

修士論文

無線電力伝送を用いた 無線センサネットワークのための ネットワーク構造とクラスタリング手法 に関する研究

令和3年度修了

三重大学大学院工学研究科

電気電子工学専攻

通信工学研究室

原口 和久

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 論文構成.....	3
第2章 無線センサネットワーク(WSN)における長寿命化技術.....	5
2.1 省電力化技術.....	5
2.1.1 デューティサイクル動作.....	5
2.1.2 クラスタ型 WSN.....	6
2.1.3 クラスタリング技術.....	7
2.2 無線電力伝送(Wireless Power Transfer)技術.....	12
2.2.1 WPT の原理.....	12
2.2.2 WSN への WPT 適用とその課題.....	13
2.2.3 WP-WSN に残る課題.....	14
第3章 無線電力伝送を考慮したネットワーク構造とクラスタリング手法.....	15
3.1 無線電力伝送装置の交替動作機構を導入したネットワーク構造.....	15
3.1.1 HAP と HCH 交替動作の導入.....	15
3.1.2 提案ネットワーク構造における必要検討事項.....	16
3.2 残余電力量を考慮したクラスタリング手法.....	16
3.2.1 HCH 選出基準.....	17
3.2.2 考慮対象 SN 範囲.....	18
第4章 特性評価モデル.....	22
4.1 ネットワークモデル.....	22
4.2 フレーム構造.....	23
4.3 伝搬モデル.....	24
4.4 トラヒックモデル.....	24
4.5 通信モデル.....	24

4.6 無線電力伝送モデル.....	25
4.7 消費電力モデル.....	26
第5章 特性評価.....	29
5.1 シミュレーション諸元.....	29
5.2 評価指標.....	30
5.3 提案ネットワーク構造の性能評価.....	32
5.4 提案システムの性能評価.....	41
5.4.1 制御パラメータの最適化.....	41
5.4.2 提案クラスタリング手法の性能評価.....	44
第6章 まとめ.....	53
参考文献.....	56
謝辞.....	59
研究業績.....	60

第1章 序論

1.1 研究背景

近年，集積回路(Integrated Circuit, IC)の高集積化などによる小型センサやスマートフォンなどの電子機器の機能・性能の発展や 5G(第五世代移動通信システム)に代表される無線通信技術の発展によって，様々な場所・分野で IoT(Internet of Things)化[1]が進んでいる．例えば，スマートハウスや自動運転システム，そしてファクトリーオートメーション(FA)や遠隔医療(診断・治療)など様々である．このような IoT は，ユーザーが必要とするデータを収集するネットワークと収集したデータをユーザーへ届けるためのインターネットで形成されることが多く，このデータ収集型のネットワークとして無線センサネットワーク(Wireless Sensor Networks, WSNs)が注目されている．

WSN は，光量や温度などの環境情報を収集するセンシング機能とそのセンシングデータを中継器等に送信する無線通信機能の両方を併せ持つセンサノード(Sensor Node, SN)と，これら SN からの情報を集約するシンクノード(Sink Node, SINK)によって構成されるネットワークである．WSN は，一般に SN が低価格であることとケーブルなど配線の必要がないことなどから容易に構築でき，現在では様々な利用がなされている．例としては，圧力センサの気圧情報から異常気象を検出するもの[2]や水田に SN を配置し水位や水温をモニタリングして水稻の収穫量を増加させる[3]など自然環境情報収集型の WSN などがある．また他にも医療の分野では，体内センサを用いて生理信号をモニタリングする BAN(Body Area Network)[4]や建築分野では橋や高層ビルなどの基盤劣化のモニタリングを行う構造ヘルスマニタリング(Structural Health Monitoring, SHM)[5]，さらに軍事の分野では侵入検知[6]で使用されるなど多種多様な利用がなされている．

進む IoT 化の中で，今後も様々な形態の WSN が必要になると考えられるが，基本的に WSN を構成する SN は小型で容量の限られたバッテリーで駆動しているため，SN のバッテリー寿命が WSN のネットワーク寿命に大きく制約してしまう恐れがある．実際に SN のバッテリーの電力が枯渇すると，バッテリー交換などのメンテナンスを行う必要があり，時間的なコスト，さらには交換するためのバッテリーやそれを交換するための人的なコストなどが必要であり，ユーザーが求めるサービスを維持・提供するのが困難になる．そのため，WSN ではバッテリーの電力枯渇を回避してネットワーク寿命を延ばす目的で，消費電力を軽減する省電力化技術[7]-[12]や SN の残余電力を回復させる電力ハーベスティング技術[14]-[20]が研究されている．

省電力化技術には，デューティサイクル動作[7]やクラスタ型ネットワークの導入

[8], [9]などがある。デューティサイクル動作ではSNが周辺のSNとの通信やセンシングを行わないスリープ期間を設定して、通信動作期間を減少させて消費電力を軽減する。クラスタ型ネットワークでは、SN群を複数のクラスタと呼ばれるグループに分割し、クラスタの代表者であるクラスタヘッド(Cluster Head, CH)を選出し、CHがクラスタ内のSNのセンシングデータを中継することで多くのSNの伝送距離短縮に伴う省電力化を図る。ただし、クラスタ型ネットワークではCHが自身の送信データに加えて配下のSNのデータを送信する必要があり、CHに電力負荷が集中する課題が存在する。そこでクラスタ型WSNでは、クラスタリング技術[10], [11], [12]を適用し、一定周期でCHを交替させてCHの負荷を全SNに分散させて電力負荷を均等化することでネットワークの長寿命化を実現する。

一方で、電力ハーベスティング技術には太陽光や地熱、風などの再生可能エネルギーから発電する環境発電技術[14], [15]や無線信号から電力を獲得する無線電力伝送(Wireless Power Transfer, WPT)技術[16], [17]などが存在する。電力ハーベスティング技術は省電力化技術とは異なりSNのバッテリーの残余電力を回復できることから、さらなるネットワークの長寿命化が期待される。環境発電技術を用いるWSNでは、SNに環境発電機能を持たしてSN自身が発電することで長時間駆動を可能にして、ネットワークの長寿命化を実現する。しかし、環境発電により得られる電力量は比較的小さく、天候などの自然環境に強く依存しているため不安定である。そこで本研究では、自然環境に依存せず、無線で安定的にSNへ電力を供給出来るとされるWPTに注目する。WPTではSNが無線信号から電力を得る変換回路を持ち、WPT装置からの無線信号より電力を獲得することで長時間駆動を可能にしてネットワークの長寿命化を実現する。WPTは環境発電とは異なり、電力源が自然環境ではなくWPT装置からの無線信号であるため、SNは安定して電力を獲得できる。ただし、無線信号は伝搬距離により減衰するため、WPTによってSNが獲得出来る電力量もWPT装置とSN間の伝送距離に大きく依存する。

WPT機能を備えた無線センサネットワークWP-WSN(Wireless Powered-WSN)では、点在するSNのうちWPT装置近傍のSNは大きな電力を獲得できバッテリーの残余電力を十分に回復することによって長時間駆動が可能となる。一方で、WPT装置遠方のSNでは小さい電力しか獲得できず、十分に残余電力を回復できずに電力枯渇が頻繁に発生してセンシングや通信動作に悪影響を与える恐れがある。そのためWP-WSNでは、WPT装置遠方のSNにおける受電量を増加させるために、WPTの送信電力の制御[18], 指向性アンテナの導入[19], [20]などが対応策として考えられている。しかし、これらの対応策ではWPT装置とSN間の伝送距離は変わらず、依然としてWPT装置からの距離のちがいでSNでの受電量差は残されたままである。

このようにWP-WSNでは、WPT装置とSN間の伝送距離によってSN受電量に地理的な不均一性が発生する課題がある。この受電量の地理的な不均一性によってWPT装

置遠方の SN では電力枯渇が多発してデータ送信ができなくなり、結果としてネットワーク性能が劣化する問題が存在する。従って、WP-WSN における WPT による SN 受電量の地理的な不均一性を緩和しつつ、ネットワーク性能を向上させるネットワーク制御技術が求められる。

1.2 研究目的

本研究では WP-WSN を研究対象として、WPT における SN 受電量の地理的な不均一性を緩和することにより、SN の電力枯渇を低減して WSN のネットワーク性能、具体的にはデータ収集性能を向上することを目的とする。

SN 受電量の地理的不均一性は、SN と WPT 装置間の伝送距離が不変であることに大きく依存している。そこでクラスタリング技術における CH 交替動作に着眼して、WPT を提供する装置の位置を交替動作により可変にすることを考える。このような交替機構を実現するために、WPT 機能と従来 CH 機能(データの集約・中継伝送)を持つハイブリッドアクセスポイント(Hybrid Access Point, HAP)を複数導入して、これらの HAP の中から両機能を提供するハイブリッド CH(Hybrid CH, HCH)を一定周期毎に選出し交替動作させるネットワーク構造を提案する。この一定周期毎の HCH 交替動作によって、WPT 提供位置が変化するため、SN の受電量の地理的な不均一性を緩和できると考えられる。また、この HCH 交替はクラスタリング技術を用いて実現するが、従来クラスタリング手法では WPT による SN への電力供給が全く考慮されていない。そのため提案ネットワーク構造に適用した場合、選出された HCH が残余電力量の小さい SN に対して大きな電力を供給できるとは限らず、十分に SN の電力枯渇を低減することが困難な場合がある。そこで本研究では、HCH 交替制御のための WPT を考慮したクラスタリング手法について提案する。

これらの提案ネットワーク構造とクラスタリング手法の有効性を確認するために、計算機シミュレーションにより、従来ネットワーク構造や従来クラスタリング手法と比較して、電力枯渇率とデータ収集率の特性を評価する。

1.3 論文構成

本論文は次のように構成される。第 2 章では無線センサネットワークにおける基礎的な長寿命化技術として本研究内容に関連するクラスタリング技術や無線電力伝送技術について記述し、第 3 章では本研究で提案するネットワーク構造とクラスタリング手法について記述する。第 4 章では特性評価で使用したシステムモデルについて記述する。第 5 章では計算機シミュレーションによる提案システム(提案ネットワーク構造と提案クラスタリング手法)の特性評価の結果について記述する。最後に第 6 章で本論

文のまとめを記述する.

第2章 無線センサネットワーク における長寿命化技術

本章では、無線センサネットワーク(WSN)における長寿命化技術について記述する。2.1節では、センサノード(SN)の消費電力を軽減する省電力化技術について記述し、2.2節ではSNのバッテリーを回復する無線電力伝送(WPT)技術について記述する。

2.1 省電力化技術

SNは一般に小型でバッテリー駆動であることからWSNでは、SNの消費電力を抑えるような省電力化技術が研究されている。その代表的技術であり本研究に関連するものとして、2.1.1節ではデューティサイクル動作、2.1.2節ではクラスタ型WSN、2.1.3節ではクラスタリング技術について記述する。

2.1.1 デューティサイクル動作

WSNではSNは、連続的なデータ通信は実施せず一定間隔で断続的な通信を実施することが一般的である。そのためSNが常に通信可能な待機状態であると、周囲のSNの不要データの受信や通信可能状態を維持することなどに起因して、通信を行わない期間であっても電力を消費する。デューティサイクル動作では、このような無駄な電力消費を軽減するために、データ通信などを行うアクティブ期間と通信などの動作行わずスリープ状態などに移行して電力消費を抑える非アクティブ期間を交互に繰り返す動作を行う。デューティサイクル動作を導入したWSNでは、非アクティブ期間を長くすることでSNの消費電力が軽減されてネットワークの寿命は長くなるが、通信期間が短くなるため通信の品質を保証ができなくなる。そこで、アプリケーションが要求するデータ量などに応じて、アクティブ期間と非アクティブ期間の比であるデューティ比を決定することでSNの消費電力を軽減によるネットワーク寿命の長期化と通信品質の保証を行う。図2.1にデューティサイクル動作の概要を示す。

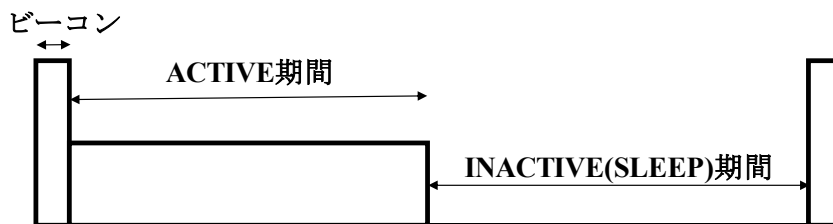


図 2.1: デューティサイクル動作の概要

デューティサイクル動作では非アクティブ期間において、SN はスリープ状態へ移行するが、このような状態では他の SN が通信状態にあるのか把握できないため、非アクティブ期間からそのまま通信を開始すると通信衝突が発生する恐れがある。そのため、デューティサイクル動作を導入した WSN では、周囲の SN との不要な通信衝突を避けるための SN 間の通信動作の同期が必要である。この SN の通信動作の同期を取るために一般的には図 2.1 のようなビーコンが使用されている。また、このビーコンは SN のデューティ比を決定するパラメータなどを含み、ネットワークの制御信号としての役割を持っている。

2.1.2 クラスタ型 WSN

WSN は、広範囲に多数配置された SN がセンシングにより様々な情報を収集し、情報集約装置であるシンクノード(SINK)へと伝送するネットワークである。そして SINK はインターネットなどを介して、最終的なユーザーへとセンシングした集約情報を伝送する。このような一般的な WSN の概要を図 2.2 に示す。

大規模な WSN では、SN は SINK から遠方に配置されることもある。この場合、遠方の SN ではセンシングデータを SINK へ送信するために大きい送信電力を要求され、結果として消費電力が大きくなり、早期に電力枯渇が発生してしまう。この課題を解決する方法の 1 つとしてクラスタ型ネットワークの導入がある。このネットワークでは、SN をいくつかのクラスタと呼ばれるグループに分割して、各グループより代表者であるクラスタヘッド(Cluster Head, CH)を選出する。CH は自身のクラスタ内の SN のデータを集約・圧縮して、まとめて SINK へと送信する。つまりクラスタ型 WSN ではデータ圧縮による送信データ量削減と中継伝送による SN の伝送距離の短縮によって省電力化が達成される。図 2.3 にクラスタ型 WSN の概要を示す。

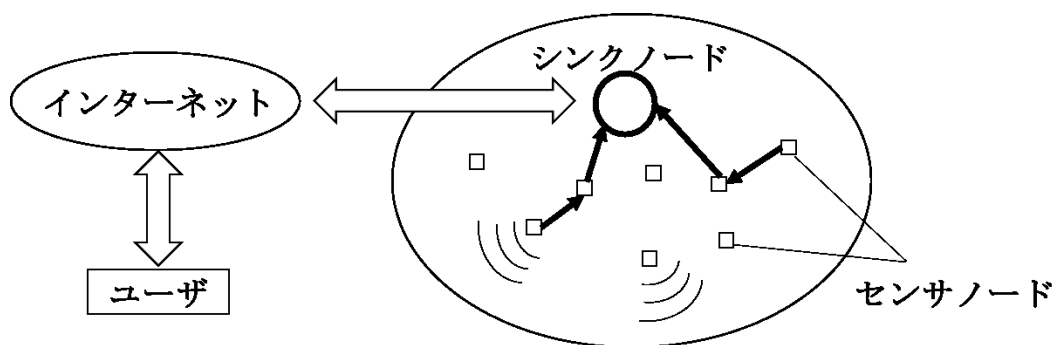


図 2.2: WSN の概要図

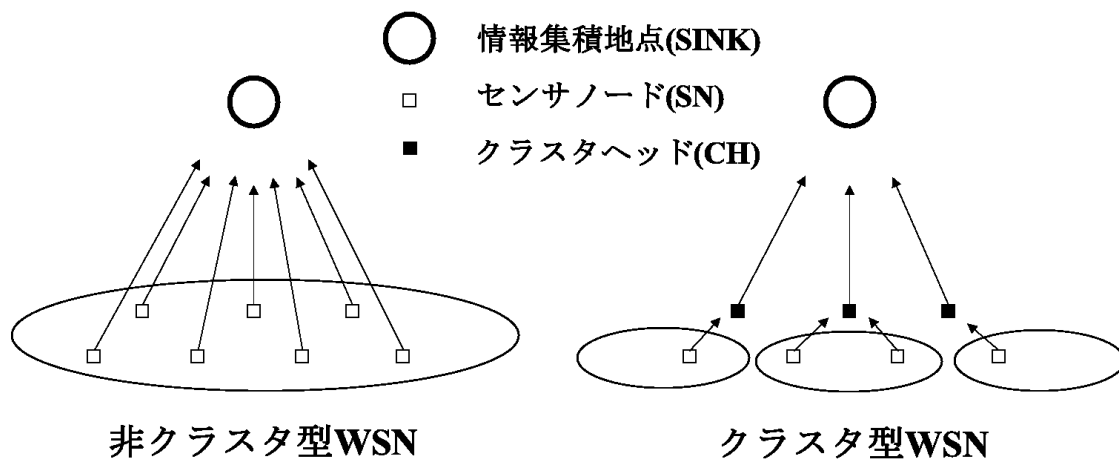


図 2.3: クラスタ型 WSN の概要図

クラスタ型 WSN では、図 2.3 に示すように多くの SN が CH による中継伝送で省電力化が達成されるが、CH はクラスタ内の SN からのデータ受信さらにこれらを集約・圧縮して伝送するために、消費電力が大きくなる。結果として CH は他の SN と比べて早期に電力が枯渇してしまい、クラスタ内の SN や自身のデータを送信できなくなる恐れがある。よってクラスタ型 WSN では、CH に集中する負荷を軽減・分散するような技術が必要となる。

2.1.3 クラスタリング技術

クラスタ型 WSN において、クラスタ内の SN のデータを中継する CH は通常の SN に比べて電力を大きく消費し、そのため早期に電力が枯渇することになる。この問題に対処するためにクラスタリング技術が研究されており[10]-[12]、本技術では一定周期 (ラウンド) ごとに CH を SN 間で交替させて負荷分散を行う。このように一定周期で CH が交替するため負荷が SN 間に分散して、ネットワークとして長時間駆動が可能になる。図 2.4 にクラスタリングによる CH 交替の概要を示す。

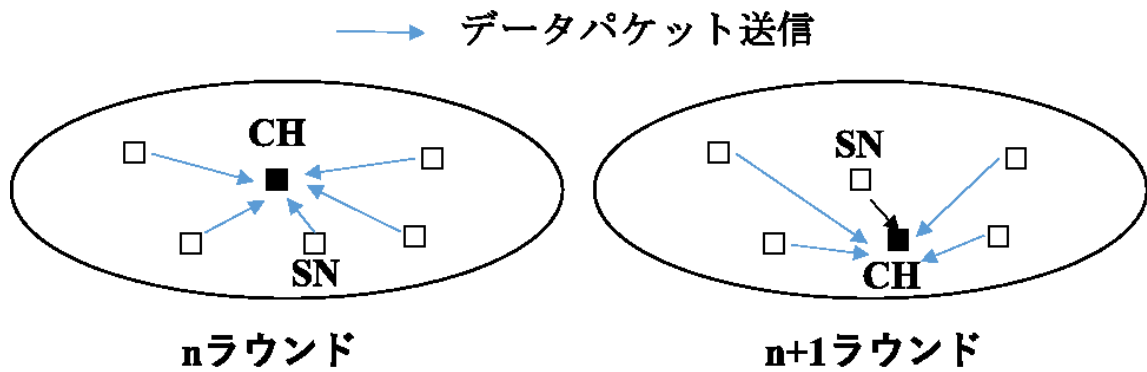


図 2.4: クラスタリング

しかし、クラスタリング技術によって多数の SN 中から一部の SN が CH として偏って選出されてしまうと負荷が集中してしまい、そのような一部の SN で早期に電力枯渇が発生する。よってクラスタリング技術では SN が均等に CH に選出されることが望ましい。主なクラスタリング手法として RR(Round Robin)[11]と LEACH(Low- Energy Adaptive Clustering Hierarchy)[12]の 2つを説明する。

● Round Robin (RR)

RR 手法では、ネットワークの管理者があらかじめネットワークを運用する前に決定した順番に従って一定周期で SN が交互に CH として選出され、負荷を分散する。したがって、どれだけネットワーク全体に CH の負荷を分散できるかは、あらかじめ決定した順番に依存する。また RR 手法では、基本的に SN が CH になる順番が一巡すると同じ順番で繰り返す。

図 2.5 に SN の識別番号を用いた RR 手法の一例を示す。図 2.5 では、あらかじめ SN の識別番号順に CH を交替するものと定めており、この例では、識別番号に従って全ての SN が均一に CH として選出されるため、CH の負荷は全ての SN に均等に割り当てられる。

この RR 手法の利点としては、ネットワークの動作前に一度順番を決定するだけで済むため SN が CH となるために特別な計算や機能を保持する必要がないことなどが挙げられる。一方で欠点としては、ネットワークが動作を始めてから新しく SN を追加しても CH 選出に組み込むためには、新たに CH の交替順番を決定する必要があることや、バッテリーの電力枯渇により通信動作を行えない SN でも事前に決定した順番に従って CH に選出されてしまうことなどが挙げられる。

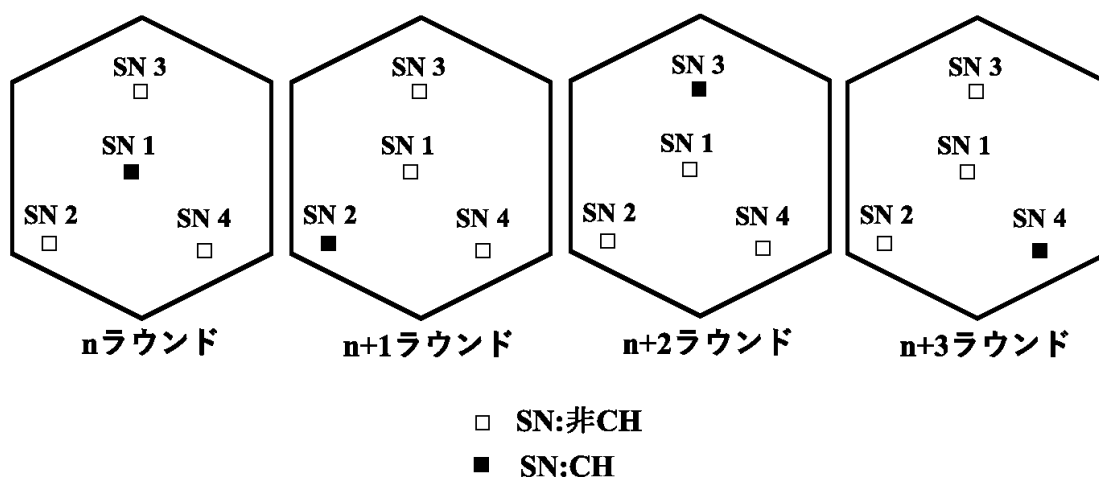


図 2.5: RR 手法による CH 交替

- Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)

先の RR 手法とは対照的に、事前に CH 選出順を決定する必要がないクラスタリング手法として LEACH(Low- Energy Adaptive Clustering Hierarchy)手法がある。LEACH 手法は、全ての SN が自律的に CH として動作するの否かを確率的に決定する手法である。確率的に CH 選出を行うが、連続して CH に選出されることはない機構が組み入れられているため、結果的に均等に全 SN が CH となり、負荷はネットワーク全体に均一に分散される。

具体的な LEACH 手法における CH 選出は次のように実施される。初めに各 SN は、0~1 までの乱数を生成する。次に式 2.1 によって算出される閾値 $T(i)$ と生成した乱数を比較して、乱数が閾値を下回る SN が CH に選出する。

$$T(i) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P(r \bmod \frac{1}{P})} & \text{if } i \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.1)$$

ここで、 i は SN の識別子であり、 P は 1 ラウンドあたりに CH に選出される SN の割合、 r は現在のラウンド、 G は過去 $1/P$ ラウンドにおいて CH になっていない SN の集合を表している。この閾値 $T(i)$ は、 $r = 0$ つまり最初のラウンドにて P となり、全 SN のうち P の割合の SN が CH に選出する。そして 1 度 CH となった SN では一定期間(サイクル) $T(i) = 0$ となり CH にはならない。結果として LEACH 手法は、SN が乱数を用いて確率的に、CH として動作するかを決定し、連続して同一の SN が CH にならないクラスタリング手法である。

図 2.6 に $P = 0.25$ の時の LEACH 手法の 1 例を示す。LEACH 手法では、1 サイクル(クラスタ内の全 SN が CH になるまでの期間)経過後の次ラウンドでも、連続して同じ SN が CH とならないように選出される。そのため図 2.6 において $n+4$ ラウンドでは SN2 以外の 3 つの SN からランダムに CH が選出される。

LEACH 手法の利点は、RR 手法とは異なりあらかじめ順番を決定しないため、新しい SN が追加されても CH 選出に影響しない。また、同じ SN が連続して CH になることはないため負荷は均等に分散される。一方欠点としては、ラウンド毎に SN 側で閾値 $T(i)$ を計算する必要があることなどが挙げられる。

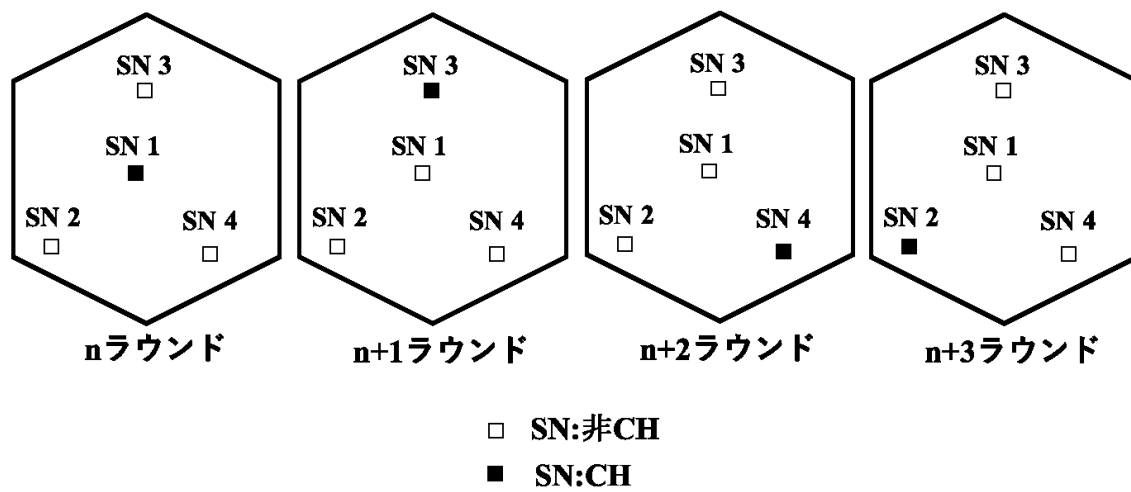


図 2.6: LEACH 手法による CH 交替

2.2 無線電力伝送(Wireless Power Transfer)技術

WSN ではネットワークの長寿命化を目指して様々な研究がされており，2.1 節では省電力化技術について記述した．しかし，省電力化技術のみでは依然としてSNの電力が枯渇するとバッテリー交換などのメンテナンスなどが必要である．そこで，電力ハーベスティング技術として，安定的に無線でSNへ電力を供給できるとされる無線電力伝送(Wireless Power Transfer)技術が注目されている．2.2.1 節では WPT の原理，2.2.2 節では WP-WSN における受電量の地理的な不均一性の緩和策，2.2.3 節では WPT を適用した WSN における課題について記述する．

2.2.1 WPT の原理

WPT 技術は，WPT 装置からの無線信号や電磁誘導，磁界共鳴などによって受電対象の端末へと電力を供給し，バッテリーを回復させる技術である．どの現象を利用して端末へ電力を供給するのかによって種類が分類されておりそれぞれ，RF(Radio Frequency)方式，電磁誘導方式，磁界共振方式と呼ばれる[16]．これらの方式の中で本研究は，低消費電力で WPT 装置と端末間の距離が長距離でも電力伝送ができることから RF 方式[17]に着眼する．

RF 方式の WPT では，WPT 装置からの無線信号が受信端末の整流回路に通されて，直流電流に変換されてバッテリーに蓄積されることにより電力供給を実現する．図 2.6 に RF 方式の WPT の概要を示す．

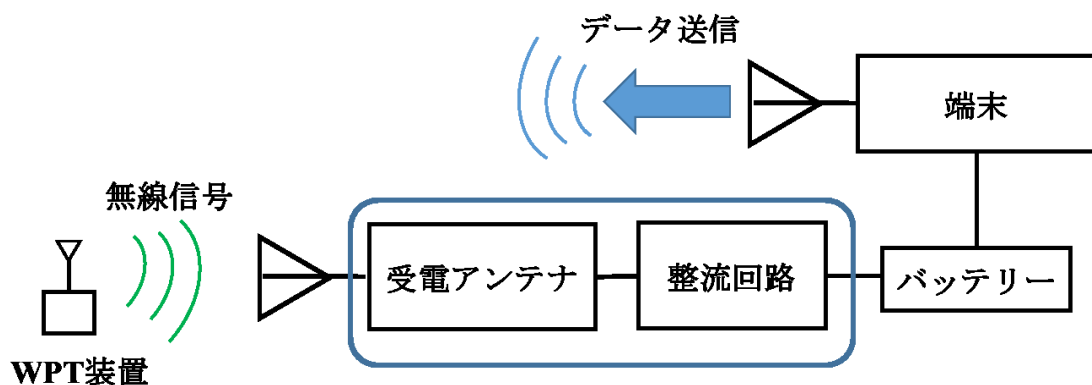


図 2.6: RF 方式の WPT の概要

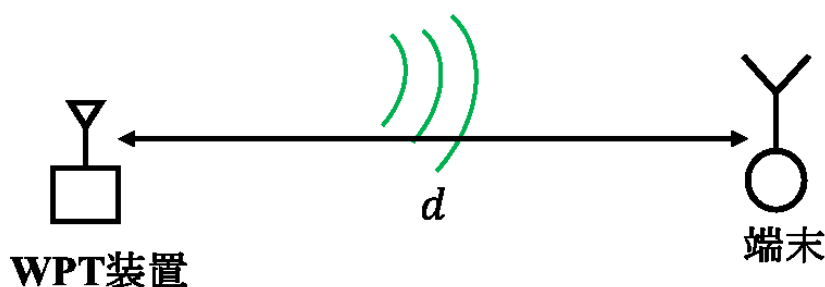


図 2.7: WPT による受電

具体的に WPT 装置と端末間の伝送距離が $d[\text{m}]$ である以下の図 2.7 のような状況において，端末が WPT によって獲得できる受電量 $E_r(d)$ は式 2.2 であらわされる[21], [22].

$$E_r(d) = \eta G_{\text{ANT}} P_0 T_{\text{WPT}} \left(\frac{c}{4\pi f_c d} \right)^\alpha \quad (2.2)$$

ここで， η ($0 < \eta \leq 1$) は電力変換効率， G_{ANT} はアンテナ利得， $P_0[\text{W}]$ は WPT 装置の送信電力， $T_{\text{WPT}}[\text{s}]$ は WPT を行う期間の時間長， $c[\text{m/s}]$ は光速， $f_c[\text{Hz}]$ は搬送波周波数， α は距離減衰指数を示す．なお，電力変換効率 η は受信端末に到達した無線信号の電磁波エネルギーがどれだけ使用可能な電力エネルギーに変換できるかを示すパラメータであり，受信アンテナや整流回路などハードウェアに依存している．式 2.2 より WPT により獲得できる受電量 $E_r(d)$ は大きく距離に依存しており，WPT 装置遠方の端末では受電量が小さくなるのがわかる．

2.2.2 WSN への WPT 適用とその課題

WPT を適用した WSN (Wireless Powered-WSNs, WP-WSNs) では，WPT 装置からの無線信号により，SN が自身のバッテリーを給電することで，長時間駆動を実現する．しかし，WPT によって SN が獲得できる受電量は WPT 装置からの距離で大きく異なり，SN が点在しているため，WP-WSN では SN の受電量に地理的な不均一性が発生するという課題が存在する．そのため WPT 装置から遠方に存在する SN では受電量が小さく，バッテリーの電力枯渇によりデータ伝送が行えなくなり，ネットワーク性能にも影響する．特に単一の WPT 装置が固定位置に配置されるような WP-WSN の場合では，WPT による受電量の地理的な不均一性は顕著に現れてしまう．

そこで WP-WSN では，遠方 SN における受電量を増加させるために WPT 装置の送信電力の制御[18]，WPT 期間の長期化や指向性アンテナの導入[19], [20]などが必要とな

ると考えられる。しかしながら、WPT 装置の送信電力の増加や指向性アンテナの導入では、受電量は増加するが WPT 装置-SN 間の伝送距離に起因した根本的な受電量の不均一性の緩和には寄与しない。また、WPT 期間の長期化はデータ送信の期間の減少につながるため一概に有効であるとは言えない。WPT による受電量が WPT 装置-SN 間伝送距離に大きく依存しているため、この伝送距離を短縮したり、変化させたりするようなネットワーク構造が最も受電量の不均一性に有効な緩和策であると考えられる。

WPT 装置-SN 間の伝送距離を短縮するネットワーク構造として、多数の WPT 装置を用いた分散 WPT 手法[23], [24]が研究されている。この手法では、単一の WPT 装置を用いる場合と異なり、SN が様々な位置にある WPT 装置から受電することになるため、WPT 装置-SN 間の伝送距離が平均的に短くなる。よって幾分か受電量の地理的な不均一性が緩和されると考えられるが、結局 WPT 装置-SN 間距離は配置後に一度も変化せず、WPT 装置遠方では依然として受電量が小さいままである。

一方で、WPT 装置-SN 間の伝送距離が変化するような構造として、モバイル給電機を導入したネットワーク構造[25], [26]が研究されている。このネットワーク構造では、車やドローンなどの移動可能な機器に給電装置を取り付け、点在する SN を順に巡って WPT を行い給電する。このような手法の場合は、WPT 装置-SN 間の伝送距離がモバイル給電機の移動に伴い変化するため、受電量が伝送距離によって小さくなるような SN が少なく、不均一性の緩和も可能であると考えられる。しかしながら、SN が十分な受電量を獲得するには、モバイル給電機は一定期間 SN 付近で停止して WPT を行う必要がある。このような待ち時間を考えると多数の SN が存在する場合は、電力が枯渇しているにもかかわらず待ち時間が非常に大きいという問題もある。また移動可能な機器を導入する場合は固定位置装置の導入に比べてコストもかかり、屋内環境では導入が困難であると考えられる。

2.2.3 WP-WSN に残る課題

WP-WSN では、WPT 装置と SN 間の伝送距離の違いによって、SN の受電量に地理的な不均一性が発生するという課題があり、これにより WPT 装置遠方の SN では電力枯渇が起こり、データ送信が円滑に行えず、結果としてネットワーク性能が劣化する。この地理的な不均一性に対して様々な対応策があるが、いずれも WPT 装置と SN 間の距離が不変であり、モバイル給電機を導入したネットワーク構造であっても、WPT の待ち時間などを考慮すると SN の電力枯渇を十分に低減できない可能性がある。

本研究では、上記の課題を鑑みて SN 受電量の地理的な不均一性の緩和、そして電力枯渇を低減可能な WP-WSNs に適した新しいネットワーク構造とそれに対応したネットワーク制御技術を提案する。

第3章 無線電力伝送を考慮した ネットワーク構造と クラスタリング手法

本章では、WP-WSNにおけるSN受電量の地理的な不均一性の緩和、SNにおいて発生する電力枯渇の低減によるデータ収集率の向上を目的として、ネットワーク構造とそのクラスタリング手法について提案する。3.1節では無線電力伝送装置の交替動作機構を導入したネットワーク構造について記述し、3.2節では当該構造におけるクラスタリング手法(交替制御手法)について記述する。

3.1 無線電力伝送装置の交替動作機構を導入した ネットワーク構造

WP-WSNにおいてWPTによるSN受電量の地理的な不均一性を緩和するために、本節で提案するネットワーク構造では、WPT装置-SN間の伝送距離が常に一定であることを回避する。このために、WPTを提供する装置を一定周期毎に交替して、位置を可変にする。このような動作を実現するために本研究では従来のクラスタリング技術のCH交替動作に着眼し、CHにWPT機能を重畳させて、クラスタリング制御(CH交替制御)によってこのWPT機能が重畳されたCHを交替することを考える。これによりCHの位置がラウンド毎に変化することでWPT機能提供位置とSN間の距離が変化する。

3.1.1節で提案ネットワーク構造の概要、3.1.2節で提案ネットワーク構造の必要検討事項を記述する。

3.1.1 HAPとHCH交替動作の導入

CHにWPT機能を重畳し、このCHを交替する機構を実現するために、ハイブリッドアクセスポイント(Hybrid Access Point, HAP)[27]を導入する。HAPはデータ集約・中継伝送(従来CH機能)に加えてWPT機能の役割を担うことが出来るアクセスポイントである。提案するネットワーク構造では、このHAPを複数導入して、ラウンド毎に複数のHAPの中から1台のHAPを選出して、ハイブリッドクラスタヘッド(Hybrid Cluster Head, HCH)として動作させる。本研究におけるHCHは従来CH機能だけでなくWPT機能も提供するためHCHと呼ぶ。複数HAPよりクラスタリング制御によって選出されたHCHは、当該ラウンドにおいてSNからの情報集約とSNへのWPTを行う。また、HCHに選出されなかったHAPは当該ラウンドにおいてはスリープ状態として

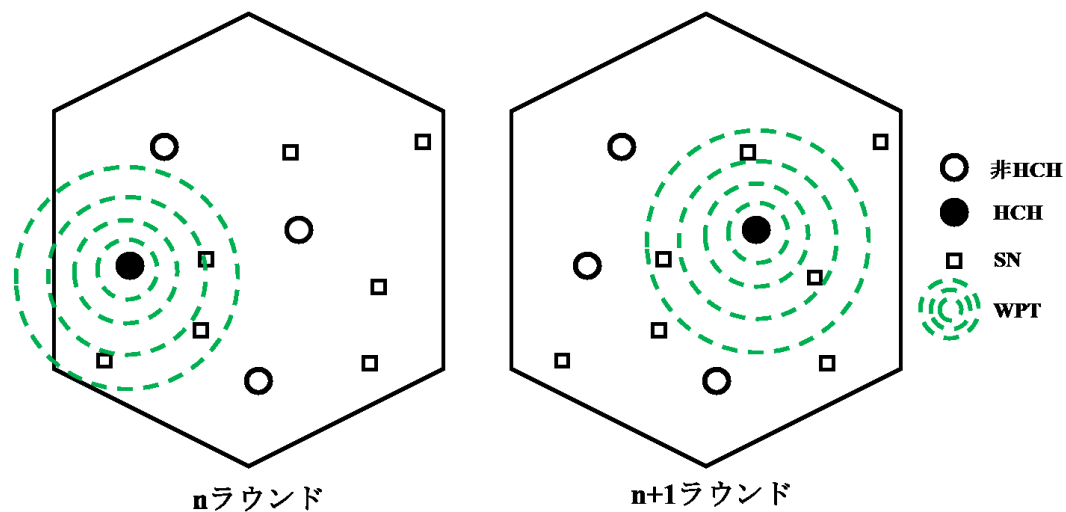


図 3.1: 提案ネットワーク構造の概要

WPT 機能などを停止する。提案ネットワーク構造の概要を図 3.1 に示す。

従来ネットワーク構造では、WPT 提供位置が固定であったのに対して、提案ネットワーク構造では WPT を提供する HCH が一定周期で交替するため、WPT 提供位置が変化して SN の受電量不均一性が緩和されると期待できる。

3.1.2 提案ネットワーク構造における必要検討事項

提案ネットワーク構造においては、クラスタリング制御により HCH を交替する。このクラスタリング制御に従来クラスタリング手法を適用して実施したとすると、残余電力量の小さい SN に対して大きく電力供給可能な HCH が選出されるとは限らず、小残余電力量 SN では電力枯渇が頻繁に発生する場合は考えられる。なぜなら従来クラスタリング手法では、CH が WPT によって SN に給電するという事は考慮されておらず、あくまで省電力化を達成するための技術にとどまっているからである。よって提案するネットワーク構造では、残余電力量が小さく電力枯渇の発生が近い SN に対して、大きい電力が供給可能な HAP を HCH として選出できる WPT を考慮したクラスタリング手法が必要である。

3.2 残余電力量を考慮したクラスタリング手法

前節で述べた提案ネットワーク構造では、残余電力量が小さく電力枯渇の近い SN に対して大きい電力を WPT により供給可能な HAP を HCH として選出する必要がある。そこで、提案するクラスタリング手法では、残余電力量が小さい SN の近傍に位置する

HAP を HCH として選出する。つまり残余電力量の小さい SN と HAP 間の距離を基準にして複数 HAP から HCH 選出を行う。

3.2.1 節では提案クラスタリング手法における HCH の選出基準について、3.2.2 では残余電力量の小さい SN をどの粒度まで考慮とするのかの考慮対象 SN 範囲について記述する。

3.2.1 HCH 選出基準

残余電力量の小さい SN の近傍に位置する HAP を HCH とするために SN-HAP 間の距離を HCH 選出基準に用いる。残余電力量が小さい SN はクラスタ領域内に複数存在する場合もあるため、HCH 選出基準値を HAP と残余電力量の小さい複数の SN 間との距離の総和で定義する。つまり、 j 番目の HAP における HCH 選出指標値 d_j^{sel} は次式 3.1 で与えられる。

$$d_j^{\text{sel}} = \sum_{\text{SN}_i \in \Phi_j} d_{j,i} \quad (3.1)$$

ここで、 Φ_j は j 番目の HAP が存在するクラスタ領域内の残余電力量が小さい SN の集合であり、 i はその集合における SN の識別子である。このような残余電力量が小さい SN の集合 Φ を設ける理由は、HCH 選出指標値 d^{sel} の算出に残余電力量が大きい SN を対象とすると、残余電力量が小さい SN から遠方の HAP が選出されてしまう恐れがあるためである。残余電力量が小さい SN の集合 Φ を決定する方法は、提案クラスタリング手法の性能に大きな影響を及ぼすことになるが、その具体的方法については考慮対象 SN 範囲として次節で詳しく記述する。

各ラウンドの終了時点で HCH で式 3.1 の HCH 選出指標値 d^{sel} を全 HAP に対して算出し、各クラスタ内で最小の指標値 d^{sel} (最小距離総和) を持つ HAP を次ラウンドの HCH として選出する。よって、次式 3.2 を満たす距離総和を持つ j 番目の HAP が次期 HCH となる。また、この提案クラスタリング手法による HCH 選出の概要図を図 3.2 に示す。

$$j = \min_j d_j^{\text{sel}} \quad (3.2)$$

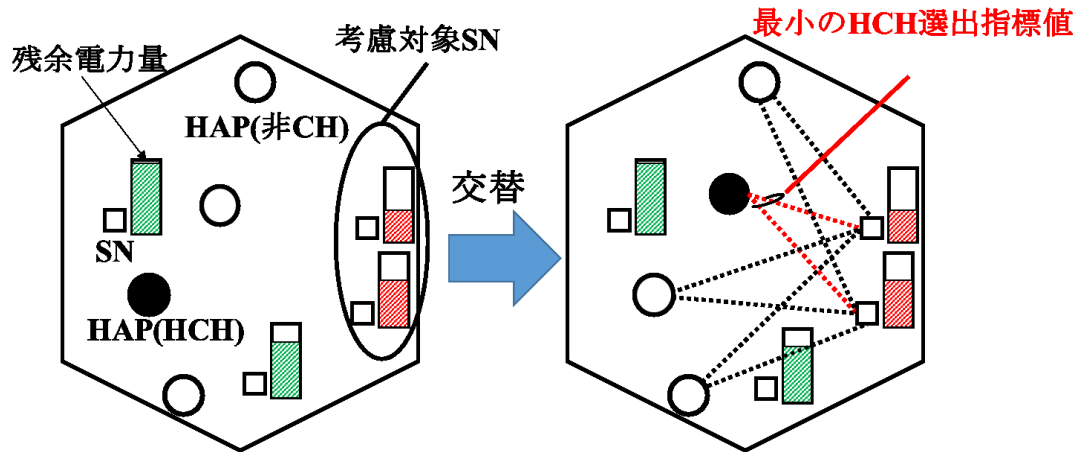


図 3.2: HCH 選出の概要

図 3.2 のように小残余電力量の SN の近傍に位置する HCH が選出されることで小さい残余電力量の SN に大きな電力を供給でき、電力枯渇の低減が達成されることによるデータ収集率の向上が実現できると考えられる。

3.2.2 考慮対象 SN 範囲

本節では、残余電力量の小さい SN のみを考慮対象として前節の HCH の選出指標値 d^{sel} の算出を行うために、集合 Φ の範囲(考慮対象 SN 範囲)を決定する方法を議論する。考慮対象範囲を適切に設定することで、残余電力量の大きい SN を HCH 選出指標値 d^{sel} の算出から除外することを目的として、本節では次の 3 つの考慮対象範囲を提案する。

- 考慮対象範囲 1

考慮対象範囲 1 は SN 台数を基準に範囲を設定する方法である。具体的には、クラスタ領域内の SN を残余電力量の小さい順に N_c [台] 考慮対象として d^{sel} を算出する。この場合の制御パラメータである考慮対象数 N_c は定数であり、SN 数などに依存しないため、全 SN の残余電力量を相対的に比較するだけで済むため実装は簡単である。また、残余電力量の小さい SN の数は、クラスタ領域内 SN 数 N_{SN} の増加に伴い大きくなるため、 N_c を大きく設定することで、クラスタ領域内 SN 数 N_{SN} が大きいときに電力枯渇をより低減できると考えられる。ただし、 N_c の値をクラスタ領域内の SN 数 N_{SN} に対して大きく設定しすぎると、残余電力量が大きい SN が HCH の選出指標値 d^{sel} の算出に含まれてしまうため、考慮対象数 N_c の設定はクラスタリングの性能に悪影響を及ぼす。結論的に、考慮対象範囲 1 では固定値の考慮対象

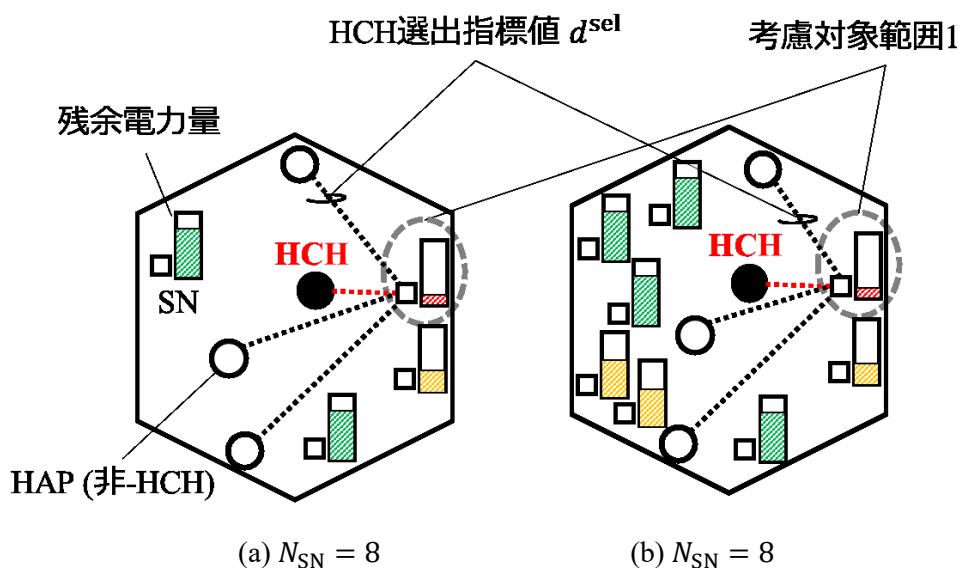


図 3.3: 考慮対象範囲 1 による HCH 選出($N_c = 1$)

数 N_c を用いた場合には，クラスタ領域内 SN 数 N_{SN} の変化に伴う残余電力量の小さい SN 数の変化に対応するのが困難である。

図 3.3 に考慮範囲 1($N_c = 1$)を用いた場合の HCH 選出の様子を示す．図 3.3(a)ではクラスタ領域内 SN 数 $N_{SN} = 4$ ，(b)では $N_{SN} = 8$ の時の様子を示している． $N_c = 1$ であるためいずれの図においても，常に最小の残余電力量の SN 1 台のみが選出指標値 d^{sel} の算出対象となっている．仮にこの上図の例において N_c の値を大きくしていくと上図で選ばれた HAP ではないものが HCH となる可能性がある．最も給電を必要としている最小残余電力量の SN は，このような場合を避ける必要がある．ゆえにネットワーク状況，具体的にはクラスタ領域内 SN 数 N_{SN} に応じて考慮対象範囲 1 における考慮対象数 N_c を適切に設定する必要がある．

- 考慮対象範囲 2

考慮対象範囲 2 も SN 台数基準であり，考慮対象範囲 1 と同様にクラスタ領域内の SN を残余電力量の小さい順に N_c [台]考慮対象として d^{sel} を算出する方法である．ただし，考慮対象範囲 1 とは異なり，考慮対象範囲 2 では，制御パラメータとして SN 数に対する考慮対象割合 R_c ($0 < R_c \leq 1$)を導入して考慮対象数 N_c を次のように定義する．

$$N_c = R_c \times N_{SN} \quad (3.3)$$

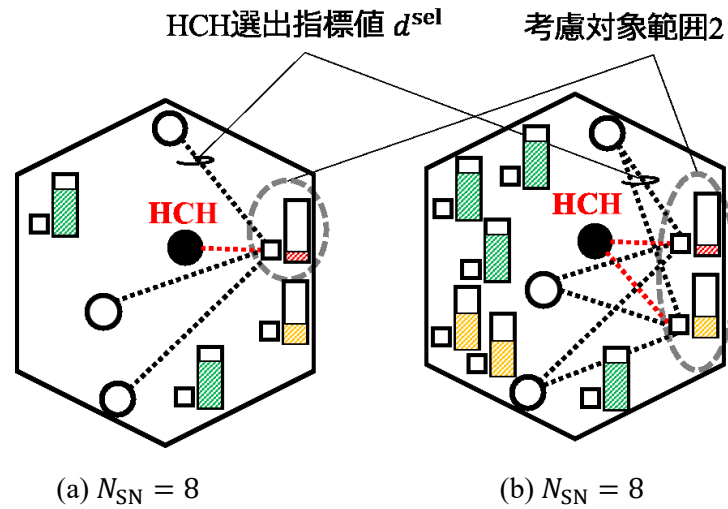


図 3.4: 考慮範囲 2 による HCH 選出($R_c = 0.25$)

上式 3.3 のように考慮対象割合 R_c を導入することで、クラスタ領域内 SN 数 N_{SN} の増加に対して考慮対象数 N_c も増加するため、考慮対象範囲 1 とは異なり SN 数 N_{SN} の変化に伴う残余電力量の小さい SN 数の変化に対応できる。

図 3.4 に考慮範囲 2($R_c = 0.25$)を用いて場合の HCH 選出の様子を示す。図 3.4(a)ではクラスタ領域内 $N_{SN} = 4$ 、(b)では $N_{SN} = 8$ の時の様子を示している。クラスタ領域内 SN 数 N_{SN} の 4 から 8 への変化に伴い考慮対象数 N_c が 1 から 2 へと変化する。ただし、ネットワークの状況(クラスタ領域内 SN 数や消費電力量の大きさなど)によって適切な考慮割合 R_c の値を設定しないと、考慮対象範囲 1 と同様に、残余電力量が十分大きい SN を考慮対象としてしまう恐れがある。

- 考慮対象範囲 3

考慮対象範囲 3 は SN の残余電力を基準として考慮対象範囲を設定する方法である。具体的には、制御パラメータとして残余電力閾値 S_{th} ($0 < S_{th} \leq B_{cap}$, B_{cap} は SN のバッテリー容量)を導入して、閾値 S_{th} 以下の残余電力量を持つ SN を考慮対象として、HCH 選出指標値 d^{sel} を算出する。なお、 $S_{th} = B_{cap}$ と設定する場合は全ての SN を考慮対象とすることになる。考慮対象範囲 3 では、SN 台数基準の考慮対象範囲 1 や 2 とは異なり、SN の残余電力で直接考慮対象範囲を設定するため適切な閾値 S_{th} を用いれば、HCH 選出指標値 d^{sel} を算出においてどのようなクラスタ領域内 SN 数 N_{SN} の状況であっても十分に残余電力量を持つ SN を除外することが出来る。

考慮対象範囲 3 では残余電力閾値 S_{th} を過剰に小さく設定すると、残余電力閾値を下回る残余電力量を持つ SN が存在しない場合が出現する。この場合 HCH 選出指標値を算出して、最小の指標値を持つ HCH を選出できなくなる。このような状

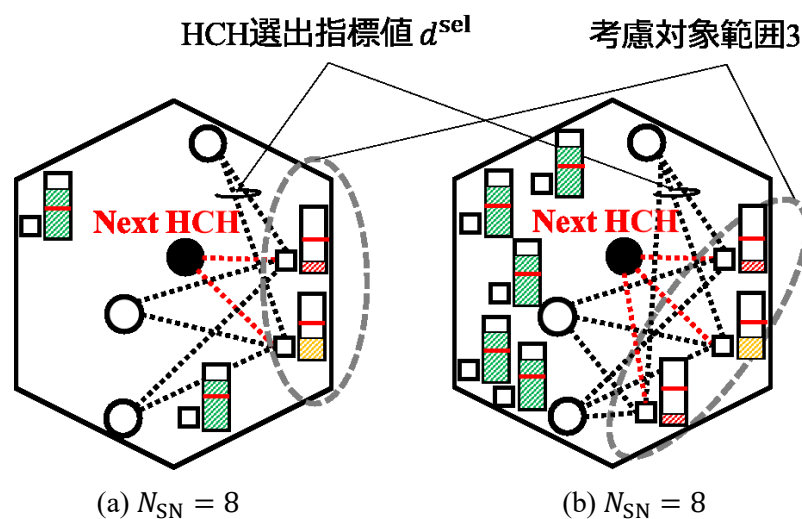


図 3.5: 考慮範囲 3 による HCH 選出($S_{th} = 0.5 \cdot B_{cap}$)

況を回避するために、残余電力閾値 S_{th} 以下の残余電力量の SN が存在しない場合において、考慮対象範囲 3 は HAP からランダムに HCH を選出する。

図 3.5 に考慮範囲 3 を用いて場合の HCH 選出の様子を示す。図 3.5(a)ではクラスタ領域内 SN 数 $N_{SN} = 4$ 、(b)では $N_{SN} = 8$ の時の様子を示している。いずれの図においても閾値 S_{th} 以下の SN が HCH 選出指標値 d^{sel} の算出における考慮対象となっており、これらに近い HAP を HCH として選出している。

いずれの考慮対象範囲も適切に制御パラメータ値を設定すれば HCH 選出指標値の計算において、十分な残余電力量を持つ SN を除外することが出来ると考えられる。ただし、この適切値はクラスタ領域内 SN 数や SN の消費する電力量などによって変化すると考えられる。本研究では提案システム(提案ネットワーク構造に提案クラスタリングを適用したもの)の性能を評価する前段でこれらの値の最適化を行う。

実際のネットワークにおいては、このような考慮対象範囲を設定して各 HCH で HAP に対する HCH 選出指標値 d^{sel} を計算するためには HAP が各 SN の残余電力量を把握する必要がある。これを実現する 1 例としては、SN がデータパケットを送信する際に自身の残余電力量を重畳することが考えられる。また、次ラウンドにおける HCH に関する情報は HAP 間で共有する必要があるが、この情報のやり取りは、次章の 4.2 節における図 4.2 に示されるビーコン信号に付加することが考えられる。

第4章 特性評価モデル

本章では，クラスタ型 WP-WSN における提案システム(提案ネットワーク構造にテイン案クラスタリング手法を適用したもの)の有効性を確認するための特性評価に用いた評価モデルを記述する．4.1 節ではネットワークモデル，4.2 節ではフレーム構造とシステム動作，4.3 節では伝搬モデル，4.4 節ではパケット生起モデル，4.5 節では通信モデル，4.6 節では無線電力伝送，4.7 節では消費電力モデルを記述する．

4.1 ネットワークモデル

ネットワークは図 4.1 に示すような半径 R [m] の正六角形の 7 つのクラスタ領域から成ること．各クラスタ領域には N_{HAP} [台/クラスタ] の HAP， N_{SN} [台/クラスタ] の SN を，どちらもランダムに配置する．HCH はラウンド毎に各クラスタの N_{HAP} 台の HAP の中から 1 台選出される．

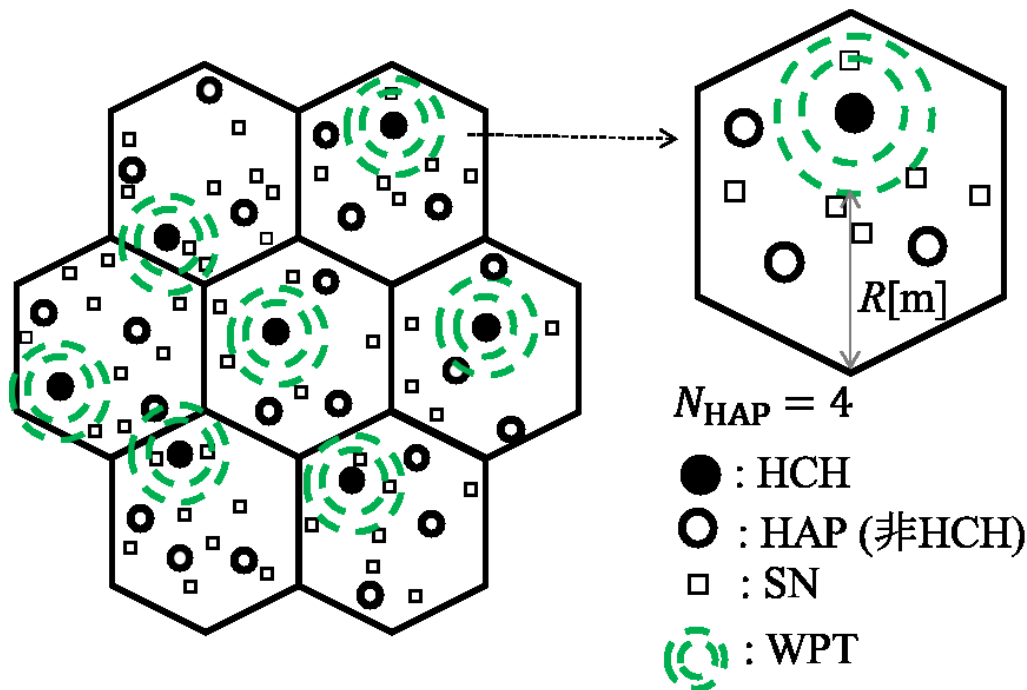


図 4.1: ネットワークモデル

4.2 フレーム構造とシステム動作

周波数利用効率向上のために、SN から HCH への情報伝送(Wireless Information Transfer, WIT)と HCH から SN への無線電力伝送(Wireless Power Transfer, WPT)において同一の周波数帯 f_c [GHz]で実施する。このとき WIT と WPT の信号干渉を避けるために、WIT 期間と WPT 期間を時分割する。また、WIT 期間において IEEE802.15.4[12]で規格されているビーコンモードを適用し、各クラスタの通信期間(Contention Access Period, CAP)を WIT 期間内に設定する。クラスタ間の信号干渉を回避するため、WIT 期間を時分割して各クラスタの CAP を時間重複なしに配置する。一方、WPT 期間はフレーム後半に配置し全クラスタが時間共通で行う。この一連の動作を実現するためのフレーム構造の一例として本研究では図 4.2 に示すフレーム構造を採用する。

各クラスタ領域からラウンド毎(Round Interval, RI)に 1 台の HCH を N_{HAP} [台/クラスタ]の HAP からクラスタリング手法に基づき選出する。なお HCH 選出時に HAP は SN の残余電力量について把握している必要があるが、本研究ではこれについては簡単化して、HAP が常に全 SN の残余電力量を把握している。そして各 HCH は、ラウンド内における各フレームの WIT 期間では SN からのデータ受信、WPT 期間で SN への WPT による給電を行う。なお、WIT 期間のデータパケット通信は、SN から HCH までの上り通信のみであり、この時の SN の接続先 HCH は SN から最も近い位置にある(最短距離の)HCH とする。したがって、クラスタ領域のエッジ付近に存在する SN は他クラスタの HCH が接続先となる可能性がある。

各クラスタ領域の HCH はフレームの先頭で同期のためにビーコンを SN へ送信する。このビーコンは必ず SN で受信されるものとする。本来ビーコンは、フレーム構造情報(CAP 時間長情報など)を含むが、本研究ではそのようなデータは事前に SN が把握しているものとする。

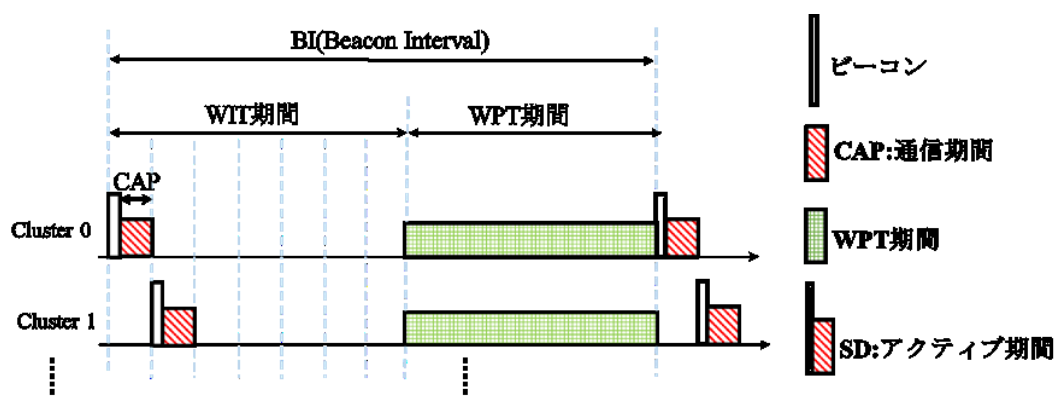


図 4.2: WIT と WPT のフレーム構造

4.3 伝搬モデル

伝搬モデルとして WIT(SN から HCH)と WPT(HCH から SN)いずれの期間における信号伝搬は自由空間伝搬であるとする. そのため距離減衰指数 $\alpha = 2$ となり, 減衰量 $LOSS[\text{dB}]$ は式(4.1)で与えられる.

$$LOSS = -20 \log\left(\frac{c}{4\pi f_c d}\right) \quad (4.1)$$

ここで, c は光速 $3.0 \times 10^8[\text{m/s}]$, $f_c[\text{GHz}]$ は使用周波数, d は送信機(WIT の場合は SN, WPT の場合は HCH)と受信機(WIT の場合は HCH, WPT の場合は SN)間の伝送距離である. また, シェドローイングやフェージングは考慮しない.

4.4 トラヒックモデル

SN の送信する全てのデータパケットは SN でランダムに生起し, その生起過程は平均生起率 $\lambda[\text{packets/BI}]$ のポアソン過程に従う. データパケット長は全てのパケットで等しく $L_{pkt}[\text{Bytes}]$ である. なお, 本研究では SN のバッファサイズを 1 とし($0 \leq B_{pkt}^i \leq 1$, i は SN の識別子, B_{pkt}^i は i 番目の SN の所持パケット数), 各 SN はパケットを所持している状態で新しくパケットが生起すると, 古いパケットを破棄する.

4.5 通信モデル

SN のデータパケットの送信条件・手順は以下の通りとする. まず, SN がデータパケット送信を開始できる条件としては大きく 2 つある. 1 つ目は SN がデータパケットを所持していること, 2 つ目は SN の残余電力量が 1 データパケット送信に必要な電力閾値 $E_{th}[\text{mJ}]$ (詳細は 4.5 節で記述する)を超える値であることである. それぞれの条件は i 番目の SN において式 4.2 と 4.3 で表現される.

$$B_{pkt}^i = 1 \quad (4.2)$$

$$B_{pow}^i \geq E_{th} \quad (4.3)$$

B_{pkt}^i は i 番目の SN が所持しているデータパケット数, $B_{pow}^i[\text{mJ}]$ は i 番目の SN の残余電力量である.

データパケット送信の通信方式は IEEE802.15.4MAC[12]で規定されている搬送波検知多重アクセス/衝突回避(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA)方式とする. 4.2 節のフレーム構造にあるように各 CAP において, 各 HCH に接続し, 式 4.2 と 4.3 を満たす SN が CSMA/CA を用いて競合し, データパケットを HCH へ送信する. この時, 全ての SN は同一伝送レート $R[\text{kbps}]$ でデータパケットを送信し, SN の送信電力は SN-HCH 間の通信が常時可能な送信電力設定である.

HCH におけるデータパケットの受信可否判定について, 単独のデータパケットが HCH に到来している場合は, そのデータパケットは受信に成功し, HCH は Ack を送信元の SN へ返す. 2 つ以上のデータパケットが同時に HCH に到来している場合は, 信号対干渉波(Signal to Interference Ratio, SIR)を用いて受信可否判定をする. 具体的には, 受信データパケットの SIR を算出して, その値が SIR 閾値 SIR_{th} を超える場合は受信に成功し HCH は Ack を返す. 一方で閾値 SIR_{th} を超えない場合は受信失敗となり, SN はそのデータパケットの再送を試みる. SN におけるデータパケットの再送では IEEE802.15.4 で再送上限回数 N_{rtx} が規定されており, この回数を超える場合には SN はパケットを破棄する.

4.6 無線電力伝送モデル

4.1 節のネットワークモデルにて記述したように 7 つのクラスタ領域があり, 各クラスタ領域に WPT によって電力を SN に供給する HCH が 1 台存在する. 4.2 節のフレーム構造では 7 つの全 HCH が同時に同一送信電力 $P_0[\text{dB}]$ で WPT を実施する. 本研究では, SN に同時に到来する全ての無線信号から理想的に受電できると仮定する. したがって, 式 2.2 より i 番目の SN が 1 フレーム内の WPT 期間で獲得できる受電量 E_i^{Rx} は次式 4.4 で与えられる.

$$E_i^{Rx} = \sum_{k=0}^6 E_r(d_{k,i}) \quad (4.4)$$

ここで, k は HCH を表す識別子であり, $d_{k,i}$ は k 番目の HCH と i 番目の SN 間の伝送距離を表す. なお, 本研究では 7 つの HCH から WPT によって理想的に受電できると仮定しているが, 実システムでは到来する無線信号間の干渉などにより, 受電量は減少する.

SN は上記の式 4.4 に従って WPT 期間終了後に獲得受電量を自身の残余電力量 B_{pow}^i に

加算する。ただし、SN のバッテリー容量 B_{cap} を超える獲得受電量は過充電として受電不可とする。つまり SN の残余電力量 B_{pow}^i が SN のバッテリー容量 B_{cap} を超えることはなく、常に以下の式 4.5 を満たす。

$$B_{\text{pow}}^i \leq B_{\text{cap}} \quad (4.5)$$

4.7 消費電力モデル

本研究では通信ノードとして SN と HAP を想定しているが、全 HAP は商用の電源に接続されているものとして、SN での消費電力についてのみ考える。SN の動作状態には、パケット送信状態 Tx, Ack とビーコン受信状態 Rx, アイドル状態 Idle, そしてスリープ状態 Sleep の計 4 つの動作状態がある。これらの動作における単位時間あたりの消費電力 $P_{\text{Tx}}[\text{W}]$, $P_{\text{Rx}}[\text{W}]$, $P_{\text{Idle}}[\text{W}]$, $P_{\text{Sleep}}[\text{W}]$ を定義するが、その具体的な値は 5.1 節に記述する。また、1 フレームあたりに各動作で過ごす時間をパケット送信時間 $T_{\text{Tx}}[\text{s}]$, Ack 受信時間 $T_{\text{Rx}}^{\text{Ack}}[\text{s}]$, ビーコン受信時間 $T_{\text{Rx}}^{\text{Beacon}}[\text{s}]$, アイドル状態(パケット送信のためにバックオフタイマーを減算して送信を待機している状態)時間 $T_{\text{Idle}}[\text{s}]$, そしてスリープ状態時間 $T_{\text{Sleep}}[\text{s}]$ とすると、1 フレーム中に各動作で消費される電力量は次式のようになる。

$$E_{\text{Tx}} = P_{\text{Tx}} \times T_{\text{Tx}} \quad (4.6)$$

$$E_{\text{Rx}}^{\text{Ack}} = P_{\text{Rx}} \times T_{\text{Rx}}^{\text{Ack}} \quad (4.7)$$

$$E_{\text{Rx}}^{\text{Beacon}} = P_{\text{Rx}} \times T_{\text{Rx}}^{\text{Beacon}} \quad (4.8)$$

$$E_{\text{Idle}} = P_{\text{Idle}} \times T_{\text{Idle}} \quad (4.9)$$

$$E_{\text{Sleep}} = P_{\text{Sleep}} \times T_{\text{Sleep}} \quad (4.10)$$

$E_{\text{Tx}}[\text{J}]$ は、1 フレームあたりにパケット送信で消費した電力量、 $E_{\text{Rx}}^{\text{Ack}}[\text{J}]$ は 1 フレームあたりに Ack 受信で消費した電力量、 $E_{\text{Rx}}^{\text{Beacon}}[\text{J}]$ はフレーム毎のビーコンを受信したときの消費電力量、 $E_{\text{Idle}}[\text{J}]$ は 1 フレームあたりのアイドル状態で消費する電力量、 $E_{\text{Sleep}}[\text{J}]$ はフレーム毎のスリープ期間で消費する電力である。

上式 4.6~4.10 における各動作の時間について、それぞれの算出方法について記述する。伝送レート $R[\text{kbps}]$, データパケット長 $L_{\text{pkt}}[\text{Bytes}]$, Ack 長 $L_{\text{Ack}}[\text{Bytes}]$, ビーコン

長 L_{beacon} [Bytes], 1フレームあたりに送信するパケット数 N_{Tx} [packets], 1フレームあたりに受信する Ack 数 N_{Rx} [packets]とすると1フレームあたりのパケット送信時間 T_{Tx} [s], 1フレームあたりの Ack 受信時間 $T_{\text{Rx}}^{\text{Ack}}$ [s], フレーム毎のビーコン受信時間 $T_{\text{Rx}}^{\text{Beacon}}$ [s]は次式表される.

$$T_{\text{Tx}} = \frac{L_{\text{pkt}}}{R} \times N_{\text{Tx}} \quad (4.11)$$

$$T_{\text{Rx}}^{\text{Ack}} = \frac{L_{\text{Ack}}}{R} \times N_{\text{Rx}} \quad (4.12)$$

$$T_{\text{Rx}}^{\text{Beacon}} = \frac{L_{\text{beacon}}}{R} \quad (4.13)$$

続いて, 1フレームあたりのアイドル状態の時間 T_{Idle} [s]はSNが送信可能なCAP期間においてパケット送信のためにバックオフタイマーを減算して送信を待機している時間である. SNのバックオフ期間 T_{backoff} はIEEE802.15.4[12]にあるように次式で与えられる.

$$T_{\text{backoff}} = [0, 2^{BE} - 1] \quad (4.14)$$

BE (Backoff Exponent)はバックオフ指数であり, バックオフ期間 T_{backoff} は上式4.14で通信衝突回避のためにランダムに与えられる. なお, 計算の簡単のためにCAP期間内のバックオフをカウントしていない他の時間は電力を消費しないものとしている. よって1フレームあたりのアイドル状態の時間 T_{Idle} [s]はランダム値を取り, 次式で与えられる.

$$T_{\text{Idle}} = \sum_{1}^{N_{\text{Tx}}} T_{\text{backoff}} \quad (4.15)$$

最後にスリープ状態の時間 T_{Sleep} について記述する. 本研究では, 4.2節の図4.3のようにSNが他クラスタのアクティブ期間(Superframe Duration, SD [s])でスリープとなる. またWPT期間においてはスリープ状態とならず, 電力を消費しないものとしているためスリープ状態の時間 T_{Sleep} は次式で与えられる.

$$T_{\text{Sleep}} = BI - (SD + T_{\text{WPT}}) = 6SD \quad (4.16)$$

BI (Beacon Interval)[s]はビーコン間隔, T_{WPT} [s]はWPT期間である.

SNが1パケット送信に必要な電力値について記述する. SNがパケットを送信するためには, バックオフタイマーを減算して送信を待機している間に必要な電力量と送信に必要な電力量とAckを受信する電力量が必要である. そのためSNが1パケット送信に必要な電力閾値 E_{th} [J/packets]は次式で表される.

$$E_{\text{th}} = E_{\text{Idle}} + E_{\text{Tx}} + E_{\text{Rx}}^{\text{Ack}} \quad (4.17)$$

なお上式4.17は $N_{\text{Tx}} = 1$, $N_{\text{Rx}} = 1$ において成り立つ.

最後に, 各動作の消費電力量をSNの残余電力量から減算するタイミングは, それぞれの動作が完了した時点で行われる. つまり1パケットを送信したときの消費電力量 $E_{\text{Tx}}(N_{\text{Tx}} = 1)$ は, パケットの送信したタイミングで, Ackを受信した時の消費電力量 $E_{\text{Rx}}^{\text{Ack}}(N_{\text{Rx}} = 1)$ についてもAckの受信が完了したタイミングで計算され, 他の消費電力量も同様である.

第5章 特性評価

本章では、WP-WSNにおいて、提案システム(提案クラスタリング手法を適用した提案ネットワーク構造)がWPTによるSN受電量の地理的な不均一性を緩和することにより、SNの電力枯渇を低減してデータ収集性能を向上させることに対して有効であることを示すために、計算機シミュレーションによる特性評価を行う。5.1節ではシミュレーション諸元、5.2節では評価指標、5.3節では提案ネットワーク構造の性能評価結果、最後に5.4節では提案システムの性能評価結果について記述する。

5.1 シミュレーション諸元

WP-WSNにおける提案システムの性能評価において使用したシミュレーション諸元であるネットワーク構成とSN消費電力に関する主要なパラメータを表5.1, 5.2に示す。なお、表5.3のSN消費電力のパラメータは、IEEE802.15.4規格に準拠したMCUであるCC2652R[28]の使用を想定して設定した。

表 5.1: ネットワーク構成に関するパラメータ

パラメータ	記号	値	単位
クラスタ領域半径	R	20	[m]
クラスタ内 HAP 数	N_{HAP}	4~15	[台/クラスタ]
クラスタ内 SN 数	N_{SN}	2~70	[台/クラスタ]
ラウンド間隔	RI	100	[BIs]
ビーコン間隔	BI	7.86	[s]
使用周波数帯	f_c	2.4	[GHz]
アクティブ期間 (SD)	SD	0.12	[s]
通信期間 (CAP)	CAP	0.119	[s]
平均パケット生起間隔	λ	0.1	[packets/BI]
パケット長	L_{pkt}	30	[Bytes]
SN バッファサイズ		1	
1 パケット送信に必要な電力閾値 (アイドル状態を除く)	E_{th}	0.0444	[mJ/packet]
伝送レート	R	250	[kbps]
SIR 閾値	SIR_{th}	10	[dB]
再送上限回数	N_{rtx}	3	
Ack 長	L_{Ack}	20	[Bytes]
ビーコン長	L_{beacon}	15	[Bytes]
最小バックオフ指数	$macMinBE$	3	
最大バックオフ指数	$macMaxBE$	5	
チャンネルビジー判定上限数	$macMaxBackoff$	3	
WPT 期間	T_{WPT}	7.0	[s]
WPT の送信電力	P_0	36.8	[dBm]
電力変換効率	η	1.0	
SN のバッテリー容量	B_{cap}	1.0	[mJ]
アンテナゲイン	G_{ANT}	0	[dB]
距離減衰指数	α	2	

表 5.2: SN 消費電力パラメータ

パラメータ	記号	値	単位
データパケット送信	P_{Tx}	25.20	[mW]
Ack とビーコン受信	P_{Rx}	31.50	[mW]
アイドル	P_{Idle}	2.03	[mW]
スリープ	P_{Sleep}	2.82	[μ W]

5.2 評価指標

評価指標は、SN における電力枯渇率 R_{dep} と HCH におけるデータ収集率 R_{data} 、そして 3 種類のデータパケット破棄率 R_{loss} である。以下に各指標の定義を示す。

- 電力枯渇率 R_{dep} [%]

電力枯渇率 R_{dep} は SN の残余電力量が 1 パケット送信に必要な電力閾値 E_{th} を下回るシミュレーション期間内の時間割合で定義され、次の式のように算出する。

$$R_{\text{dep}} = \frac{N_{\text{frame}}^{\text{dep}}}{N_{\text{frame}}^{\text{sim}}} \times 100 \quad (5.1)$$

$N_{\text{frame}}^{\text{sim}}$ はシミュレーションの実行期間フレーム数、 $N_{\text{frame}}^{\text{dep}}$ は SN 残余電力量が電力閾値 E_{th} を下回りパケットを送信できないフレームの数を表している。本研究では、各フレームの先頭で、ビーコン受信電力 $E_{\text{Rx}}^{\text{Beacon}}$ を SN 残余電力量 B_{pow}^i から減算し、その後 SN の残余電力量が 1 パケット送信に必要な電力閾値 E_{th} を下回るならパケットを送信できない電力が枯渇したフレームであるとして $N_{\text{frame}}^{\text{dep}}$ をカウントアップする。

$$B_{\text{pow}}^i < E_{\text{th}} \quad (5.2)$$

よって、上式 5.2 を満たすとき $N_{\text{frame}}^{\text{dep}}$ をカウントアップする。

- データ収集率 R_{data} [%]

データ収集率 R_{data} は、SN で生じたデータパケットのうち、HCH で受信に成功したデータパケットの割合を示し、次の式で算出される。

$$R_{\text{data}} = \frac{N_{\text{pkt}}^{\text{col}}}{N_{\text{pkt}}^{\text{gen}}} \times 100 \quad (5.3)$$

$N_{\text{pkt}}^{\text{gen}}$ は、シミュレーション期間内に SN で生じたパケット数、 $N_{\text{pkt}}^{\text{col}}$ は HCH で受信に成功したパケット数である。

- データパケット破棄率 R_{loss} [%]

データパケット破棄率 R_{loss} は、SN で生じたデータパケットのうち次の 3 つの

各原因で破棄されたデータパケットの割合である.

- a. オーバーフローによるパケット破棄率 $R_{\text{loss}}^{\text{over}}$
 オーバーフローによるパケット破棄率 $R_{\text{loss}}^{\text{over}}$ は, SN で生じたパケットのうち, SN バッファにおいてオーバーフローによって破棄されたパケットの割合であり, 次式で算出される.

$$R_{\text{loss}}^{\text{over}} = \frac{N_{\text{pkt}}^{\text{over}}}{N_{\text{pkt}}^{\text{gen}}} \times 100 \quad (5.4)$$

$N_{\text{pkt}}^{\text{over}}$ はオーバーフローによって破棄されたパケット数である. 本研究では SN のバッファサイズを 1 としているため, パケットを所持している状態 ($B_{\text{pkt}}^i = 1$) で新たにパケットが生起するとオーバーフローとなる.

- b. チャネルビジーによるパケット破棄率 $R_{\text{loss}}^{\text{busy}}$
 チャネルビジーによるパケット破棄率 $R_{\text{loss}}^{\text{busy}}$ は SN で生じたパケットのうち, SN がキャリアセンスによって, チャネルビジーと判定される回数が上限値 *macMaxBackoff* (IEEE802.15.4 で規定) を超えた際に破棄されるパケット $R_{\text{loss}}^{\text{busy}}$ の割合であり, 次式で算出される.

$$R_{\text{loss}}^{\text{busy}} = \frac{N_{\text{pkt}}^{\text{busy}}}{N_{\text{pkt}}^{\text{gen}}} \times 100 \quad (5.5)$$

$N_{\text{pkt}}^{\text{busy}}$ はキャリアセンス時にチャネルビジーと判定される回数が上限値を超えた際に破棄されるパケット数である.

- c. 再送上限によるパケット破棄率 $R_{\text{loss}}^{\text{reTx}}$
 再送上限によるパケット破棄率 $R_{\text{loss}}^{\text{reTx}}$ は SN で生じたパケットのうち, SN でのパケット再送回数が最大再送回数 N_{rtx} を超えた際に破棄されるパケットの割合であり, 次式で算出される.

$$R_{\text{loss}}^{\text{reTx}} = \frac{N_{\text{pkt}}^{\text{reTx}}}{N_{\text{pkt}}^{\text{gen}}} \times 100 \quad (5.6)$$

$N_{\text{pkt}}^{\text{reTx}}$ は再送回数が最大再送回数 N_{rtx} を超えた際に破棄されるパケット数である.

5.3 提案ネットワーク構造の性能評価

本節では、3.1 節で記述した提案ネットワーク構造の性能評価を行うために、まず 3.2 節で記述した提案クラスタリング手法を用いず、従来クラスタリング手法の RR と LEACH を提案ネットワーク構造に適用して、HCH を交替する。なお RR 手法を適用した場合は、HAP を ID 順に各ラウンドで 1 台を選出し、LEACH 手法を適用した場合は、各ラウンドで 1 台の HAP を連続して同一 HAP が CH にならないように確率的にランダム選出する。

提案ネットワーク構造と性能を比較対象の従来ネットワーク構造として、単一の HAP を各クラスタ領域中心に配置するクラスタ中心配置手法、単一の HAP を各クラスタの SN の重心に配置する重心配置手法を考える。一方で複数 WPT 装置を用いる手法として、各クラスタに N_{HAP} の HAP をランダム配置し各 HAP が P_0/N_{HAP} の送信電力で分散給電を行う分散 WPT 手法を考える。分散 WPT 手法においては、各 HAP での送信電力を P_0/N_{HAP} とすることで、提案ネットワーク構造や先に説明したクラスタ中心配置手法、重心配置手法における WPT と HAP で消費される電力量が等しくなり、システムの供給電力の面で公平となる。

- 電力枯渇率 R_{dep} とデータ収集率 R_{data}

図 5.1 にクラスタ内と SN 数 N_{SN} を変化させた時の全 SN で平均した電力枯渇率 R_{dep} 特性を示す。クラスタ内 HAP 数 N_{HAP} は 4 とした。図 5.1 より最も電力枯渇率を低減できているのは重心配置手法であり、RR 手法や LEACH 手法を適用した提案ネットワーク構造は重心配置手法をはじめとする従来ネットワーク構造と比較して電力枯渇率が低減できていない。RR 手法や LEACH 手法では、電力が枯渇している SN に対して大電力供給可能な当該 SN の近傍に位置する HAP が必ずしも HCH に選出されるわけではないため十分に電力枯渇を低減できない。これに対して、重心配置手法では SN の重心に直接 HAP を配置するため SN 数が小さいときに SN-HAP 間の伝送距離が比較的小さくなるため電力枯渇率性能が良好となる。また、SN 数の増加に伴い SN 配置の地理的な均一化が進むためクラスタ中心に HAP が配置されやすくなるためクラスタ中心配置手法の性能に近づく。さらに、分散 WPT 手法では複数の HAP が同時分散給電するため、重心配置手法やクラスタ中心配置手法に比べて、SN が WPT を実施する HAP から遠方となることが少なくなるため SN 数の変化に対して電力枯渇率はほとんど変化しない。

図 5.2 にクラスタ内 SN 数 N_{SN} を変化させた時の全 SN で平均したデータ収集率 R_{data} 特性を示す。クラスタ内 HAP 数 N_{HAP} は 4 とした。図 5.2 では、図 5.1 の電力枯渇率 R_{dep} 特性が優れている手法の順にデータ収集率特性が良いことが示されている。これは電

力枯渇による SN でのデータパケット送信不可が，電力枯渇の低減により送信可となる機会が増加したためである．ゆえにデータ収集率 R_{data} を向上には電力枯渇率 R_{dep} の低減が不可欠であることが分かる．

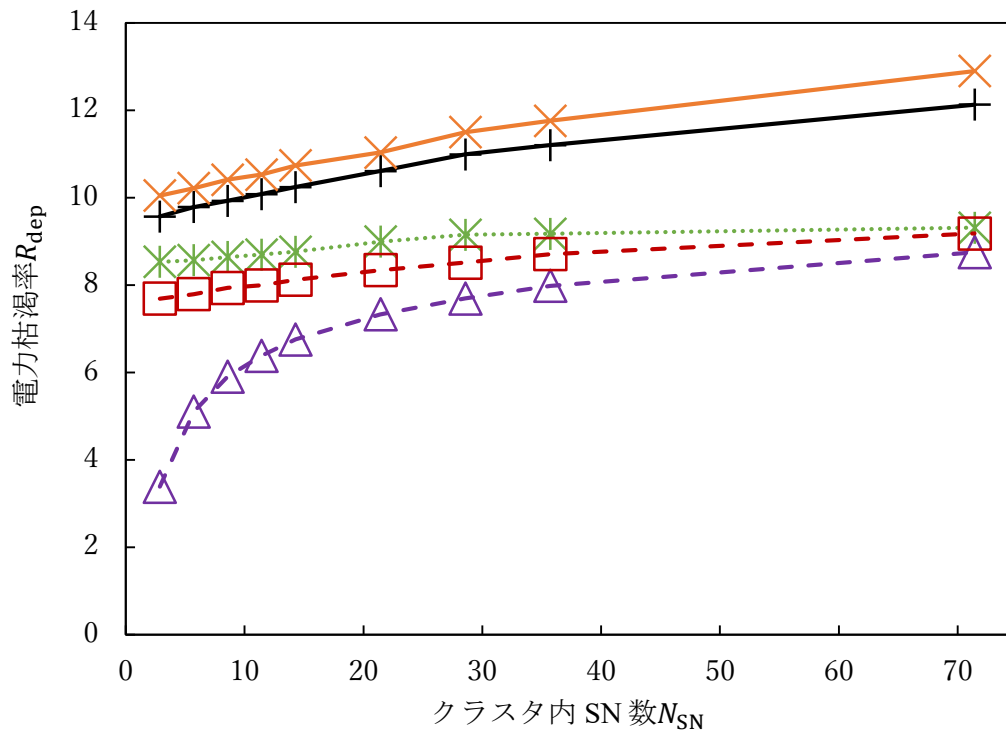


図 5.1: SN 数変化時の電力枯渇率 R_{dep}

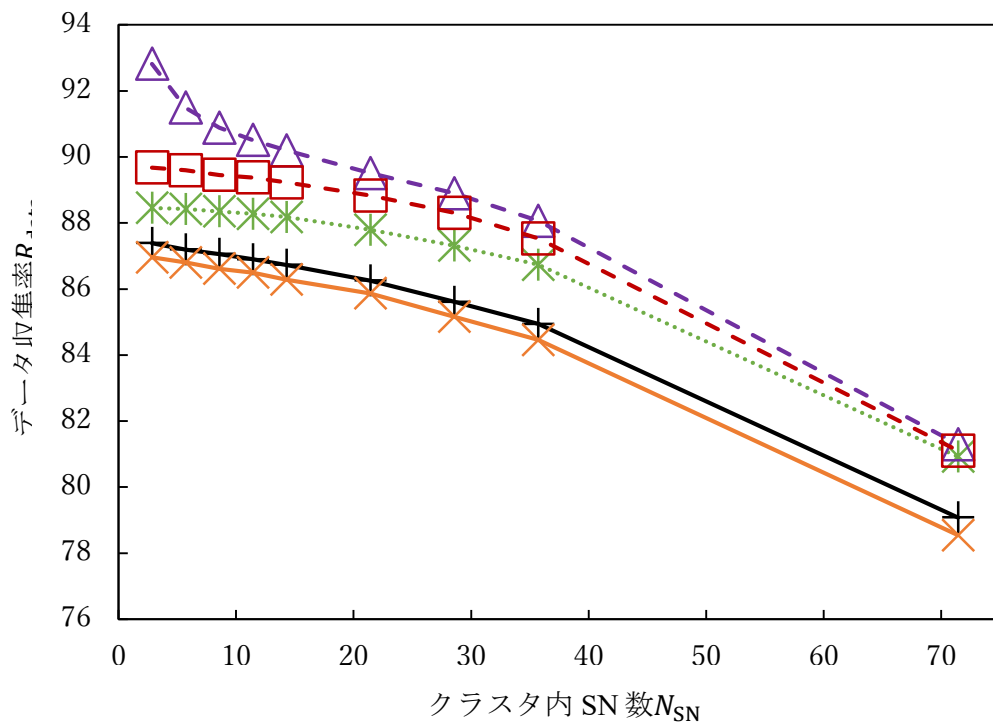
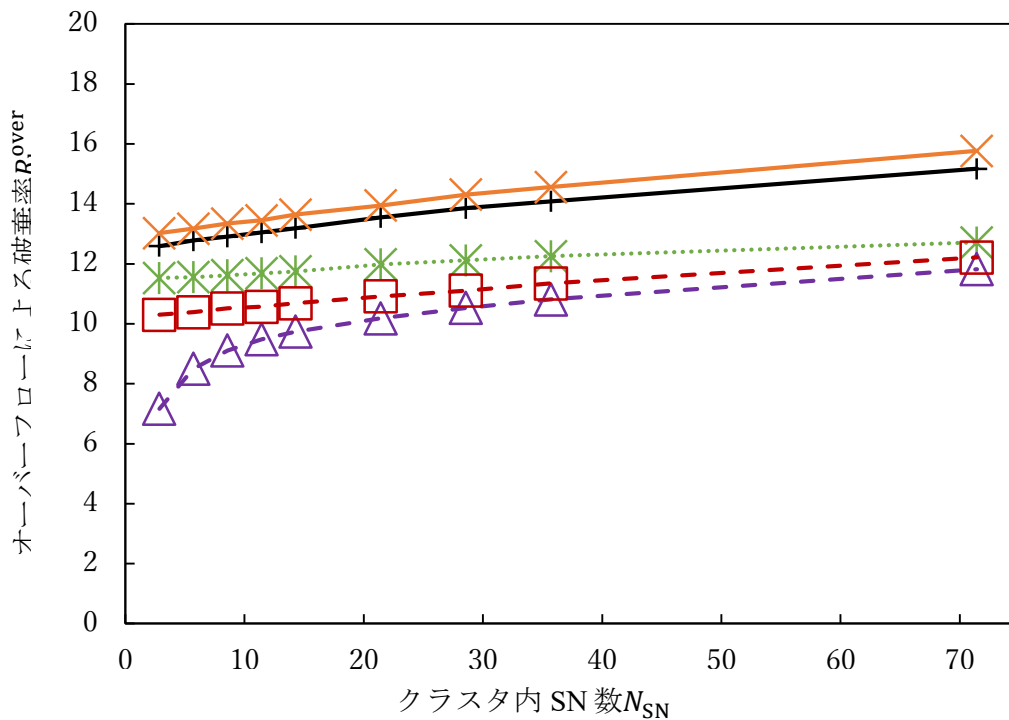


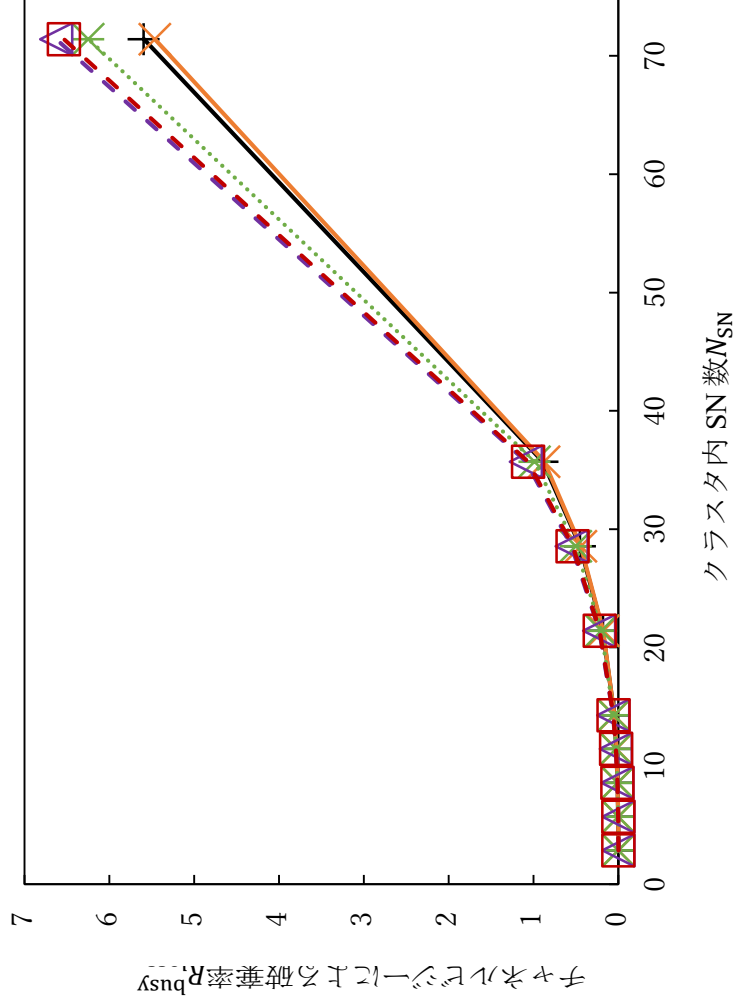
図 5.2: SN 数変化時のデータ収集率 R_{data}

● データパケット破棄率 R_{loss}

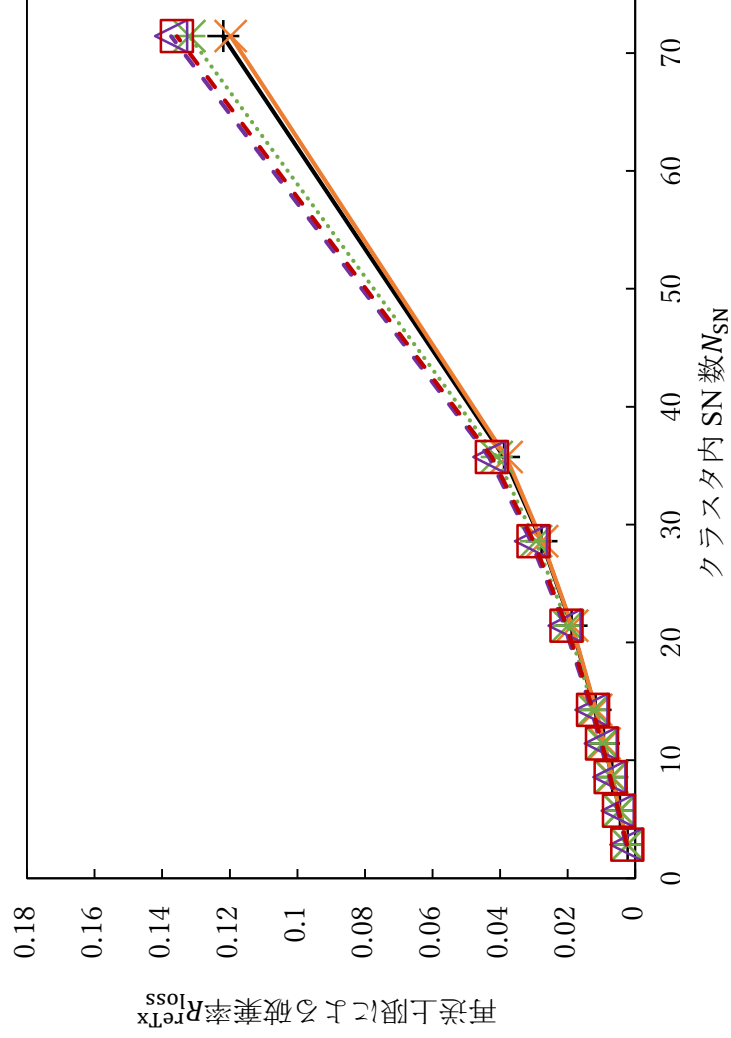
図 5.3 にクラスタ内 SN 数 N_{SN} を変化させた時の全 SN で平均したデータパケット破棄率 R_{loss} 特性を示す。クラスタ内 HAP 数 N_{HAP} は 4 とした。図 5.3 よりデータパケットが破棄される最大要因は、(a)の packets オーバーフローによる破棄で、次に(b)のチャネルビジーによるパケット破棄、そして最後に(c)再送上限によるパケット破棄である。(a)の packets オーバーフローによる破棄率 $R_{\text{loss}}^{\text{over}}$ での各手法の性能は、図 5.1 に示した電力枯渇率 R_{dep} 特性における性能と同一である。これは、電力枯渇によりデータパケットを送信できず、パケットを所持している時間が長いためである。つまり packets オーバーフロー率 $R_{\text{loss}}^{\text{over}}$ は SN の電力枯渇に大きく依存している。一方で、(b)チャネルビジーによる破棄率 $R_{\text{loss}}^{\text{busy}}$ と(c)再送上限によるパケット破棄率 $R_{\text{loss}}^{\text{reTx}}$ では RR 手法や LEACH 手法の方が従来ネットワーク構造に比べて小さい。これは、(a)とは逆に RR 手法や LEACH 手法では電力枯渇を低減できないため、競合する端末数が少なくなるためである。



(a) packets オーバーフローによる packets 破棄率 $R_{\text{loss}}^{\text{over}}$



(b) チャネルビジーによるパケット破棄率 $R_{\text{loss}}^{\text{busy}}$



(c) 再送上限によるパケット破棄率 $R_{\text{loss}}^{\text{reTx}}$

図 5.3: SN 数変化時のデータパケット破棄率 R_{loss}

- SN間の電力枯渇率 R_{dep} とデータ収集率 R_{data} の性能差評価

図 5.4 と図 5.5 にクラスタ内の SN 数 N_{SN} を変化させた時の電力枯渇率 R_{dep} とデータ収集率 R_{data} の SN 間の標準偏差をそれぞれ示す。クラスタ内 HAP 数 N_{HAP} は 4 とした。図 5.4 と 5.5 から、SN 数が大きいときに RR 手法や LEACH 手法を適用した提案ネットワーク構造は電力枯渇率 R_{dep} とデータ収集率 R_{data} における SN 間標準偏差を縮小していることが分かる。つまり、各 SN が同程度の電力枯渇率 R_{dep} やデータ収集率 R_{data} を示すことになり、SN 間の性能差を低減している。そのため性能の公平性での観点では提案ネットワーク構造のような WPT 提供位置を変化させることが有効策の一つであるといえる。このような公平性を提供できる理由としては、WPT 提供位置から遠方に配置された SN であっても交替動作により、時間経過で WPT 提供位置が変化するため、距離に依存した電力枯渇の低減が出来るためであると考えられる。そこで次に SN 位置による地理的な SN 間性能の不均一性をより詳細に調査するために、距離ごとの電力枯渇率 R_{dep} とデータ収集率 R_{data} を示す。

図 5.6 と図 5.7 に、SN 数 $N_{\text{SN}} = 30$ の時のクラスタ中心からの距離ごとに当該距離に位置する SN で平均した電力枯渇率 R_{dep} とデータ収集率 R_{data} の特性を示す。クラスタ内 HAP 数 N_{HAP} は 4 とした。SN 重心配置手法とクラスタ中心配置手法では、単一の HAP がクラスタ中心に配置されやすい、もしくはクラスタ中心に配置されるため、クラスタ中心に近い SN の電力枯渇率とデータ収集率が良好であるが、クラスタ中心から遠方のクラスタエッジ付近の SN では WPT による受電量が小さくなるため両性能は著しく劣化している。一方で RR 手法や LEACH 手法を適用した提案ネットワーク構造は、クラスタ中心に近い位置でも幾分か電力枯渇が発生して、データ収集性能が劣化しているが、WPT 提供位置の変化によりクラスタエッジ付近での大きな劣化は低減されている。また、分散 WPT 手法においても複数 WPT 装置からの同時給電であるため、他の従来ネットワーク構造と比較しても良好な電力枯渇率とデータ収集率 R_{data} 特性が得られている。結果として提案ネットワーク構造では、WPT 提供位置の変化により受電量の地理的な不均一性を緩和し、SN 間の電力枯渇率 R_{dep} とデータ収集率特性における公平性の改善に寄与できると言える。

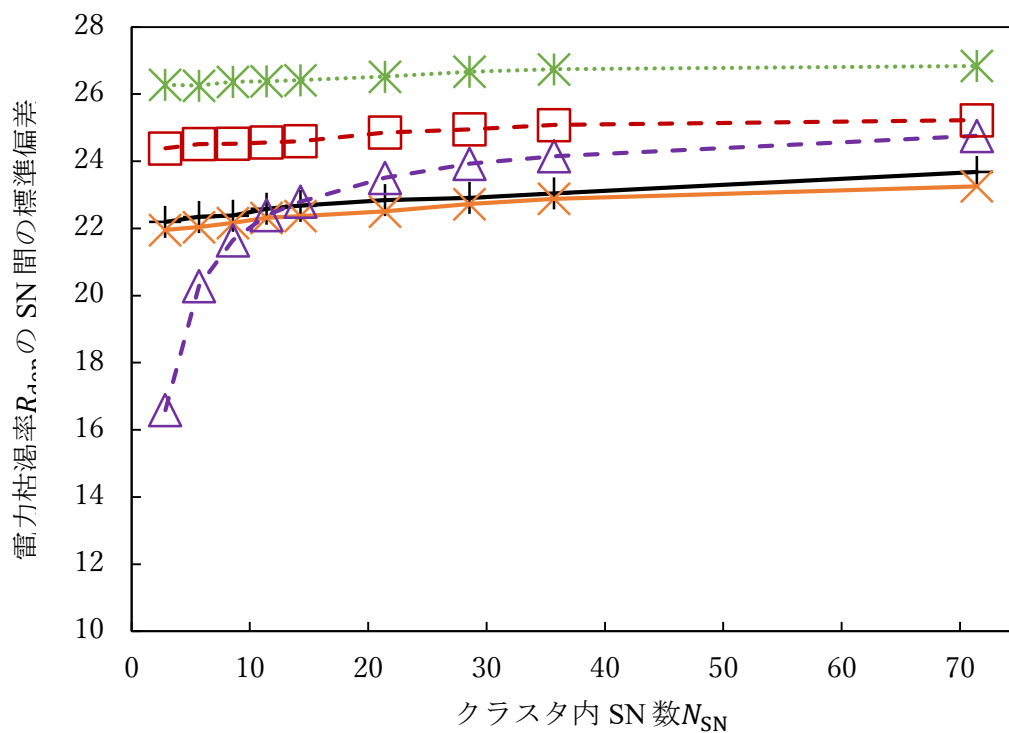


図 5.4: SN 数変化時の電力枯渇率 R_{dep} の SN 間の標準偏差

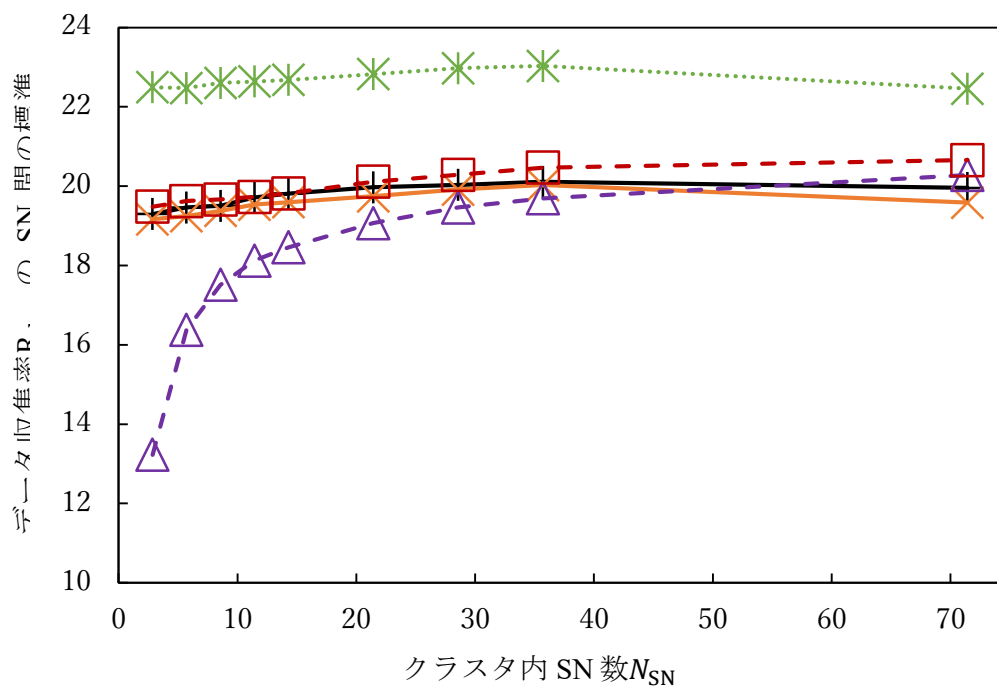


図 5.5: SN 数変化時のデータ収集率 R_{data} の SN 間の標準偏差

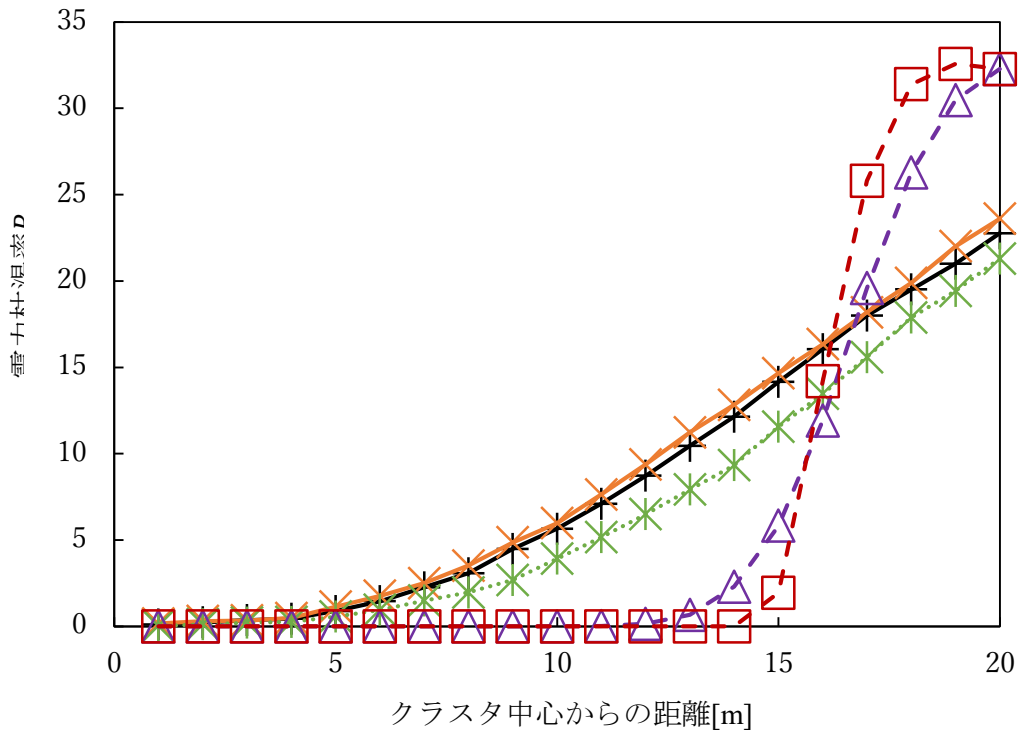


図 5.6: 距離変化時の電力枯渇率 R_{dep}

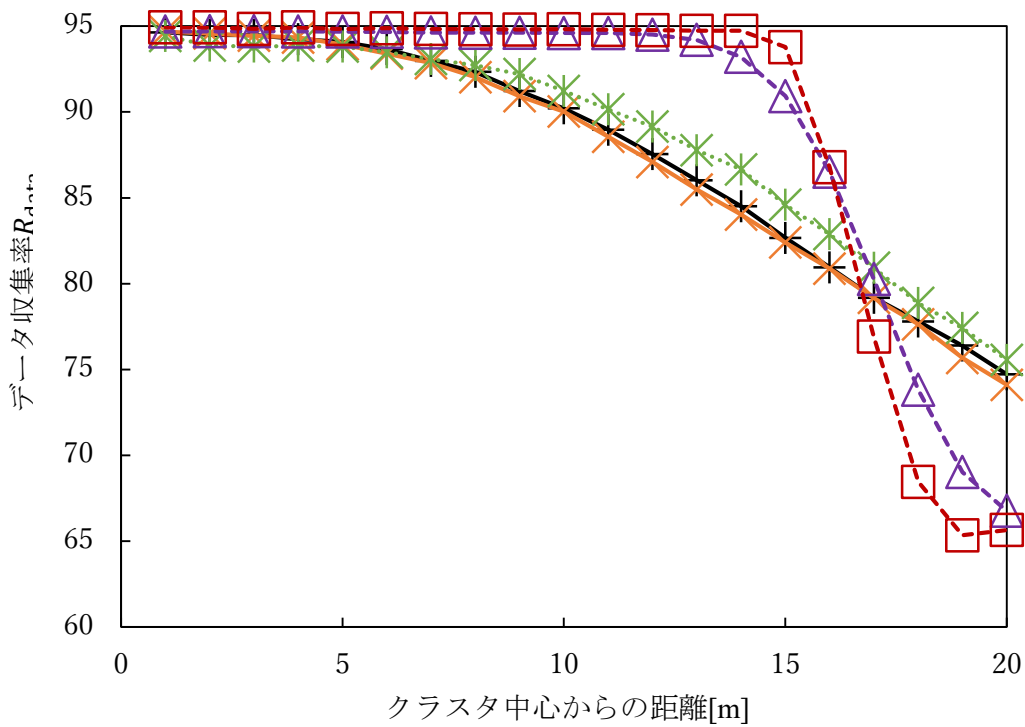


図 5.7: 距離変化時のデータ収集率 R_{data}

提案ネットワーク構造に RR 手法や LEACH 手法などを適用して，従来ネットワーク構造と性能比較を行った結果，電力枯渇率とデータ収集率の SN 間の標準偏差が改善され両者における SN 間の公平性の観点では優れていることが示された．特に WPT 提供位置が変化するため，従来ネットワーク構造と比較して図 5.6 や 5.7 にあるような電力枯渇率 R_{dep} とデータ収集率の距離評価においてクラスタエッジ付近の SN での大きな性能劣化を低減した．つまり，受電量の地理的な不均一性を緩和し，SN 間の電力枯渇率とデータ収集率 R_{data} 特性の公平性を改善している．しかし，図 5.1, 5.2 にあるように電力枯渇率とデータ収集率自体は従来ネットワーク構造の性能に及ばない結果となった．これは従来クラスタリング手法では WPT による SN への電力給電が未考慮であるため電力枯渇の抑制には不十分であることに起因すると考えられる．よって提案ネットワーク構造において良好なデータ収集率を得るためには，WPT を考慮した SN 電力枯渇を低減可能なクラスタリング手法が必要となる．

5.4 提案システムの性能評価

本節では、3.2節で記述した提案クラスタリング手法の性能を評価する。5.4.1節では提案クラスタリング手法の制御パラメータの最適化、5.4.2節では提案ネットワーク構造に最適化した制御パラメータを用いた提案クラスタリング手法を適用した場合の性能評価について記述する。

5.4.1 制御パラメータの最適化

3.2節で記述した提案クラスタリング手法では、残余電力量の小さいSN数だけをHCH選出基準値の算出対象とするために3種の考慮対象SN範囲を提案した。各考慮対象SN範囲では、残余電力量の小さいSNをHCH選出基準値算出の考慮対象とするために、制御パラメータ(考慮対象範囲1: N_c , 考慮対象範囲2: R_c , 考慮対象範囲3: S_{th})を導入した。これら制御パラメータは、SNの残余電力の状態などから適切に設定する必要がある。よって本節ではSN数を変化させた時の電力枯渇率から各制御パラメータの最適化を行う。

図5.8では考慮対象範囲1の制御パラメータ N_c の最適化として、クラスタ内SN数 N_{SN} を変化させた時の全SNで平均した電力枯渇率 R_{dep} 特性を示す。クラスタ内HAP数 N_{HAP} は4とした。考慮対象範囲1ではSN数が大きい場合($N_{SN} \geq 30$)では制御パラメータ N_c を大きく設定することで電力枯渇率が低減できている。しかし、SN数が小さい場合では逆に性能劣化が見られる。この性能劣化の要因としては、SN数が小さいと残余電力量が小さいSN数も少数となり、そのため N_c を大きく設定すると残余電力量が十分なSNまでもHCH選出基準値の算出の考慮対象となってしまうためである。よってSN数が小さいときに性能劣化が著しい $N_c = 5$ は不適であり、 $N_c = 3$ を考慮対象範囲1の最適制御パラメータ値とする。

図5.9では考慮対象範囲2の制御パラメータ R_c の最適化として、クラスタ内SN数 N_{SN} を変化させた時の全SNで平均した電力枯渇率 R_{dep} 特性を示す。クラスタ内HAP数 N_{HAP} は4とした。考慮対象範囲2は、考慮対象範囲1と同様にSN台数基準であるが、SN数が小さいときの性能劣化はない。これは、考慮対象範囲2では制御パラメータ R_c が考慮対象数の割合として導入されているためSN数が小さい場合に N_c が小さくなるためである。 R_c が0.3や0.4と大きく設定されると、HCH選出基準値の算出に残余電力量の大きいSNが考慮対象となってしまうため性能が若干劣化する。よって、図5.9よりどのSN数においても電力枯渇を低減できている $R_c = 0.2$ を考慮対象範囲2の最適制御パラメータ値とする。

図5.10では考慮対象範囲3の制御パラメータ S_{th} の最適化として、クラスタ内SN数 N_{SN} を変化させた時の全SNで平均した電力枯渇率 R_{dep} 特性を示す。クラスタ内HAP数

N_{HAP} は4とした。考慮対象範囲3ではSN数が小さい場合に制御パラメータ S_{th} が大きいほど電力枯渇が低減され、一方でSN数が大きい場合は S_{th} が小さいほど電力枯渇が低減されている。これは、SNが小さい場合に残余電力量が小さいSN数も少数となり、残余電力閾値 S_{th} をある程度大きく設定しないと閾値を下回るSNが存在しない状況になり、このような状況下において考慮対象範囲3ではランダムにHCHを選出するためであり、また逆にSN数が大きい場合には残余電力量が小さいSN数が増えるため、閾値 S_{th} を小さく設定することで、残余電力が小さいSNが優先的にHCH選出指標値算出の考慮対象となるためである。図5.10より、どのSN数においても電力枯渇を低減できている $S_{\text{th}} = 0.5$ を考慮対象範囲3の制御パラメータ値とする。

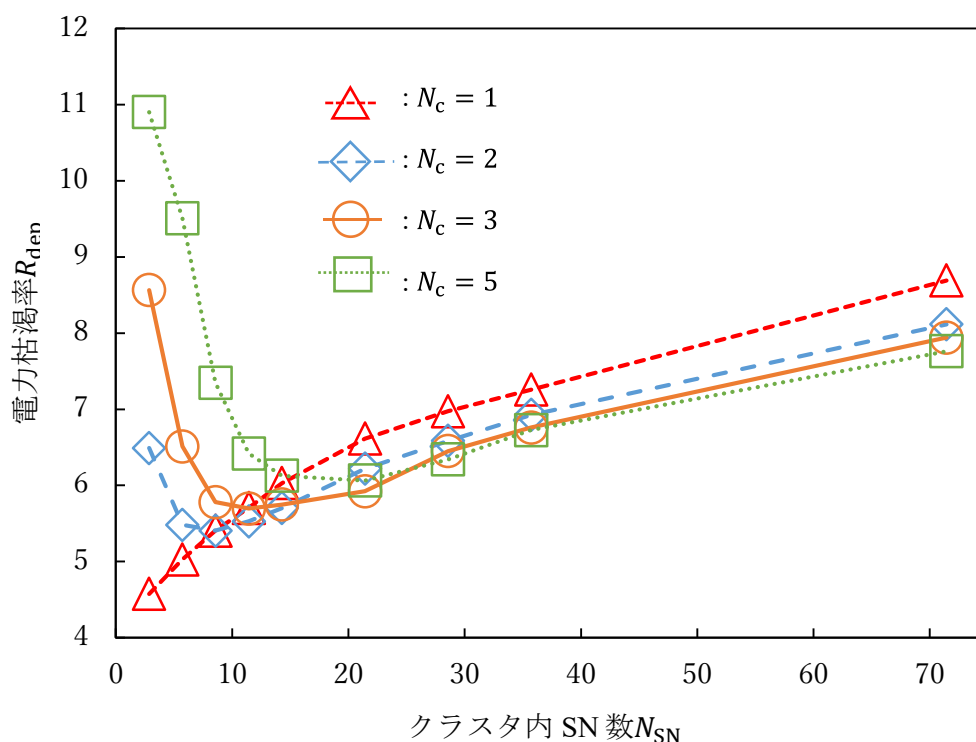


図 5.8: 考慮対象範囲1の電力枯渇率 R_{dep}

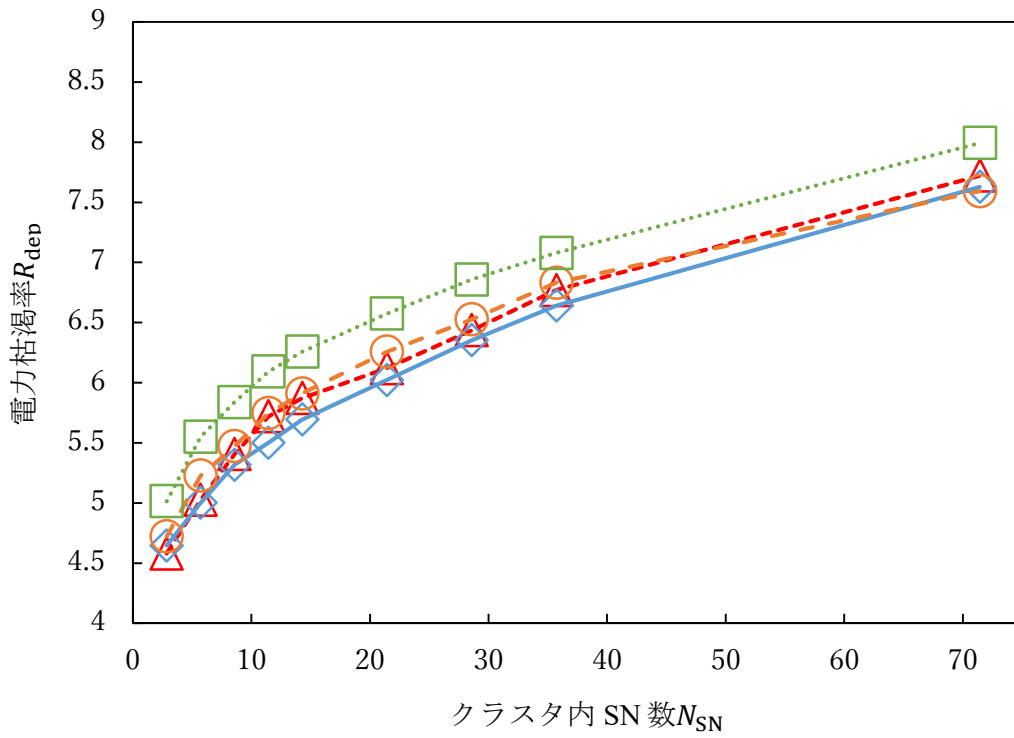


図 5.9: 考慮対象範囲 2 の電力枯渇率 R_{dep}

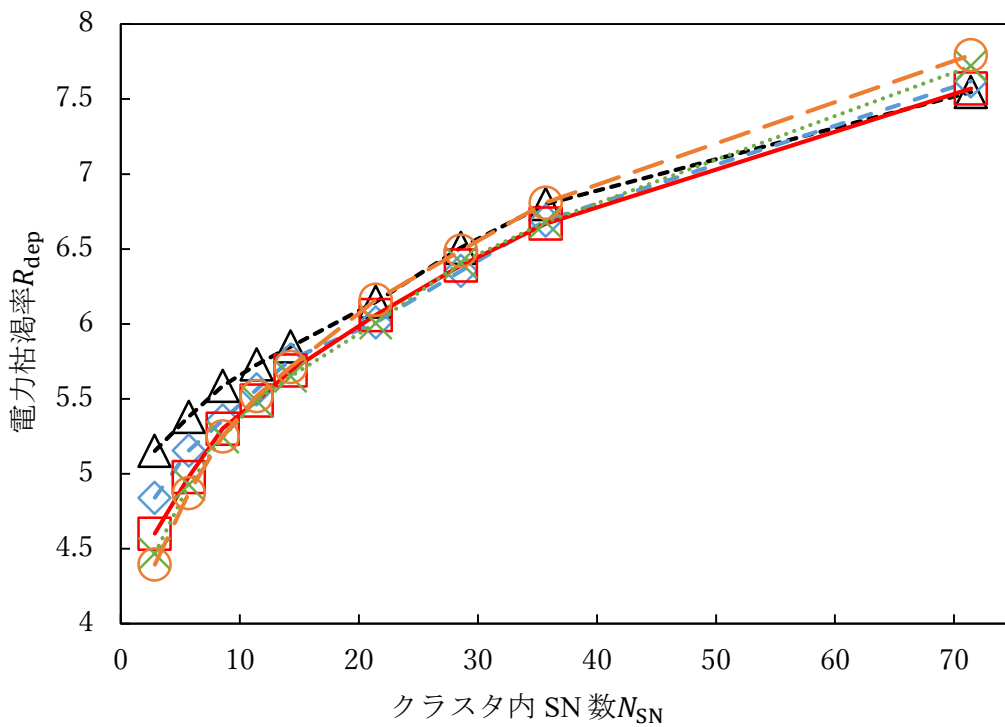


図 5.10: 考慮対象範囲 3 の電力枯渇率 R_{dep}

5.4.2 提案クラスタリング手法の性能評価

本節では、3章で記述した残余電力量を考慮した提案クラスタリング手法を適用した提案ネットワーク構造である提案システムの特性能評価を行う。なお、提案クラスタリング手法の考慮対象範囲の制御パラメータは5.4.1節で決定した最適値を用いる。

提案システムと性能比較する従来システムとして、従来ネットワーク構造では、5.3節での評価において、電力枯渇率 R_{dep} とデータ収集率 R_{data} 特性が優れていた重心配置手法と、両特性の公平性において優れていた分散 WPT 手法を考える。また、従来クラスタリング手法では、提案ネットワーク構造での併用で優れた特性を示す RR 手法を比較対象とする。

● 電力枯渇率 R_{dep} とデータ収集率 R_{data}

図 5.11 にクラスタ内の SN 数 N_{SN} を変化させた時の全 SN で平均した電力枯渇率 R_{dep} 特性を示す。クラスタ内 HAP 数 N_{HAP} は4とした。図 5.11 より提案システムの考慮対象範囲2と3は、従来ネットワーク構造の2手法や従来クラスタリングの RR 手法と比較して、SN 数が極めて小さい場合($N_{SN} \leq 3$)を除き電力枯渇を低減できていることがわかる。また提案システムの考慮対象範囲1においても SN 数が10台以上の場合は、同様に比較手法よりも優れた電力枯渇率 R_{dep} 特性を示す。しかし、考慮対象範囲1では SN 数が小さい場合の性能劣化を抑えるために制御パラメータ N_c をある程度小さく設定する必要があるため、SN 数が大きくなる($N_{SN} \geq 36$)に従い HCH 選出指標値算出において考慮されるべき残余電力量の小さい SN を適切に選定できなくなり、考慮対象範囲2や3に比べて性能が劣化している。提案システムが比較手法よりも電力枯渇率 R_{dep} 特性が優れている理由としては、残余電力量の小さい SN に対して近い HAP が HCH として大電力を給電できているためである。

図 5.12 にクラスタ内の SN 数 N_{SN} を変化させた時の全 SN で平均したデータ収集率 R_{data} 特性を示す。クラスタ内 HAP 数 N_{HAP} は4とした。図 5.12 では、図 5.11 に示されている電力枯渇の低減に起因して、SN でのデータパケット送信回数が増加するため、提案システムは従来ネットワーク構造や RR 手法に比べて、データ収集率 R_{data} 特性の向上を達成している。

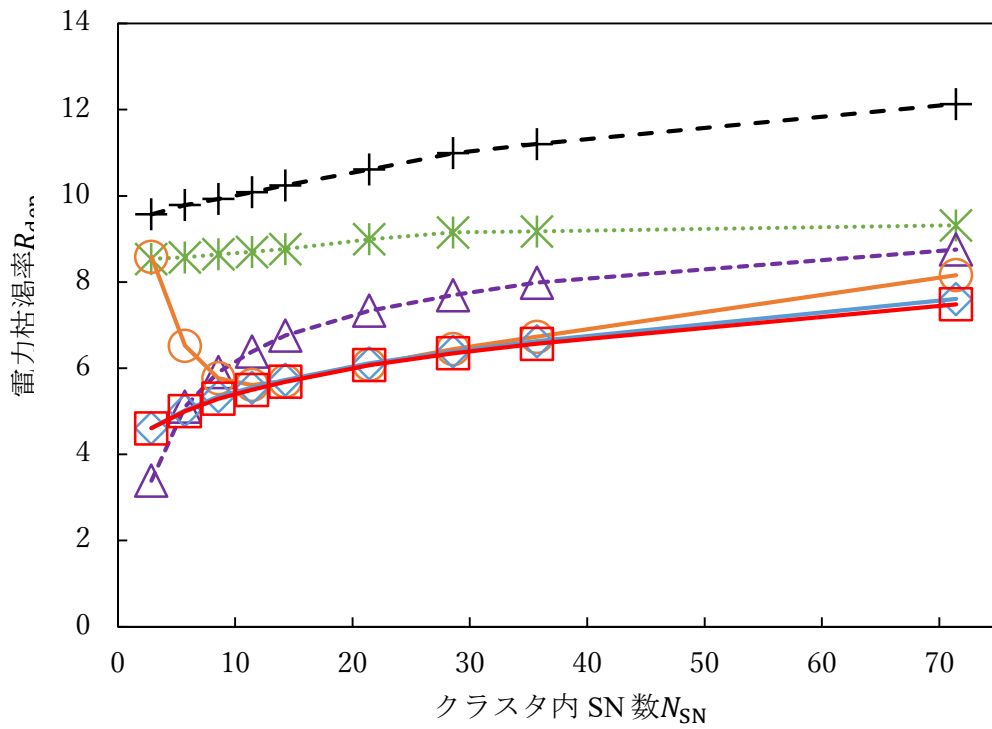


図 5.11: SN 数変化時の電力枯渇率 R_{dep}

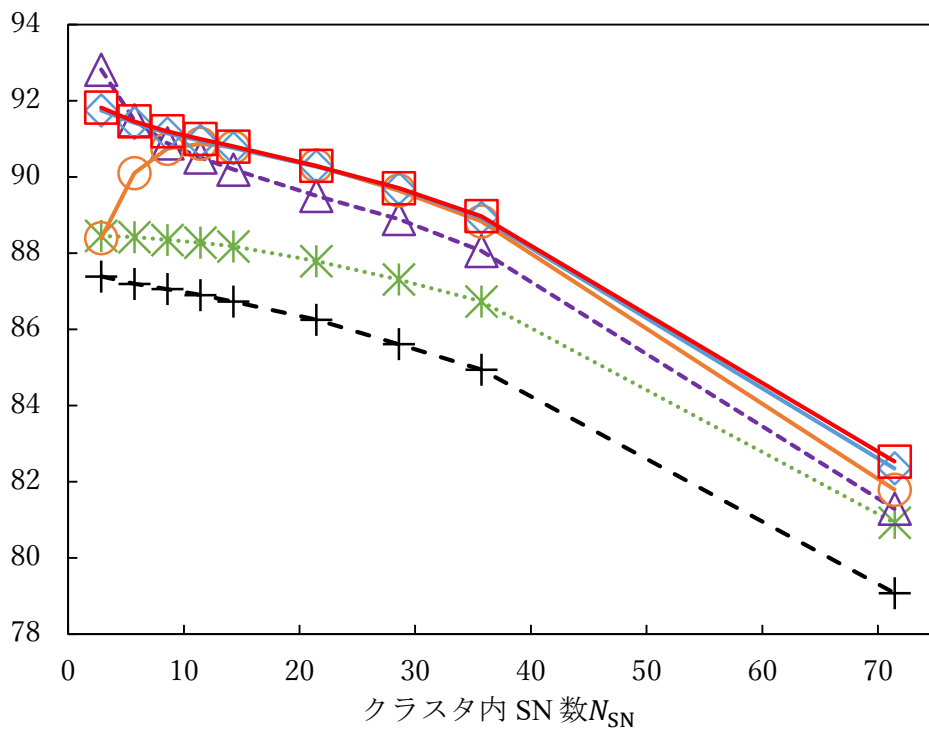
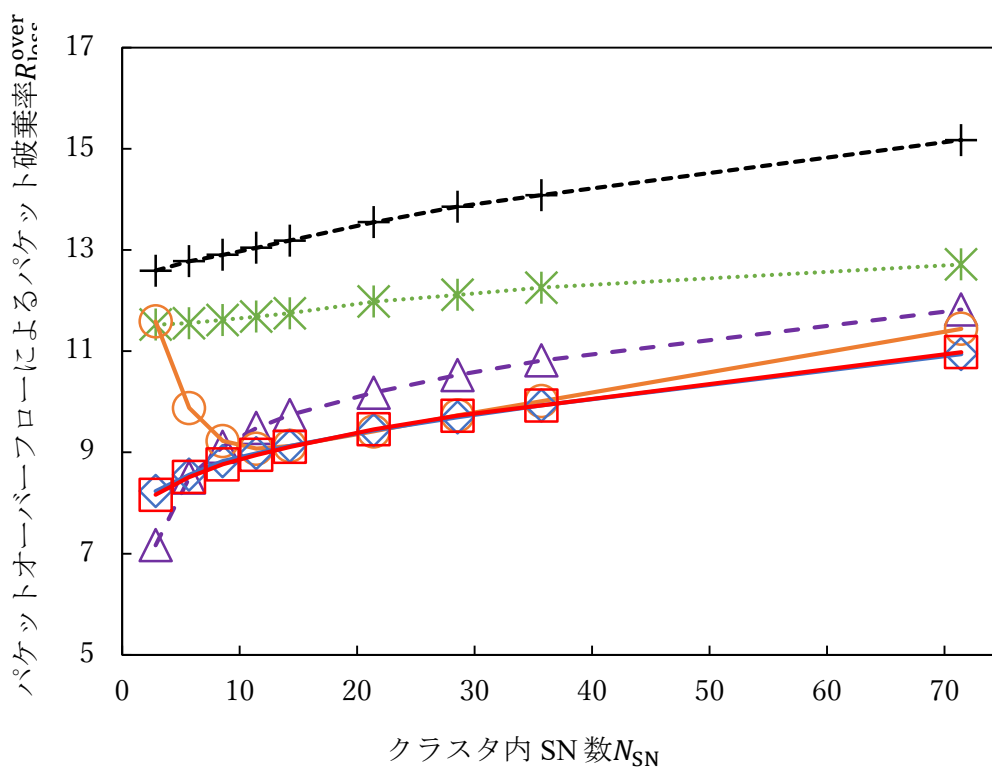


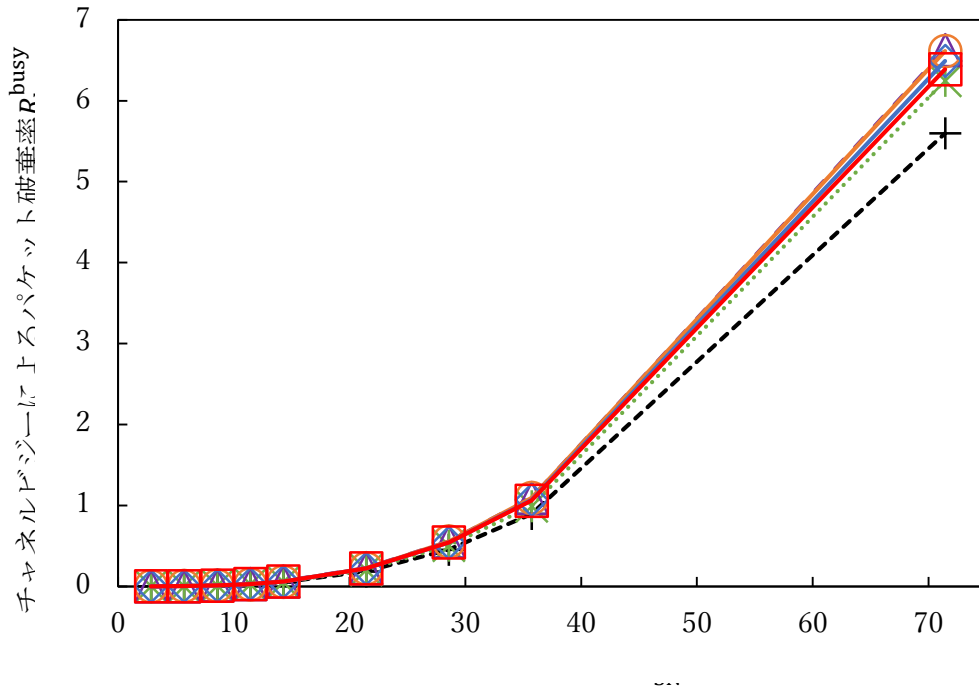
図 5.12: SN 数変化時のデータ収集率 R_{data}

● データパケット破棄率 R_{loss}

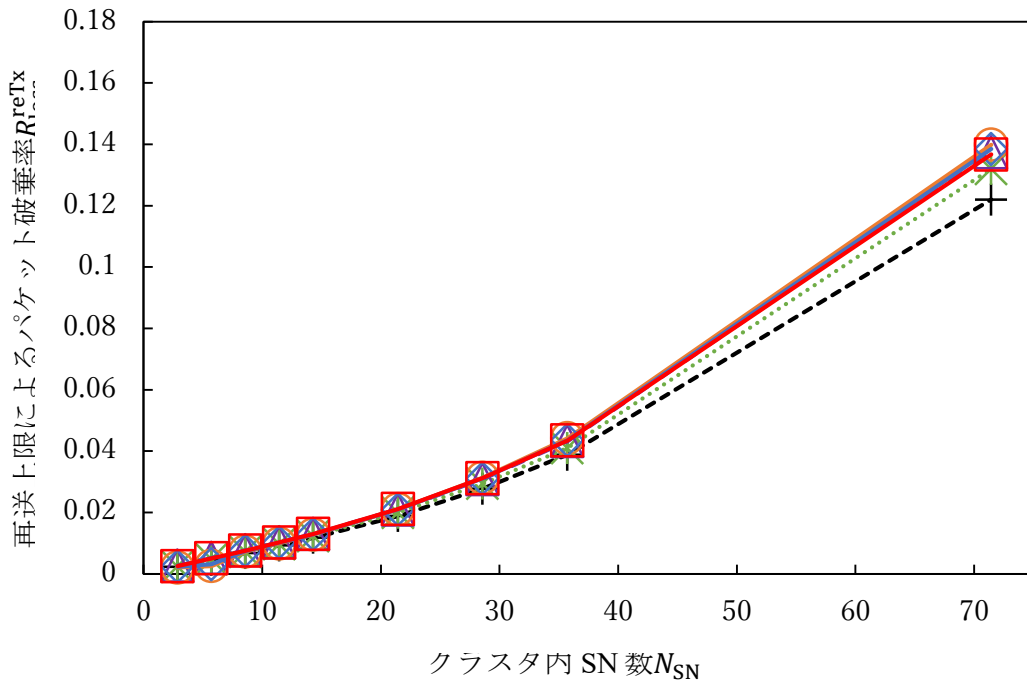
図 5.13 にクラスタ内 SN 数 N_{SN} を変化させた時の全 SN で平均したデータパケット破棄率 R_{loss} 特性を示す。クラスタ内 HAP 数 N_{HAP} は 4 とした。図 5.13 より、図 5.3 と同様にパケットが破棄される原因は(a)パケットオーバーフローによる破棄、(b)チャネルビジーによるパケット破棄、(c)再送上限によるパケット破棄の順に大きい。(a)のパケットオーバーフローによる破棄率 $R_{\text{loss}}^{\text{over}}$ も先のデータ収集率 R_{data} と同様に、電力枯渇率を低減され、SN がバッファ内にデータパケットを保持しない状態が多くなるため、提案システムではデータパケット破棄率 R_{loss} が低下している。(b)チャネルビジーによる破棄率 $R_{\text{loss}}^{\text{busy}}$ と(c)再送上限によるパケット破棄率 $R_{\text{loss}}^{\text{reTx}}$ では、電力枯渇率 R_{loss} を低減されたことによる競合端末数の増加で、提案システムの方が大きな値を示している。



(a) パケットオーバーフローによるパケット破棄率 $R_{\text{loss}}^{\text{over}}$



(b) チャネルビジーによるパケット破棄率 $R_{\text{loss}}^{\text{busy}}$



(c) 再送上限によるパケット破棄率 $R_{\text{loss}}^{\text{reTx}}$

図 5.13: SN 数変化時のデータパケット破棄率 R_{loss}

- SN間の電力枯渇率 R_{dep} とデータ収集率 R_{data} の性能差評価

図 5.14 と図 5.15 にクラスタ内 SN 数 N_{SN} を変化させた時の電力枯渇率 R_{dep} とデータ収集率 R_{data} の SN 間での標準偏差をそれぞれ示す。クラスタ内 HAP 数 N_{HAP} は 4 とした。図 5.14 と 5.15 より、従来クラスタリング手法の RR 手法においても従来ネットワーク構造の 2 手法よりも SN 間の標準偏差を小さくできているが、提案システムはより小さい標準偏差を達成できている。よって提案クラスタリング手法では、残余電力量の小さい SN に大電力を供給しデータ収集率を向上させているため、従来クラスタリング手法に比べ公平性という観点でも優れている。また、次に SN 位置による地理的な SN 間性能の不均一性をより詳細に調査するために、5.3 節と同様に距離ごとの電力枯渇率 R_{dep} とデータ収集率 R_{data} を示す。

図 5.16 と図 5.17 に、SN 数 $N_{\text{SN}} = 30$ の時のクラスタ中心からの距離ごとに当該距離に位置する SN で平均した電力枯渇率 R_{dep} とデータ収集率 R_{data} の特性を示す。クラスタ内 HAP 数 N_{HAP} は 4 とした。図 5.16 と 5.17 より、提案システムは、分散 WPT 手法や RR 手法と比べて両特性が優れており、距離にかかわらず良好な性能を提供できると言える。また重心配置手法と比べてクラスタ中心からの距離が 5~15[m]では電力枯渇率特性がわずかに劣化するが、遠方のクラスタエッジ付近の特性では大幅に優れていることがわかる。提案システムでは、WTP 提供位置の変化により、比較手法よりも受電量の地理的な不均一性を緩和でき、さらに残余電力量の小さい SN に対して大電力を供給するため、全ての位置において良好な電力枯渇率 R_{dep} とデータ収集率 R_{data} 特性が提供できる。

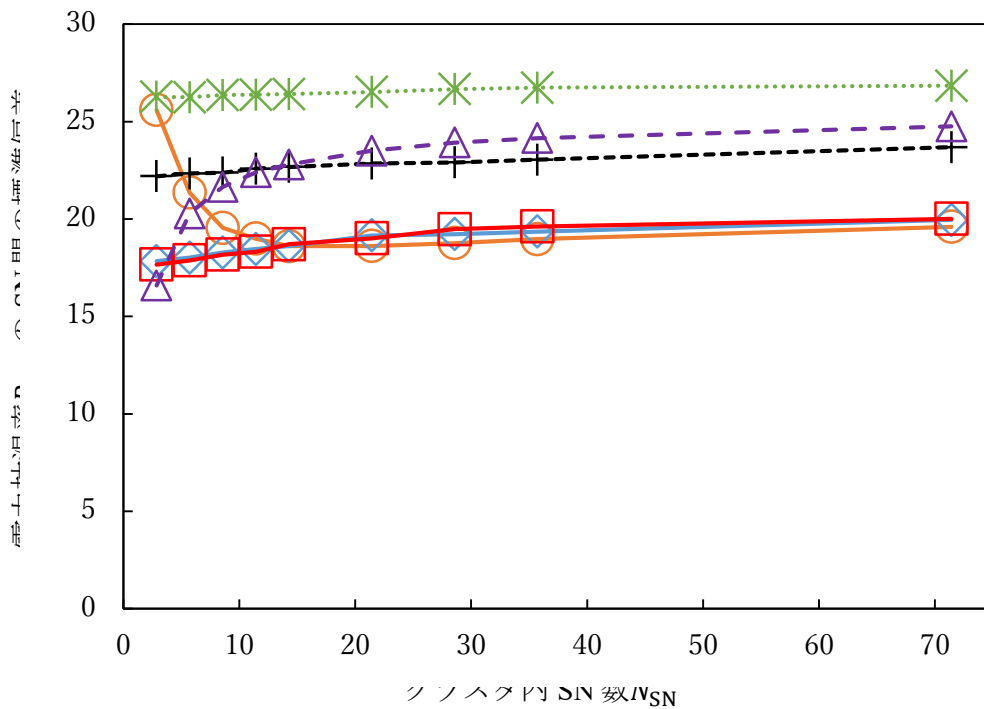


図 5.14: SN 数変化時の電力枯渇率 R_{dep} の SN 間の標準偏差

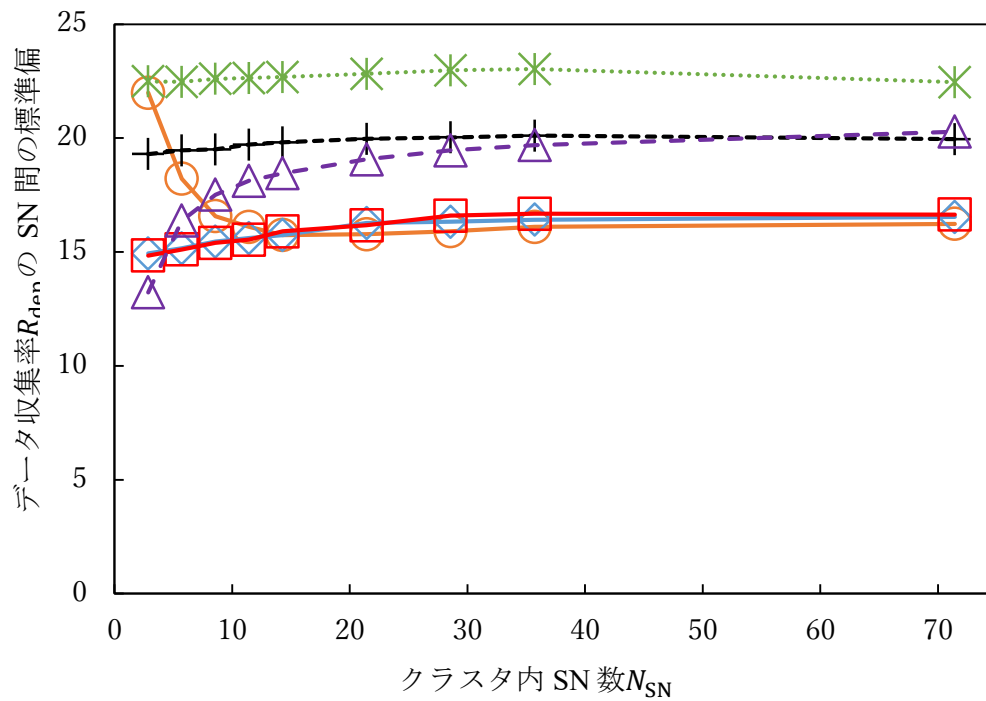


図 5.15: SN 数変化時のデータ収集率 R_{data} の SN 間の標準偏差

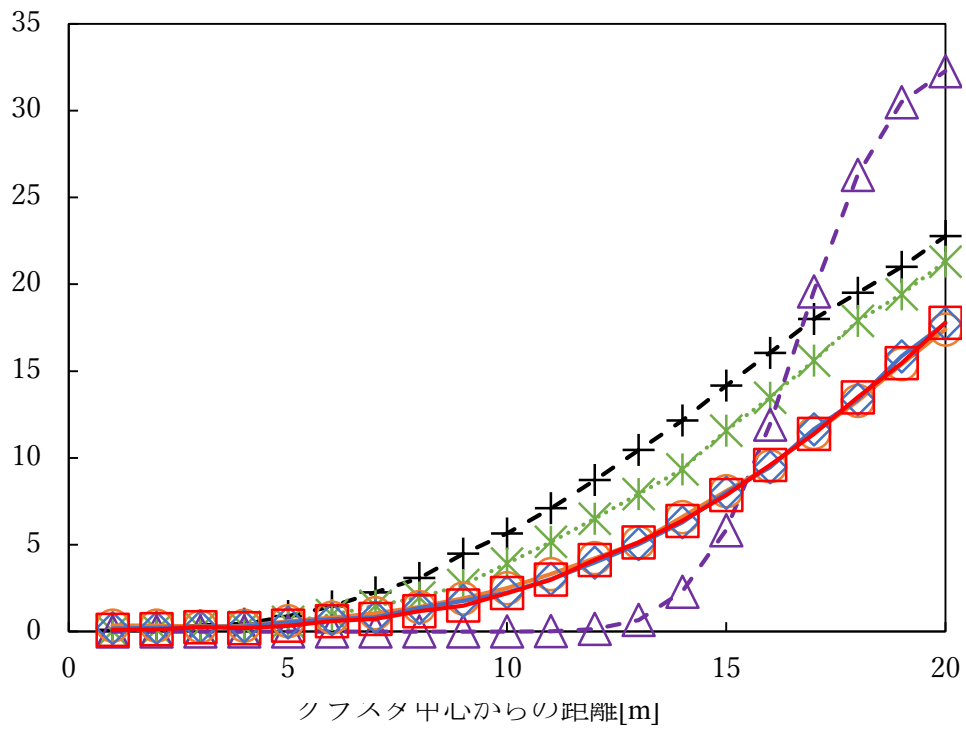


図 5.16: 距離変化時の電力枯渇率 R_{dep}

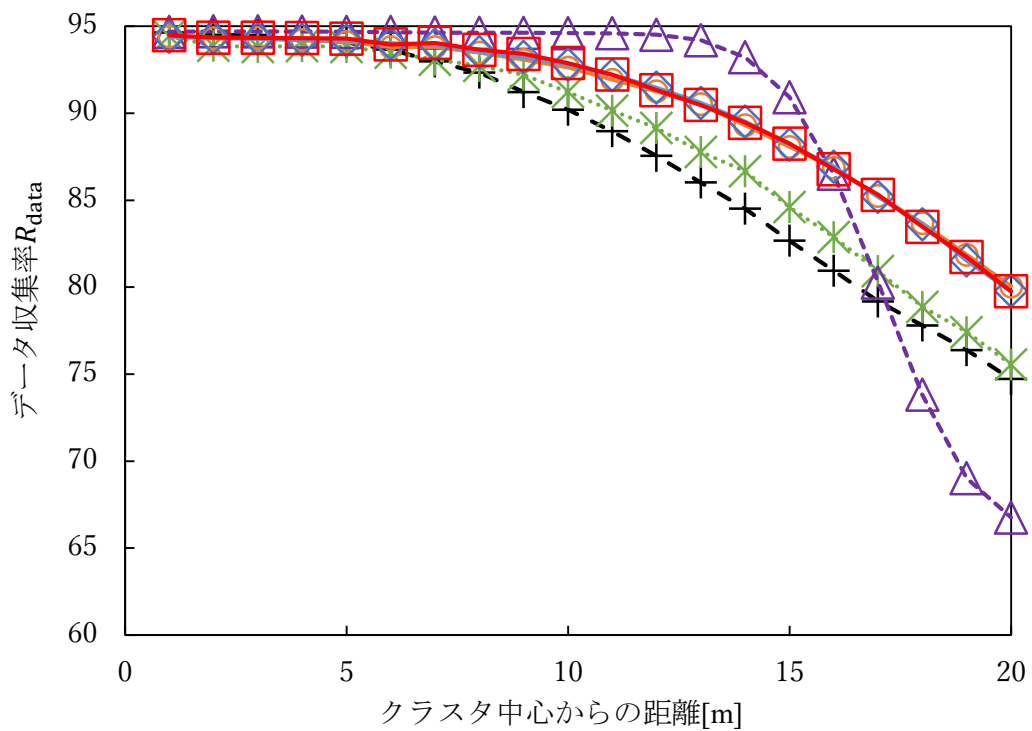


図 5.17: 距離変化時のデータ収集率 R_{data}

● HAP 数 N_{HAP} 変化時の電力枯渇率 R_{dep} とデータ収集率 R_{data}

最後に図 5.18 と図 5.19 に、SN 数 $N_{\text{SN}} = 30$ の時のクラスタ内 HAP 数 N_{HAP} を変化させた時の電力枯渇率 R_{dep} とデータ収集率 R_{data} の特性を示す。クラスタ内 SN 数 N_{SN} は 30 とした。提案システムや分散 WPT 手法では HAP 数の増加に伴い電力枯渇率が減少してデータ収集率が向上する。提案システムでは、残余電力量の小さい SN に大電力供給可能な HAP が HAP 数の増加に伴い増加するため、両性能が向上する。分散 WPT 手法では、HAP 数の増加で HAP-SN 間の平均距離が小さくなるため両性能が向上し、 $N_{\text{HAP}} = 15$ のときに提案システムの性能をわずかに上回る。しかし、分散 WPT 手法では、複数の HAP から同時に WPT により受電するため、実システムにおいては WPT 信号の干渉等が発生して性能に大きな悪影響を与える恐れがある。また RR 手法では HAP 数の増加による性能の向上は確認できないが、これは WPT を提供する HCH を HAP の ID に従って選出しているのみであるため、HAP 数の増加に伴う WPT 給電量の変化が表れないためである。結果として、提案システムでは単一の HAP を用いる重心配置手法などに比べると多数の HAP を導入する必要があるが、比較的小さい HAP 数においても SN の電力枯渇率 R_{dep} とデータ収集率 R_{data} 特性を向上させることが出来る。

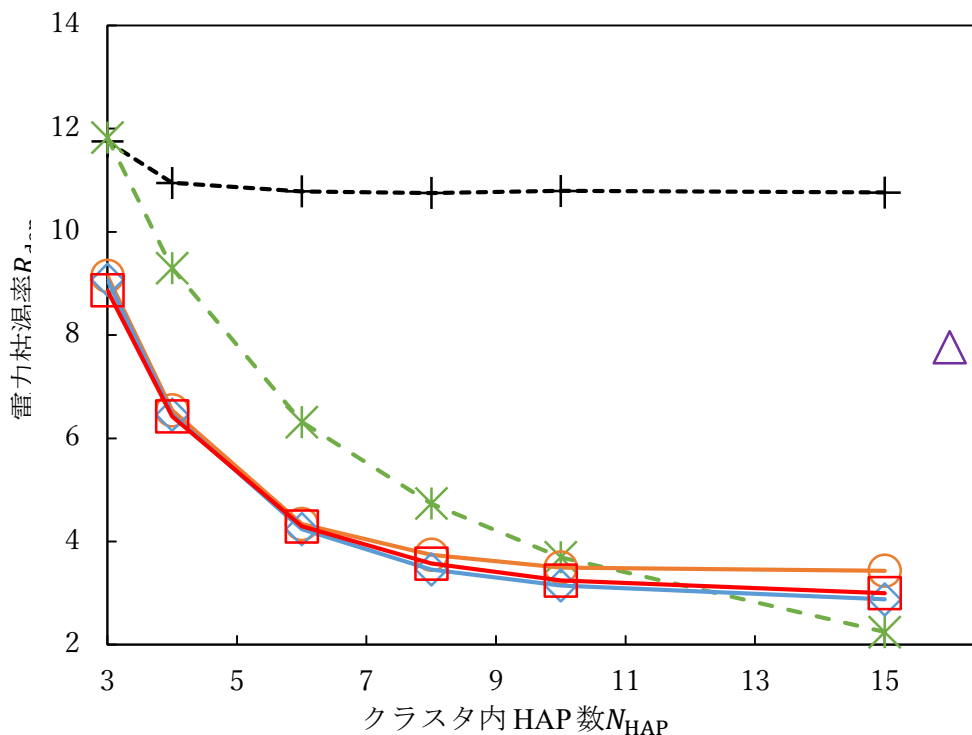


図 5.18: HAP 数変化時の電力枯渇率 R_{dep}

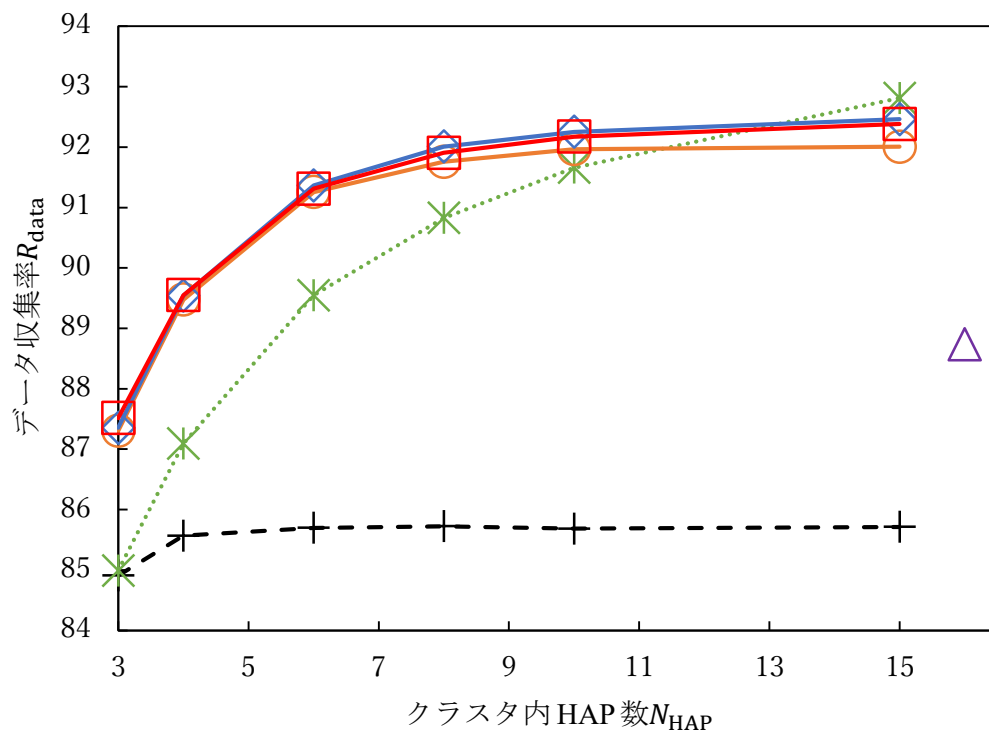


図 5.19: HAP 数変化時のデータ収集率 R_{data}

第6章 まとめ

本研究は、無線電力伝送機能を備えた WSN(WP-WSN)を研究対象として、WPT による SN 受電量の地理的な不均一性に起因したネットワーク性能劣化の緩和を課題とした。SN 受電量の地理的な不均一性は、WPT 装置遠方の SN における電力枯渇の発生につながり、ネットワークのデータ収集性能に悪影響を及ぼす。よって本研究では、SN の受電量の地理的な不均一性を緩和して、SN の電力枯渇低減によるデータ収集性能の向上を目的とした。

WP-WSN における SN 受電量の地理的な不均一性は、WPT 装置-SN 間の距離が不変であることに起因すると考え、本研究では従来クラスタリング技術の CH 交替動作に着眼して、WPT 提供位置を交替動作によって位置可変にする。位置可変の構造を実現するために、複数の HAP を導入してそれらから従来 CH 機能と WPT 機能の役割を果たす HCH を一定周期毎に選出して交替動作する新しいネットワーク構造を提案した。この提案ネットワーク構造では、クラスタリング制御によって HCH を交替するが、従来クラスタリング手法では WPT による SN への電力給電が未考慮であるため、残余電力量の小さい SN に十分に電力供給できずに電力枯渇が頻繁に発生する可能性がある。そこで本研究では、WPT を考慮したクラスタリング手法も提案した。提案クラスタリング手法では、残余電力量の小さい SN を考慮対象として、これら SN と HAP との距離総和を HCH 選出基準値として、最小距離総和を持つ HAP を HCH として選出する。これにより、残余電力量の小さい SN 近傍の HAP が HCH に選出され WPT を実施するため、当該 SN での電力枯渇の低減が可能となる。

計算機シミュレーションにより、提案システム(提案クラスタリング手法を適用した提案ネットワーク構造)における SN 電力枯渇率とデータ収集率特性の評価を行った。まず、提案ネットワーク構造を評価するために、従来クラスタリング手法である RR や LEACH を適用した提案ネットワーク構造と、HAP 重心配置や分散 WTP などの従来ネットワーク構造と比較した。提案ネットワーク構造では、電力枯渇率とデータ収集率の SN 間標準偏差が改善され両者における公平性という観点では優れていることが示されたが、電力枯渇率とデータ収集率自体の性能は従来ネットワーク構造に及ばない結果となった。次に、提案クラスタリング手法の評価では、従来ネットワーク構造や提案ネットワーク構造に従来クラスタリング手法を適用したシステムと比較して、電力枯渇率とデータ収集率の SN 間の標準偏差がより改善され両者における公平性という観点では最も優れていると同時に、電力枯渇率とデータ収集率自体の性能も最も優れていることを示した。また、提案システムは重心配置手法などに比べると多数の HAP を導入する必要があるが、比較的小さい HAP 数においても SN の電力枯渇率とデータ収

集率特性を向上させることが出来ることを示した。以上から WP-WSN において提案システムは、WPT による SN の受電量の地理的不均一性を緩和し、SN の電力枯渇の低減による良好でかつ公平性のあるデータ収集性能を提供でき、特に車やドローンなどを活用するモバイル給電機を導入することのできない屋内環境では有効である。つまり、提案システムは、WP-WSN におけるネットワーク性能の向上に寄与する一つの有効策であると結論付けられる。

今後の課題として、提案システムでは従来システムよりも多くの HAP を必要とするため、HAP の導入コストや動作コストを考慮した性能評価が必要となる。また現在は、SN のバッテリー容量や送信電力が全て等しいとしており、あまり現実的であるとは言えない。SN 間で異なる性能を持たせたヘテロジニアスな環境での性能評価も必要である。

参考文献

- [1] 大橋正良, 大槻知明, “ユビキタスセンサネットワーク,” 電子情報通信学会誌, vol.95 no.9 pp.772-778, 2012年9月.
- [2] T. Otuka, Y. Torii, T. Ito, “Anomaly Detection Algorithm for Localized Weather Using Low-Cost Wireless Sensor Nodes,” Proceedings of IEEE 7th International Conference on Service-Oriented Computing and Applications, pp.304-308, Nov. 2014.
- [3] 谷本和俊, 堀口学, 南石晃明, 佐々木崇, 李東坡, “大規模水田センサネットワークの電力消費と稼働時間,” 農業情報研究 27 卷 4 号, pp.64-74, 2018年12月.
- [4] S. Shen, J. Qian, D. Cheng, K. Yang, G. Zhang, “A Sum-Utility Maximization Approach for Fairness Resource Allocation in Wireless Powered Body Area Networks,” IEEE Access, vol.7, pp.20014-20022, Dec. 2019.
- [5] A. B. Noel, A. Abdaoui, T. Elfouly, M. H. Ahmed, A. Badwy, M. S. Shehata, “Structural Health Monitoring Using Wireless Sensor Network: A Comprehensive Survey,” IEEE Communication Surveys & Tutorials, vol. 19, no. 3, pp.1403-1423, Apr. 2017.
- [6] I. Butun, S. D. Morgera, R. Sankar, “A Survey of Intrusion Detection Systems in Wireless Sensor Networks,” IEEE Communication Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 1, pp.266–282, May 2014.
- [7] X. Xiang, W. Liu, N. N. Xiong, H. Song, A. Liu, T. Wang, “Duty Cycle Adaptive Adjustment Based Device to Device Communication Scheme for WSNs,” IEEE Access, vol.6, pp.76339–76373, Nov. 2018.
- [8] J.-S. Leu, T.-H. Chiang, “Energy Efficient Clustering Scheme for Prolonging the Lifetime of Wireless Sensor Network with Isolated Nodes,” IEEE Communications Letters, vol.19, no.2, pp.259-262, Feb. 2015.
- [9] 甲斐成美, 小室信喜, 阪田史郎, “クラスタツリー無線センサネットワークのための適応的同期制御による低遅延化方式,” 信学技報 コミュニケーションシステム研究会 (CS), CS2013-59, vol.113, no.473, pp.41-46, 2013年7月.
- [10] N. K. Chaubey, D. H. Patel, “Energy Efficient Clustering Algorithm for Decreasing Energy Consumption and Delay in Wireless Sensor Networks (WSN),” International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering, vol.4, no.5, pp.8652-8656, May 2016.
- [11] D. H. Nam, H. Min, “An Energy-Efficient Clustering Using a Round-Robin Method in a Wireless Sensor Network,” Proceedings of ACIS International Conference on Software Engineering Research, pp. 54-60, Aug. 2007.

- [12] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences, vol.2, pp.1-10, Jan. 2000.
- [13] IEEE802.15.4 standard, "Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks(WPANs)", Sep. 2006.
- [14] Y. He, X. Cheng, W. Peng, G. L. Stuber, "A survey of energy harvesting, communications: models and offline optimal policies," IEEE Communications Magazine, vol.53, issue 6, pp.79-85, June 2015.
- [15] W. Liu, X. Zhou, S. Durrani, H. Mehrpouyan, S. D. Blostein, "Energy Harvesting Wireless Sensor Networks: Delay Analysis Considering Energy Costs of Sensing and Transmission," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol.15, issue 7, pp.34-41, July 2016.
- [16] Liguang. Xie, Yi Shi, Y. Thomas Hou, Andwenjing Lou, "Wireless Power Transfer and Applications to Sensor Networks," IEEE Wireless Communications Magazine, vol.20, no.4, pp.140-145, Aug.2013.
- [17] Xiao Lu, Ping Wang, Dusit Niyato, Zhu Han, "Resource Allocation in Wireless networks with RF Energy Harvesting and Transfer," IEEE Network, vol.29, no.6, pp.68-75, Dec. 2015.
- [18] Y. Ko, S. Kim, J. No, "Uplink Time Scheduling with Power Level Modulation Scheme in Wireless Powered Communication Networks," IEEE Access, vol. 7, pp.11187-11194, Jan. 2019.
- [19] Z. Wang, L. Duan, R. Zhang, "Adaptively Directional Wireless Power Transfer for Large-Scale Sensor Networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.34, no. 5, pp.1785-1800, May 2016.
- [20] 田中信甫, 四方博之, "無線電力伝送を用いたセンサネットワークのためのマルチユーザダイバーシティ活用電力伝送法," 信学技報 知的環境とセンサネットワーク研究会 (ASN), ASN2018-78, vol.118, no.428, pp.1-6, 2019年1月.
- [21] X. Kang, C.K. Ho, S. Sun, "Charging and Transmission Time Minimization for Wireless Powered Communication Networks," Proceedings of 2014 IEEE Global Communication Conference, pp.1436-1441, Dec. 2014.
- [22] S. Bi, R. Zhang, "Placement Optimization of Energy and Information Access Points in Wireless Powered Communication Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 15, no.3, pp.2351-2364, Mar. 2016.
- [23] Y. Tanaka, K. Kanai, R. Hasaba, H. Sato, Y. Koyanagi, T. Ikeda, H. Tani, S. Kajiwara, N. Shinohara, "A Study of Received Power in Distributed Wireless Power Transfer System," Proceedings of 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, pp.1355-1356, Jul. 2020.
- [24] S. Bi, R. Zhang, "Distributed Charging Control in Broadband Wireless Power Transfer

- Networks,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 34, no. 12, pp.3380-3393, Dec. 2016,
- [25] L. Fu, L. He, P. Cheng, Y. Gu, J. Pan, J. Chen, “ESync: Energy Synchronized Mobile Charging in Rechargeable Wireless Sensor Networks,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no. 9, pp.7415-7431, Sep. 2016.
- [26] M. Hu, Z. Chen, K. Peng, X. Ma, P. Zhou, J. Liu, “Periodic Charging for Wireless Sensor Networks with Multiple Portable Chagres,” IEEE Access, vol. 7, pp.2612-2623, Dec. 2019.
- [27] H. Ju, R. Zhang, “Throughput Maximization in Wireless Powered Communication Networks,” IEEE Transactions on Wireless Communication., vol. 13, no. 4, pp.418-428, Jan. 2014.
- [28] Texas Instrument, “CC2652R Simple Link TM multiprotocol 2.4GHz wireless MCU data sheet,” Jul. 2019.

謝辞

本研究を進めるにあたって、多忙な時間の中、ご指導いただいた森香津夫教授、羽多野裕之准教授、眞田耕輔助教に深く感謝致します。また、研究設備の整備、管理などご協力下さいました山本好弘技術員に深く感謝致します。そして多くの助言やご意見を下さいました通信工学研究室の皆様に深く感謝いたします。

研究業績

1. 原口和久, 眞田耕輔, 羽多野裕之, 森香津夫, “無線センサネットワークにおける無線電力伝送を考慮したクラスタリング方式,” 2020年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-15-12, 2020年9月.
2. K. Haraguchi, K. Sanada, H. Hatano K. Mori, “Cluster Head Rotation for Wireless Powered Sensor Networks,” Proceedings of the 10th International Symposium for Sustainability by Engineering at Mie University (Research Area C), Sep. 2020.
3. 原口和久, 眞田耕輔, 羽多野裕之, 森香津夫, “無線電力伝送を用いた無線センサネットワークのためのネットワーク構造とクラスタリング手法,” 信学技報, vol.120, no.315, pp.10-15, 2021年1月.
4. 原口和久, 眞田耕輔, 羽多野裕之, 森香津夫, “無線電力伝送適用センサネットワークにおけるクラスタリング方式の改良,” 2021年電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-15-28, 2021年3月.
5. K. Haraguchi, K. Sanada, H. Hatano, K. Mori, “Novel Network Configuration and its Clustering Scheme for Wireless Powered Sensor Networks,” Proceedings of the 93rd IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring), May 2021.
6. K. Haraguchi, K. Sanada, H. Hatano, K. Mori, “Novel Network Configuration and its Clustering Scheme Based on Residual Power for Wireless Powered Sensor Networks,” Proceedings of the 11th International Symposium for Sustainability by Engineering at Mie University (Research Area C), Sep. 2021.