み経路に対する操作である(図 3.2 参照)。それぞれのセンサノードで近くにあるセンサノードからのパケットを破棄する処理を行なう。操作の手順は以下の通りである。

1. あらかじめ受信不可能な距離の閾値 $d_{threshold}$ を設定する。
2. 受信したパケットに含まれる送信元のセンサノードの位置情報を用いて、送信元のセンサノードと自センサノードの距離を算出する。算出した結果を d_{relay} とする。
3. 算出した結果 d_{relay} とあらかじめ設定した閾値 $d_{threshold}$ を比較する。
4. $d_{relay} > d_{threshold}$ であれば、センサデータをバッファに保存する。
5. $d_{relay} < d_{threshold}$ であれば、受信したパケットを破棄する。

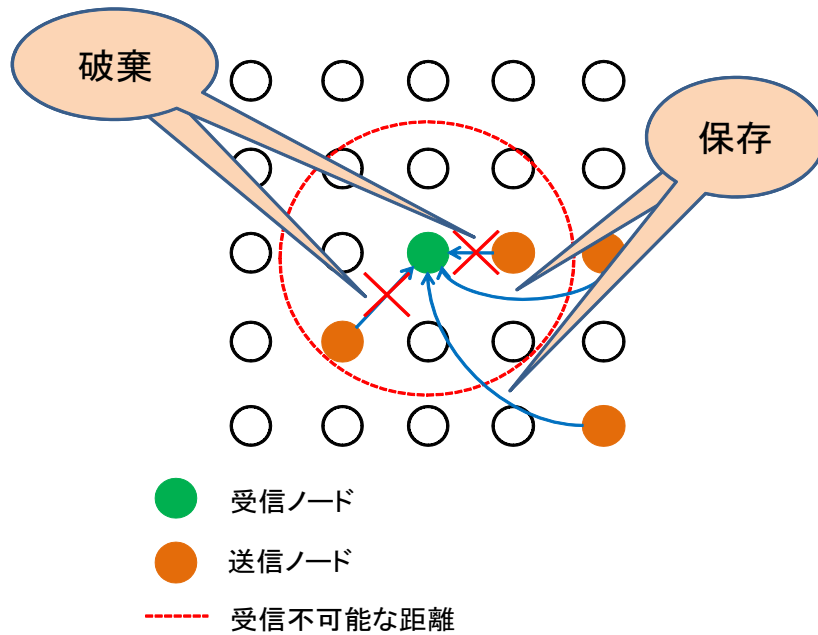


図 3.2 小刻み経路に対する操作

このように，各センサノードは至近距離にあるセンサノードからのパケットを受け取らずに，自センサノードの位置から遠いセンサノードからのパケットのみを受け取る処理を行なうことにより，1 回送信するときの距離を稼ぐことができる．

3 つ目の操作は長い経路を経たと想定されるパケットを破棄する処理である．各センサノードは自分のセンシングしたセンサデータをフラディングする直前に，パケットに対して，シンクノードへの距離に応じてライフタイムを設定する．シンクノードから近いセンサノードは値が小さいライフタイムを，シンクノードから遠いセンサノードは値が大きいライフタイムを設定する．各センサノードはパケットのライフタイムを監視し，ライフタイムが切れたパケットをバッファから破棄する．パケットのライフタイム $t_{lifetime}$ は以下の数式で決定する．

$$t_{lifetime} = c \times d_n [\text{秒}] \quad (3.1)$$

ここで， $c[\text{秒}/\text{m}]$ は定数で， $d_n[\text{m}]$ はセンサノードからシンクノードまでの距離を表す．

3.3 動作の詳細

DFDC は図 3.3 に示した動作を繰り返す．まず，DFDC では電力の残量に応じて必要なスリープ時間 t_{sleep} を算出する．次に求められた t_{sleep} を基に，センサノードを $t_{sleep} + [0 \cdots t_{sleep}]$ 秒間スリープさせる．ここで $[0 \cdots t_{sleep}]$ は 0 から t_{sleep} の間でランダムに選択された値を意味する．スリープ時間にランダム性を持たせることによって同時にアクティブになる隣接センサノードが毎回変化する．センサノードはスリープした後，アクティブになり，センシングを行ない，バッファ内にある自分のセンサデータを更新する．その後，バッファから最初の一項目のセンサデータを選択する．式 3.1 でパケットのライフタイムを算出し，パケットに算出したライフタイムを設定してから，パケットをブロードキャストする．ブロードキャストし終わったセンサデータをバッファから削除する．パケットのブロードキャストが終了した後，他のセンサノードからブロードキャスト

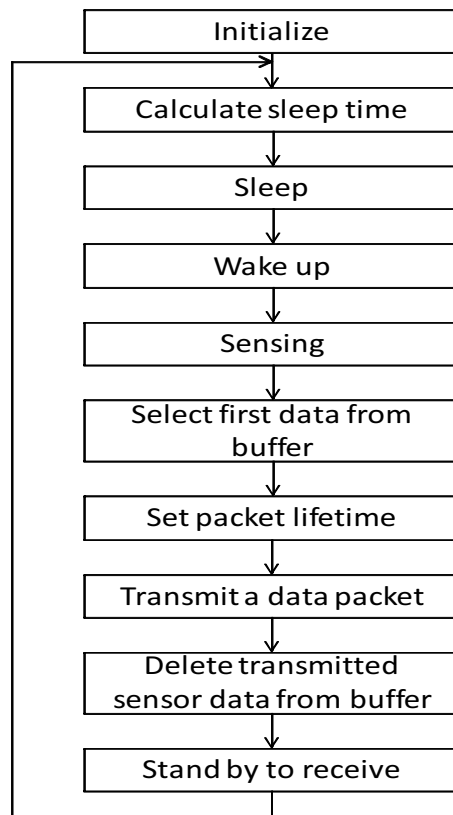


図 3.3 DFDC : 動作フロー

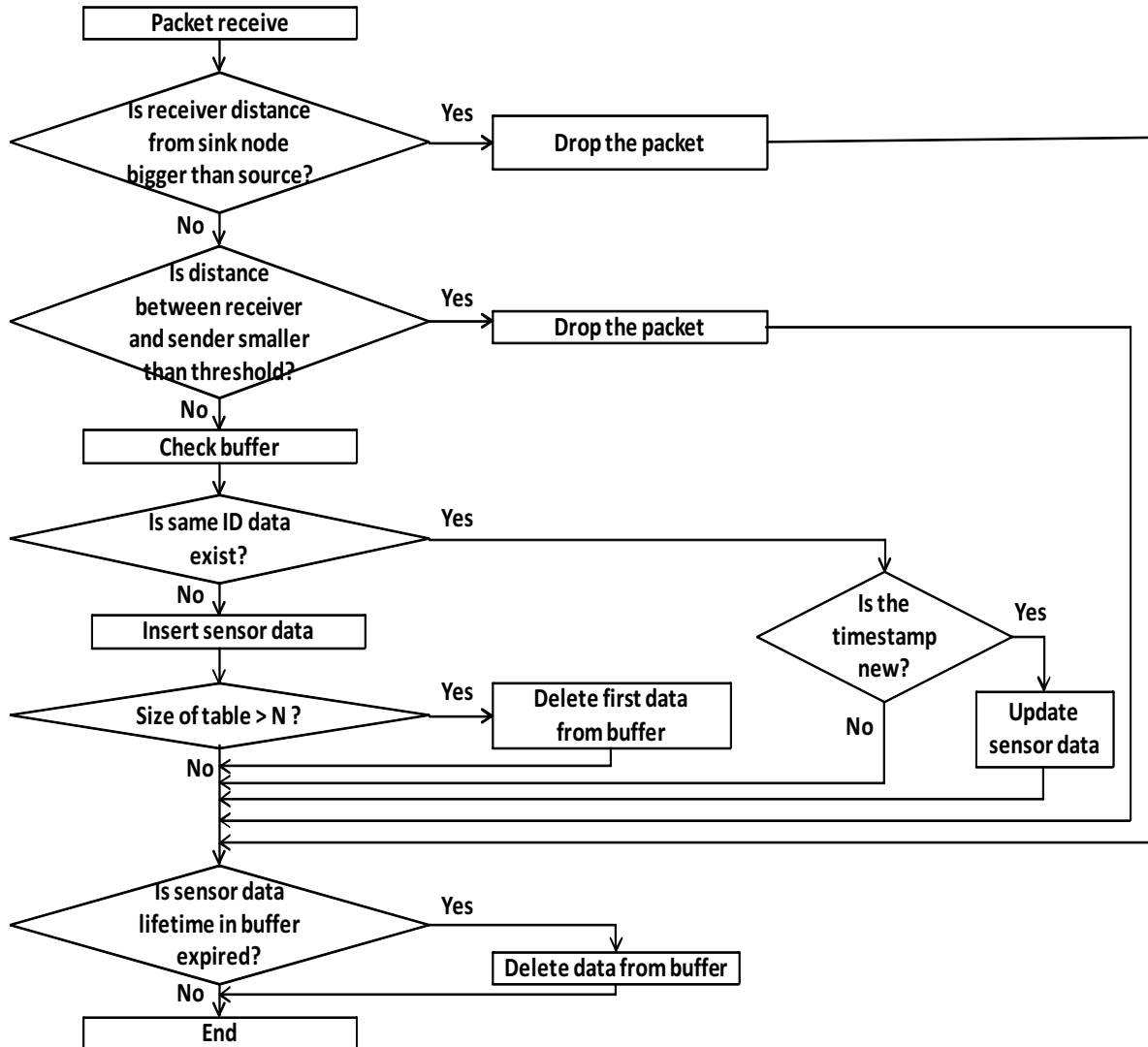


図 3.4 DFDC：受信時の動作フロー

されるパケットを受信待機するために t_{active} 秒間アクティブを維持し，アクティブ時間が終了したら再びスリープ時間の計算処理を行う．

図 3.4 に DFDC のパケットを受信したときの処理を示す．パケットを受け取ったセンサノードはまず，3.2 で述べた迂回路に対する操作を行なう．次に，小刻み経路に対する操作を行なう．この 2 つの操作が終了したら，バッファにパケットに含まれるセンサノード ID と合致する項目が存在するか否かを調べる．もしバッファにセンサノード ID と合致する項目が存在すれば，パケットに含まれるタイムスタンプがバッファの合致した項目のタイムスタンプよりも新しいかどうかをチェックする．新しい場合にはバッファのセン

サデータとタイムスタンプを更新する．パケットに含まれるセンサノード ID と合致する項目が存在しなかった場合にはパケットの中身をバッファに追加する．バッファが溢れた場合，FIFO の仕組みを適用し，バッファから自センサノードの項目以外の最初の一項目を削除する．最後に，バッファの各項目のライフタイムのチェックを行なう．自センサノードの項目以外のライフタイムが切れた項目を全てバッファから削除する．以上の仕組みにより，DFDC ではセンサノードから送信されたパケットが徐々にネットワークを伝播し，SDDP より効率よくシンクノードに到達することができる．

3.4 おわりに

本章では，第 2 章で述べた「Simple Data Dissemination Protocol (SDDP)」の問題に対し，あらかじめセンサノードに設定された位置情報を利用したバッテリーレス無線センサネットワーク向けのデータ収集プロトコル「Directional Flooding for Data Collection (DFDC)」を提案し，DFDC の動作の概要と動作の詳細について述べた．次章では，DFDC を PAVENET[10] モジュールとシミュレータ上に実装し，性能評価について述べる．

第 4 章

評価

4.1 はじめに

本章では，第 3 章で提案した，位置情報を利用したバッテリーレス無線センサネットワーク向けのデータ収集プロトコル「Directional Flooding for Data Collection (DFDC)」の性能を評価する．DFDC の評価方法として，DFDC を PAVENET[10] モジュールとシミュレータ上に実装し，SDDP との性能を比較する．

4.2 シミュレーション評価

シミュレーション評価では，第 2 章で得られた Solar Biscuit の実験データを用いて，DFDC の性能を評価し，SDDP の性能と比較する．具体的には，OMNeT++[24] を用いて，ネットワークのサイズに応じたデータの収集率の評価をシミュレーションによって行ない，DFDC は SDDP よりどのくらい効率的であるかを調べる．ここではデータの収集率を「ネットワーク中の全センサノードのうち，シンクノードが少なくとも 1 つ以上のデータを受信したセンサノードの割合」と定義する．また，様々な条件での DFDC の性能も評価する．

4.2.1 シミュレーションシナリオ

シミュレーション評価で用いた全体のシミュレーションパラメータを表 4.1 に示す．シミュレーション評価では，以下の 6 つの条件を想定してシミュレーションを行なった．

1. 既存の通信プロトコルとの比較
2. センサノードの配置がランダムの場合
3. センサノードに障害が生じた場合
4. 電力の状態が変化する場合
5. シンクノードの位置が中央にある場合
6. シンクノードが複数ある場合

センサノードの配置は，図 4.1 のように $M \times M$ の格子状とランダムとした．センサデータを収集するシンクノードの数は 1 台，4 台，5 台とした．シンクノード数が 1 台のときはシンクノードを格子状の隅か中央に配置するとし，4 台のときは全て隅に配置するとした．シンクノード数が 5 台のときは，その中の 4 台を隅に，残りの 1 台を中央に配

表 4.1 シミュレーションパラメータ

センサノードの配置	格子, ランダム
シンクノード数および配置	1 (隅, 中央), 4 (隅), 5 (隅 4 台, 中央 1 台)
隣接センサノード間の距離	10 [m]
ネットワークのサイズ: M	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
障害が生じたセンサノード数の割合	20, 40, 60, 80 [%]
バッファのサイズ	10
t_{active}	1 [秒]
t_{sleep}	1, 5, 10 [秒]
c	1.4
$d_{threshold}$	80 [m]
ビットレート	19.2 [kbps]
送信電力	10 [dBm]
パケット長	16 [byte]
最大通信範囲	100 [m]
センサ値更新頻度	1 [回/分]
電波伝搬モデル	文献 [25]

置するとした．隣接センサノード間の距離は 10 メートル，バッファのサイズは 10 とした．ネットワークのサイズ M を 10 から 100 に 10 ずつ増やした．障害が生じたセンサノード数の割合はネットワーク全体のセンサノード数の 20% から 80% に 20% ずつ増やした．このとき t_{active} は 1 秒とし， t_{sleep} は 1 秒，5 秒，10 秒とした． t_{sleep} が 1 秒のときは晴天時，5 秒のときは薄曇り時，10 秒のときは雲天時を想定した．DFDC における $d_{threshold}$ は 80 メートル， $t_{lifetime}$ は $t_{lifetime} = 1.4 \times d_n$ [秒] とした．ここで d_n はセンサノードからシンクノードまでの距離を表す．無線通信は CC1000 を用いた場合を想定し，送信電力は 10 dBm，ビットレートは 19.2 kbps，電波の最大到達距離は約 100 メートルとなる．また，パケット長は 16 byte とし，各センサノードのセンサ値は 1 分に 1 回更新されるものとした．電波伝搬モデルは無線センサネットワークシミュレータ Castalia[26] で使用されているモデル [25] を用いた．[25] のモデルは実際の実験データを基に構築されており，片方向リンクなども再現されるため，現実に近い電波伝搬モデルである．

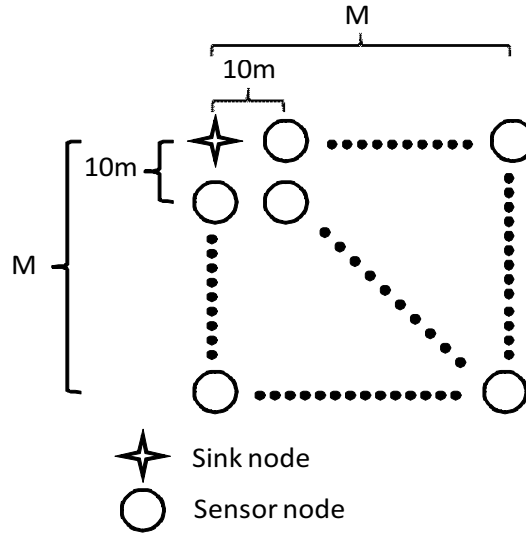


図 4.1 センサノードの配置

4.2.2 既存プロトコルとの比較

DFDC を SDDP[9] , 標準的に使われているフラッディングプロトコル (Simple Flooding) , Directed Diffusion[6] の 3 つのプロトコルと比較した . このとき , センサノードの配置は格子状とし , その 1 つの隅がシンクノードとした . また , t_{active} は 1 秒とし , t_{sleep} は 10 秒とした .

図 4.2 にシミュレーションによる DFDC と既存プロトコルとの比較した結果を示す . DFDC は他の全てのプロトコルよりも高い収集率を実現した . 特にネットワーク規模が大きい場所では他のプロトコルとの差が最も大きくなり , センサノード数が 10,000 台の時には SDDP と比べて約 4 倍 , Simple Flooding と比べて約 10.4 倍 , Directed Diffusion と比べて約 30.1 倍の効率でデータを収集できることが示された .

次に , ネットワークのサイズ M を 50 から 100 に 10 ずつ増やしたとき , シンクノードからの距離に対する収集率を測定した . M の値は文献 [9] から SDDP における 1 時間の測定では $M = 40$ で収集できるセンサノード数が飽和していることから , 余裕を見て M を 50 からと設定した . 図 4.3 に $M = 50$, 図 4.4 に $M = 60$, 図 4.5 に $M = 70$, 図 4.6 に $M = 80$, 図 4.7 に $M = 90$, 図 4.8 に $M = 100$ のときの距離に対する収集率を示す . 図 4.3 ~ 図 4.8 から分かるように , SDDP より DFDC の方が効率的にセンサデータを配送することができた .

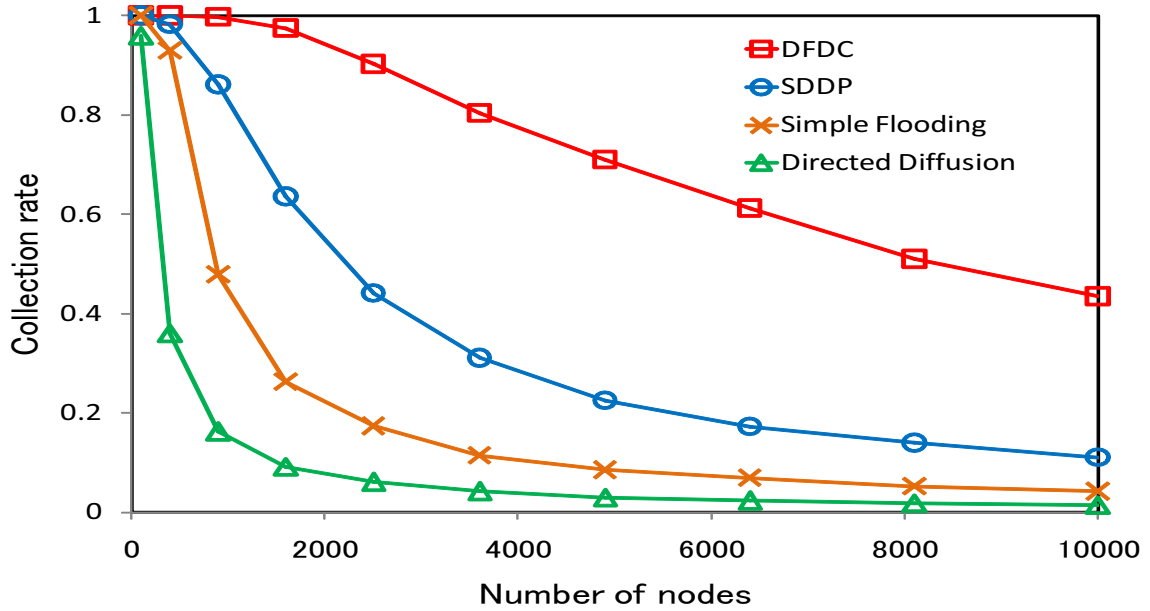
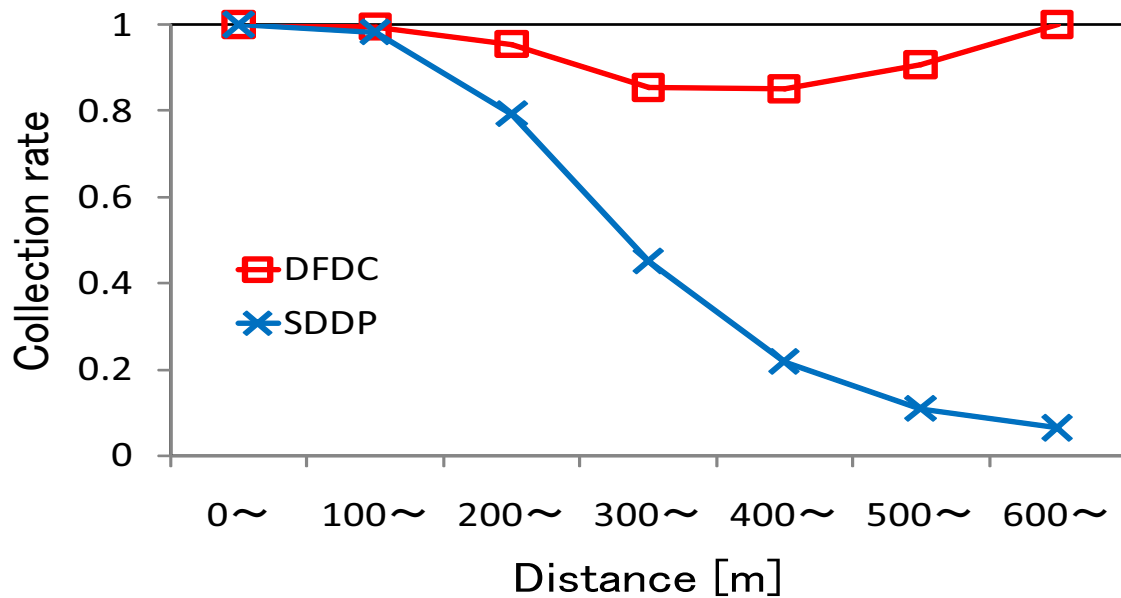
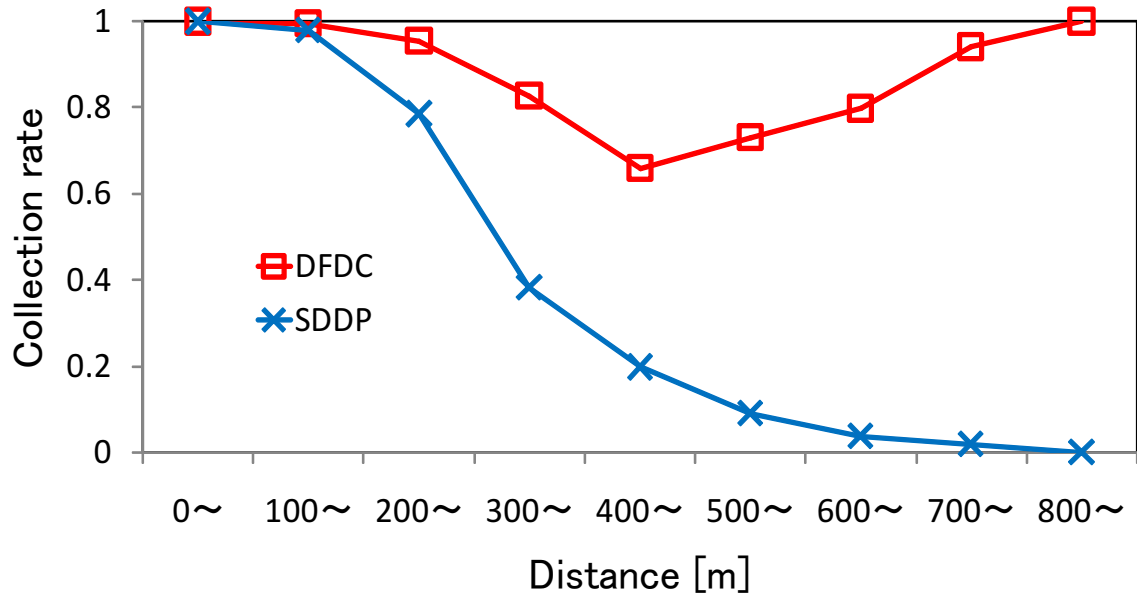
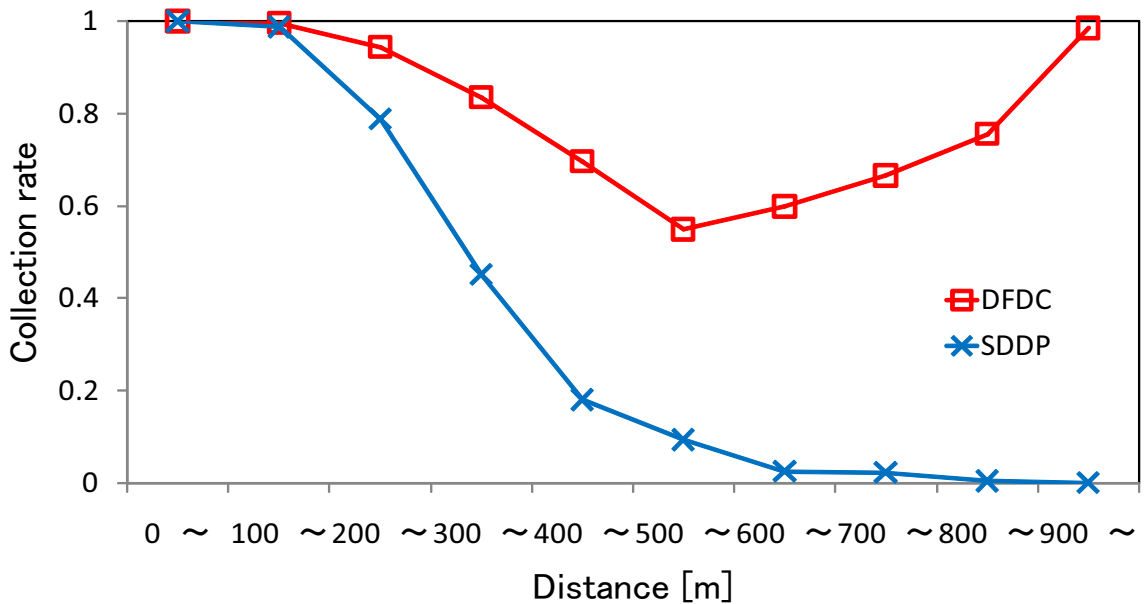
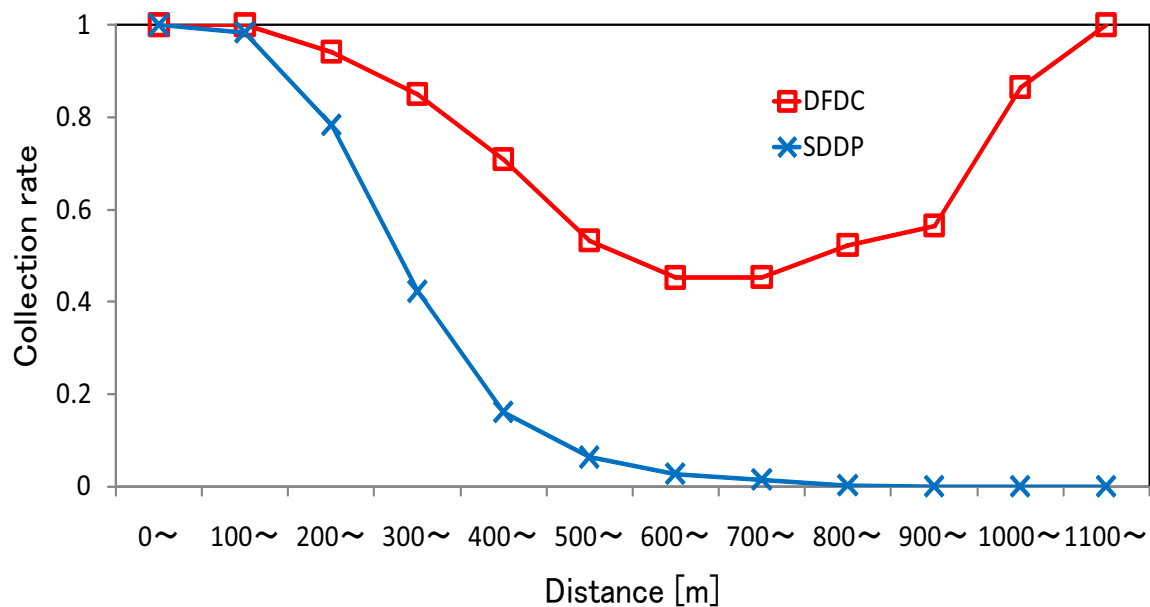
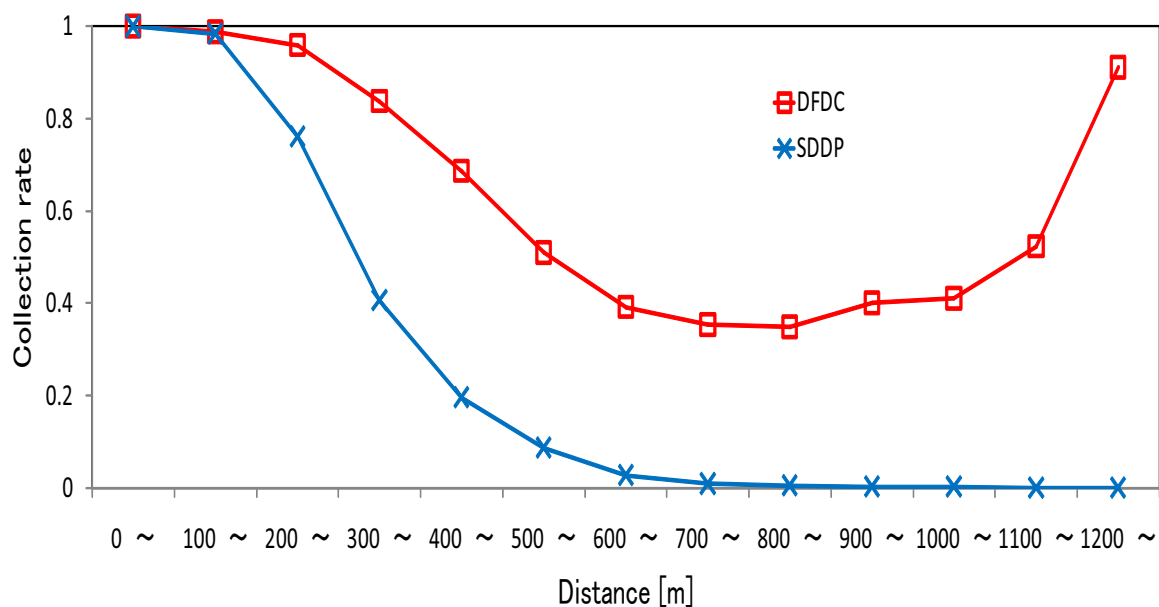


図 4.2 DFDC と既存プロトコルとの比較

図 4.3 シンクノードからの距離に応じた DFDC と SDDP との比較 ($M = 50$)

図 4.4 シンクノードからの距離に応じた DFDC と SDDP との比較 ($M = 60$)図 4.5 シンクノードからの距離に応じた DFDC と SDDP との比較 ($M = 70$)

図 4.6 シンクノードからの距離に応じた DFDC と SDDP との比較 ($M = 80$)図 4.7 シンクノードからの距離に応じた DFDC と SDDP との比較 ($M = 90$)

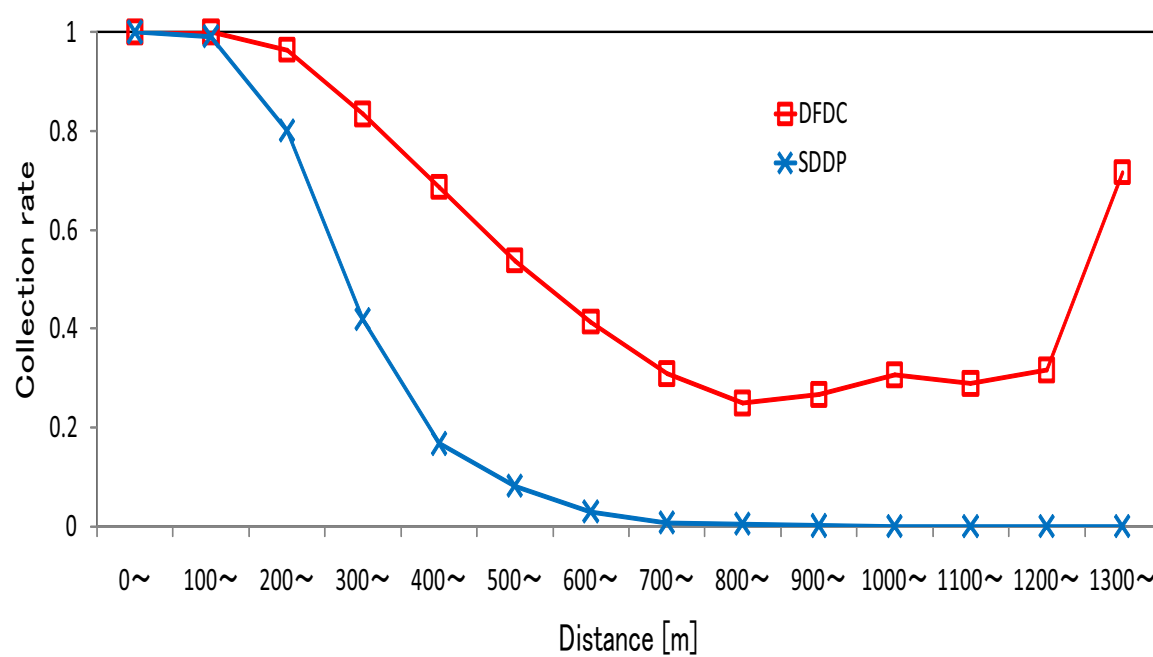


図 4.8 シンクノードからの距離に応じた DFDC と SDDP との比較 ($M = 100$)

4.2.3 センサノードの配置がランダムの場合

図 4.9 にセンサノードの配置がランダムの場合のシミュレーション結果を示す．このとき，4.2.2 と同様に t_{active} は 1 秒とし， t_{sleep} は 10 秒とした．図 4.9 から分かるように，センサノードの配置がランダムの場合の結果は格子状の配置の結果とほぼ一致している．つまり，DFDC はセンサノードの配置をランダムにしても収集率に影響を受けないことが分かる．

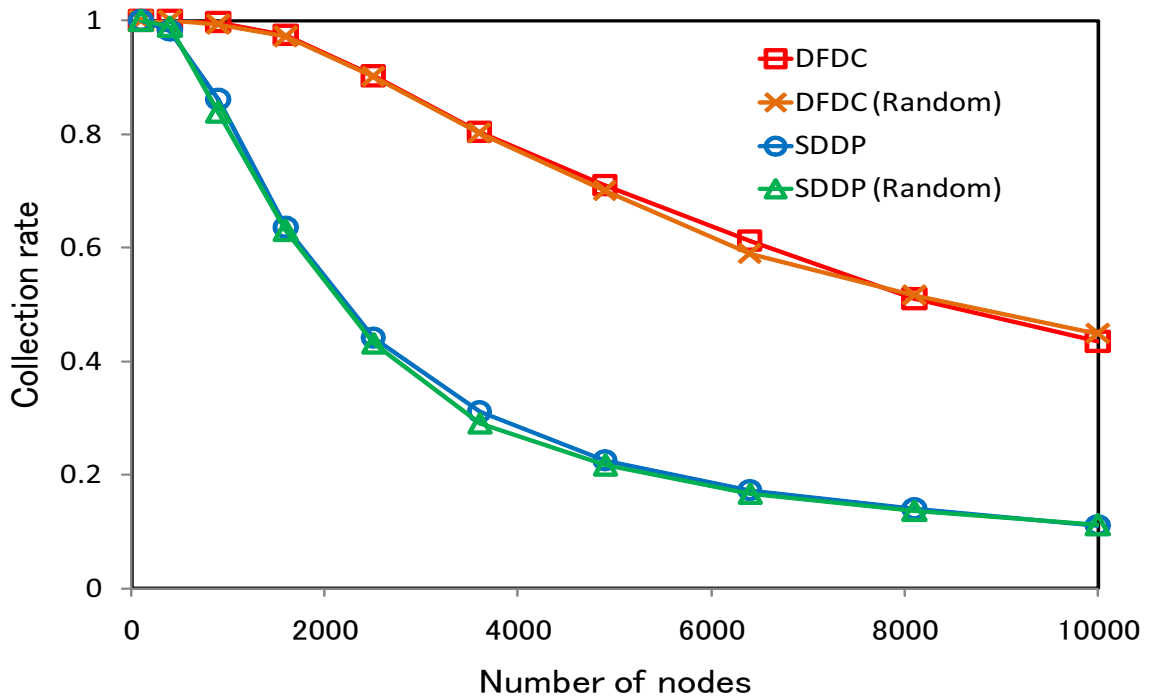


図 4.9 センサノードの配置がランダムの場合の収集率

4.2.4 センサノードに障害が生じる場合

ネットワーク全体のセンサノード数に対して障害が生じたセンサノード数の割合を20%から80%に20%ずつ増やしたときの収集率を測定した。このとき、障害が生じたセンサノードは中央に存在する場合と、ランダムである場合という2つの条件を想定し、シミュレーションを行った。センサノードの配置は格子状とし、その1つの隅がシンクノードとした。ネットワークのサイズ M は10から40に10ずつ増やした。また、 t_{active} は1秒とし、 t_{sleep} は10秒とした。

4.2.4.1 障害が生じるセンサノードがトポロジーの中央に存在する場合

図4.10に障害が生じるセンサノードは中央に存在する場合のDFDCの収集率を、図4.11にSDDPの収集率を、図4.12に $M = 40$ のときのDFDCとSDDPとの比較した結果を示す。シミュレーション結果から分かるように、SDDPではセンサノードに障害が生じてても、安定したデータの収集率を得られた。一方、DFDCでは障害が生じるセンサノード数が多くなるにつれて、データの収集率が低下した。これは、DFDCが位置情報を用いており、多くのセンサノードに障害が生じるとDirectional Floodingができなくなることに起因する。しかし、ネットワーク全体のセンサノード数に対して障害が生じたセンサノード数の割合が80%まではSDDPよりDFDCの収集率の方が高い。

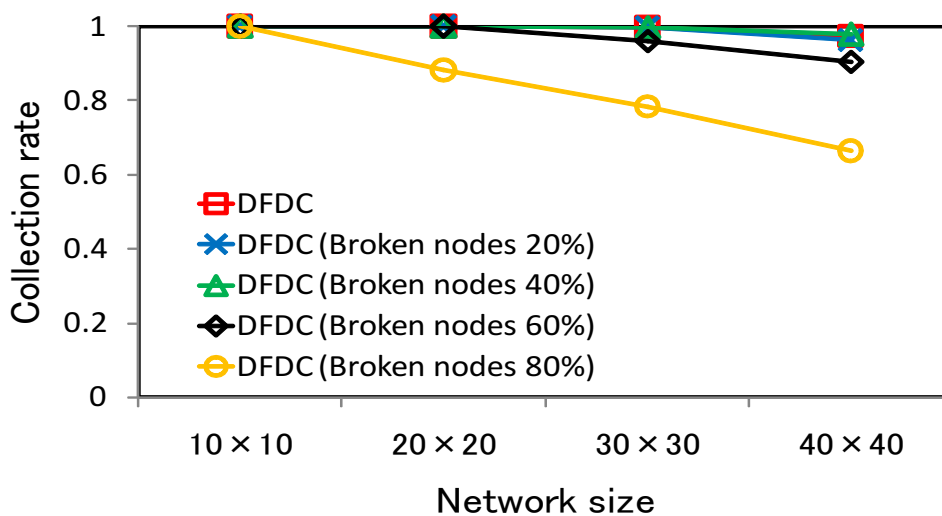


図 4.10 障害が生じるセンサノードが中央である場合の収集率 (DFDC)

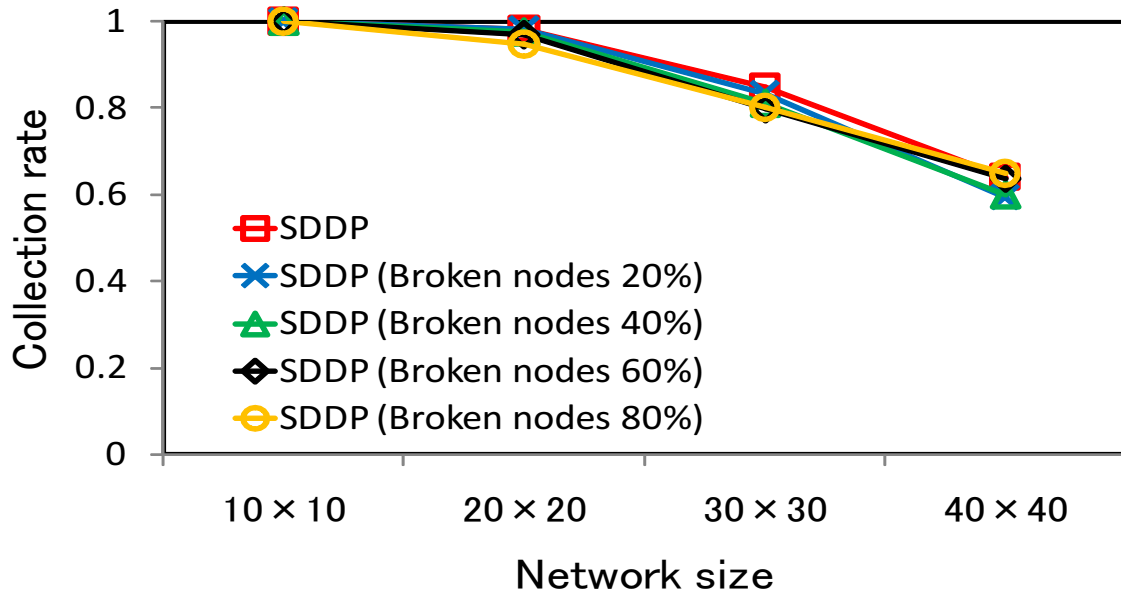
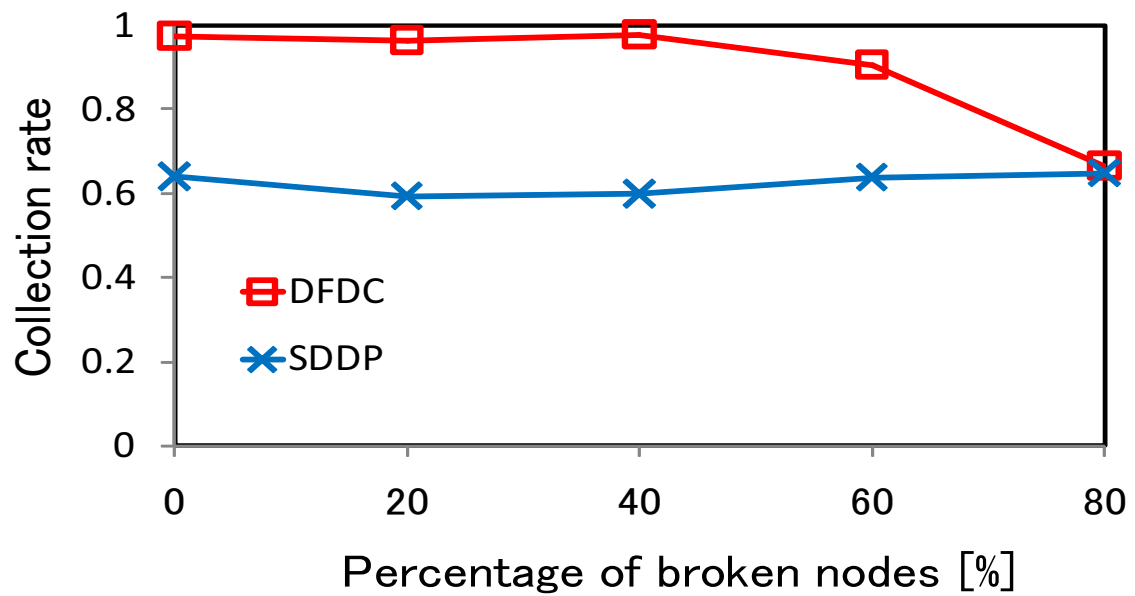


図 4.11 障害が生じるセンサノードが中央である場合の収集率 (SDDP)

図 4.12 障害が生じるセンサノード中央である場合の収集率 ($M = 40$, DFDC と SDDP の比較)

4.2.4.2 障害が生じるセンサノードがランダムである場合

図 4.13 に障害が生じるセンサノードがランダムである場合の DFDC の収集率を，図 4.14 に SDDP の収集率を，図 4.15 に $M = 40$ のときの DFDC と SDDP との比較した結果を示す．4.2.4.1 と同様に，シミュレーション結果から SDDP ではセンサノードに障害が生じてても，安定したデータの収集率を得られたが，DFDC では障害が生じるセンサノード数が多くなるにつれて，データの収集率が低下したことが分かる．これは，DFDC が位置情報を用いており，多くのセンサノードに障害が生じると Directional Flooding ができなくなることに起因する．しかし，ネットワーク全体のセンサノード数に対して障害が生じたセンサノード数の割合が 80% までは SDDP より DFDC の収集率の方が高い．

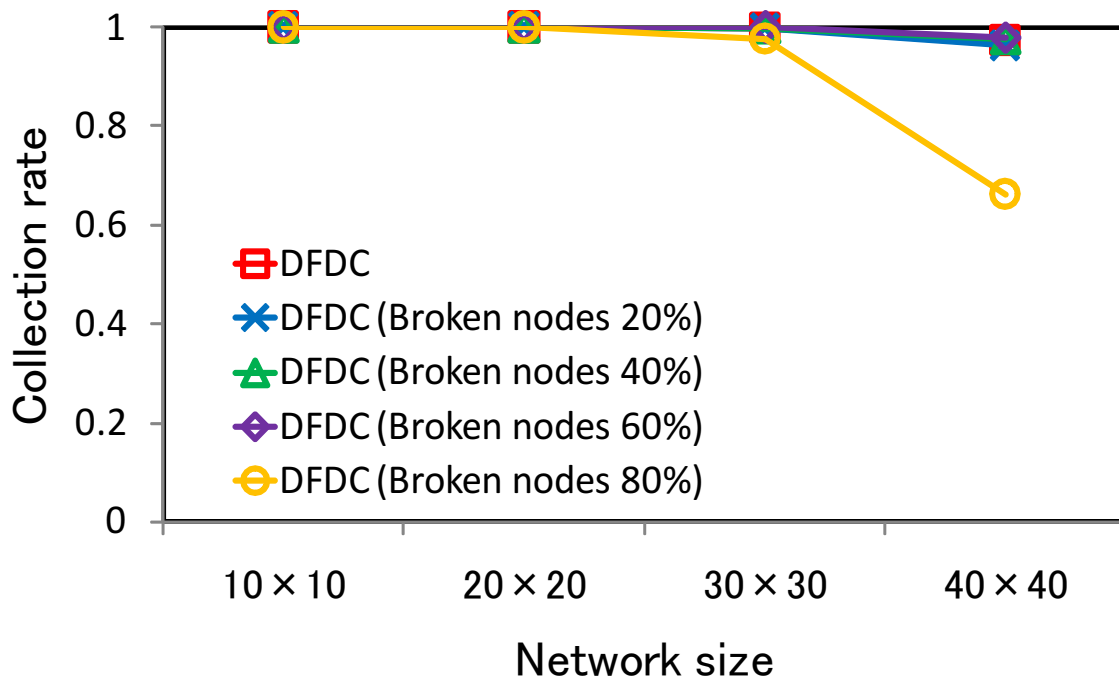


図 4.13 障害が生じるセンサノードがランダムである場合の収集率 (DFDC)

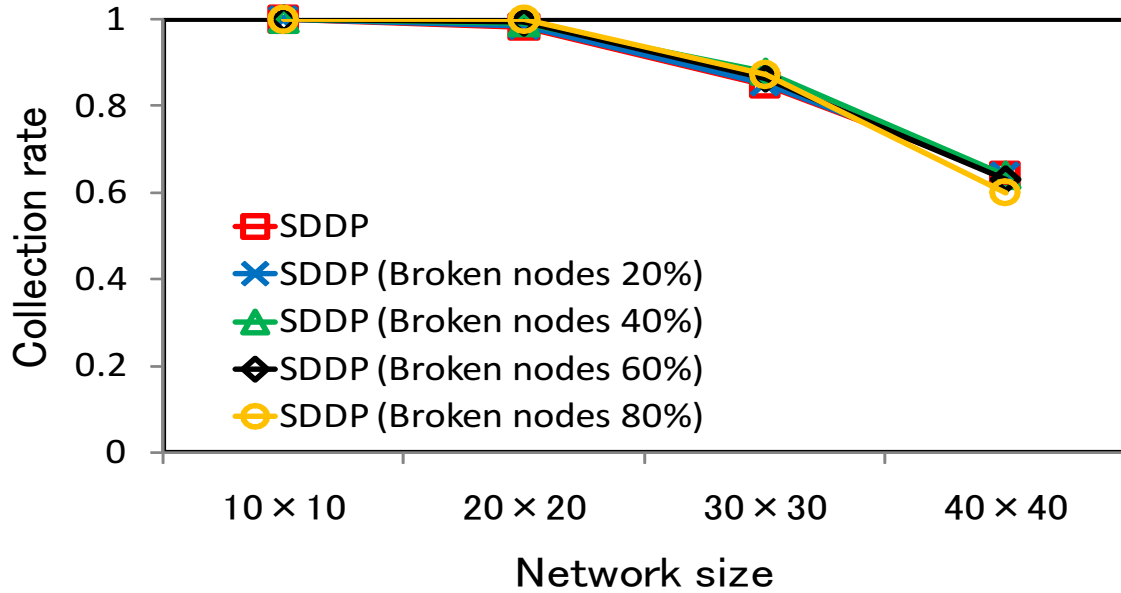
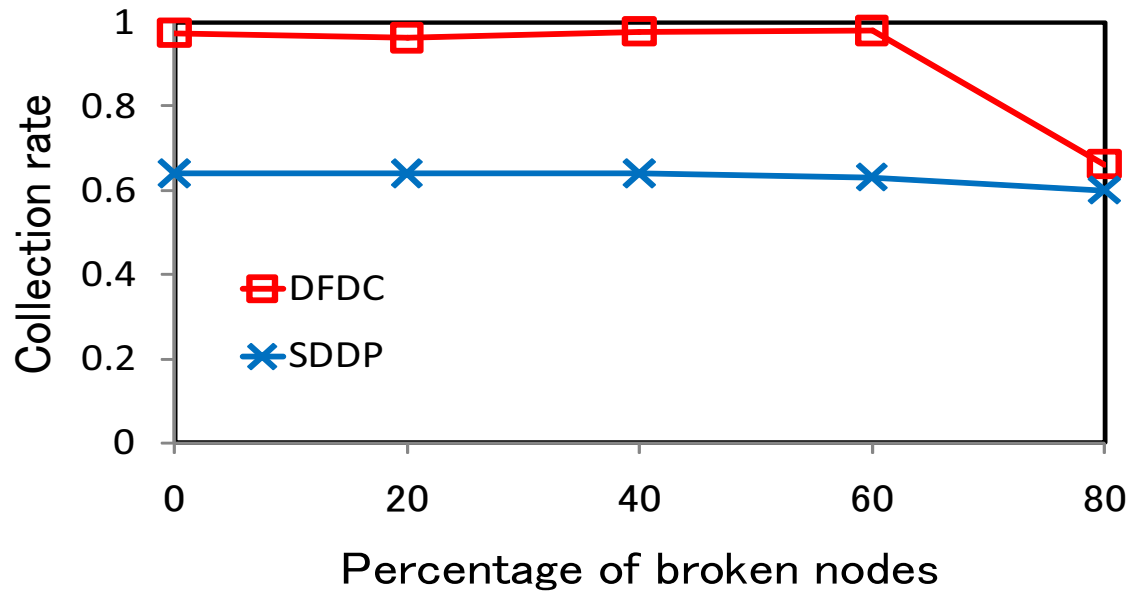


図 4.14 障害が生じるセンサノードがランダムである場合の収集率 (SDDP)

図 4.15 障害が生じるセンサノードがランダムである場合の収集率 ($M = 40$, DFDC と SDDP の比較)

4.2.5 電力の状態が変化する場合

図 4.16 に電力の状態が変化する場合のシミュレーション結果を示す．電力の状態の変化を表すのに， t_{sleep} を 1 秒，5 秒，10 秒とした．このとき， t_{active} は 1 秒とした．また，センサノードの配置は格子状とし，その 1 つの隅がシンクノードとした．

図 4.16 から分かるように，電力の状態が良かったとき，必要なスリープ時間が短くなり，より多くの通信を行うことができたので，高い収集率を得られた．DFDC におけるセンサノード数が 6,400 台で t_{sleep} が 1 秒のときの収集率は， t_{sleep} が 5 秒のときの約 1.2 倍， t_{sleep} が 10 秒のときの約 1.5 倍となった．また DFDC と SDDP を比較した結果，センサノード数が 6,400 台で t_{sleep} が 1 秒のとき，DFDC は SDDP の約 2.4 倍， t_{sleep} が 5 秒のとき，DFDC は SDDP の約 3.2 倍であることが分かる．

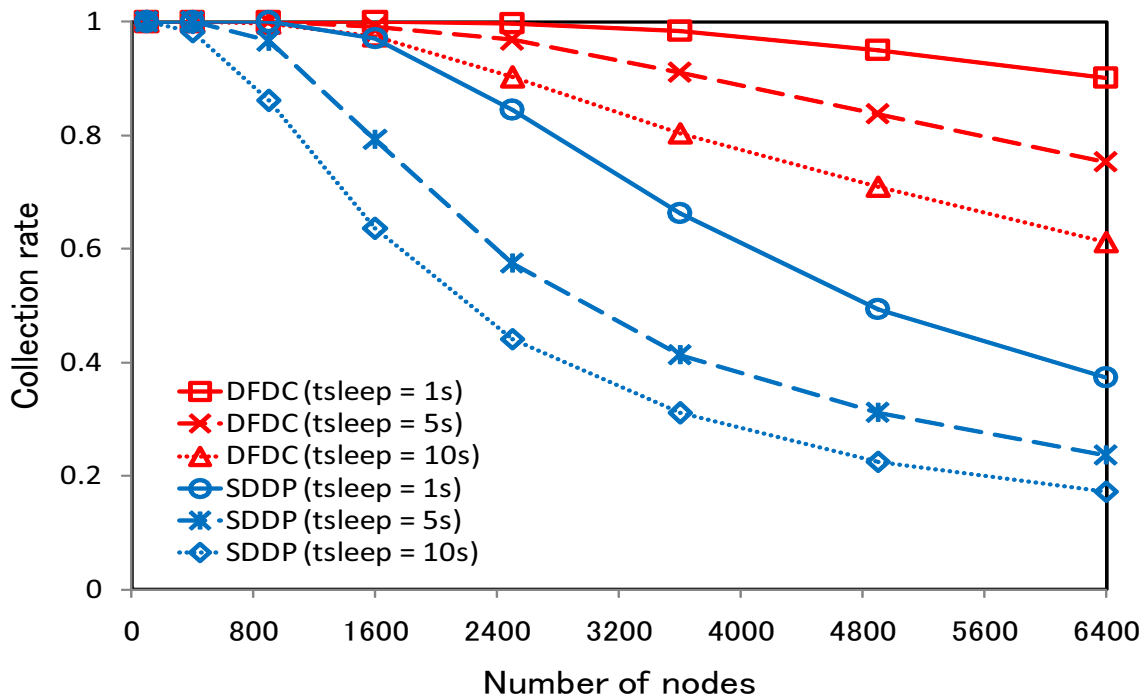


図 4.16 電力の状態が変化する場合の収集率

4.2.6 シンクノードの配置が中央にある場合

図 4.17 にシンクノードの配置が中央にある場合のシミュレーション結果を示す．このとき，センサノードの配置は格子状とし， t_{active} は 1 秒， t_{sleep} は 10 秒とした．図 4.17 から分かるように，シンクノードの配置が中央にある場合はシンクノードの配置が隅にある場合より高い収集率を得られた．DFDC においてセンサノード数が 10,000 台のときの収集率は，シンクノードの位置が隅にある場合に比べて約 1.8 倍となった．また同じくシンクノードを中央に配置した SDDP に比べて約 2.2 倍であることが分かる．シンクノードを中央に配置することにより，シンクノードが隅にある場合に比べて，シンクノードまでの距離が元々長いセンサノードの距離は短くなり，シンクノードにより素早くセンサノードを配送することができる．

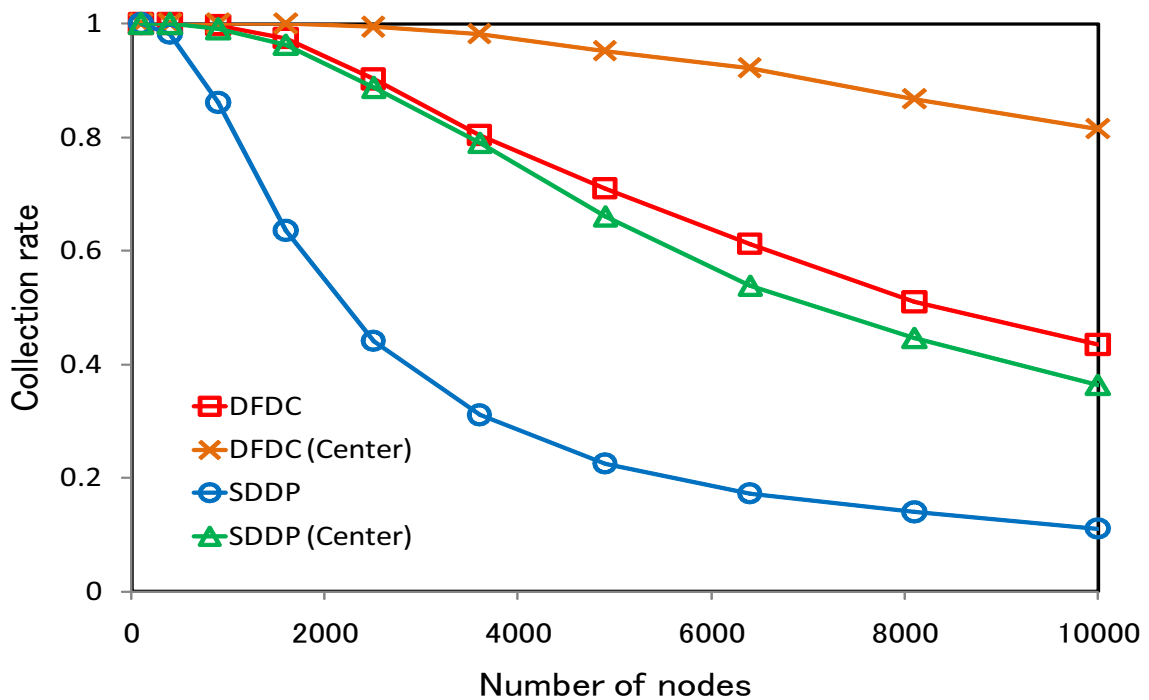


図 4.17 シンクノードの配置が中央にある場合の収集率

4.2.7 シンクノードが複数ある場合

シンクノードを複数用意したときの収集率を測定した。このとき、センサノードの配置は格子状とし、 t_{active} は 1 秒、 t_{sleep} は 10 秒とした。

4.2.7.1 シンクノード数が 4 つ (偶 4 つ) ある場合

図 4.18 にシンクノード数は 4 台とし、全てを隅に配置する場合のシミュレーション結果を示す。図 4.18 から分かるように、DFDC においてセンサノード数が 10,000 台のときの収集率は、シンクノード数が 1 台の場合に比べて約 2 倍となった。また、同じくシンクノードを 4 台と用意した SDDP に比べても約 2 倍であることが分かる。シンクノードを複数用意することによって、各センサノードは自センサノードから最も距離が近いシンクノードに配送すれば良いため、より素早くセンサデータを配送することができる。

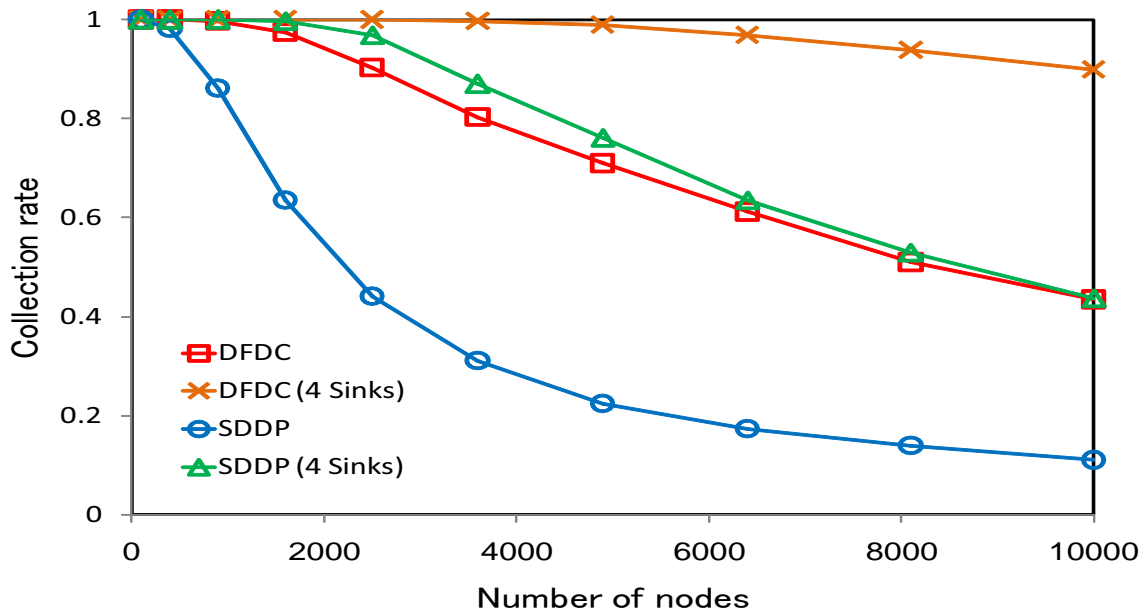


図 4.18 シンクノード数が 4 つある場合の収集率

4.2.7.2 シンクノード数が5つ（隅4つ，中央1つ）ある場合

図 4.19 にシンクノード数は5台とし，その中の4台を隅に，残りの1台を中央に配置する場合のシミュレーション結果を示す．図 4.19 から分かるように，DFDC においてセンサノード数が10,000 台のときの収集率は，シンクノード数が1 台の場合に比べて約2.2 倍となった．また，同じくシンクノードを5 台と用意したSDDP に比べて約1.4 倍であることが分かる．シンクノードを複数用意することによって，各センサノードは自センサノードから最も距離が近いシンクノードに配送すれば良いため，より素早くセンサデータを配送することができる．

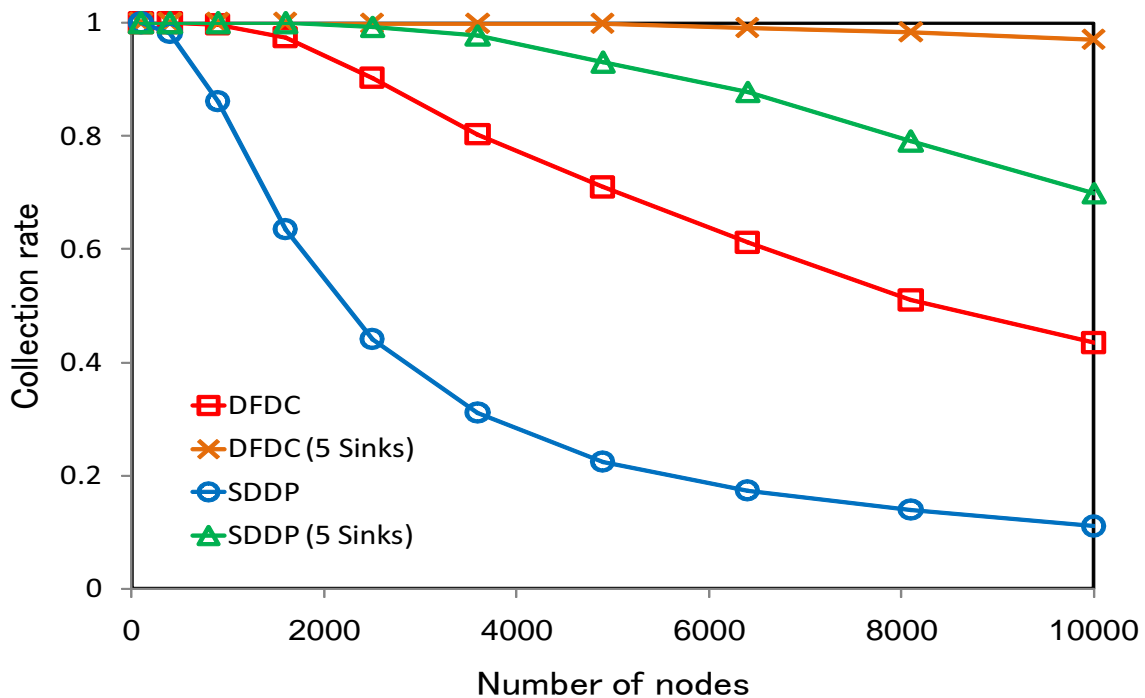


図 4.19 シンクノード数が5 台ある場合の収集率

4.3 実装評価

本節では，省資源性の評価およびシミュレーションの妥当性を検証するために，DFDC と SDDP を PAVENET モジュール [10]（図 4.20 参照）に実装し，比較を行った．

4.3.1 省資源性の評価

DFDC と SDDP を PAVENET モジュール上に実装し，省資源性の評価を行なった．SDDP と DFDC を実装した際にはバッファのサイズを 10 とした．表 4.2 に DFDC と SDDP が利用したメモリの容量を示す．SDDP が用いたデータメモリサイズは 56 バイトで，プログラムメモリサイズは 1420 バイトである．一方，DFDC が用いたデータメモリサイズは 117 バイトで，プログラムメモリサイズは 4750 バイトである．参考として，PAVENET に用いられる PIC18F4620（図 4.21 参照）はデータメモリサイズが 4,096



図 4.20 PAVENET モジュール

表 4.2 DFDC と SDDP が利用したメモリの容量

	データメモリ [B]	プログラムメモリ [B]
SDDP	56	1420
DFDC	117	4750
PIC18F4620(参考)	4096	65536

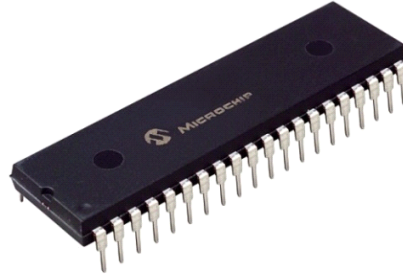


図 4.21 PIC18F4620

バイトで，プログラムメモリサイズが 65,536 バイトである．表 4.2 から，SDDP より DFDC の方がメモリを多く利用することが分かる．これは，位置情報の追加やパケットのライフタイムの設定などの第 3 章で述べた各操作の追加があり，プログラムがより複雑になることに起因する．しかし，PAVENET モジュールで用いられる PIC18F4620 のメモリの容量から見ると，遥かに小さい．

4.3.2 実環境での評価

シミュレーションの妥当性を検証するために，PAVENET モジュール 100 台を用いて実装した DFDC の実験結果と SDDP の実験結果の比較を行った．具体的には，隣接センサノード間の距離 D は 10cm から 60cm に 10cm ずつ増やしたとき，時間の経過に対するデータの収集率を測定した．ここではデータの収集率を「ネットワーク中の全センサノードのうち，シンクノードが少なくとも 1 つ以上のデータを受信したセンサノードの割合」と定義する．

表 4.3 に実験パラメータを示す．実験では，センサノードの配置は図 4.22 のように 10×10 の格子状とし，その 1 つの隅がデータを収集するシンクノードとした．バッファのサイズは 10， t_{active} は 1 秒， t_{sleep} は雲天時を想定して 10 秒とした．また，DFDC における $d_{threshold}$ は 20cm， $t_{lifetime}$ は $t_{lifetime} = 44 \times d_n / 100$ [秒] とした．ここで d_n [cm] はセンサノードからシンクノードまでの距離を表す．センサノードの最も安定した通信距離は図 4.23 に示す．図 4.24 に実験の様子を示す．

表 4.3 実験パラメータ

センサノードの配置	格子
ネットワークの大きさ : M	10
隣接センサノード間の距離 : D	10, 20, 30, 40, 50, 60 [cm]
バッファのサイズ	10
t_{active}	1 [秒]
t_{sleep}	10 [秒]
c	44
$d_{threshold}$	20 [cm]

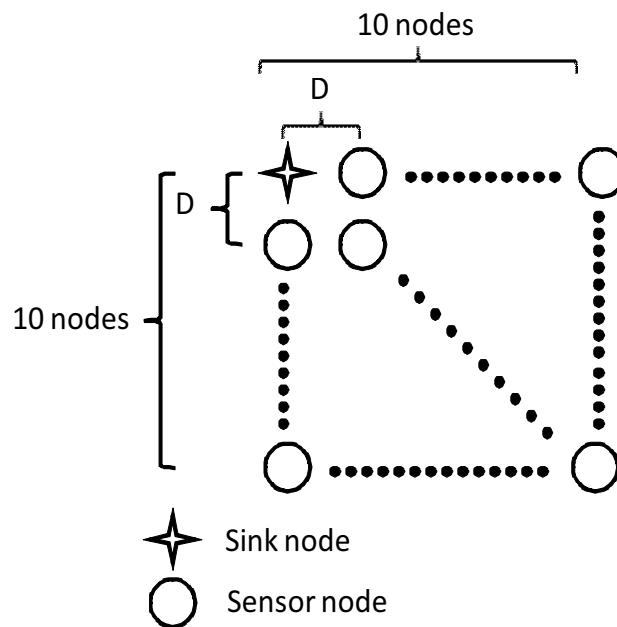


図 4.22 センサノードの配置

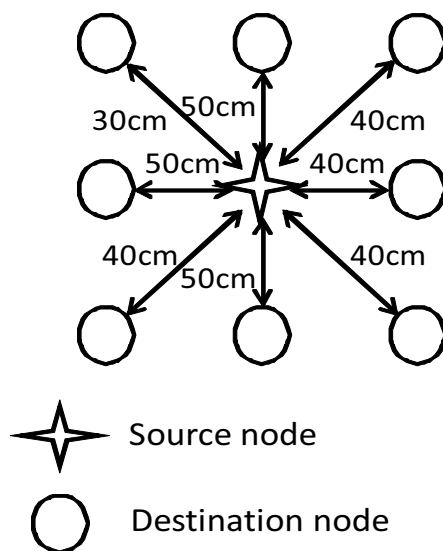


図 4.23 センサノードの最も安定した通信範囲

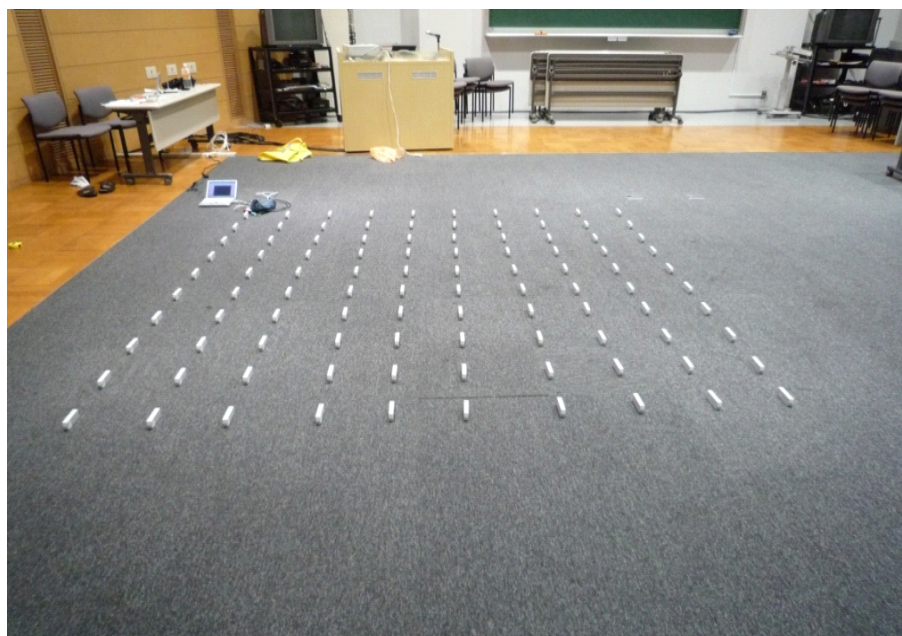


図 4.24 実験の様子

図 4.25 に $D = 20\text{cm}$, 40cm , 60cm を, 図 4.26 に $D = 10\text{cm}$, 30cm , 50cm のときの DFDC と SDDP の実験結果を示す. 図 4.25 と図 4.26 から分かるように, どの隣接センサノード間の距離においても DFDC の方が SDDP よりも高いデータ収集率が得られた. 図 4.27 に $D = 50\text{cm}$ のときの DFDC と SDDP の実験結果と, シミュレーション結果の比較を示す. 図 4.27 から分かるように, 実験とシミュレーション結果は共に DFDC の方が SDDP よりも高いデータ収集率が得られた.

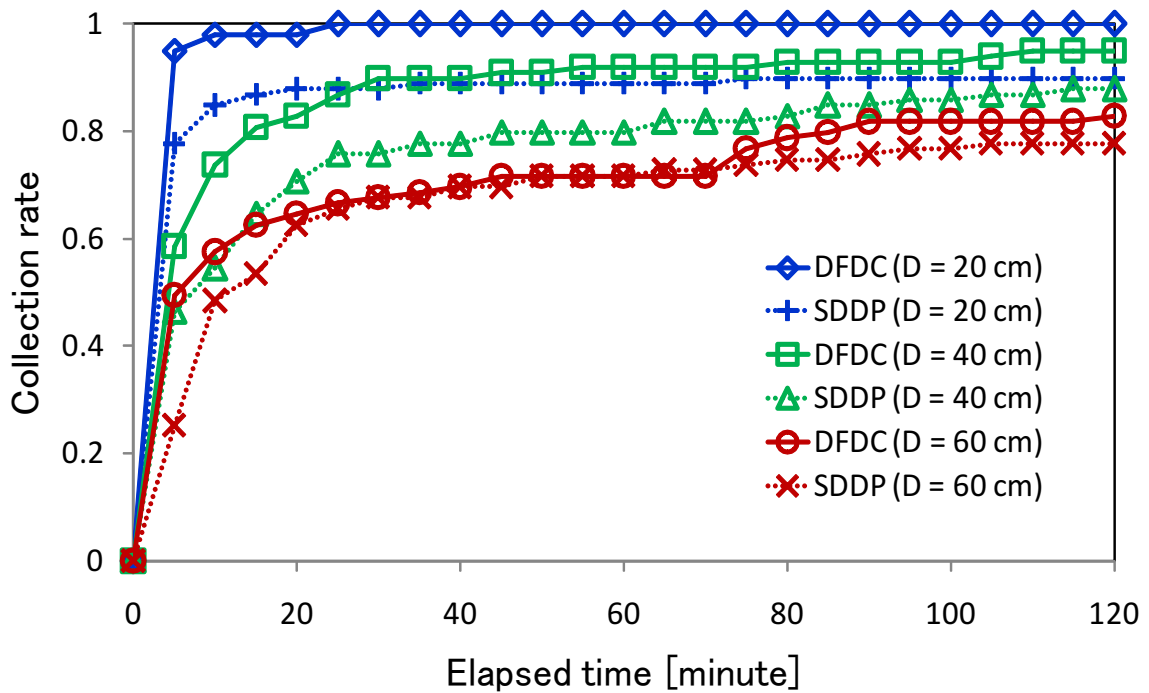
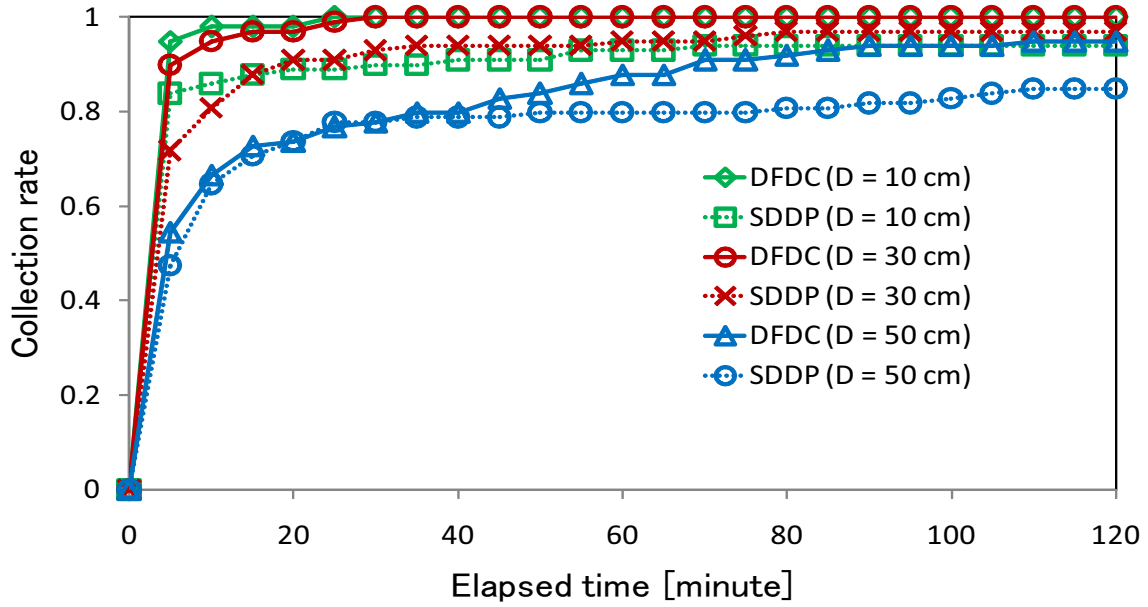
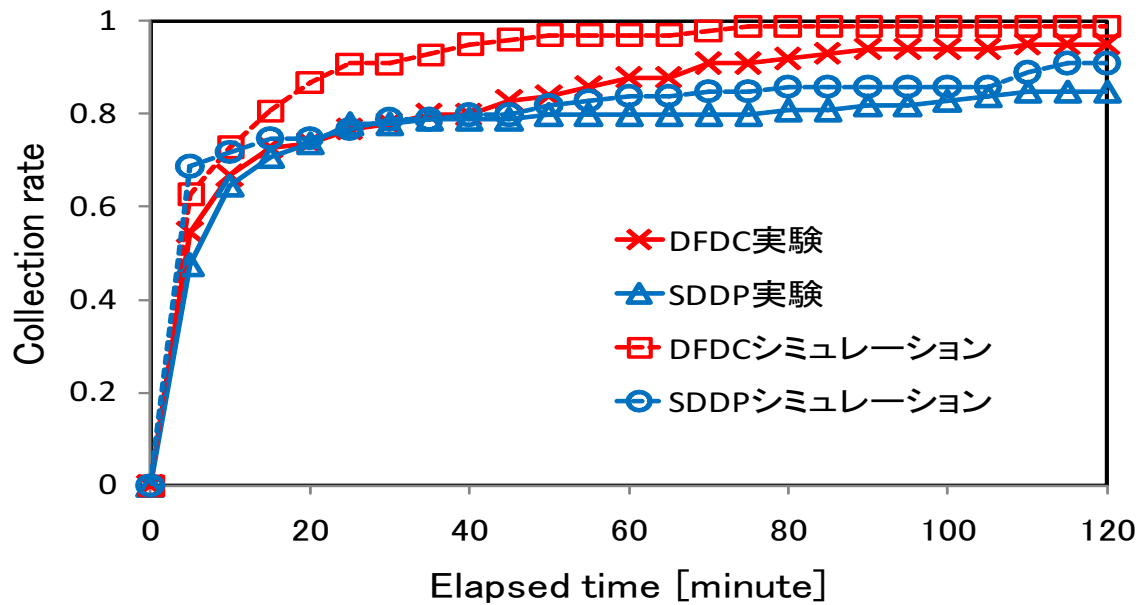


図 4.25 実験結果 ($D = 20\text{cm}$, 40cm , 60cm)

図 4.26 実験結果 ($D = 10\text{ cm}$, 30 cm , 50 cm)図 4.27 実験結果とシミュレーション結果との比較 ($D = 50\text{ cm}$)

4.4 おわりに

本章では，前章までで述べた DFDC と SDDP を PAVENET[10] モジュールとシミュレータ上に実装し，評価を行なった．シミュレーションによる評価の結果，DFDC は SDDP に比べて最大 4 倍の効率でデータを収集できることが示された．また，実装による評価の結果からも，DFDC の方が SDDP よりも高いデータ収集率を得られることが示された．

第 5 章

結論

5.1 本研究の主たる成果

本論文では、バッテリーレス無線センサネットワーク向けの既存のデータ収集プロトコルである Simple Data Dissemination Protocol (SDDP) のセンサデータが迂回路と小刻み経路に分類できた冗長な経路で配送されることによるデータ収集の非効率性という問題に対し、あらかじめセンサノードに設定された位置情報を利用してデータの送信方向を指定可能なフラッディングを利用することで効率的なデータ収集を行う Directional Flooding for Data Collection (DFDC) を提案し、シミュレーション評価および実装評価によってその有効性を示した。

DFDC では SDDP における冗長な経路の問題に対し、以下の 3 つの操作を追加した。1 つ目の操作は、迂回路に対して各センサノードはパケットが迂回していると判断した場合に、パケットを破棄し、経路方向を限定する処理を行なった。2 つ目の操作は、小刻み経路に対して受信不可能な距離の閾値を設定し、それぞれのセンサノードで近くにあるセンサノードからのパケットを破棄する処理を行った。3 つ目の操作は、各センサノードは自分のセンシングしたセンサデータをフラッディングする直前に、パケットに対してシンクノードへの距離に応じてライフタイムを設定し、長い経路を経たと想定されるパケットを破棄する処理も行なった。これらの 3 つの操作を追加することで効率的なデータ収集を実現した。特に、ネットワークの規模が大きい場所において SDDP ではあまり収集できなかったシンクノードから遠いセンサノードからのセンサデータが効率的に配送できた。

シミュレーション評価では、DFDC は SDDP と比べて最大 4 倍、Simple Flooding と比べて最大 10.4 倍、Directed Diffusion と比べて最大 30.1 倍の効率でデータを収集することが示された。シンクノードを中央に配置することや、シンクノードを複数用意することにより、DFDC の収集率をさらに向上させることができた。また、シミュレーション結果から DFDC はセンサノードの配置をランダムにしても、格子状の配置の結果とほぼ一致し、影響を受けないということが分かる。しかし、DFDC はセンサノードの障害率に従い、収集率が低下した。これは、DFDC が位置情報を用いており、多くのセンサノードに障害が生じると Directional Flooding ができなくなることに起因する。

実装評価では、省資源性の評価を行なった。評価した結果、SDDP より DFDC の方がメモリを多く利用することが分かる。これは、位置情報の追加やパケットのライフタイムの設定などの前述した各操作の追加があったため、プログラムが複雑になることに起因する。しかし、PAVENET モジュールで用いられる PIC18F4620 のメモリの容量から見ると、遥かに小さい。また、PAVENET モジュール 100 台を用いて実装した DFDC と

SDDP の実験結果と、シミュレーションの結果の比較を行なった。比較した結果、実験とシミュレーションの結果は共に DFDC の方が SDDP よりも高いデータ収集率が得られた。

以上より、DFDC は省資源で実装可能であり、効率的なデータの収集を行なうことができること示した。

5.2 今後の課題

本研究では、シミュレーション評価および実装評価によって DFDC が効率的なデータ収集を行うことができることを示した。今後は、実アプリケーションへ展開し、性能を評価する必要がある。また、様々な機能拡張をすることによって、さらに効率化を図ることができると考えられる。電波時計による時刻同期 [27] を利用した機能拡張を検討していきたい。

■ 謝辞

本研究を進めていく過程で適切かつ有益なご指導・ご鞭撻を頂き、様々な知識や研究生活に対する心構えをご教示くださり、様々な悩みに真剣にご相談に乗って頂きました森川博之教授、南 正輝准教授に深く感謝いたします。特任講師の今泉 英明さんには私が修士課程1年で光グループに所属した際、様々な形でサポートして頂きました。ここに深く感謝いたします。助教の猿渡 俊介さんは時間を割き、本研究のすべての面において様々な助言をくださり、ご協力してくださいました。さらに、猿渡 俊介助教には研究への姿勢、日本人の考え方などを教えて頂きました。頑張り続けることや組織を優先させることの重要性などについて教えてくださいました。ここに深く感謝の意を述べたいと思います。また、円滑な研究生活を行なえるように環境の整備及び購入物品における事務処理に尽力してくださった秘書の川北 敦子さん、石崎 智子さんに感謝いたします。

本研究を進めていく上でアドバイスをして頂くとともに、研究室での過ごし方においてご指導頂きました博士課程3年の鈴木 誠さんに深く感謝いたします。本研究の先駆者である博士課程3年の森戸 貴さんには様々な助言を頂き、深く感謝いたします。修士課程1年の高木 潤一郎君には論文や研究に関する助言を頂き、深く感謝いたします。本研究室を昨年卒業された千家 雅之さん、高木 衛さん、町田 啓太さんには研究に関する助言や励ましを頂き、また進路に関する相談にも乗って頂きました。深く感謝いたします。そして、他の博士課程の先輩方、修士課程1年生、卒論生には研究を進めていく上で様々な形でのお世話になりました。深く感謝いたします。

修士2年間を同期として苦楽を共にした、大原 壮太郎君、林 敏樹君、西村 亨輔君、シトルス ティモティ ラウレンス君、パンジャイタン フェルナンド君、グエン フィレーさん、李 慧さん、大変お世話になりました。大原 壮太郎君には本研究や研究室での過ごし方に関する助言を頂き、進路に関する相談にも乗って頂き、また励ましてくださるために飲み会などを企画してくださったこと、深く感謝いたします。林 敏樹君と西村 亨輔君には研究室での日常生活において様々な形で大変お世話になり、また進路に関する相談にも乗って頂き、深く感謝いたします。シトルス ティモティ ラウレンス君とパンジャイタン フェルナンド君には日頃から励ましを頂き、深く感謝いたします。グエン フィレーさん

と李 慧さんには日常生活において大変お世話になりました，深く感謝いたします．良い同期に恵まれたおかげで 2 年間を乗り切ることができました．今後別々の道へと歩みだすこととなりますが，お互いに頑張りましょう．そして，これからもどうぞ宜しくお願いいたします．

森川研究室で過ごした 2 年間は非常に忙しく厳しいものではありませんでしたが，人間としても成長でき，充実した 2 年間を過ごせました．森川研究室の皆様にご心より感謝いたします．

最後に両親と家族をはじめとし，今まで支えてくれた多くの方々に深い感謝の意を述べたいと思います．

皆様，本当にありがとうございました．

平成 22 年 2 月 9 日

参考文献

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “A Survey on Sensor Networks”, *Communications Magazine, IEEE*, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, 2002.
- [2] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, “Versatile Low Power Media Access For Wireless Sensor Networks”, *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Nov. 2004.
- [3] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, “An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks”, *Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2002)*, vol. 3, pp. 1567-1576, 2002.
- [4] T. Van Dam and K. Langendoen, “An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks”, *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, ACM Press, New York, NY, USA*, pp. 171-180, 2003.
- [5] D. B. Johnson and D. A. Maltz, “Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks”, *Kluwer International Series in Engineering and Computer Science*, pp. 153-179, 1996.
- [6] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, “Directed Diffusion : A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks”, *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking ACM, New York, NY, USA*, pp. 56-67, 2000.
- [7] C. E. Perkins and E. M. Royer, “Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing”, *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA)*, pp. 90-100, 1999.
- [8] A. Woo, T. Tong, and D. Culler, “Taming the Underlying Challenges of Reliable Multihop Routing in Sensor Networks”, *The 2003 ACM SIGMOBILE Interna-*

- tional Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003)*, Los Angeles, CA, USA, pp. 14-27, 5-7 November 2003.
- [9] 森戸貴, 猿渡俊介, 南正輝, 森川博之, “バッテリーレス無線センサネットワークにおけるデータ収集プロトコルの設計と評価”, 電子情報通信学会技術研究報告, 情報ネットワーク研究会, IN2008-157, Mar. 2009.
 - [10] S. Saruwatari, T. Kashima, M. Minami, H. Morikawa, and T. Aoyama, “PAVENET : A Hardware and Software Framework for Wireless Sensor Networks”, *Transaction of the Society of Instrument and Control Engineers*, vol. E-S-1, no. 1, pp. 74-84, 2005.
 - [11] Y. Ammar, A. Buhrig, M. Marzencki, B. Charlot, S. Basrour, K. Matou, and M. Renaudin, “Wireless Sensor Network Node with Asynchronous Architecture and Vibration Harvesting Micro Power Generator”, *Proceedings of the 2005 Joint Conference on Smart Objects and Ambient Intelligent : Innovative Context-Aware Services : Usages and Technologies*, pp. 287-292, 2005.
 - [12] J. Paradiso and T. Starner, “Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics”, *Pervasive Computing, IEEE*, vol. 4, no. 1, pp. 18-27, 2005.
 - [13] P. D. Mitcheson, T. C. Green, E. M. Yeatman, and A. S. Holmes, “Architecture for Vibration-Driven Micro Power Generator”, *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 13, no. 3, page 429, 2004.
 - [14] M. Minami, T. Morito, H. Morikawa, and T. Aoyama, “Solar Biscuit : A Battery-less Wireless Sensor Network System for Environmental Monitoring Applications”, *Proceedings of the 2nd International Workshop on Networked Sensing Systems (INSS 2005)*, San Diego, CA, USA, June 2005.
 - [15] A. Burke, “Ultracapacitors: Why, how, and where is the technology”, *Journal of Power Sources*, vol. 91, no. 1, pp. 37-50, 2000.
 - [16] P. Levis, N. Patel, D. Culler, and S. Shenker “Trickle: A Self-Regulating Algorithm for Code Propagation and Maintenance in Wireless Sensor Networks”, *Proceedings of the First Symposium on Networked Systems Design and Implementation*, San Francisco, CA, USA, 2004.
 - [17] J. W. Hui and D. Culler “The Dynamic Behavior of a Data Dissemination Protocol for Network Programming at Scale”, *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, 2004.
 - [18] F. Stann, J. Heidemann, R. Shroff, and M. Z. Murtaza “RBP: Robust Broad-

- cast Propagation in Wireless Networks”, *Proceedings of the 4nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Boulder, Colorado, USA, 2006*.
- [19] P. Kyasanur, R. R. Choudhury, and I. Gupta “Smart Gossip: An Adaptive Gossip-based Broadcasting Service for Sensor Networks”, *IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems*, 2006.
 - [20] Shuo Guo, Yu Gu, Bo Jiang and Tian He “Opportunistic Flooding in Low-Duty-Cycle Wireless Sensor Networks with Unreliable Links”, *The 15th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2009.
 - [21] X. Chen, M. Faloutsos, and S. Krishnamurthy “Power Adaptive Broadcasting with Local Information in Ad Hoc Networks”, *11th IEEE International Conference on Network Protocols, Atlanta, Georgia, USA, 2003*.
 - [22] Jiakang Lu and Kamin Whitehouse “Flash Flooding: Exploiting the Capture Effect for Rapid Flooding in Wireless Sensor Networks”, *The 28th Conference on Computer Communications (INFOCOM 2009)*, Apr. 2009.
 - [23] M. J. Miller, C. Sengul, and I. Gupta “Exploring the Energy-Latency Trade-Off for Broadcasts in Energy-Saving Sensor Networks”, *25th International Conference on Distributed Computing Systems, Columbus, OH, USA, 2005*.
 - [24] A. Varga, “The OMNeT++ Discrete Event Simulation System”, *Proceedings of the European Simulation Multiconference (ESM 2001)*, pp. 319-324, 2001.
 - [25] M. Zuniga and B. Krishnamachari, “Analyzing the Transitional Region in Low Power Wireless Links”, *First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, IEEE SECON 2004*, pp. 517-526, 2004.
 - [26] A. Boulis, “Castalia : A Simulator for Wireless Sensor Networks”, <http://castalia.npc.nicta.com.au/>
 - [27] 渡辺貴文, 森戸貴, 南正輝, 森川博之, “電波時計を用いた同期型バッテリーレス無線センサネットワークの設計と実装”, 情報処理学会研究報告, *MBL, Vol. 2007, no. 44*, pp. 113-118, 20070517, 2007.

■ 発表文献

- [1] デラジャット エコ リアント，猿渡俊介，森戸貴，南正輝，森川博之．バッテリーレス WSN における位置情報を用いたデータ収集プロトコルの評価．電子情報通信学会総合大会，Mar. 2010，投稿済