

修士論文

WPSN における余剰電力を活用した リレーRF 電力伝送に関する研究

令和 5 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

角田 剛

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 本研究の目的.....	3
1.3 論文構成.....	4
第2章 WPSN(Wireless Powered Sensor Network).....	5
2.1 無線センサーネットワーク (WSN)	5
2.1.1 概要.....	5
2.1.2 WSN のネットワーク寿命問題.....	6
2.2 WPT 技術.....	7
2.3 WSN への WPT 導入.....	8
2.3.1 WPSN 概要.....	8
2.3.2 システム構成.....	9
2.3.2.1 ネットワーク構成.....	9
2.3.2.2 モジュール構成.....	10
2.3.2.3 WPT のアンテナ指向性.....	11
2.4 WPSN の技術課題.....	12
2.4.1 SN の獲得電力の地理的不均一性.....	12
2.4.2 獲得電力不均一性に対する既存アプローチ.....	13
2.4.2.1 分散給電.....	13
2.4.2.2 協調中継.....	14
第3章 余剰電力を活用した Relay-WPT 方式.....	15
3.1 方式概要.....	15
3.2 Relay-WPT 実施を考慮した フレーム 構造.....	16
3.2.1 基準とする IEEE802.15.4 ビーコン有効 PAN のフレーム構造.....	16
3.2.2 WPT フレームの導入.....	17
3.3 Relay-WPT 実施基準.....	19

3.3.1 Relay-WPT 開始基準.....	19
3.3.2 Relay-WPT 停止基準.....	19
第4章 特性評価モデル.....	20
4.1 ネットワークモデル.....	20
4.2 フレーム構造.....	20
4.3 チャネルアクセスモデル.....	21
4.4 信号伝搬モデル.....	23
4.5 通信モデル.....	23
4.6 トラフィックモデル.....	23
4.7 無線電力伝送モデル.....	24
4.8 SN 電力消費モデル.....	25
4.9 アンテナ指向性モデル.....	27
第5章 特性評価.....	29
5.1 評価指標.....	29
5.1.1 電力枯渇率， 相対電力枯渇低減率.....	29
5.1.2 データ収集率， 相対データ収集向上率.....	30
5.1.3 データ 収集維持電力.....	30
5.2 シミュレーション諸元.....	31
5.3 特性評価.....	32
5.3.1 連続稼働期間判定の システム性能への 影響.....	32
5.3.2 オムニアンテナによる Relay-WPT 送信時評価.....	34
5.3.2.1 電力枯渇率特性.....	34
5.3.2.2 データ収集率特性.....	37
5.3.2.3 データ収集維持電力特性.....	40
5.3.3 指向性アンテナによる Relay-WPT 送信時評価.....	44
5.3.3.1 電力枯渇率特性.....	44
5.3.3.2 データ収集率特性.....	47

5.3.3.3 データ収集維持電力特性.....	50
5.3.4 Relay-WPT の送信アンテナ指向性影響評価.....	53
第 6 章 まとめ.....	57
参考文献.....	58
謝 辞.....	60

第1章 序論

1.1 研究背景

近年，センサー，通信デバイスの小型化と省電力化，および LoRaWAN，Zigbee に代表される通信規格など要素技術の発展により，あらゆるものが無線通信を介してネットワークに接続する「モノのインターネット」，IoT : Internet of Things が急速に発展，普及を続けている．IoT の例としては，照明器具，エアコン，暖房システム，シャッターなどの家庭用機器をスマートフォンや AI スピーカーを介して遠隔から監視および制御することが可能となるスマートホーム[1]，ロボット，センサー，通信技術等の活用により生産プロセスを自動化することで，効率化や品質向上，運用コスト削減を図る産業自動化[2]，モニタリングで得られた電力需要情報を反映して電力提供を行うスマートグリッド[3]，エネルギー，交通網等の都市インフラを地域情報をもとに効率的に管理・運営するスマートシティ[4] 等が挙げられ，従来では独立していたモノが相互接続することでより効率的，高価値のサービスを提供することが可能となる．これらの IoT サービスを実現するためには，サービス提供に必要なデータのセンシングと収集が必要となり，特にセンサー，通信モジュールを搭載した多数のセンサーノード (SN) を分散して配置し，無線通信で情報を集約するネットワークである無線センサーネットワーク (Wireless Sensor Network, WSN) は IoT 化実現の必須技術として注目が高まっている．

WSN では各 SN が計測したデータをシンクノード(SINK)に無線通信で送信することで，データの集約を行う．有線通信で同様のサービスを実現する場合と比較すると，WSN では配線が撤廃されたことによりケーブル敷設コストが低減されるほか，配線に制限されない自由な SN の配置が可能となり，これらの利点は多種多様な需要，環境が想定される IoT サービスのシステム要件に合致する．

以上の利点を活かすため多くの WSN では電源配線を含めて SN の配線撤廃が図られるが，その場合 SN は容量が有限のバッテリーやコンデンサ等の蓄電デバイス駆動となり，SN の蓄電容量制限が WSN のネットワーク寿命を大きく制約してしまうという課題が存在する．蓄電デバイスのエネルギーが枯渇した場合，SN はセンシングやデータ送信といった必要動作を継続できなくなり，IoT サービスの品質を担保することができなくなる恐れがある．蓄電デバイスの再充電，交換を手動で実施するという対応策も考慮されるが，比較的大規模な展開が想定される IoT サービスではメンテナンスのために必要な人的コストが増大し，要求されるサービスの提供，維持が困難となる．この課題の対応策としては，SN の必要動作電力を低減する省電力化技術[7]-[8]と，SN の

蓄電デバイスを再充電する環境発電技術[9]，無線電力伝送技術の適用[10]-[13]に大きく分かれる．

省電力化技術としては，SN のハードウェアの省電力化，送信電力の適応的制御，デバイスのスリープ制御などが挙げられる．これらは SN の長期間稼働に必要な技術であるが，蓄電容量が有限である以上，省電力化技術単体では蓄電デバイスの再充電，交換作業の必要性から解放されない．そのため，より長期間の動作や恒久的動作を可能とするには，環境発電技術，あるいは無線電力伝送技術と合わせて用いる必要がある．

環境発電技術は太陽光，風力，振動など環境中の再生可能エネルギーリソースを活用して発電を行う技術を指す．環境発電技術を活用した WSN では，各 SN が周辺環境のエネルギーを電力に変換，蓄電デバイスの充電を行う．省電力化技術と合わせることで WSN の長期間稼働が実現可能であるが，獲得電力が自然環境に依存し天候などの周辺環境の変化で動的に変化するため，電力を安定して得られない点が課題となる．

そこで，本研究では安定的に SN が電力獲得可能な RF 波による無線電力伝送技術 (Wireless Power Transfer, WPT) に着目する．WPT が適用された WSN である WPSN (Wireless Powered Sensor Network) では，設置された WPT 装置が電力伝送を意図して RF 波を放出し，各 SN が RF-DC 変換回路を介して受電を行う．環境発電と異なり SN の所望獲得電力に応じた WPT 装置の出力電力制御，および安定した電力提供が可能である．しかし，RF 波の信号強度は伝搬距離に対して減衰する特性を持ち，各 SN の獲得エネルギー量は WPT 装置と SN 間の距離に強く依存する．そのため WPSN では，WPT 装置と SN の間の伝送距離により，SN の受電量に地理的な不均一性が生じるといふ課題が存在する．

この受電量不均一性により，WPT 装置近傍の SN は動作に必要な以上の余剰エネルギーを獲得し，活用できないまま蓄電デバイスの容量制限により破棄される一方で，WPT 装置から遠く離れた SN は動作に必要なエネルギーを獲得できず，センシング，データ送信動作に支障をきたし WSN の通信性能劣化を招く恐れがある．WPT 装置遠方 SN の電力枯渇問題については WPT 装置の供給電力が十分である場合に WPT 送信電力増大による対処が可能であるが，安易な WPT 送信電力増大による解決はエネルギーリソースの活用効率，およびサービスの実現性と拡張性に関して課題を抱える．例えばエネルギーリソースの活用効率化が洗練されていない WPSN を多く適用することは，低消費電力が求められる持続可能社会実現の観点，および運用の経済的コストの観点から課題となり，また WPT により他の ICT サービスの通信を阻害してしまう干渉電力問題[14]の悪化，十分なエネルギーリソースの確保の難しさが予想される山間部での環境モニタリング[5]や災害対応[6]等のユースケースへの適用についても課題がある．これらの多面的な観点から，より低い WPT 電力で WPSN を運用するための効率化アプローチが望まれるが，これは WPT 装置近傍の SN が有する余剰エネルギーの活用によ

って改善が期待できる。以上より、WPSNにおけるWPTによるSN受電量の地理的な不均一性に対し、余剰エネルギー活用によりネットワーク性能を向上させるリソース活用効率化技術が必要となる。

WPSNにおける獲得電力の地理的不均一課題に対する既存アプローチとしては、分散給電[15]-[16]や協調通信[17]-[18]が挙げられる。分散給電では複数のWPT装置を分散して配置することで、SNとWPT装置間の平均距離が従来と比較して短縮され、獲得電力の地理的不均一性が緩和される。しかし、このアプローチでは獲得電力の地理的不均一性を可能な限り発生させないことに焦点が当たっており、発生した余剰エネルギー活用については議論されない。また、比較的実装コストの高いWPT装置の複数分散配置が必要であることも課題となる。これに対し、協調通信ではSN間の情報通信中継を利用したアプローチをとる。WPTと同様に、RF波による情報伝送についても信号の受信電力は送受信間距離が増加するほど減少する。そのためSNとSINKノードが直接通信を行う場合、各SNはSINKノードまでの距離伝搬損失を考慮したうえでデータパケット復号に必要な受信電力要件を満たす送信電力で情報伝送を行うことを求められるが、協調通信では情報伝送をSNの残余エネルギーに応じてSN同士で協調し通信中継することで実施する。すなわち、蓄電デバイスの残余エネルギーに余裕のあるSNが電力不足のSNの情報通信を中継しSINKノードに伝送することで電力不足SNの必要送信電力を低減し、残余エネルギーの不均一性を緩和する。協調通信はSNの余剰エネルギーを活用した方式であるが、電力不足SNのデータ送信機会に応じて必要とされる転送分のエネルギーのみが活用され、余剰エネルギーリソースが完全に有効活用されない可能性がある。

1.2 本研究の目的

本研究では、RF波によるWPTが適用されSNの獲得電力の地理的な不均一性が生じるWPSNを研究対象とし、WPT装置近傍のSNが有する余剰エネルギーを活用して他SNの電力枯渇を低減し、WPSNのネットワーク性能を向上させることを目的とする。

WPSN中の余剰電力を活用しネットワーク性能向上を図るアプローチとして、本研究では、動作に必要以上の電力を獲得したSNが、自身の獲得エネルギーをWPT電力源として活用し、電力不足のSNへWPTを実施するRelay-WPT方式を提案する。Relay-WPTの導入に際し、Relay-WPTを考慮したフレーム構造、および自身の安定動作を維持しながら他SNに余剰エネルギーを提供するためのRelay-WPT実施基準について検討を行う。

提案方式の有効性調査のため、計算機シミュレーションによりWPSN中のSNの電力枯渇率、HAPのデータ収集率特性、およびWPSNにおけるデータ収集性能を維持するために必要なHAPのWPT送信電力であるデータ収集維持電力についてRelay-WPT

非適用方式との比較を実施する．また，WPCN の WPT 給電量に与える影響を考慮して，上記評価を Relay-WPT の送信アンテナ指向性条件を変化させ実施する．

1.3 本論文の構成

第2章ではWSN，およびWPTを適用したWSNであるWPSN (Wireless Powered Sensor Network) とその技術課題について記述する．第3章では提案方式であるWPSN中の余剰電力を活用したRelay-WPT方式について記述する．第4章では計算機シミュレーションの特性評価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の結果について示し，提案方式の有効性を評価する．また，最後に第6章では本研究のまとめを行う．

第2章 WPSN(Wireless Powered Sensor Network)

本章では、WPTを適用した WSN である WPSN (Wireless Powered Sensor Network) における基礎技術について記述する。2.1 節で WSN の概略，および技術課題について記述する，2.2 節では RF 波による WPT 技術について記述する。2.3 節では WPT 技術を導入した WSN である WPSN の概要およびシステム構成について記述する。2.4 節では WPSN の技術課題について述べる。

2.1 無線センサーネットワーク (WSN)

2.1.1 概要

無線センサーネットワーク (Wireless Sensor Network, WSN) とは，広範囲にセンサーデバイスを備えたセンサーノード (SN) を分散配置し，各 SN の計測データを無線通信により集約するネットワークを指す。

図 2.1 に WSN の概略図を示す。ネットワーク中にはデータ計測用の SN とデータ収集用のシンクノード(SINK)が配置され，SN は直接，あるいは他の SN との相互接続を介してデータ収集用の SINK と無線通信を行い，自身がセンシングで得た計測データを送信する。センサーデバイスが計測するデータは温度・湿度・光・振動など多岐にわたり，環境モニタリング，スマートシティ，産業制御，医療など様々な分野で活用されている。有線ネットワークと比較すると通信の無線化によって配線の敷設コストが低減され，さらにより自由な SN 配置が可能となるため配置後のレイアウト変更やセンシング範囲の拡張性にも優れるといった利点を持つ。

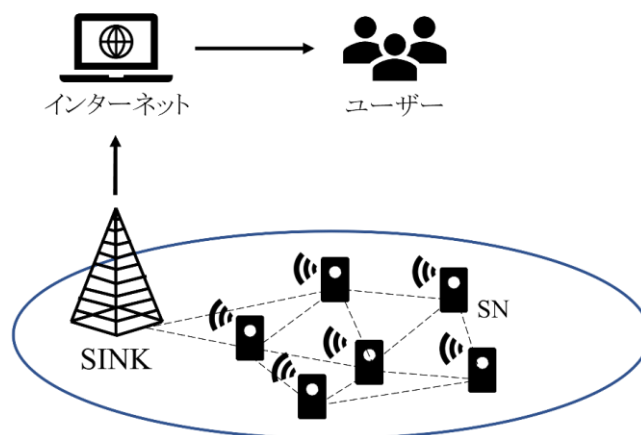


図 2.1 WSN 概略図

2.1.2 WSN のネットワーク寿命問題

通信の無線化によってコスト削減，配置自由度の向上が得られる一方で，電源配線についても同時に撤廃が必要となることから，SN は自身の備える蓄電デバイス（バッテリー，キャパシタ等）を電力源とした動作が必要であり，この有限の容量が WSN のネットワークを大きく制限してしまうという課題が存在する．ネットワーク寿命の問題に対処を行わない場合，各 SN で電力枯渇による動作停止が頻発し，ネットワーク全体でのデータ収集の阻害とデータ損失，遅延によるリアルタイム性の低下，リレーネットワークにおける通信経路の途絶，サービス途絶による信頼性の低下等が発生し，WSN のネットワーク性能が大きく損なわれる．ネットワークの機能不全を防ぐため，人手による SN の備える蓄電デバイスの交換，充電作業で WSN のネットワーク寿命を維持することは可能であるが，頻繁な作業はメンテナンス性の悪化および人的コストの増大をもたらし，特に WSN の規模が大きくなるほど問題となる．

以上より，運用コストを抑えつつネットワーク寿命を維持する SN の稼働時間延長技術は WSN の重要な技術課題となる．代表的な稼働時間延長技術としては，SN の稼働に必要な電力を削減する省電力化技術と，エネルギー獲得により SN の蓄電デバイスの充電を行う環境発電，および無線電力伝送技術に分かれる．

本研究では，SN へ安定的に電力供給を行うことができる無線電力伝送について焦点を当て，無線電力伝送が適用された WSN を研究対象とする．

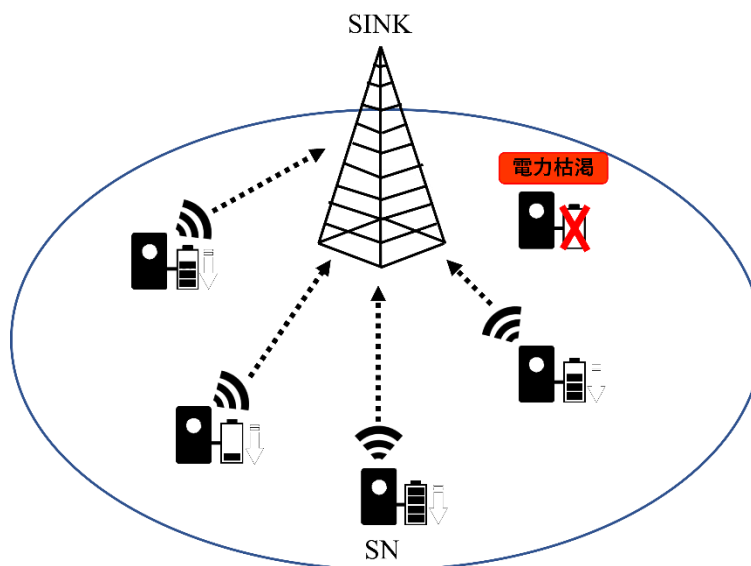


図 2.2 WSN のネットワーク寿命問題

2.2 WPT 技術

無線電力伝送（Wireless Power Transfer, WPT）は電力をケーブル、接触点を介さず、空間を通じて伝送する技術であり、大きくはコイルの電磁誘導や磁界共振等を利用した非放射型の WPT と、RF 波方式に代表される放射型の WPT に分かれる[21]。非放射型の WPT は近距離での伝送効率に優れる反面、長距離の伝送効率が悪く、また給電のために送電、受電デバイスの位置、向きのずれの補正が必要であり、多数の SN が数 m 以上の距離オーダーで展開することが予想される WSN への適用に関しては課題が多い。それに対し、RF 波を用いた WPT では、近距離の伝送効率は非放射型の WPT に劣るものの長距離の伝送特性に優れ、また受電可能なデバイス位置や角度について制限が少ないため、WSN の長時間稼働技術として有望視されている。本研究ではこの RF 波方式の WPT に着目するため、本節ではその原理について触れる。

RF 波を用いた WPT システムでは、図 2.3 に示されるように電力伝送の送信側デバイスは RF 波の発信器と送信用アンテナを、受信側デバイスは受信用アンテナと整流器を備える。送信デバイスは自身の電力を RF 信号として空間中に発信、伝搬させ、受信デバイスはその信号を受信、整流し直流電流の形に変換することで電力を獲得することができる。送信、受信デバイス間の伝送距離が d [m] である場合、受信デバイスが獲得する電力 $P_{\text{acq}}(d)$ はフリスの伝達公式に従い、次の(2.1)式で表される。

$$P_{\text{acq}}(d) = P_{\text{rx}} \cdot \eta = P_{\text{tx}} G_{\text{tx}} G_{\text{rx}} \left(\frac{c}{4\pi f_c d} \right)^\alpha \eta \quad (2.1)$$

ただし、 P_{rx} は受信デバイスでの受信電力[mW]、 P_{tx} は送信デバイスの送信電力[mW]、 G_{tx} は送信デバイスの送信アンテナ利得、 G_{rx} は受信デバイスの受信アンテナ利得、 c は光速 3.0×10^8 [m/s]、 f_c は RF 信号の周波数 [Hz]、 α は減衰指数、 η ($0 \leq \eta \leq 1$) は WPT の電量変換効率である。減衰指数 α は送受信デバイス間の障害物、地形等の伝搬環境に依存し、理想的な伝搬環境である自由空間で $\alpha = 2$ となる。また、WPT の受電効率 η は受信デバイスが受信する RF 信号電力に対する整流後の電力比率であり、整流回路の効率やアンテナ効率等に依存する。

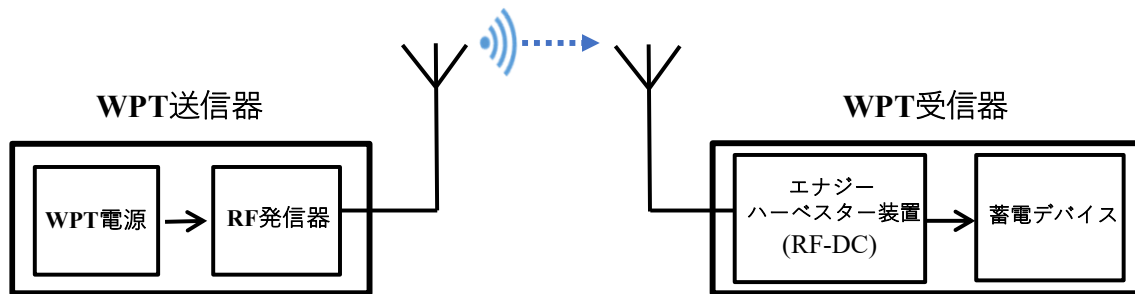


図 2.3 RF 波方式 WPT の送受信モジュール概略図

2.3 WSN への WPT 導入

2.3.1 WPSN 概要

ネットワーク寿命問題の改善のために WPT が適用された WSN は WPSN (Wireless Powered Sensor Network) と呼ばれる。図 2.4 に WPSN の概略図を示す。

WPSN 中では各 SN が受信した RF 信号を DC 電流へ整流するエネルギーハーベスター装置を備え、変換した DC 電流により蓄電デバイスを充電する。その後、WPT によって得たエネルギーを使用して、各 SN が計測したデータを無線情報伝送 (Wireless Information Transfer, WIT) により送信、集約する。

センシング、通信動作により蓄電デバイスのエネルギーが減少し続ける従来の WSN に対し、WPSN では WPT 適用により安定して蓄電デバイスのエネルギーを回復し、より長期間のネットワーク稼働が可能となる。

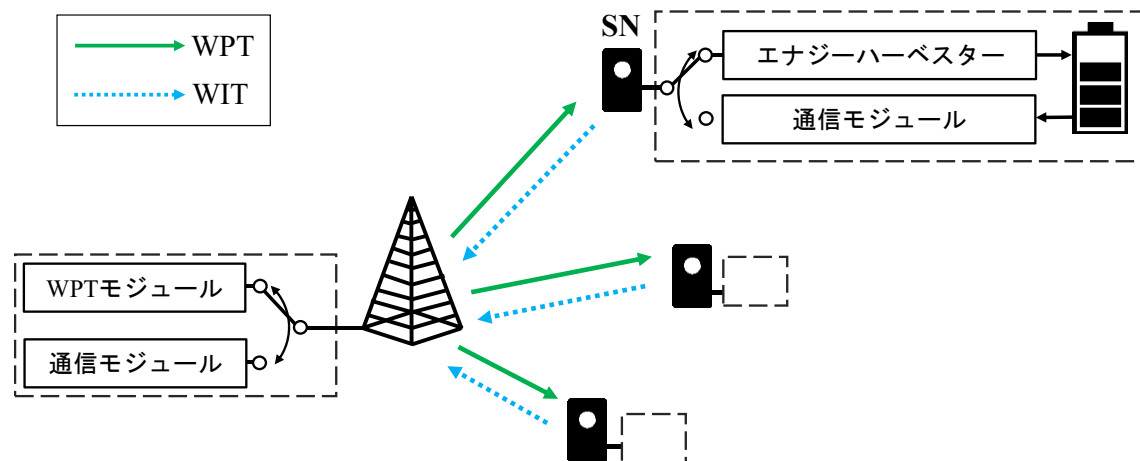


図 2.4 WPSN 概略図

2.3.2 システム構成

2.3.2.1 ネットワーク構成

前節で記述した WPSN を構成するにあたって，図 2.5，図 2.6 に示すように WPT 装置とデータ集約ノード（SINK）を個別に設置する場合と，電力伝送機能とデータ集約機能を統合した HAP(Hybrid Access Point)を設置する場合がある．HAP を採用した場合は，個別の WPT 装置とデータ集約ノードを採用した場合と比較して，ネットワーク内の情報とエネルギー伝送の調整を容易にし，また通信モジュールと信号処理モジュールを共有することにより，実装，運用のコスト削減が可能である[13]．ネットワーク構成の簡単化のため本研究では HAP を採用する．

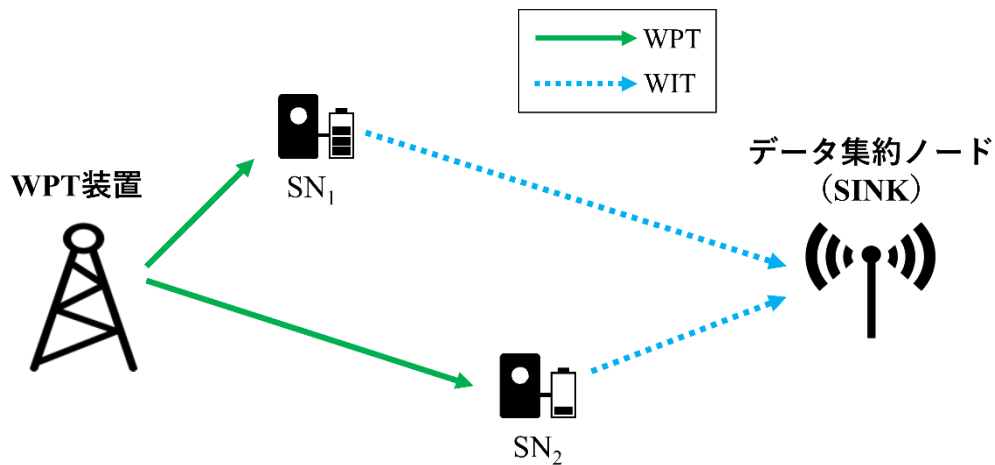


図 2.5 WPT 装置とデータ集約ノードが別個の WPSN 構成例

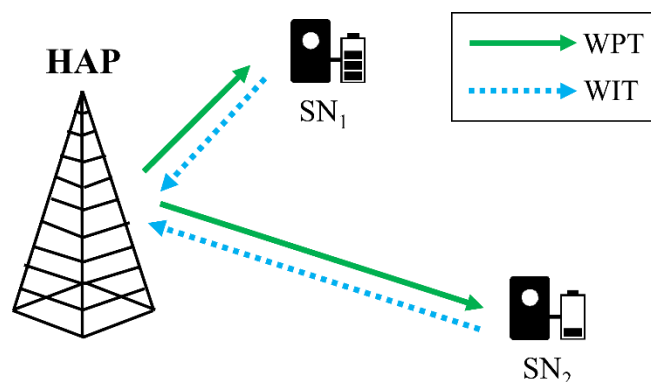


図 2.6 WPT 装置とデータ集約ノードが統合された（HAP）ネットワーク構成例

2.3.2.2 モジュール構成

HAP を用いた WPSN を実装する場合のモジュール構成例を図 2.7 に示す[11]. SN は HAP からの WPT 用 RF 信号を整流するためのエネルギーハーベスティング回路, 整流された電流のエネルギーを貯蔵するための蓄電デバイス, センサーデバイス, データの送受信用の通信モジュール, 処理演算装置, および WPT 受信用アンテナ, データ送受信用アンテナで構成される. 蓄電デバイスとしては二次電池のほかに, 急速な充放電サイクルに耐えるスーパーキャパシタが想定される[11]. HAP については通常は恒常的に電力が供給される AC 電源または, 環境発電モジュール等の外部電源に接続されることが想定され, WPT 信号の生成器および増幅送信器, SN とのデータ送受信用の通信モジュール, 制御装置, および WPT 送信用アンテナ, データ送受信用アンテナで構成される.

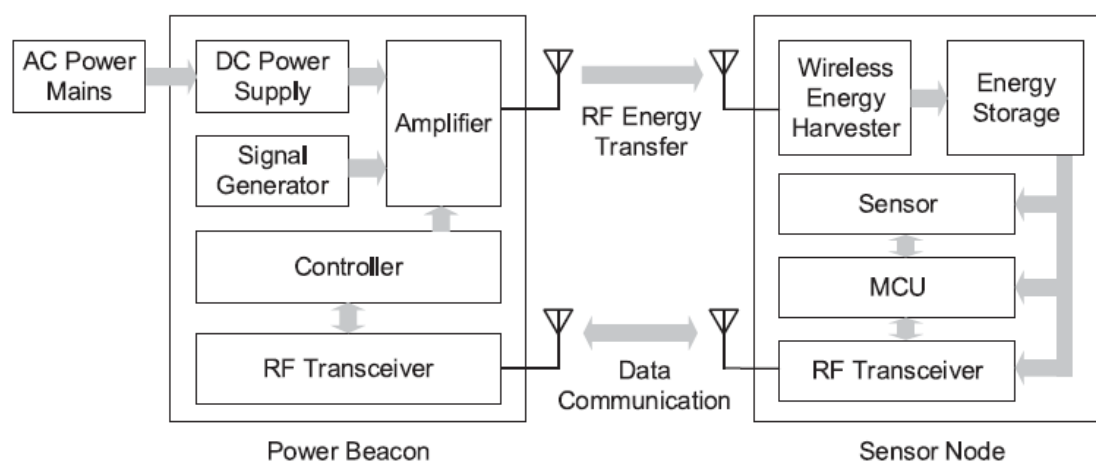


図 2.7 WPSN コンポーネントのモジュール構成[11]

2.3.2.3 WPT のアンテナ指向性

WPSN において WPT の送信，受信アンテナの指向性は SN の受電量に関わるシステム構成要素となる．水平面について無指向性のオムニアンテナのように，より理想アンテナに近いアンテナを採用した場合には，SN との方位に関わらず均等に WPT 信号を放射することが可能であるため受電に関して SN 位置に関する制限は少ない．対して，WPT 用のアンテナとして指向性アンテナを用いた場合は電波の放射方向が一方向に集中することで受信電力の高い範囲が狭まり，受電が可能な SN がネットワーク中の限られた範囲に制限されてしまうが，その反面アンテナ利得が高まることで無指向性アンテナと比較して SN の受電量は増大する．そのため，WPSN においては SN 配置等システム要件に合わせ適切なアンテナを選択することが必要となる．

複数のアンテナエレメントを備えたマルチアンテナを WPT 用アンテナとして用いる場合には，電波の送受信の指向性を制御するビームフォーミング技術を応用し任意 SN へ選択的に WPT 信号を放射，不要方向への放射抑制および SN 電力量に合わせた適応的な給電を実現するエネルギービームフォーミングが検討されている[23]-[24]．文献[23]ではランダム位置の SN の平均受信電力，センサーアクティブ確率を最大化する適応的 WPT スキーム提案が，文献[24]ではクラスタリングが導入された WPSN において受電量の異なる各 SN，負荷の大きいクラスタヘッドを考慮した WPT スキーム提案がそれぞれなされ，両文献ともにビームフォーミングを適用しない場合と比較してシステム性能の向上が確認される．

ただし，エネルギービームフォーミングを実施する場合，WPT 装置が実装コストの比較的高いマルチアンテナを備えていること，また受電デバイスと WPT 装置間のチャネル推定が必要となる．特に WPSN ではバッテリー残余電力量の制限，実装コスト制限の大きい SN がチャネル推定のための動作，機器を必要とすることが課題となる．そのため，より簡易に WPSN を実装する場合はマルチアンテナでない通常のアンテナによる WPT が想定されるが，その場合各 SN へ集中して WPT 電力，WPT 送信時間を割り当てることが不能であるため，次項で述べる SN の獲得電力の地理的不均一性が顕著に問題となる．

2.4 WPSN の技術課題

2.4.1 SN の獲得電力の地理的不均一性

WPSN 中の SN は WPT 装置からの WPT によって電力供給を受け、より長時間の稼働が可能となる。しかし、(2.1)式で示したように RF 波の受信電力は送受信間距離の減衰指数 α 乗で減少するため、HAP から遠方に配置された SN ほど獲得電力が減衰するという SN 位置に依存する地理的な獲得電力不均一性が発生する。その結果、図 2.8 に示すように HAP 近傍の SN は動作に必要な消費電力以上の過剰な電力を獲得し、蓄電デバイスの容量を超えてエネルギーが破棄される一方で、HAP 遠方の SN では獲得電力が近傍 SN と比較して非常に小さくなり、SN として動作するために必要な電力を確保できず、頻繁な電力枯渇を発生させる恐れがある。SN が電力枯渇を起こした場合センシングおよび情報送信が不能となることから、本来求められるセンシングデータの集約機能が損なわれ、ネットワーク通信性能が劣化する。

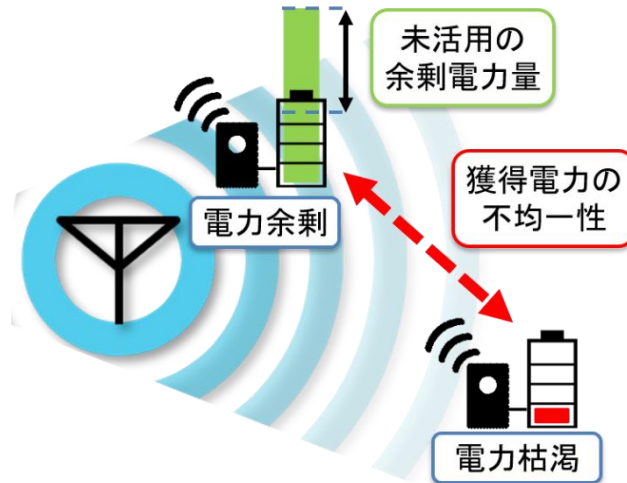


図 2.8 WPSN における SN 獲得電力の地理的不均一性

2.4.2 獲得電力不均一性に対する既存アプローチ

2.4.2.1 分散給電

図 2.9 に示されるように，分散給電では複数の WPT 装置をネットワーク中に分散して配置することで，各 SN と WPT 装置との距離の分散を低減し，獲得電力の地理的不均一問題の発生を抑制する．

さらに，文献[15]ではネットワーク中の複数 WPT 装置と情報収集ノードの位置最適化を実施し，文献[16]ではデータ収集・中継機能を担うクラスタヘッド（CH）に WPT 機能を加えた HAP をネットワーク中に分散配置し，データ収集・WPT 機能を担う HAP を周期的に交代することで，SN の獲得電力の地理的不均一性の緩和を図るなど，より高度な適用手法が提案されている．

ただし，分散給電は可能な限り SN の獲得電力不均一性を発生させないことを焦点としており，なお生じた WPSN 中の余剰エネルギーの有効活用については研究の対象としていない．また，実装，運用コストの大きい WPT 装置の複数配置が前提となっている点も課題が残る．

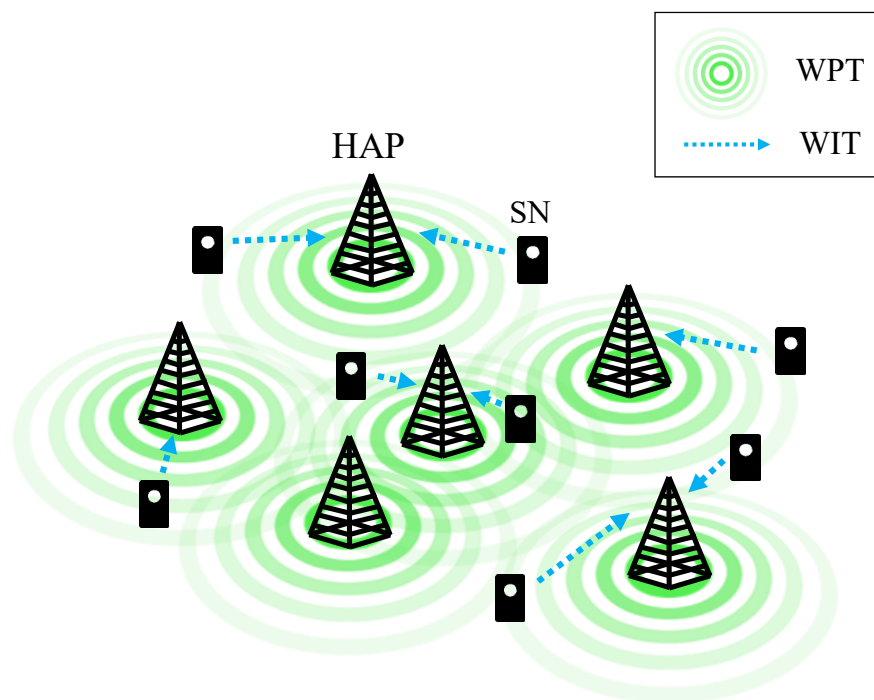


図 2.9 分散給電を適用した WPSN のネットワーク構造

2.4.2.2 協調通信

RF 波によって情報信号を伝搬する WIT においても，送受信間の伝送距離増加に対し受信電力が減衰する伝搬特性の影響を受けるため，SN が HAP に直接データパケットを送信する WPCN の場合，各 SN は HAP までの距離伝搬損失を考慮したうえで HAP の信号復調に必要な受信電力要件以上の送信電力で自身のデータパケットを送信する必要がある。

これに対し，図 2.10 に示されるような協調通信を適用した WPCN では，HAP 近傍の余剰エネルギーを有する SN が HAP 遠方のエネルギー不足の SN のデータ送信を中継することで，遠方 SN の必要送信電力が低減され，SN の残余エネルギーの不均一性が緩和される。

SN の余剰電力を活用し送信中継を行うため，WPSN 中のエネルギーリソースを有効活用したネットワーク性能改善手法であるといえるが，余剰エネルギーが情報転送に必要なエネルギー分のみ消費されるため，全ての余剰エネルギーリソースを活用できない場合があることが課題となる。

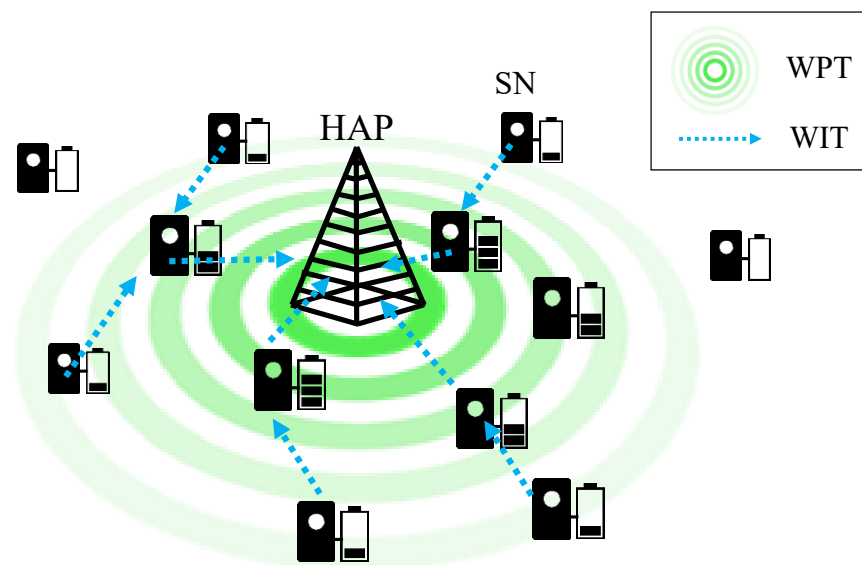


図 2.10 協調通信を適用した WPSN のネットワーク構造

3 章 余剰電力を活用した Relay-WPT 方式

本章では，SN の地理的獲得電力不均一性が生じる WPSN 中の余剰電力を有した SN を活用した Relay-WPT 方式を提案する．3.1 節では提案方式の概要と必要検討事項について記述する．3.2 節では Relay-WPT の導入を考慮したフレーム構造について記述する．また 3.3 節では Relay-WPT を実施する SN の選定基準について記述する．

3.1 方式概要

提案方式では，HAP 近傍の SN が有する自身の動作に必要以上の余剰エネルギーを WPT 電力源として，RF 波として再放射（Relay-WPT）を実施する．概略図を図 3.1 に示す．獲得エネルギーが不足する HAP 遠方の SN では HAP からの WPT 獲得エネルギーに加え，余剰電力を有した SN からの Relay-WPT を受電することにより電力枯渇状態から回復し，獲得エネルギーの地理的不均一性の緩和，およびネットワーク性能の向上が期待される．

Relay-WPT を WPSN に導入するにあたり，Relay-WPT を考慮したフレーム構造，および Relay-WPT を実施する余剰電力を有した SN の選別基準の規定が必要となる．

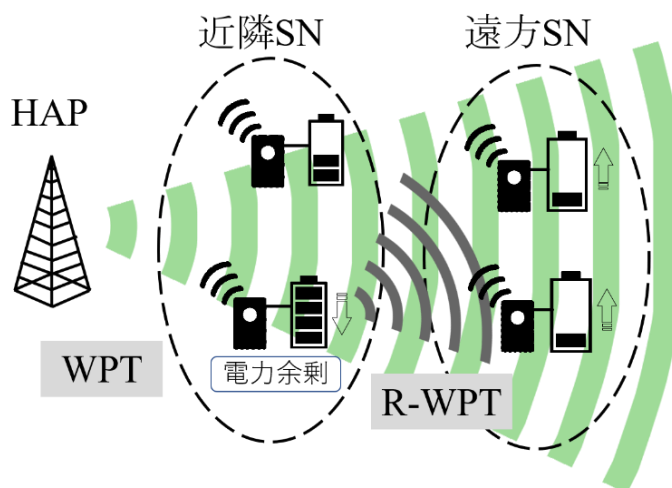


図 3.1 Relay-WPT の概略図

3.2 Relay-WPT 実施を考慮したフレーム構造

3.2.1 基準とする IEEE802.15.4 ビーコン有効 PAN のフレーム構造

本研究では、提案方式の導入を容易にし、また WSN のシステム要件として求められる省電力化を満足するため、WSN などのアプリケーションで広く使用されている通信プロトコル IEEE 802.15.4 のビーコン有効 PAN に準拠したネットワークを検討する。フレーム構造についてもビーコン有効 PAN のフレーム構造を基礎にし、HAP からの WPT および余剰電力を有する SN による Relay-WPT を導入する。

IEEE802.15.4 ビーコン有効 PAN では、情報集約ノードが周期的に同期用のビーコン信号をブロードキャストする。各 SN の動作フレームはビーコン信号を受信した時間を基準として、ビーコン間の期間が SN の無線情報伝送が実施されるアクティブ期間、および SN の通信デバイスがスリープ状態となる非アクティブ期間に時分割され、ネットワーク全体で同期したデューティサイクル動作を実現する。

フレーム長 T_{BI} とアクティブ期間長 T_{SD} はそれぞれネットワーク管理者が設定可能なパラメータ BO (BeaconOrder), SO (SuperframeOrder) で次のように設定される。

$$T_{BI} = aBaseSuperframeDuration \cdot 2^{BO} \quad (3.1)$$

$$T_{SD} = aBaseSuperframeDuration \cdot 2^{SO} \quad (3.2)$$

ただし、 BO, SO の値は $0 \leq SO \leq BO \leq 14$ に制限される。

アクティブ期間は送信を試みる各ノードがチャネルアクセス方式 Slotted CSMA/CA を用いて競合を行い通信を行う Contention Access Period (CAP) 期間と、チャネルアクセス競合なしに予約されたノードが通信を行う Contention Free Period(CFP)期間で構成される。なお、CFP 期間については必ずしも設ける必要はない。

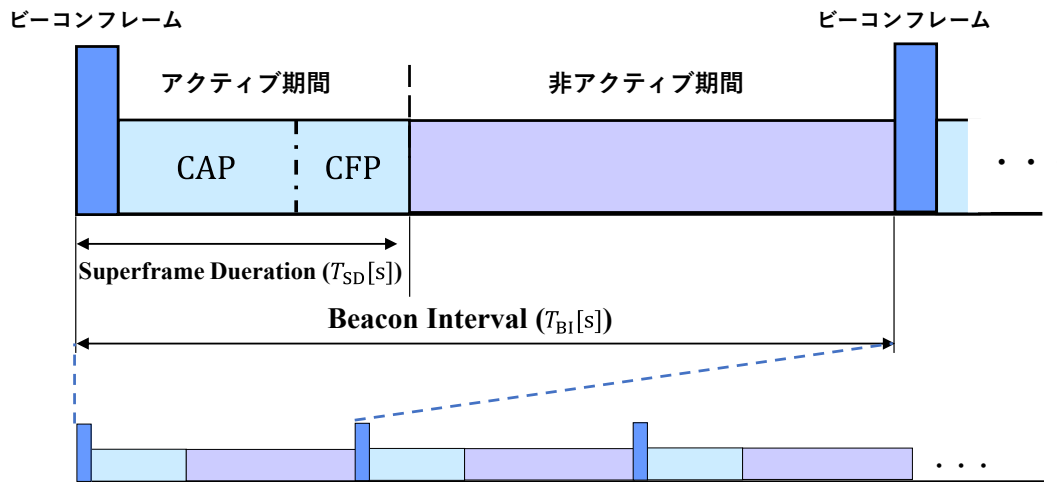


図 3.2 IEEE 802.15.4 ビーコン有効 PAN のフレーム構造

3.2.2 WPT フレームの導入

通信デバイスがスリープとなる非アクティブ期間では同一周波数の通信信号と WPT 信号の混線を防ぐことができるため、この期間内に HAP からの WPT、および余剰電力を有した SN による Relay-WPT を実施することを検討する。アクティブ期間直後に余剰電力を有すると判定された SN が WPT を実施する Relay-WPT 期間を、その後に HAP による WPT を実施する Direct-WPT 期間をそれぞれ時間比率 $r_{\text{relay}} : r_{\text{direct}}$ で時分割し配置する。

したがって、ビーコン受信期間、WIT 期間、Relay-WPT 期間、Direct-WPT 期間の順にフレームが時分割される。Relay-WPT 期間を WIT 期間の直後に配置するのは、WIT 期間で自身の情報伝送プロセスを経て、なお余剰電力を有していると判定された SN を選別することを意図している。Relay-WPT 期間中では余剰電力を有していると判定された SN は一斉に WPT 信号を放出し、次節で示す Relay-WPT 停止基準を満たした場合、または Relay-WPT 期間が終了した場合に WPT 信号送信を停止する。なお、SN が複数の Relay-WPT 信号を受信する場合は理想的に同位相で受信するとして扱う。

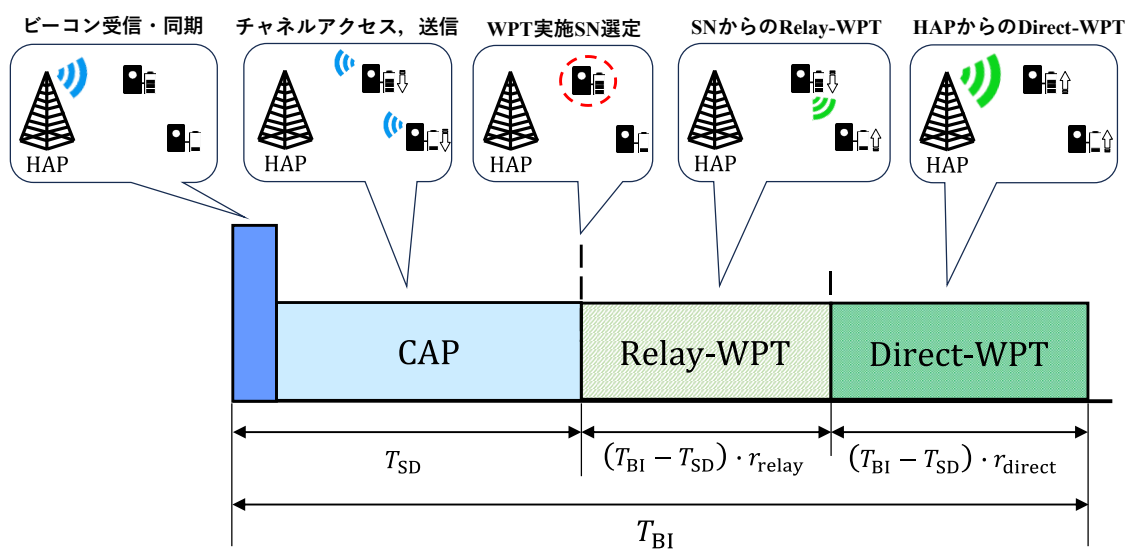


図 3.3 Relay-WPT を導入したフレーム構成

3.3 Relay-WPT 実施基準

本節では，Relay-WPT 期間開始時点において，余剰エネルギーを有し Relay-WPT を実施する SN を選別する基準について規定する．3.3.1 項では余剰電力を有していると判定し Relay-WPT を開始する基準について記述する．3.3.2 項では Relay-WPT 実施中の SN が WPT を停止する基準について記述する．

3.3.1 Relay-WPT 開始基準

任意の SN について，Relay-WPT 期間の開始時に以下の 2 基準をどちらも満たした場合，SN は余剰電力を有していると判断し，Relay-WPT 動作を開始する．

$$E_{\text{red}} \geq E_{\text{th}}^{\text{start}} \quad (3.3)$$

$$T_{\text{run}} \geq T_{\text{BI}} \cdot N_{\text{th}}^{\text{act}} \quad (3.4)$$

なお， E_{red} [mJ] は SN の蓄電デバイスの残余電力量を， T_{run} [s] は SN が電力枯渇（4 章 4.8 節で規定）を起こさずに稼働を続けている時間をそれぞれ表す． T_{run} については電力枯渇を起こした時点で 0 に再設定される． $E_{\text{th}}^{\text{start}}$ は残余電力量 E_{red} に対して設けられた Relay-WPT 開始電力量閾値， $N_{\text{th}}^{\text{act}}$ は連続稼働時間に対して設けられた閾値である．(3.3)式の判定は Relay-WPT の開始動作のために設定され，(3.4)式の判定は SN が $N_{\text{th}}^{\text{act}}$ で指定された期間だけ連続で稼働していることから，余剰電力を有していることが確からしいことを適応的に確認するために設定されている．

SN の獲得電力は HAP の WPT 送信電力と SN 位置に依存し，また SN が動作に必要な電力はネットワーク中のトラフィックや通信プロトコル，SN が備える通信モジュールの消費電力等の条件に依存する．また特に SN がチャネルアクセス競合を行う場合はバックオフ動作にランダム性があることから，SN の消費電力が安定しないことが予想される．そのため，ネットワーク環境に依存せず，余剰エネルギーを有する SN のみが WPT を実施する効率的な Relay-WPT 動作を狙いにして(3.4)式の適応的な判定項を導入した．

3.3.2 Relay-WPT 停止基準

SN が次式を満たした時点で，Relay-WPT 動作を停止する．

$$E_{\text{red}} \leq E_{\text{th}}^{\text{stop}} \quad (3.5)$$

$E_{\text{th}}^{\text{stop}}$ は残余電力量に対して設けられた Relay-WPT 停止電力量閾値である．ただし，前節で述べたように停止基準を満たさず Relay-WPT 期間が終了した場合は，その時点で Relay-WPT を停止する．

4 章 特性評価モデル

本章では提案方式の有効性評価のために用いるシミュレーション評価モデルについて記述を行う。4.1 節でネットワークモデル，4.2 節でフレーム構造，4.3 節で SN のチャネルアクセスモデル，4.4 節で信号伝搬モデル，4.5 節で通信モデル，4.6 節でトラフィックモデル，4.7 節で無線電力伝送モデル，4.8 節で SN の電力消費モデル，4.9 節でアンテナの指向性モデルについて記述する。

4.1 ネットワークモデル

図 4.1 に示すような HAP を中心とした半径 R_{area} [m] 円形エリア内に SN が N_{SN} [台] ランダム配置されたネットワークを想定する。HAP と各 SN は HAP を中心としたスター型のネットワークで接続される。HAP はデューティサイクル同期のためのビーコン信号のみをダウンリンクで SN へ定期的を送信し，各 SN は生起したデータパケットをアップリンクで HAP へ送信する。

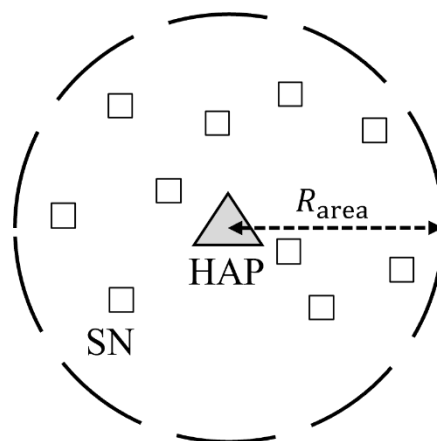


図 4.1 ネットワークモデル

4.2 フレーム構造

3 章 3.2 節で規定したとおり各 SN のデューティサイクルが HAP の送信するビーコンフレームを基準に同期した IEEE802.15.4 のビーコン有効 PAN 準拠のフレーム構造を採用する。なお，スーパーフレームは全て Slotted CSMA/CA によるチャネルアクセスを経て SN がデータを送信する CAP 期間として設定し，専用の情報送信フレームである CFP 期間については設けない。

4.3 チャネルアクセスモデル

CAP 期間開始時にデータパケットを保持している SN は、IEEE 802.15.4 のビーコン有効 PAN で規定されている Slotted CSMA/CA を用いてチャネルアクセスを実施する。

IEEE802.15.4 ビーコン有効 PAN の CAP 期間におけるチャネルアクセス方式として、単位バックオフ期間 (Unit Backoff Period, UBP) と呼ばれる固定期間フレーム単位でスロットを分割し CSMA/CA 動作を実施する Slotted CSMA/CA が規定されている。Slotted CSMA/CA では、バックオフ待機、CCA (Clear Channel Assessment) と呼ばれる瞬間的なチャネル確認動作、および送信動作の開始などの各イベントが UBP のスロット区切りで実施され、ネットワーク中のノードのチャネルアクセス動作がスロット単位で同期される。

Slotted CSMA/CA のアルゴリズムフローを図 4.2 に示す。CSMA/CA 開始時、各ノードはバックオフ回数 NB を 0 に、コンテンションウィンドウ CW を CW_0 に、バックオフ指数 BE を $macMinBE$ に初期化する。なお規格により CW_0 の値は 2 に設定されている。その後直近の UBP 境界まで待機した後、現在の BE の値に基づいて、

$$T_{backoff} = random(0, 2^{BE} - 1) [UBP] \quad (4.1)$$

だけバックオフ待機動作を継続する。ただし $random(\cdot)$ は $[0, 2^{BE} - 1]$ の範囲の整数値を一様ランダムに返す関数としている。バックオフ待機動作終了後、ノードは CCA によりチャネルがアイドル状態かどうかを確認する。アイドル状態であった場合、CCA を実施したノードは自身の CW の値を 1 減算し、その後 CW が 0 となるかを確認する。0 となった場合、チャネルアクセス処理が成功したとして直近の UBP 境界から自身のパケット送信処理を開始する。 CW を減算してもまだ 0 とならなかった場合は再びランダムバックオフ期間決定処理に戻る。CCA 後にチャネルがアイドル状態でなかった場合は、バックオフ回数 NB を 1 増加、 CW を再び CW_0 に初期化、 BE は最大値 $macMaxBE$ を超えない限り増加させる。ただし、バックオフ回数が規定の最大バックオフ回数 $macMaxCSMABackoff$ を超過した場合、チャネルの輻輳からパケット送信が現在不能であると判定され、チャネルアクセス処理が中止される。

また、送信処理が終了した後パケットバッファにさらにデータパケットが存在している場合は、続けてチャネルアクセス処理を開始する。

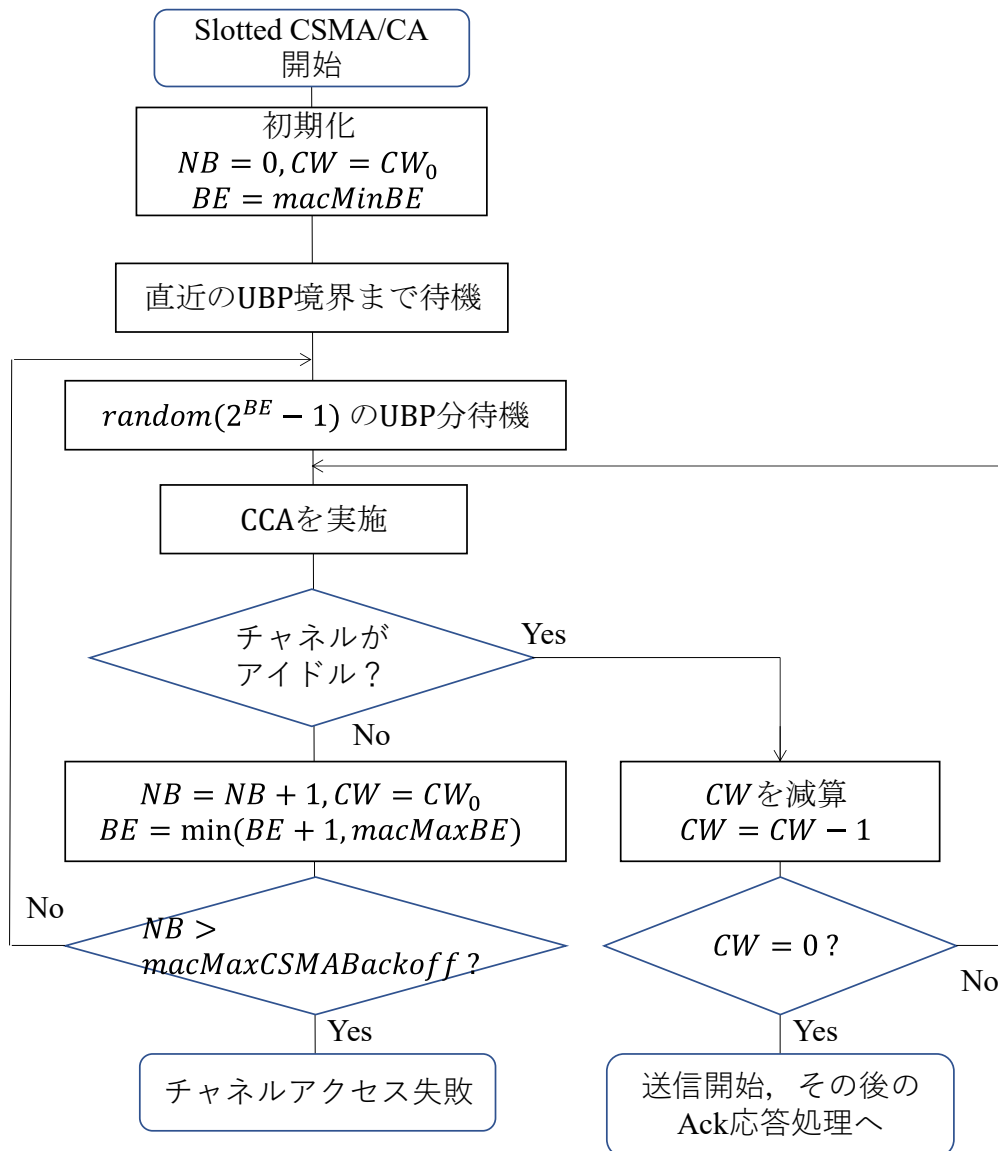


図 4.2 IEEE802.15.4 Slotted CSMA/CA のアルゴリズムフロー

4.4 信号伝搬モデル

フリスの伝達公式に従い，信号の受信電波強度 P_{rx} は

$$P_{rx}(d) = P_{tx} G_{tx} G_{rx} \left(\frac{c}{4\pi f_c d} \right)^\alpha \quad (4.2)$$

として扱う．ただし d は送受信間の伝送距離[m], P_{tx} は送信デバイスの送信電力 [mW], G_{tx} は送信デバイスの送信アンテナ利得, G_{rx} は受信デバイスの受信アンテナ利得, c は光速 3.0×10^8 [m / s], f_c は RF 信号の周波数[Hz], α は減衰指数を示す．

4.5 通信モデル

HAP と各 SN との距離が通信成功の観点において十分に近いネットワークを想定し，送受信距離による通信エラーレートについては考慮しない．また信号伝搬に関しては(4.2)式で示した距離減衰を考慮し，フェージング，シャドーイングについては考慮しない．

ただし，SN の送信データ信号が衝突した場合は，ある信号波の受信電波強度 P_1 に対しその他の信号の電波強度 P_2, \dots, P_n を理想的に合計した値を干渉波の電力として扱い，HAP の受信可能な SIR 閾値 SIR_{req} に対して

$$\frac{P_1}{\sum_{k=2}^n P_k} > SIR_{req} \quad (4.3)$$

を満たした信号については受信成功とする．

4.6 トラフィックモデル

センシングにより SN で生起するデータパケットについては，単位時間当たりの平均生起率が λ [packets/s] のポアソン生起に従って各 SN でランダムに生起する．また，データパケット長は全ての SN で等しく L_{pkt} [Byte] であるとし，各 SN はパケットを 3 つまでパケットバッファに保持することが可能と設定する．なお，データパケットを既にパケットバッファ分保持している状態でパケットが生起した場合については溢れたパケットを破棄する．また，データパケットを保持している状態で SN が電力枯渇を起こした場合，保持データが全て失われたとして扱い，パケットバッファ中の全てのデータパケットが破棄される．

4.7 無線電力伝送モデル

電力伝送の受電 SN が獲得する電力 P_{acq} [mW] は(4.2)式を使用して次式のように計算される.

$$P_{\text{acq}} = P_{\text{rx}}(d) \cdot \eta_{\text{rx}} = P_{\text{tx}} G_{\text{tx}} G_{\text{rx}} \left(\frac{c}{4\pi f_c d} \right)^\alpha \eta_{\text{rx}} \quad (4.4)$$

ただし, η_{rx} は WPT 受信時電力変換効率である.

なお, 電力伝送時間を T_{WPT} [s] とする場合, 受電 SN が獲得する電力量 E_{acq} [mJ], 電力獲得前の蓄電デバイスの残余電力量 $E_{\text{red}}^{\text{prev}}$ に対する充電後の残余電力量 $E_{\text{red}}^{\text{next}}$ はそれぞれの(4.5)式, (4.6)式で計算される.

$$E_{\text{acq}} = P_{\text{acq}} \cdot T_{\text{WPT}} \quad (4.5)$$

$$E_{\text{red}}^{\text{next}} = \min(E_{\text{red}}^{\text{prev}} + E_{\text{acq}}, E_{\text{lim}}) \quad (4.6)$$

ただし, E_{lim} [mJ] は SN の蓄電デバイスの容量上限である.

HAP が各フレームで任意の SN_i に伝送する電力量 E_{direct}^i [mJ] は, HAP と SN_i との距離を d_i [m], HAP の WPT 送信電力を P_{HAP} [mW] とすると, 次式のように表される.

$$E_{\text{direct}}^i = (T_{\text{BI}} - T_{\text{SD}}) \cdot r_{\text{direct}} \cdot P_{\text{HAP}} \cdot G_{\text{tx}} G_{\text{rx}} \left(\frac{c}{4\pi f_c d_i} \right)^\alpha \eta_{\text{rx}} \quad (4.7)$$

また, SN_i が Relay-WPT を実施した場合に SN_j が獲得する電力量 E_{relay}^{ij} [mJ] は, SN_i と SN_j 間の距離を d_{ij} [m], SN_i の Relay-WPT 期間開始時の残余電力量を E_{red}^i [mJ], SN の WPT 送信電力を P_{relay} [mW], WPT の送信時電力変換効率を η_{tx} とすると, まず SN_i の WPT 実施時間 T_{WPT}^i [s] が

$$T_{\text{WPT}}^i = \min \left(\frac{E_{\text{red}}^i - E_{\text{th}}^{\text{stop}}}{\frac{P_{\text{relay}}}{\eta_{\text{tx}}}}, (T_{\text{BI}} - T_{\text{SD}}) \cdot r_{\text{relay}} \right) \quad (4.8)$$

と表されるため,

$$E_{\text{relay}}^{ij} = P_{\text{relay}} G_{\text{tx}} G_{\text{rx}} \left(\frac{c}{4\pi f_c d_{ij}} \right)^\alpha \eta_{\text{rx}} \cdot T_{\text{WPT}}^i \quad (4.9)$$

となる.

4.8 SN 電力消費モデル

SNは動作に応じて、アイドル状態 Idle 、受信状態 Rx 、パケット送信状態 Tx 、スリープ状態 Sleep の4つの動作状態を持つ。各状態での消費電力は P_{Idle} , P_{Rx} , P_{Tx} , P_{Sleep} [mW]として定義する。フレーム構造で規定されるビーコン信号から次のビーコン信号までのフレーム長 T_{BI} のうち、各状態で動作している時間をそれぞれ $T_{\text{Idle}}[\text{s}]$, $T_{\text{Rx}}[\text{s}]$, $T_{\text{Tx}}[\text{s}]$, $T_{\text{Sleep}}[\text{s}]$ と表すと、 T_{BI} と各時間の関係は(4.10)式のように、また1フレームで各動作により消費される電力量は(4.11)から(4.14)式のようになる。

$$T_{\text{BI}} = T_{\text{Idle}} + T_{\text{Rx}} + T_{\text{Tx}} + T_{\text{Sleep}} \quad (4.10)$$

$$E_{\text{Idle}} = P_{\text{Idle}} \cdot T_{\text{Idle}} \quad (4.11)$$

$$E_{\text{Rx}} = P_{\text{Rx}} \cdot T_{\text{Rx}} \quad (4.12)$$

$$E_{\text{Tx}} = P_{\text{Tx}} \cdot T_{\text{Tx}} \quad (4.13)$$

$$E_{\text{Sleep}} = P_{\text{Sleep}} \cdot T_{\text{Sleep}} \quad (4.14)$$

ただし $E_{\text{Idle}}[\text{m}]$, $E_{\text{Rx}}[\text{m}]$, $E_{\text{Tx}}[\text{m}]$, $E_{\text{Sleep}}[\text{m}]$ はそれぞれ1フレームあたりに Idle , Rx , Tx , Sleep 状態で消費した電力量の合計である。

1フレーム中の各状態での動作時間 T_{Idle} , T_{Rx} , T_{Tx} , T_{Sleep} の算出式についてそれぞれ記述する。まず、 Idle 状態での動作時間 T_{Idle} は1フレーム中のランダムバックオフ回数 N_b に対し(4.1)式で定義されたランダムなバックオフ期間 T_{backoff} を用いて次式のように表される。

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

なお、CAP 期間開始時に自身がデータパケットを保持していないSN、およびCAP 期間中にデータパケットを全て送信、あるいは破棄されパケットバッファが空になったSNはその後非アクティブ期間に入るまで待たずに Sleep 状態とする動作を想定するため(4.15)式のようになっている。

次に Rx 状態の動作時間 T_{Rx} については、フレームの先頭でビーコンを受信する期間 $T_{\text{beacon}}[\text{s}]$ とデータパケットの送信時に HAP からの Ack フレームを受信する期間 $T_{\text{Ack}}[\text{s}]$ を用いて表される。 T_{beacon} はビーコンフレーム長 $L_{\text{beacon}}[\text{Byte}]$ 、通信レート $R[\text{bps}]$ に対して次式のようになる。

$$T_{\text{beacon}} = \frac{L_{\text{beacon}} \cdot 8}{R} \quad (4.16)$$

T_{Ack} は 1 フレーム中の SN のデータパケット送信数 N_{Tx} , Ack フレーム長 L_{Ack} [Byte], 通信レート R [bps]に対し次式のようになる.

$$T_{\text{Ack}} = \frac{L_{\text{Ack}} \cdot 8}{R} \cdot N_{\text{Tx}} \quad (4.17)$$

よって, Rx 状態の動作時間 T_{Rx} は以上の(4.16), (4.17)式から, 次式で表される.

$$T_{\text{Rx}} = T_{\text{beacon}} + T_{\text{Ack}} = \frac{L_{\text{beacon}} \cdot 8}{R} + \frac{L_{\text{Ack}} \cdot 8}{R} \cdot N_{\text{Tx}} \quad (4.18)$$

続いて Tx 状態の動作時間 T_{Tx} については, 1 フレーム中の SN のデータパケット送信数 N_{Tx} , データパケット長 L_{pkt} [Byte], 通信レート R [bps]を用いて, 次式で表される.

$$T_{\text{Tx}} = \frac{L_{\text{pkt}} \cdot 8}{R} \cdot N_{\text{Tx}} \quad (4.19)$$

最後に, Sleep 状態での動作時間 T_{Sleep} については, (4.10)式, および(4.15), (4.18)式, (4.19)式でそれぞれ算出される $T_{\text{Idle}}, T_{\text{Rx}}, T_{\text{Tx}}$ より

$$T_{\text{Sleep}} = T_{\text{BI}} - (T_{\text{Idle}} + T_{\text{Rx}} + T_{\text{Tx}}) \quad (4.20)$$

で表される.

また, フレーム先頭でビーコン信号を受信し, その後 1 パケットを送信するために必要な電力量 E_{req} [mJ] が蓄電デバイスに残っていない SN は, そのフレーム中でデータパケットを送信する能力がなく SN としての動作が可能でないとし, そのフレーム中に SN は電力枯渇状態であると定義する. 送信のために最低限必要な動作は, 送信動作後に Ack 受信を行う動作であるとし, 次式のように定義する.

$$E_{\text{req}} = \frac{L_{\text{pkt}} \cdot 8}{R} \cdot P_{\text{Tx}} + \frac{L_{\text{Ack}} \cdot 8}{R} \cdot P_{\text{Rx}} \quad (4.21)$$

4.9 アンテナ指向性モデル

Relay-WPT の送信アンテナについて、水平面に無指向なオムニアンテナを用いる場合、指向性を持つアンテナを用いる場合についてそれぞれ指向性モデルを定める．それぞれを用いて Relay-WPT を実施した場合の俯瞰的な模式図を図 4.3 に示す．

オムニアンテナを用いる場合は、ネットワーク中の自身を除く全ての SN が Relay-WPT 信号を受信可能な位置に配置されているとし、送信利得については半波長ダイポールアンテナを想定し 2.14 [dBi] に設定する．

指向性アンテナを用いる場合は、図 4.4 で示すように最大放射方向を Relay-WPT を実施する SN（ここでは SN_{relay} と呼称）から見て HAP と逆方向に固定して設置する．これは、HAP 近傍の SN は既に十分な電力を得ている可能性が高いため放射を低減し、電力不足が予想されるより HAP から遠方の SN へ電力を伝送することを狙いとしている．放射パターンとしてはペンシルビーム型を想定し、送信アンテナ利得 G [dBi] に対し文献[20]の近似モデルから

$$G = \frac{DB}{\phi_E^\circ \phi_H^\circ} \quad (4.22)$$

に基づいて半値角 ϕ [°] を決定する．ただし、水平面、垂直面におおよそ対称なパターンを想定し $\phi = \phi_E^\circ = \phi_H^\circ$ として算出する． DB は利得とビーム幅の積であり、文献[20]中でアンテナ種類ごとに設定されている． SN_{relay} と Relay-WPT 信号を受信する可能性のある SN（ここでは SN_{rx} と呼称）が成す角が θ [°] である場合、 SN_{rx} に対する SN_{relay} の送信アンテナ利得 G_θ [dBi] は

$$G_\theta = \begin{cases} G \left(1 - \frac{\theta}{\phi}\right), & \theta \leq \frac{\phi}{2} \\ 0, & \theta > \frac{\phi}{2} \end{cases} \quad (4.23)$$

として算出する．式で示されるように、半値角 ϕ より外に位置する SN_{rx} は Relay-WPT 信号を受信不能であるとし、ヌル点までの利得、およびサイド・バックローブの利得については考慮しない．また受信可能範囲内に位置する場合は SN_{relay} との角度 θ に応じて利得を最大放射方向の利得から線形的に減少させる．

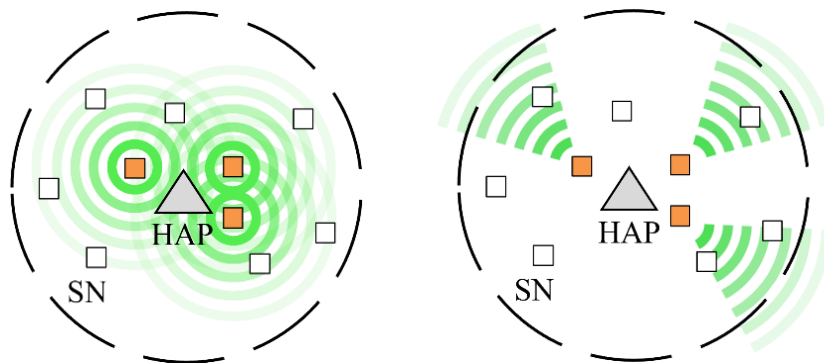


図 4.3 Relay-WPT 送信アンテナの指向性模式図
(左)オムニアンテナ (右)指向性アンテナ

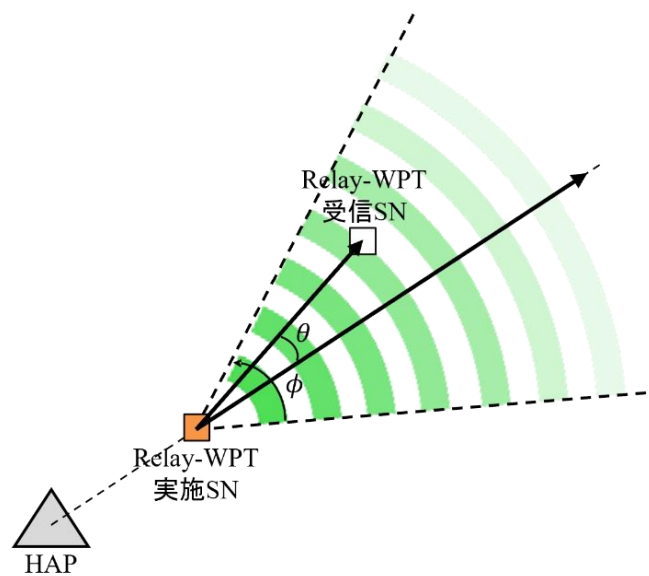


図 4.4 指向性アンテナによる Relay-WPT 送信

5 章 特性評価

本章では，WPSN において提案方式である SN の余剰電力を活用した Relay-WPT 方式がネットワーク性能向上に有効であるかを計算機シミュレーションによって評価する．5.1 節でシステム性能評価に用いる評価指標を記述する．5.2 節でシミュレーション諸元を記述する．5.3 節で提案方式の特性評価結果について示し，各結果に対する考察を合わせて記述する．

5.1 評価指標

システム性能の評価指標として，SN の電力枯渇率 R_{dep} ，および HAP のデータ収集率 R_{data} ，および HAP のデータ収集維持電力 P_{sus} を用いる．各指標の定義についてそれぞれ 5.1.1 項，5.1.2 項，および 5.1.3 項で記述する

5.1.1 電力枯渇率，相対電力枯渇低減率

電力枯渇率 R_{dep} [%] は 4 章 4.7 節の(4.21)式で規定した 1 パケット送信のために最低限必要な電力量 E_{req} [mJ] を SN が保有していなかった平均フレーム割合を示す指標で，次式で算出される．

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

ただし， $N_{\text{frame}}^{\text{sim}}$ はシミュレーションの実行フレーム数を示し， $N_{\text{frame}}^{\text{dep}}$ はビーコンフレーム受信後の WIT 期間開始時において SN の蓄電デバイスの残余電力量が 1 パケットを送信するために最低限必要な電力量 E_{req} を下回り電力枯渇と判定されたフレーム数を示す．

また，Relay-WPT を非適用の場合と適用した場合で確認された電力枯渇率がそれぞれ $R_{\text{dep}}^{\text{no-relay}}$ [%], $R_{\text{dep}}^{\text{relay}}$ [%] であった場合に， $R_{\text{dep}}^{\text{no-relay}}$ の値に対して相対的に電力枯渇率が低減された割合として，相対電力枯渇低減率 $R_{\text{dep}}^{\text{rel}}$ [%] を次式のように定義する．

$$R_{\text{dep}}^{\text{rel}} = \frac{R_{\text{dep}}^{\text{no-relay}} - R_{\text{dep}}^{\text{relay}}}{R_{\text{dep}}^{\text{no-relay}}} \times 100 \quad (5.2)$$

5.1.2 データ収集率，相対データ収集向上率

データ収集率 R_{data} [%] は，SN で生起したデータパケットのうち，HAP が受信に成功した割合を示し，次式で計算される．

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

ただし， $N_{\text{pkt}}^{\text{gen}}$ は，シミュレーション期間内に全ての SN で生起したパケット数， $N_{\text{pkt}}^{\text{suc}}$ は HAP が受信に成功したパケット数である．

また，Relay-WPT を非適用の場合と適用した場合で確認されたデータ収集率がそれぞれ $R_{\text{data}}^{\text{no-relay}}$ [%], $R_{\text{data}}^{\text{relay}}$ [%] であった場合に， $R_{\text{data}}^{\text{no-relay}}$ の値に対して相対的にデータ収集率が向上した割合として，相対データ収集向上率 $R_{\text{data}}^{\text{rel}}$ [%] を次式のように定義する．

$$R_{\text{data}}^{\text{rel}} = \frac{R_{\text{data}}^{\text{relay}} - R_{\text{data}}^{\text{no-relay}}}{R_{\text{data}}^{\text{no-relay}}} \times 100 \quad (5.4)$$

5.1.3 データ収集維持電力

WPSN において本来意図したサービスの品質，信頼性を維持するためにはネットワーク中の全 SN の計測データを最大限収集することが必要となる．そこで，WPSN におけるデータ収集性能を維持するために必要な HAP の WPT 送信電力をデータ収集維持電力 P_{sus} [dBm] として定義し，評価を行う．ただし，全 SN が HAP から十分に電力を供給され電力枯渇を起こさない条件下においても CAP 期間にチャネルアクセス競合を実施するためパケットが破棄される場合があることから，本研究ではデータ収集率が 99.9% 以上の場合に十分にサービス維持が可能であると設定する．すなわち，HAP の WPT 電力が P [dBm] である場合に得られるデータ収集率を $R_{\text{data}}(P)$ [%] と表すとき，

$$P_{\text{sus}} = \min(P) \text{ subject to } R_{\text{data}}(P) \geq 99.9 \quad (5.5)$$

と定義される．

また，Relay-WPT を非適用の場合と適用した場合で確認されたデータ収集維持電力がそれぞれ $P_{\text{sus}}^{\text{no-relay}}$ [W], $P_{\text{sus}}^{\text{relay}}$ [W] であった場合に， $P_{\text{sus}}^{\text{no-relay}}$ の値に対して相対的にデータ収集維持電力が低減された割合として，相対収集維持電力低減率 $R_{\text{sus}}^{\text{rel}}$ [%] を次式のように定義する．

$$R_{\text{sus}}^{\text{rel}} = \frac{P_{\text{sus}}^{\text{no-relay}} - P_{\text{sus}}^{\text{relay}}}{P_{\text{sus}}^{\text{no-relay}}} \times 100 \quad (5.6)$$

5.2 シミュレーション諸元

評価に使用した主要なシミュレーション諸元を表 5.1 に示す.

表 5.1 シミュレーション諸元

パラメータ	記号	値	デフォルト値	単位
SN 配置半径	R_{area}	4~12	8	[m]
SN 台数	N_{SN}	20~90	50	
使用周波数(WIT/WPT)	f_c	915		[MHz]
距離減衰指数	α	2		
情報伝送レート	R	40		[kbit/s]
実行フレーム数	$N_{\text{frame}}^{\text{sim}}$	20000		
BeaconOrder	BO	7		
SuperframeOrder	SO	6		
SN ごとのパケット生起平均間隔	λ	40		[BI]
パケット衝突時 SIR 閾値	SIR_{th}	10.0		[dB]
データパケット送信時消費電力	P_{Tx}	102.3		[mW]
受信時消費電力	P_{Rx}	46.2		[mW]
アイドル状態時消費電力	P_{Idle}	12.87		[mW]
スリープ状態時消費電力	P_{Sleep}	4.29		[μ W]
蓄電デバイス容量上限	E_{lim}	1000		[mJ]
ビーコンサイズ	L_{beacon}	17		[Byte]
ACK フレームサイズ	L_{Ack}	11		[Byte]
ペイロードサイズ		40		[Byte]
データパケットサイズ	L_{pkt}	55		[Byte]
最小バックオフ指数	$macMinBE$	5		
最大バックオフ指数	$macMaxBE$	8		
最大バックオフ回数	$macMaxCSMABackoff$	4		
最大再送回数		3		
HAP の WPT 送信電力	P_{HAP}		40.79	[dBm]
非アクティブ期間における Relay-WPT 期間比率	r_{relay}	0.5		
非アクティブ期間における Direct-WPT 期間比率	r_{direct}	0.5		
WPT 受信時電力変換効率	η_{rx}	0.8		
WPT 送信時電力変換効率	η_{tx}	0.8		
Relay-WPT 開始電力量閾値	$E_{\text{th}}^{\text{start}}$	20~900	200	[mJ]
Relay-WPT 停止電力量閾値	$E_{\text{th}}^{\text{stop}}$		100	[mJ]
連続稼働期間閾値	$N_{\text{th}}^{\text{act}}$	5000		

5.3 特性評価

本節では提案方式の有効性について、以下の項目に分けて評価結果を示す。5.3.1 項では提案方式において余剰エネルギーを有する SN の選定に用いている連続稼働期間の判定がネットワーク性能に与える影響について評価する。5.3.2 項では Relay-WPT の送信にオムニアンテナを用いた場合の電力枯渇率、データ収集率、データ収集維持電力について Relay-WPT 非実施の場合と比較評価する。5.3.3 項では Relay-WPT の送信に指向性アンテナを用いた場合について前項と同様に Relay-WPT 非実施の場合と比較評価する。

5.3.1 連続稼働期間判定のシステム性能への影響

提案方式で規定された Relay-WPT 実施基準のうち、SN の連続稼働期間基準が余剰エネルギーを有する SN を Relay-WPT 実施 SN として適応的に選定することが可能であるかを評価するため、連続稼働期間基準を有効にした場合（提案方式と同等）と無効にした場合（電力量基準のみで動作）についてシステム性能を比較した。電力枯渇率、データ収集率の結果をそれぞれ図 5.1, 図 5.2 に示す。なお、エリア半径 R_{area} を 8m と設定し、おおよそ全ての SN が枯渇せず動作する条件として HAP の WPT 送信電力 P_{HAP} を 41.07dBm に設定した。また、Relay-WPT 停止電力量閾値 $E_{\text{th}}^{\text{stop}}$ を 10mJ とし、Relay-WPT 開始電力量閾値 $E_{\text{th}}^{\text{start}}$ を 20mJ から 900mJ まで変化させて影響を確認した。

図 5.1 より、連続稼働期間判定を有効にした場合は全ての $E_{\text{th}}^{\text{start}}$ 条件で Relay-WPT 非適用の場合と比較して電力枯渇率の低減が確認されるのに対して、連続稼働期間判定を設けず、 $E_{\text{th}}^{\text{start}}$ のみで Relay-WPT 実施 SN を選定した場合は $E_{\text{th}}^{\text{start}}$ の値がおおよそ 200mJ 未満の条件下で性能が劣化し、一部で Relay-WPT を非適用の場合よりも電力枯渇率が悪化した。これは、自身のパケット送信処理で電力枯渇を起こしうる SN の残余電力量が開始電力量閾値 $E_{\text{th}}^{\text{start}}$ を超えてしまい、Relay-WPT 実施 SN として選定された結果としてその後に自身がより頻繁に電力枯渇を起こしていることが要因として考えられる。連続稼働期間基準を有効にした場合では $E_{\text{th}}^{\text{start}}$ の値に依らず安定して電力枯渇率が低減されており、Relay-WPT 実施 SN が適切に選定されているといえる。

図 5.2 で示されるデータ収集率の結果は電力枯渇率特性と対応しており、電力枯渇率の上昇、低減に対しそれぞれデータ収集率の悪化、向上が確認される。

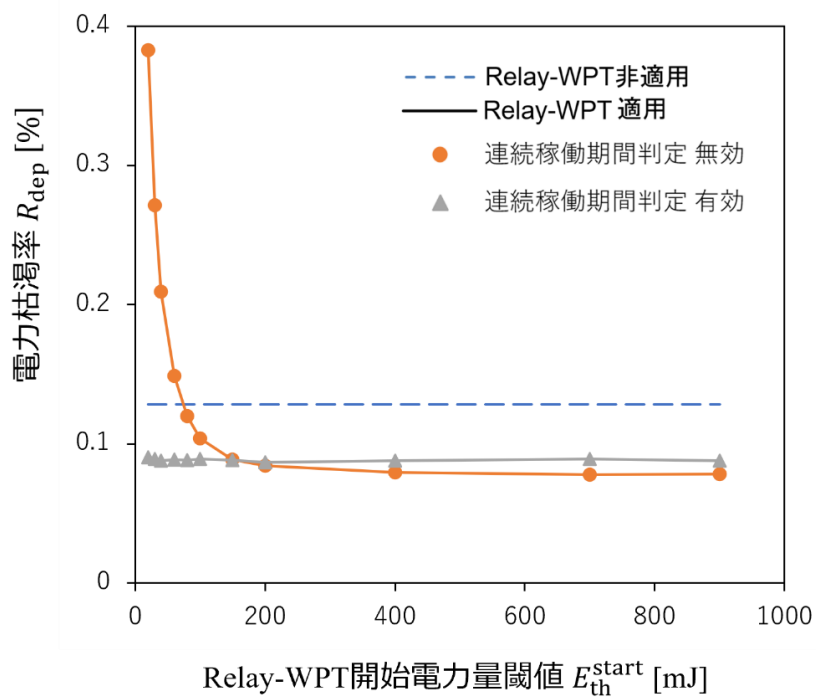


図 5.1 連続稼働期間判定の無効/有効時の電力枯渇率

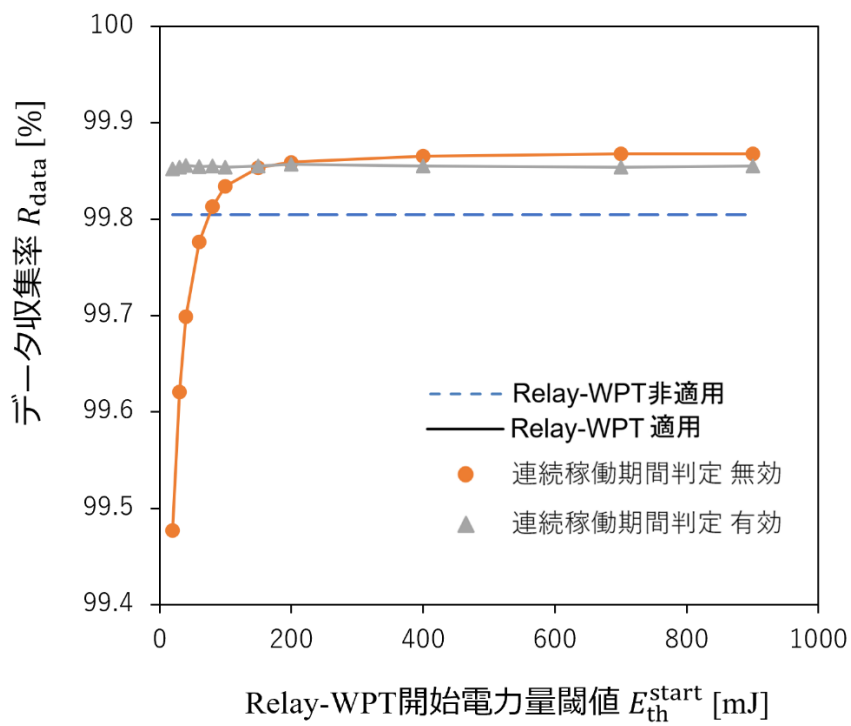


図 5.2 連続稼働期間判定の無効/有効時のデータ収集率

5.3.2 オムニアンテナによる Relay-WPT 送信時評価

5.3.2.1 電力枯渇率特性

Relay-WPT をオムニアンテナにより実施した場合の電力枯渇率 R_{dep} ，および相対電力枯渇低減率 $R_{\text{dep}}^{\text{rel}}$ 特性について，それぞれ SN 台数 N_{SN} とネットワークエリア半径 R_{area} を変化させ評価する．

● SN 台数 N_{SN} 変化

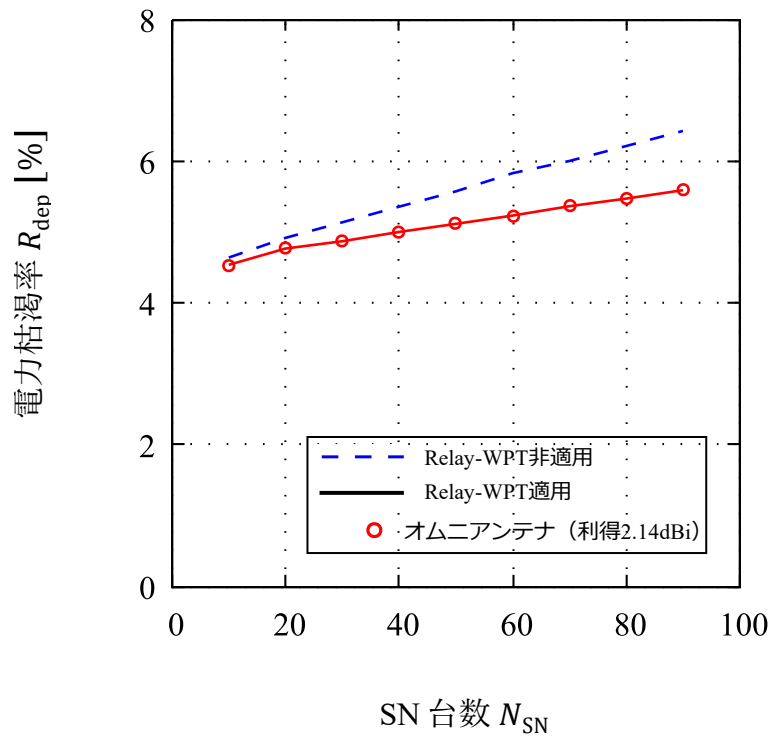


図 5.3 SN 台数 対 電力枯渇率（オムニアンテナ使用時）

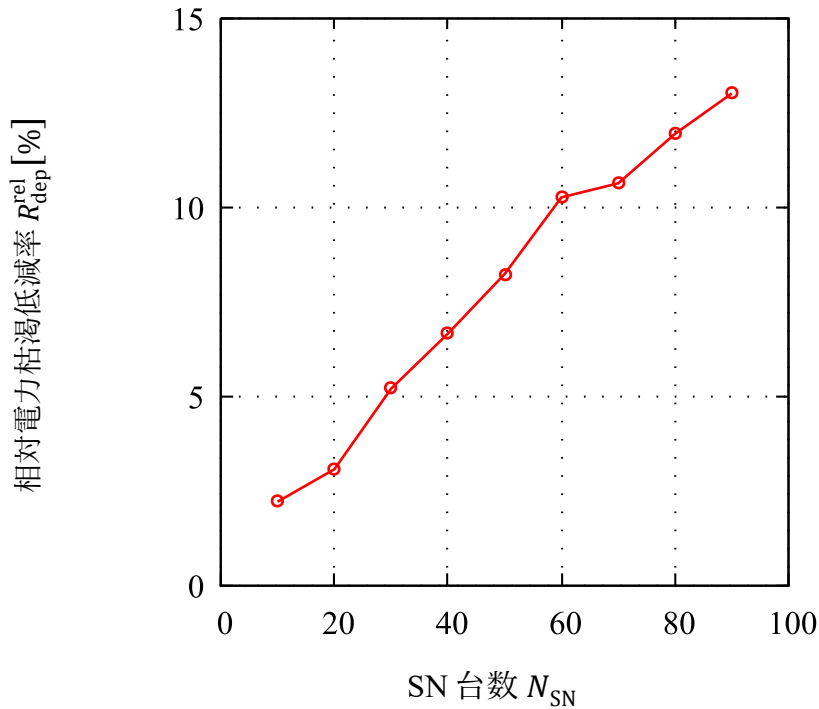


図 5.4 SN 台数 対 相対電力枯渇低減率（オムニアンテナ使用時）

SN 台数 N_{SN} 変化時の電力枯渇率 R_{dep} ，相対電力枯渇低減率 R_{dep}^{rel} についてそれぞれ図 5.3，図 5.4 に示した．なお，ネットワークエリア半径 R_{area} は 8m に設定されている．

まず，図 5.3 に示されるように Relay-WPT 適用時，非適用時ともに SN 台数が増えるほど電力枯渇率が上昇する特性が見られた．これは，SN 台数が増えるほどネットワークトラフィックが増加し，CAP 期間中のチャネルアクセス競合による SN の電力消費が増加するためである．

また，Relay-WPT 適用時と非適用時を比較すると，適用時では電力枯渇率の値が低くなり，HAP 遠方 SN の電力枯渇低減効果が伺える．また，その効果は SN 台数が増加するほど増加する傾向を示した．これについては SN 台数が増加することで HAP 近傍に位置し頻繁に Relay-WPT を実施する SN，および電力が不足する SN 近傍へ近距離から Relay-WPT を実施する SN の台数が増加することが要因として考えられる．

図 5.4 の相対電力枯渇低減率についても Relay-WPT 適用により電力枯渇率が減少したことから正の値を示し，またこちらも SN 台数増加に伴って増大する傾向を示した．

● ネットワークエリア半径 R_{area} 変化

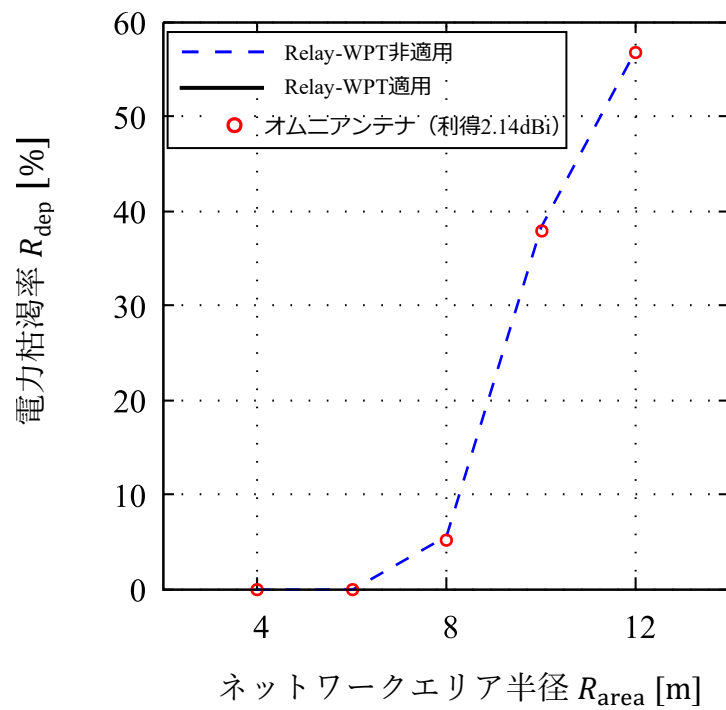


図 5.5 エリア半径 対 電力枯渇率（オムニアンテナ使用時）

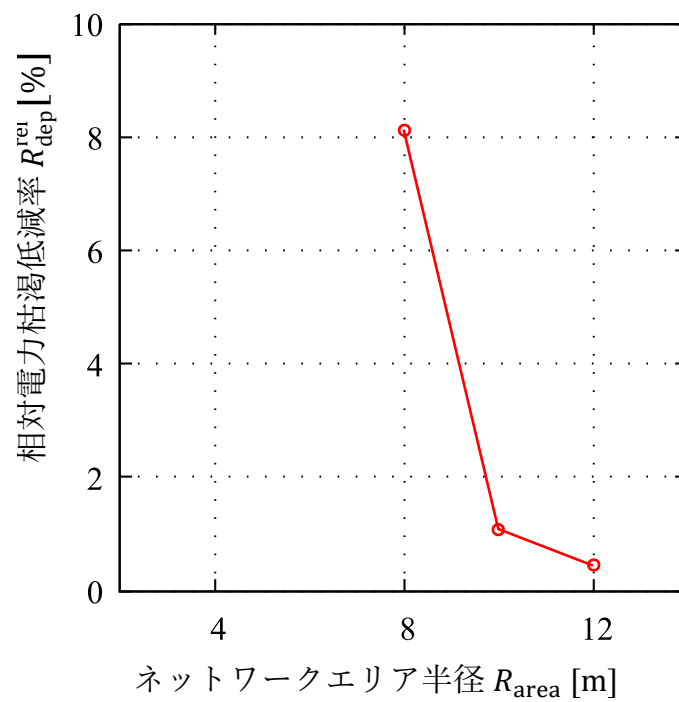


図 5.6 エリア半径 対 相対電力枯渇低減率（オムニアンテナ使用時）

ネットワークエリア半径 R_{area} 変化時の電力枯渇率 R_{dep} , 相対電力枯渇低減率 $R_{\text{dep}}^{\text{rel}}$ についてそれぞれ図 5.5, 図 5.6 に示した. なお, SN 台数 N_{SN} は 50 台に設定している.

図 5.5 より, ネットワークエリア半径が大きいほど, ネットワーク外縁に位置する SN が動作するために必要な電力を提供するための HAP の WPT 送信電力が増大することから, 電力枯渇率も増加傾向を示している.

また, Relay-WPT による電力枯渇率の低減効果について図 5.6 より確認すると, ネットワークエリア径が大きいほど低下する傾向を示した. なお, ネットワークエリア径が 4m, 6m の場合の結果は電力枯渇率が 0%であったため相対電力枯渇低減率についてはプロットされていない.

5.3.2.2 データ収集率特性

● SN 台数 N_{SN} 変化

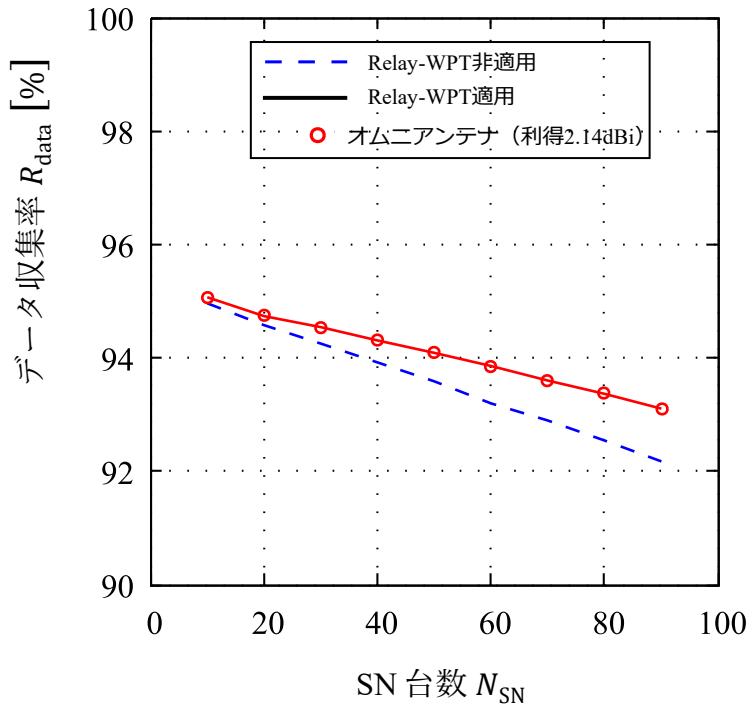


図 5.7 SN 台数 対 データ収集率 (オムニアンテナ使用時)

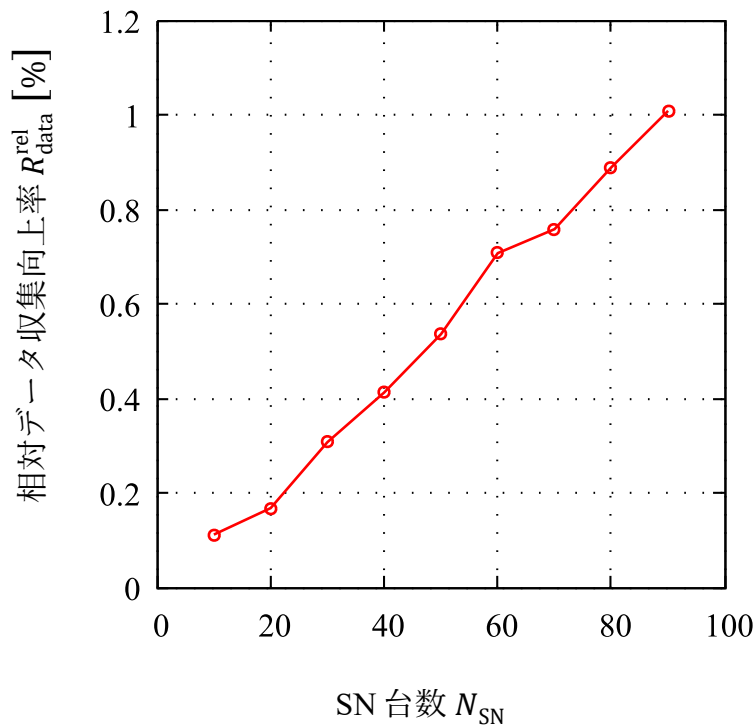


図 5.8 SN 台数 対 相対データ収集向上率（オムニアンテナ使用時）

SN 台数 N_{SN} 変化時のデータ収集率 R_{data} ，相対データ収集向上率 R_{data}^{rel} についてそれぞれ図 5.7，図 5.8 に示した．なお，ネットワークエリア半径 R_{area} は 8m に設定されている．

図 5.3 で示されたように **Relay-WPT** により **SN** の電力枯渇率が低減されたことから図 5.7 のデータ収集率についても向上し，またその向上効果は **SN** 台数が増加するほど増加することが確認された．図 5.8 の相対電力枯渇低減率についても図 5.4 と同様に **SN** 台数増加とともに向上効果が増加することが確認された．

● ネットワークエリア半径 R_{area} 変化

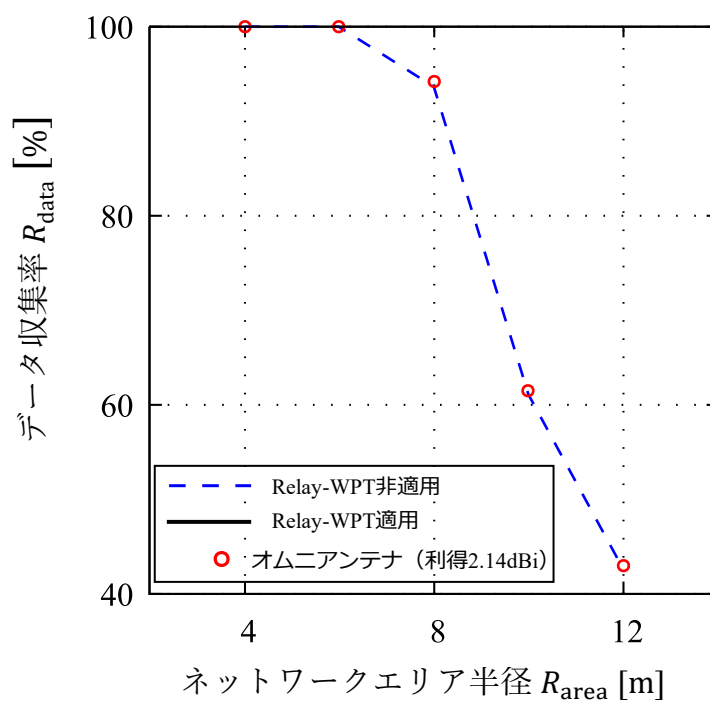


図 5.9 エリア半径 対 データ収集向上率（オムニアンテナ使用時）

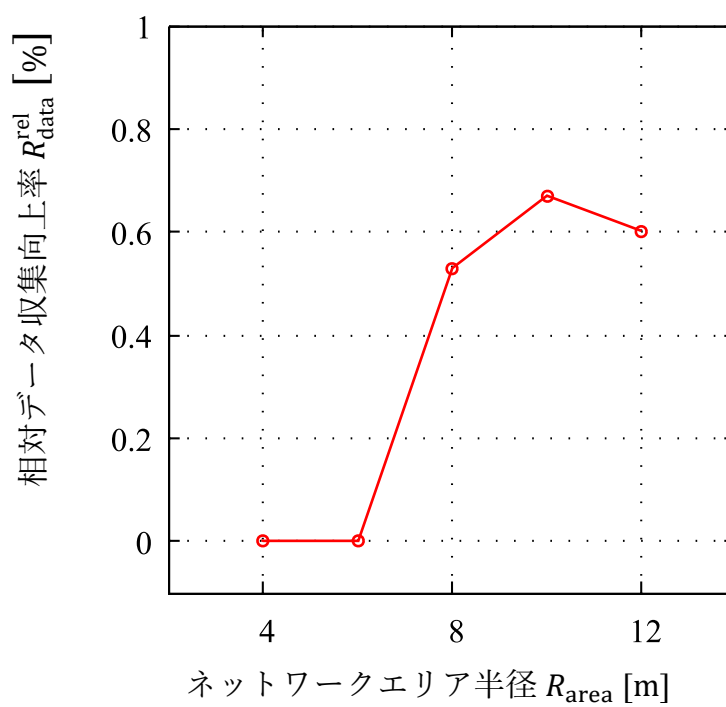


図 5.10 エリア半径 対 相対データ収集向上率（オムニアンテナ使用時）

ネットワークエリア半径 R_{area} 変化時のデータ収集率 R_{data} , 相対データ収集向上率 $R_{\text{data}}^{\text{rel}}$ についてそれぞれ図 5.9, 図 5.10 に示した. なお, SN 台数 N_{SN} は 50 台に設定している.

図 5.9 について, HAP の WPT 送信電力を固定しネットワークエリア半径を変化させているため, こちらもネットワーク半径が大きくなるほど低下する.

図 5.10 の相対データ収集向上率については 10m 条件までは増加が確認されたが, その後は増加傾向を示していない. これは, データ収集率がネットワークエリア半径増大とともに減少していくため相対的な向上率としては増加傾向を示すものの, 図 5.6 で示したように Relay-WPT による電力枯渇低減効果はネットワークエリア半径増大とともに減少するため, そのトレードオフが表れていると考えられる.

5.3.2.3 データ収集維持電力特性

● SN 台数 N_{SN} 変化

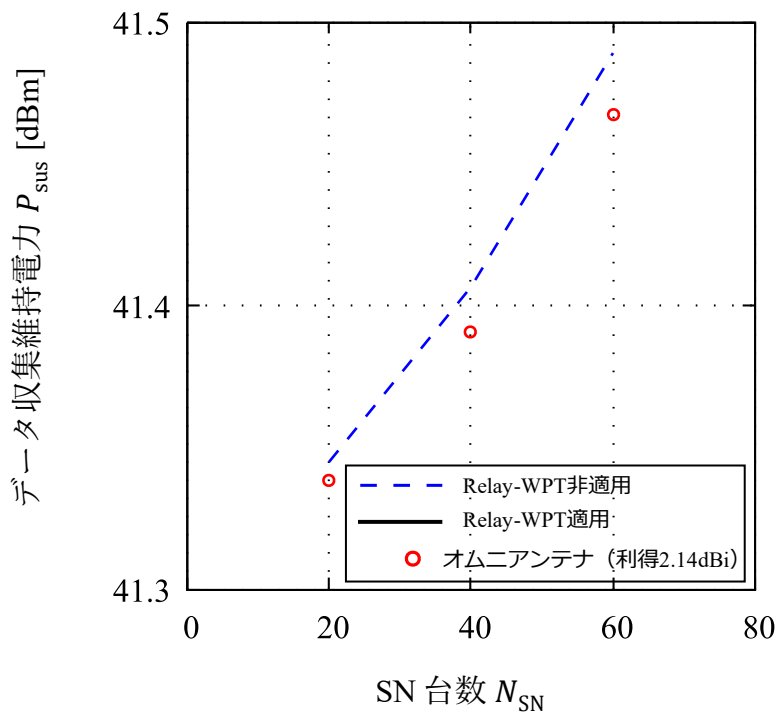


図 5.11 SN 台数 対 データ収集維持電力 (オムニアンテナ使用時)

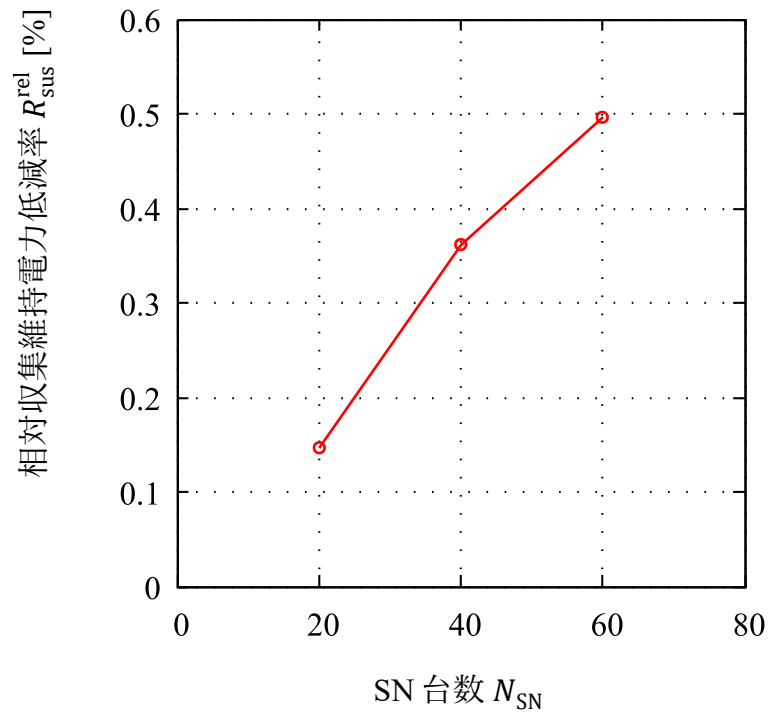


図 5.12 SN 台数 対 データ収集維持電力（オムニアンテナ使用時）

SN 台数 N_{SN} 変化時のデータ収集維持電力 P_{sus} ，相対収集維持電力低減率 R_{sus}^{rel} についてそれぞれ図 5.11，図 5.12 に示した．なお，ネットワークエリア半径 R_{area} は 8m に設定されている．

図 5.11 について，SN 台数が増加した場合トラフィック増加により図 5.3 で示したように電力枯渇率が増加することから，データ収集維持電力についても全体として増加することが確認される．Relay-WPT による電力枯渇の低減，およびデータ収集率向上が確認されることから，データ収集維持電力も Relay-WPT 非実施時と比較して低減されることが確認された．また，その効果が SN 台数増加とともに増大する傾向についても同様である．

図 5.12 で示される相対的な電力低減効果についても SN 台数増加に対し増大傾向を示した．

● ネットワークエリア半径 R_{area} 変化

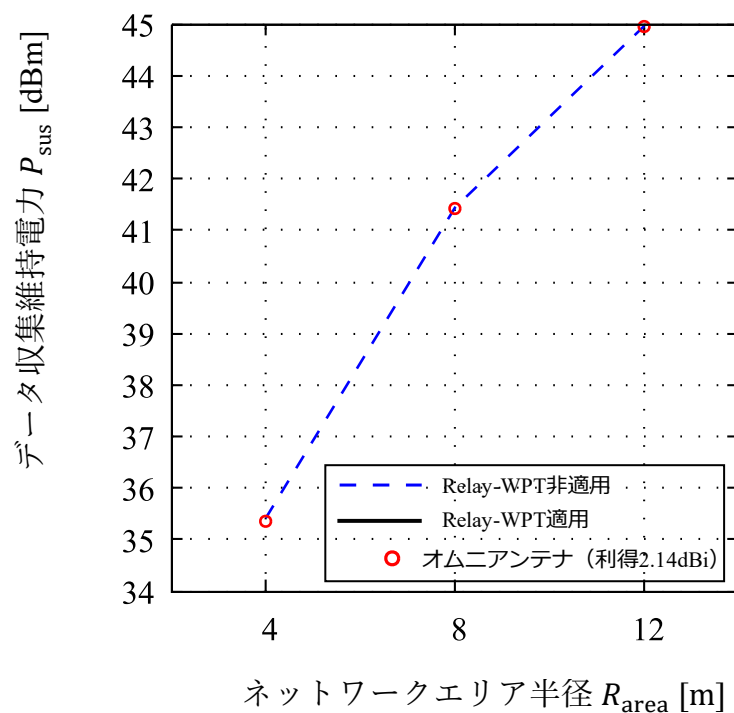


図 5.13 エリア半径 対 データ収集維持電力（オムニアンテナ使用時）

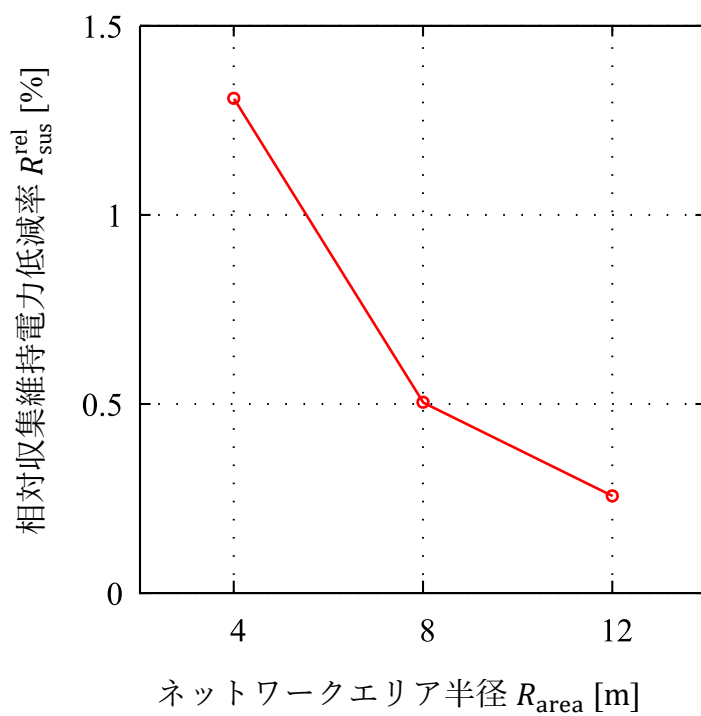


図 5.14 エリア半径 対 相対収集維持電力低減率（オムニアンテナ使用時）

ネットワークエリア半径 R_{area} 変化時のデータ収集維持電力 P_{sus} 、相対収集維持電力低減率 $R_{\text{sus}}^{\text{rel}}$ についてそれぞれ図 5.13, 図 5.14 に示した。なお, SN 台数 N_{SN} は 50 台に設定している。

図 5.13 について, 図 5.5 で示した電力枯渇率特性と同様に, ネットワークエリア半径が大きいほど, ネットワーク外縁に位置する SN が動作するために必要な電力を提供するための HAP の WPT 送信電力が増大することから, データ収集維持電力はネットワークエリア増大とともに全体として増加傾向を示す。

また, 図 5.14 で示される相対収集維持電力低減率についてはネットワークエリア半径増大とともに減少する傾向を示した。

5.3.3 指向性アンテナによる Relay-WPT 送信時評価

5.3.3.1 電力枯渇率特性

- SN 台数 N_{SN} 変化

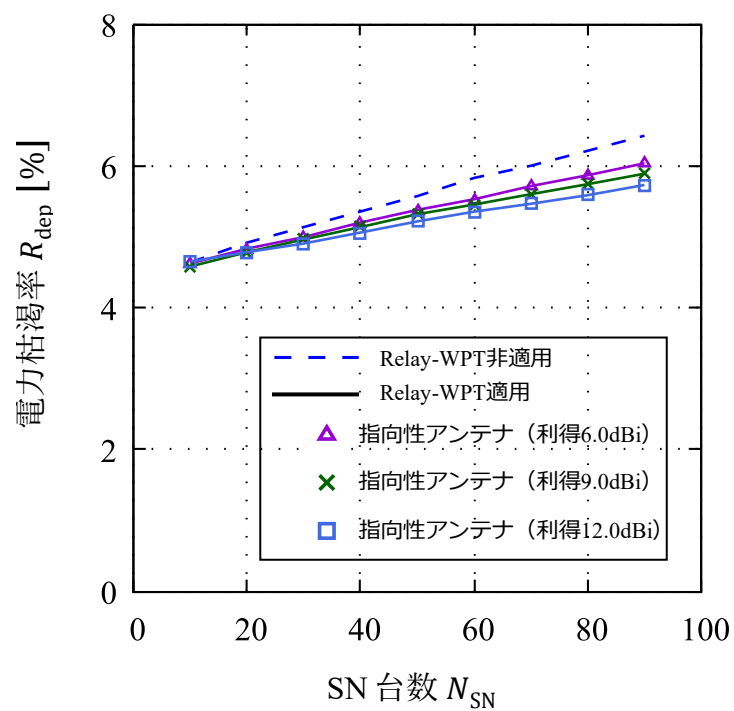


図 5.15 SN 台数 対 電力枯渇率（指向性アンテナ使用時）

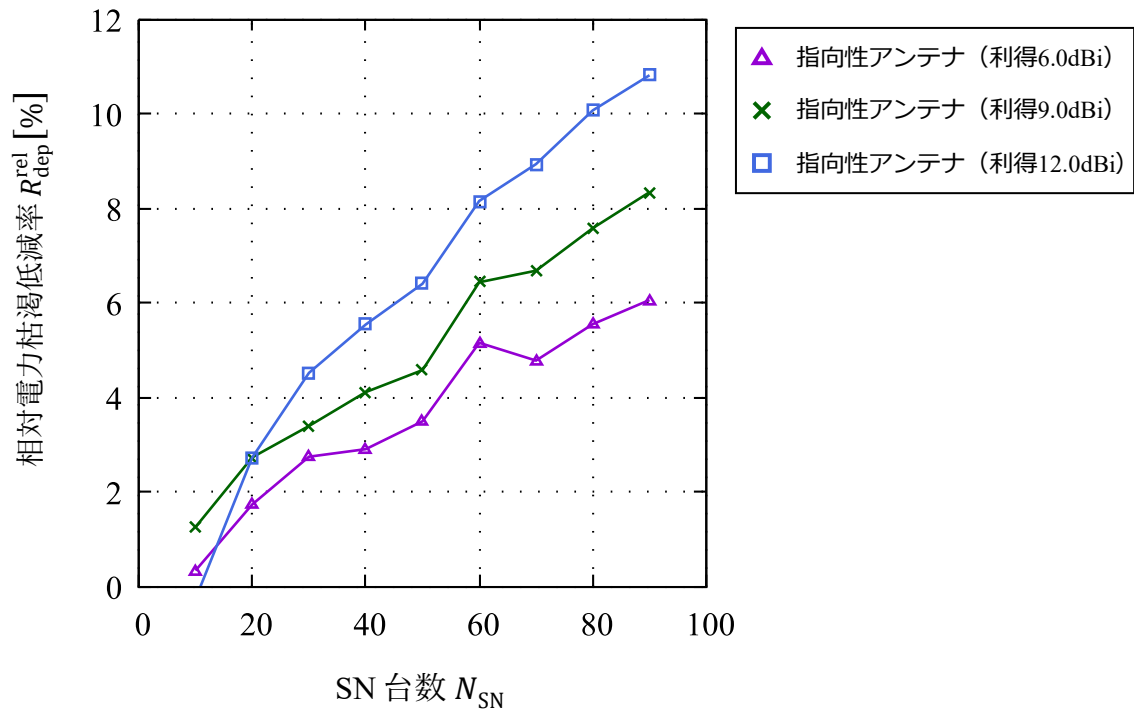


図 5.16 SN 台数 対相対電力枯渇低減率（指向性アンテナ使用時）

SN 台数 N_{SN} 変化時の電力枯渇率 R_{dep} ，相対電力枯渇低減率 R_{dep}^{rel} についてそれぞれ図 5.15，図 5.16 に示した．なお，ネットワークエリア半径 R_{area} は 8m に設定されている．

図 5.16 に示されるように，破線で示される Relay-WPT 非実施の場合と比較して Relay-WPT を実施した場合では図 5.3 で示したオムニアンテナでの Relay-WPT 実施時の結果と同様に，いずれの利得値でも電力枯渇率の低減が確認された．また，SN 台数増加とともに低減効果が増加することも同様である．

なお，その電力枯渇率低減効果について図 5.16 より相対電力枯渇低減率を確認すると，12dBi 条件で最も高く，次いで 9dBi，6dBi と指向性が先鋭となるほど効果の増大が確認された．

● ネットワークエリア半径 R_{area} 変化

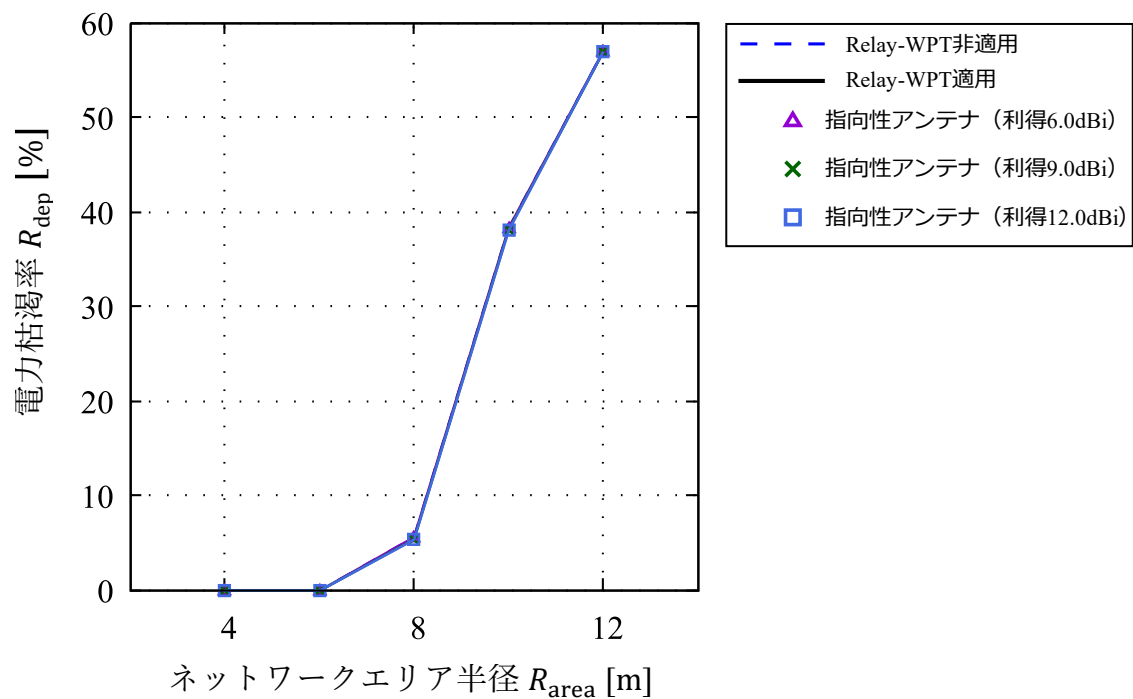


図 5.17 エリア半径 対 電力枯渇率（指向性アンテナ使用時）

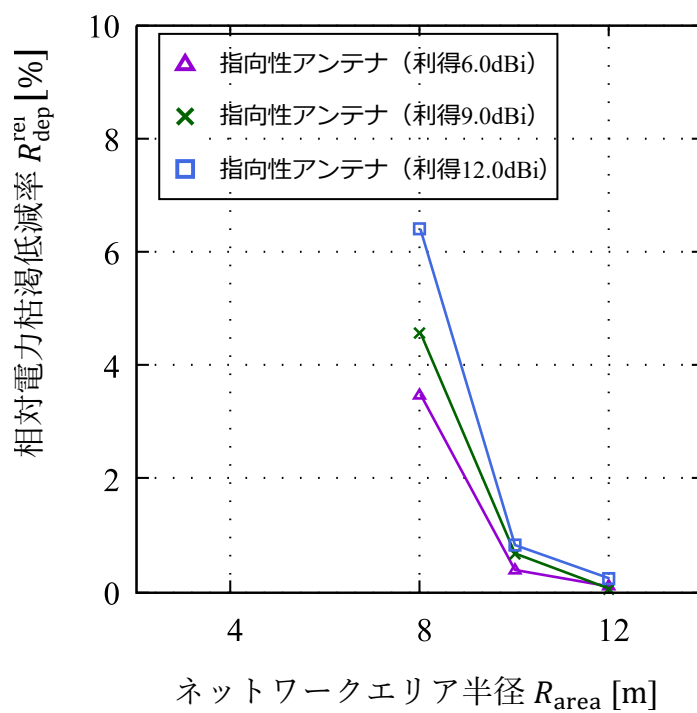


図 5.18 エリア半径 対 相対電力枯渇低減率（指向性アンテナ使用時）

ネットワークエリア半径 R_{area} 変化時の電力枯渇率 R_{dep} , 相対電力枯渇低減率 $R_{\text{dep}}^{\text{rel}}$ についてそれぞれ図 5.17, 図 5.18 に示した. なお, SN 台数 N_{SN} は 50 台に設定している.

全体としてはオムニアンテナによる結果とほぼ同等の傾向を示すが, 電力枯渇低減効果についてはアンテナ利得が高く指向性が先鋭であるほど高い結果を示した.

5.3.3.2 データ収集率特性

● SN 台数 N_{SN} 変化

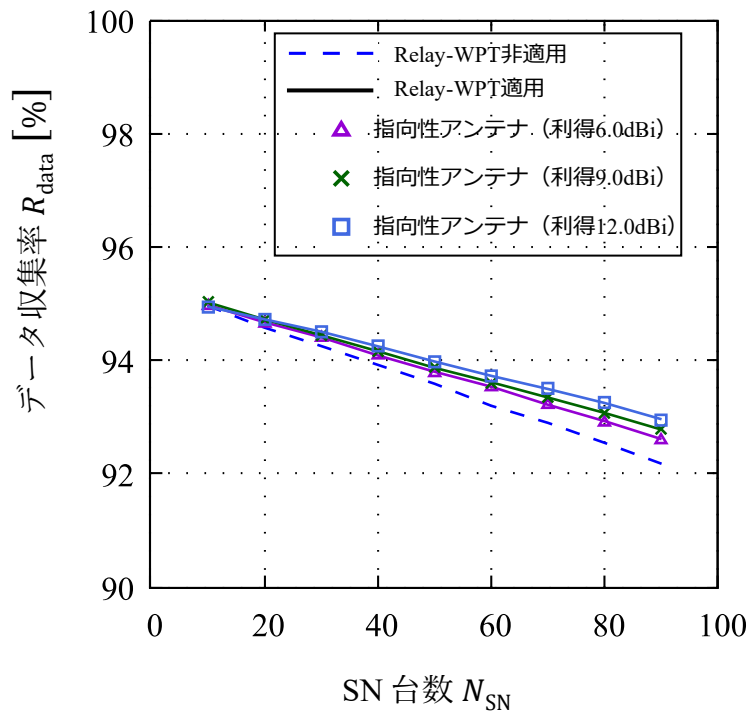


図 5.19 SN 台数 対 データ収集率 (指向性アンテナ使用時)

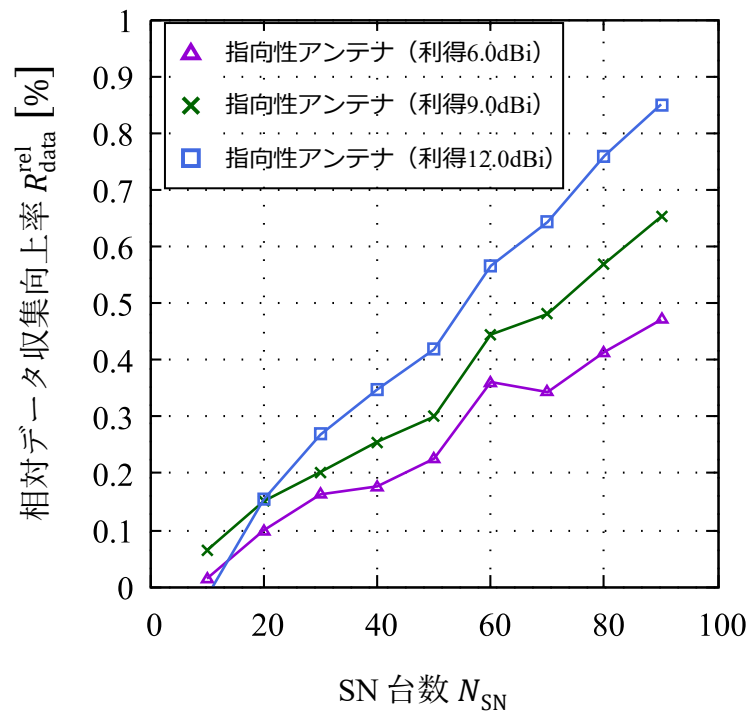


図 5.20 SN 台数 対 相対データ収集向上率（指向性アンテナ使用時）

SN 台数 N_{SN} 変化時のデータ収集率 R_{data} ，相対データ収集向上率 R_{data}^{rel} についてそれぞれ図 5.19，図 5.20 に示した．なお，ネットワークエリア半径 R_{area} は 8m に設定されている．

Relay-WPT による SN の電力枯渇低減に伴い，データ収集率（図 5.19）の増加が確認された．また図 5.20 より，図 5.16 で示したアンテナ利得ごとの電力枯渇低減効果と対応して，高利得アンテナほど相対データ収集向上率についても高い結果を示した．

● ネットワークエリア半径 R_{area} 変化

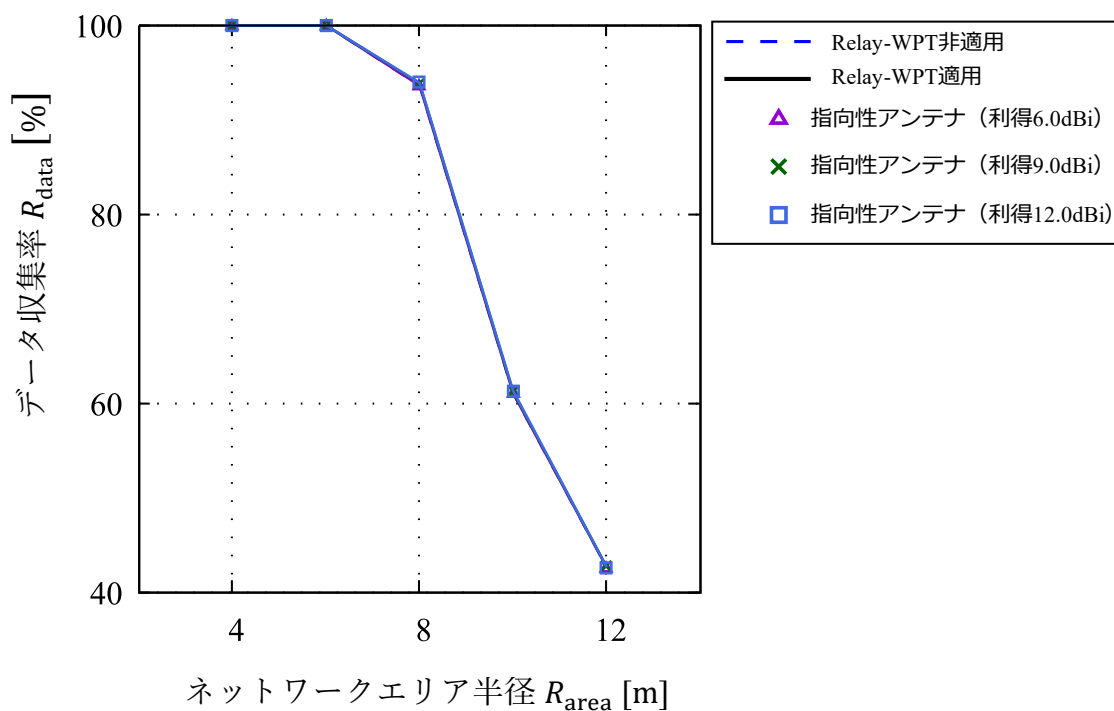


図 5.21 エリア半径 対 データ収集向上率（指向性アンテナ使用時）

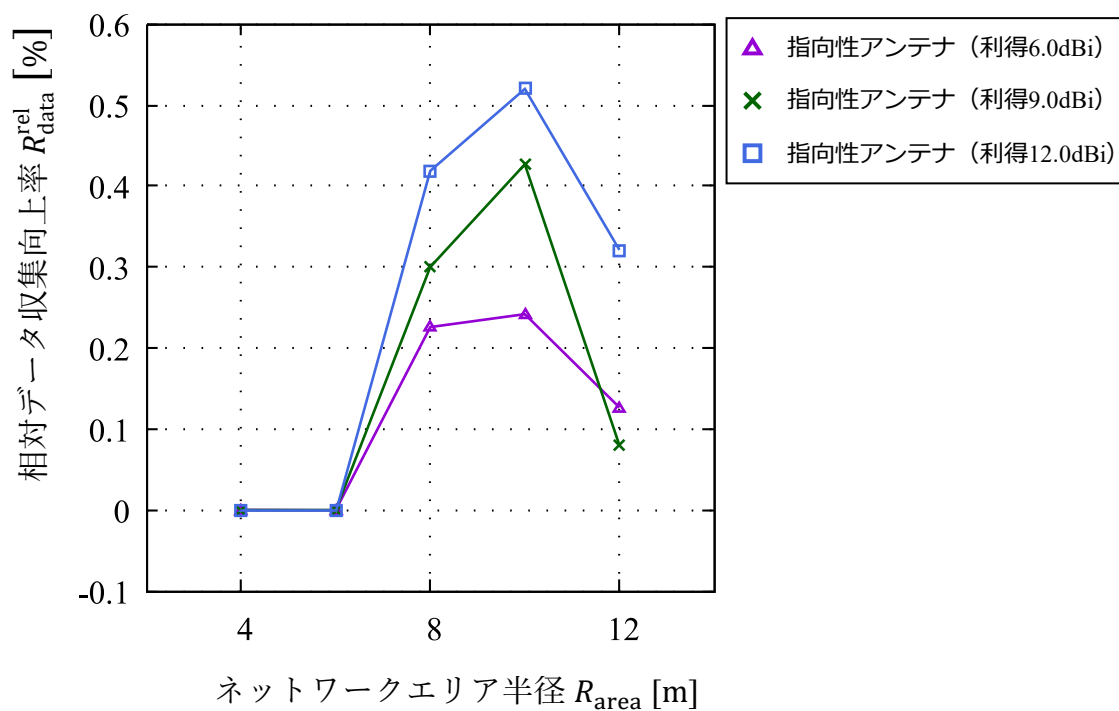


図 5.22 エリア半径 対 相対データ収集向上率（指向性アンテナ使用時）

ネットワークエリア半径 R_{area} 変化時のデータ収集率 R_{data} , 相対データ収集向上率 $R_{\text{data}}^{\text{rel}}$ についてそれぞれ図 5.21, 図 5.22 に示した. なお, SN 台数 N_{SN} は 50 台に設定している.

オムニアンテナを使用して Relay-WPT を実施した図 5.10 について述べた傾向と同様の傾向を示し, そのデータ収集率向上効果もおおよそ高利得アンテナ条件で高い結果を示した.

5.3.3.3 データ収集維持電力特性

● SN 台数 N_{SN} 変化

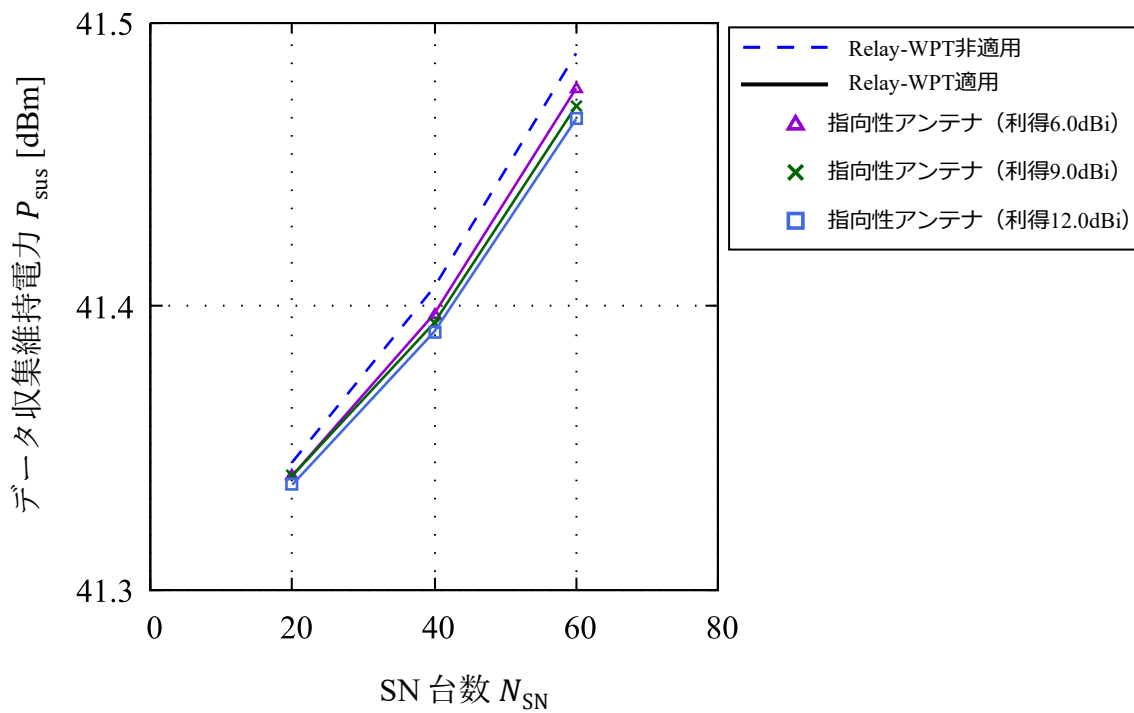


図 5.23 SN 台数 対 データ収集維持電力 (指向性アンテナ使用時)

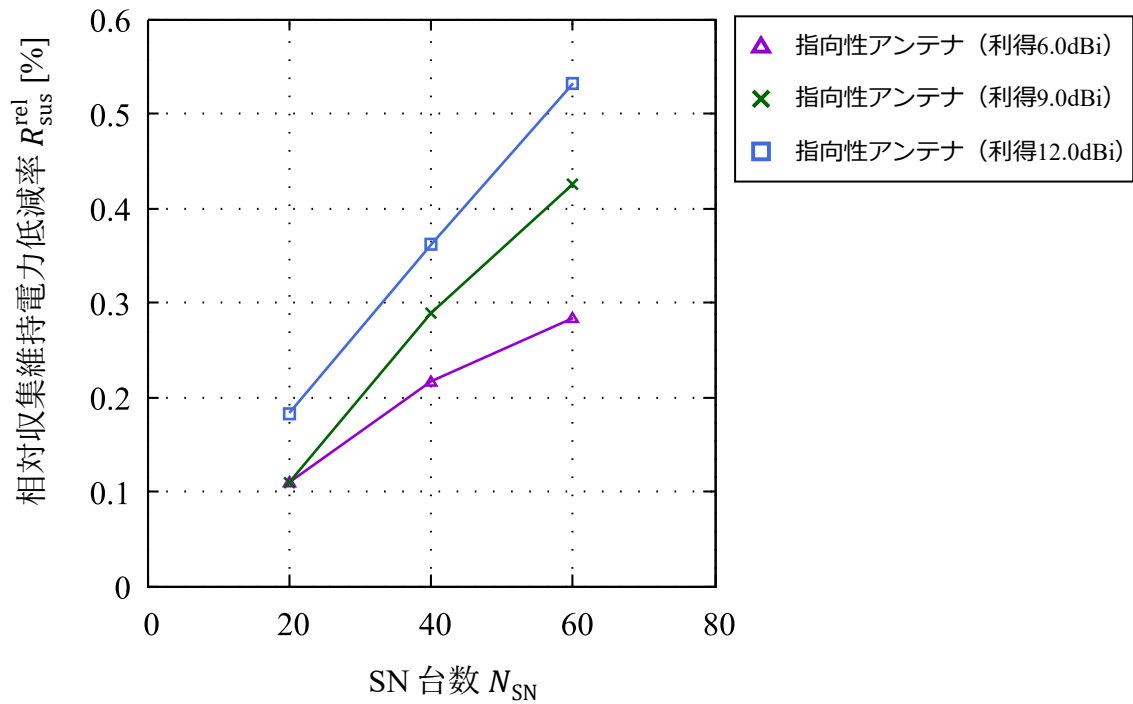


図 5.24 SN 台数 対 相対収集維持電力低減率（指向性アンテナ使用時）

SN 台数 N_{SN} 変化時のデータ収集維持電力 P_{sus} , 相対収集維持電力低減率 R_{sus}^{rel} についてそれぞれ図 5.23, 図 5.24 に示した. なお, ネットワークエリア半径 R_{area} は 8m に設定されている.

Relay-WPT による電力枯渇低減, およびデータ収集率向上に伴い, 指向性アンテナを用いた場合でも Relay-WPT 非実施の場合と比較してデータ収集維持電力の低減が確認され, またその削減効果は図 5.23, 図 5.24 よりアンテナが高利得な場合で増加した.

● ネットワークエリア半径 R_{area} 変化

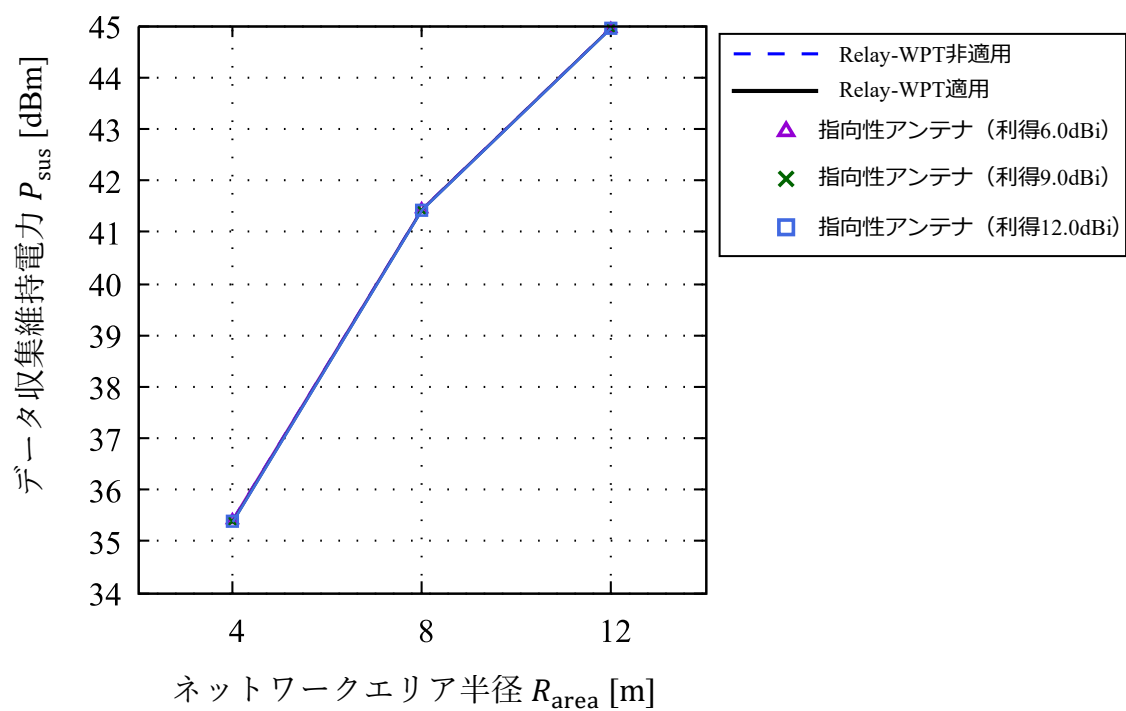


図 5.25 エリア半径 対 データ収集維持電力（指向性アンテナ使用時）

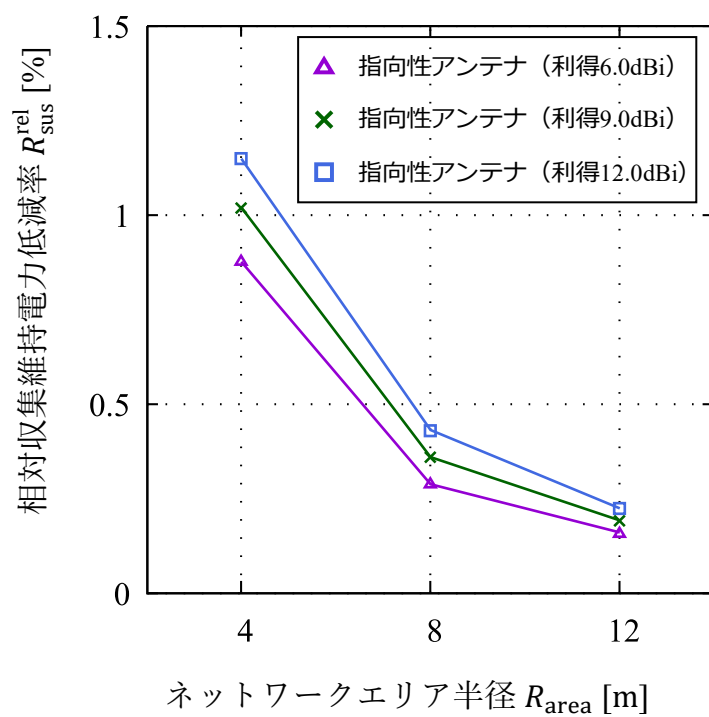


図 5.26 エリア半径 対 相対収集維持電力低減率（指向性アンテナ使用時）

ネットワークエリア半径 R_{area} 変化時のデータ収集維持電力 P_{sus} ，相対収集維持電力低減率 $R_{\text{sus}}^{\text{rel}}$ についてそれぞれ図 5.25，図 5.26 に示した．なお，SN 台数 N_{SN} は 50 台に設定している．

指向性アンテナを用いた場合でも，電力枯渇率特性，データ収集率特性ともにオムニアンテナを使用した Relay-WPT 実施時の結果と同様の傾向を示したことから，エリア半径が増大した場合にデータ収集率の向上効果が減少する特性についても同様となることが確認された．低減効果についても電力枯渇率特性，データ収集率特性と同様に高利得アンテナで高い結果を示した．

5.3.4 Relay-WPT の送信アンテナ指向性影響評価

これまで示した Relay-WPT の送信にオムニアンテナ，指向性アンテナを使用した場合の結果について，その指向性影響を比較するため，特にデータ収集維持電力 P_{sus} ，相対収集維持電力低減率 $R_{\text{sus}}^{\text{rel}}$ について比較評価を示す．SN 台数 N_{SN} ，およびネットワークエリア半径 R_{area} 変化時の結果について，それぞれ示す．

● SN 台数 N_{SN} 変化

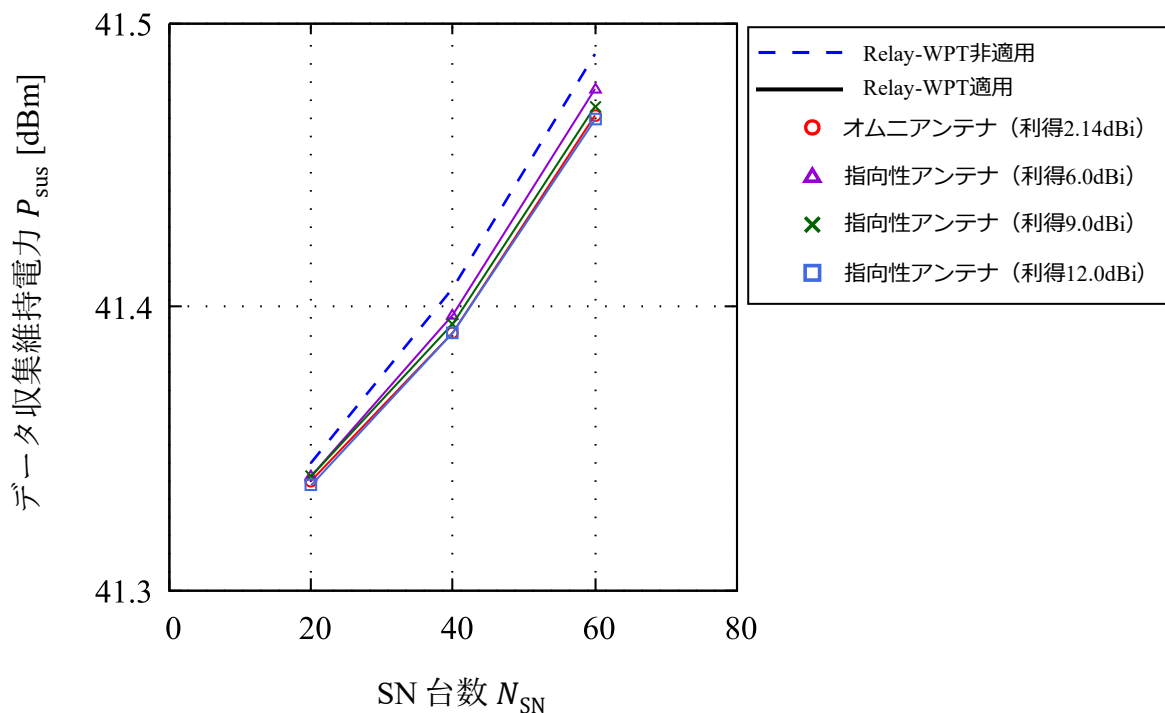


図 5.27 SN 台数 対 データ収集維持電力（アンテナ指向性ごと）

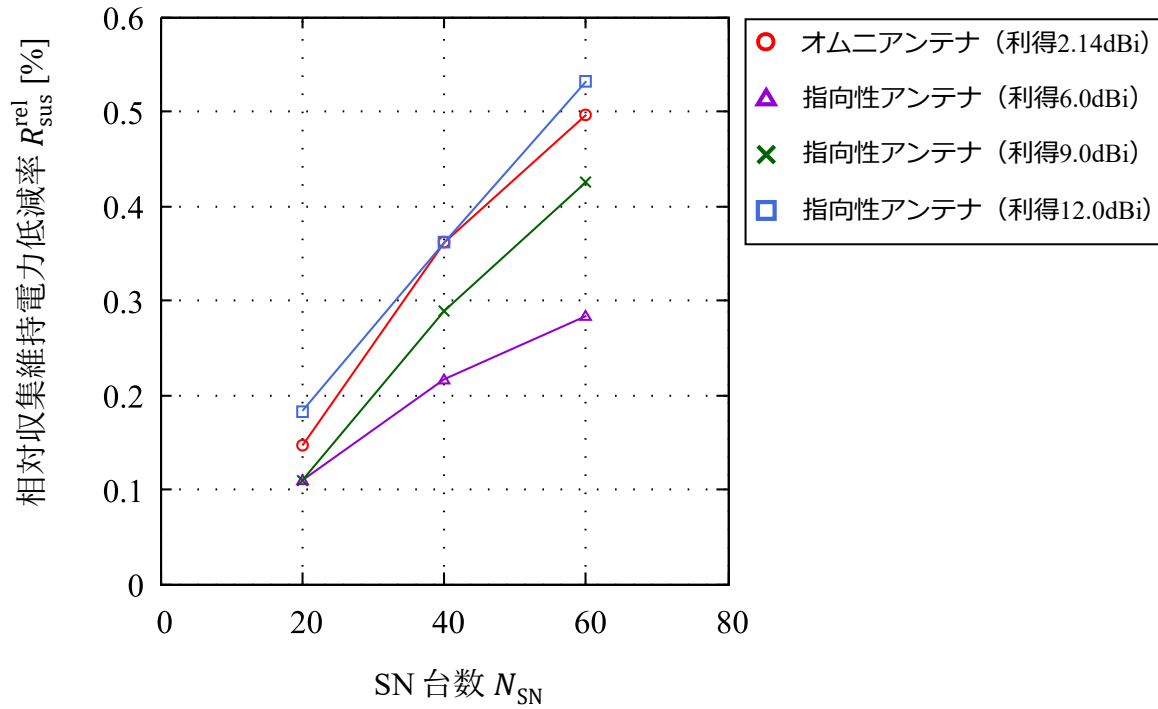


図 5.28 SN 台数 対 相対収集維持電力低減率（アンテナ指向性ごと）

SN 台数 N_{SN} 変化時のデータ収集維持電力 P_{sus} ，相対収集維持電力低減率 R_{sus}^{rel} についてそれぞれ図 5.27，図 5.28 に示した．なお，ネットワークエリア半径 R_{area} は 8m に設定されている．

図 5.27，図 5.28 について，アンテナ利得ごとのデータ収集維持電力，およびその相対値を確認すると，指向性アンテナを用いた利得 6.0dBi の結果が最も電力低減効果が低く，次いで 9.0dBi となっており，オムニアンテナと指向性アンテナ（利得 12dBi）の結果についてはほとんど同じであるものの，わずかに利得 12dBi の指向性アンテナの結果が上回る結果となった．

指向性アンテナを HAP と逆方向に向け Relay-WPT を実施した場合，1 度の Relay-WPT 実施あたりではよりネットワーク外縁の SN に電力を提供することが可能であるはずであるが，6.0dBi，9.0dBi の結果はオムニアンテナの結果を下回っている．これについては，Relay-WPT を頻繁に実施する SN は HAP 付近のネットワーク中央に集中しており，指向性アンテナを用いる利点が働きのにくいこと，また，指向性アンテナについてはペンシルビーム型の指向性モデルを採用しているため，先鋭でない指向性アンテナではむしろオムニアンテナと比較して垂直方向への放射が大きいいため，オムニアンテナに対して結果が劣る結果となることが考慮される．

● ネットワークエリア半径 R_{area} 変化

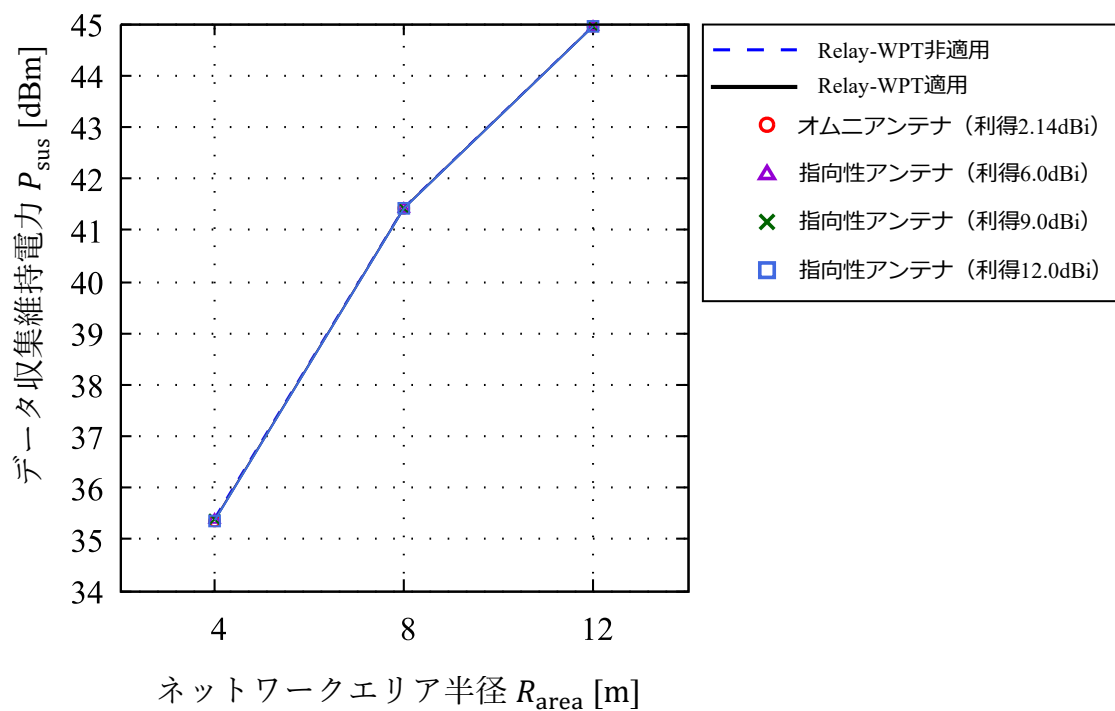


図 5.29 エリア半径 対 データ収集維持電力（アンテナ指向性ごと）

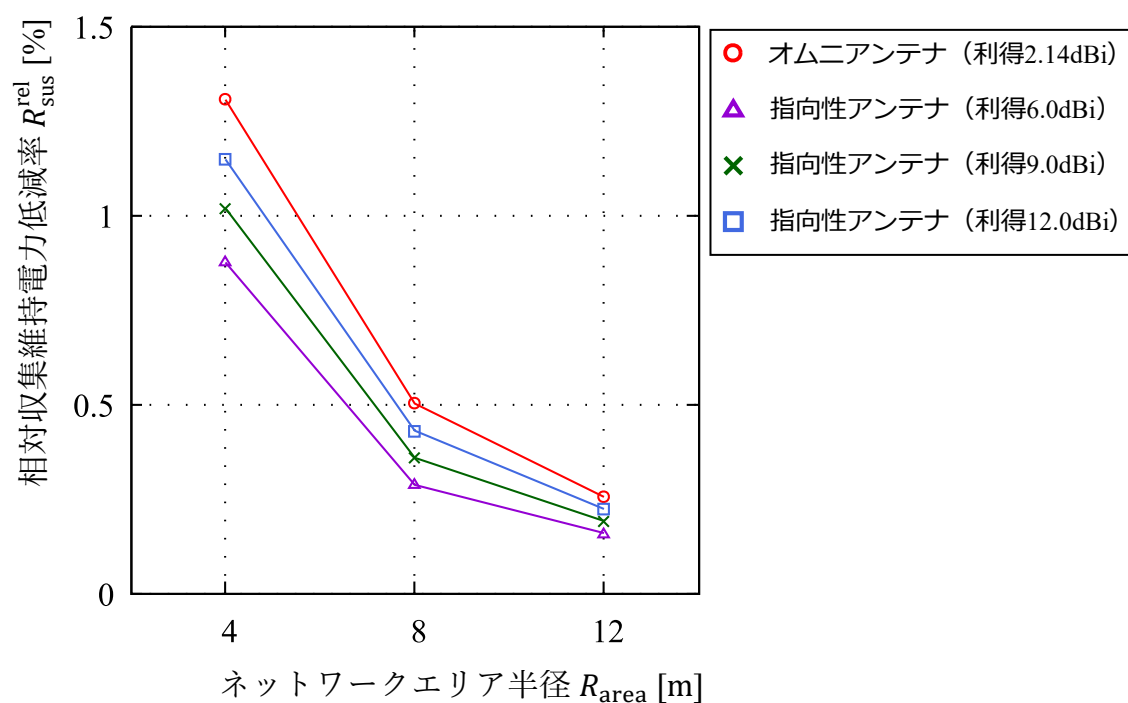


図 5.30 エリア半径 対 相対収集維持電力低減率（アンテナ指向性ごと）

ネットワークエリア半径 R_{area} 変化時のデータ収集維持電力 P_{sus} ，相対収集維持電力低減率 $R_{\text{sus}}^{\text{rel}}$ についてそれぞれ図 5.29，図 5.30 に示した．なお，SN 台数 N_{SN} は 50 台に設定している．

図 5.30 により相対収集維持電力低減率について確認すると，オムニアンテナを用いた結果が最も高くなり，指向性アンテナを用いた場合では利得が低いほど低減効果が低下する傾向が確認された．これについても Relay-WPT を頻繁に実施する SN の中央集中の影響，および指向性パターンの違いによる垂直面放射の影響が考えられる．

6章 まとめ

本研究は、無線電力伝送 (WPT) が適用された無線センサーネットワーク (WSN) である WPSN (Wireless Powered Sensor Network) を研究対象として、WPT による SN 獲得電力の地理的な不均一性によるネットワーク性能の劣化を課題とした。WPSN における獲得電力の地理的な不均一性では、HAP 近傍の SN は蓄電デバイスの容量を超過して破棄される未活用の余剰電力を獲得する一方で、HAP 遠方の SN では獲得電力が減少することで電力枯渇が発生し、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 の残余エネルギーの地理的な不均一性を緩和することでデータ収集性能を向上させ、より効率的な WPSN を実現することを目的とした。

WPSN における SN 残余エネルギーの地理的な不均一性は、HAP 近傍の SN の余剰電力を積極活用し、電力が不足する SN へ融通することで改善が期待できる。そこで本研究では HAP 近傍 SN の有するエネルギーを WPT の電力源として活用した Relay-WPT 方式を提案し、Relay-WPT を考慮したフレーム構造、および自身の安定動作を維持しながら他 SN に余剰エネルギーを提供するための Relay-WPT 実施基準について検討を行った。

計算機シミュレーションにより、提案方式である Relay-WPT を適用した WPSN における SN の電力枯渇率、およびデータ収集率特性について、Relay-WPT 非適用の WPSN との比較評価を実施した。評価の結果、Relay-WPT の適用による電力枯渇率特性の改善、およびそれに伴った HAP のデータ収集率特性の改善がみられ、サービス維持に必要なデータ収集維持電力についても低減が確認された。特に SN 台数が多く、エリア規模が小さいネットワークほど効果が顕著になる特性が確認されたが、全体的な改善効果としては限定的となった。この原因としては、WPT 装置から放出される RF 波が減衰し、SN に伝送された後、さらに SN で再度拡散を行うため、二重の拡散によって相対的な改善効果が限定的となった可能性が推察される。Relay-WPT 送信用としてオムニアンテナを使用した場合、および指向性アンテナを使用した場合についても性能比較を実施したが、オムニアンテナがおおよそ優勢な結果となった。これについては Relay-WPT 実施頻度が多い SN が HAP 近傍であるネットワーク中心に偏ること、および垂直方向への放射成分がオムニアンテナと比較し想定した指向性アンテナでは増加することなどが考慮される。

今後の課題として、HAP 近傍の SN の余剰電力を使用するリレー情報伝送との比較評価が考慮される。また、本研究では計算機シミュレーションのみで評価を行っており実環境との差異が懸念されるため、実機を用いた性能評価についても課題となる。

参考文献

- [1] A. AlHammadi, A. AlZaabi, B. AlMarzooqi, S. AlNeyadi, Z. AlHashmi and M. Shatnawi, "Survey of IoT-Based Smart Home Approaches," *Proc. of 2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, pp. 1-6, March 2019.
- [2] H. Xu, W. Yu, D. Griffith and N. Golmie, "A Survey on Industrial Internet of Things: A Cyber-Physical Systems Perspective," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 78238-78259, Dec. 2018.
- [3] Y. Saleem, N. Crespi, M. H. Rehmani and R. Copeland, "Internet of Things-Aided Smart Grid: Technologies, Architectures, Applications, Prototypes, and Future Research Directions," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 62962-63003, April 2019.
- [4] H. Rajab and T. Cinkler, "IoT based Smart Cities," *Proc. of 2018 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, pp. 1-4, June 2018.
- [5] Xiaochuan Jiang, Guoping Zhou, Yunfei Liu and Yixiong Wang, "Wireless sensor networks for forest environmental monitoring," *Proc. of The 2nd International Conference on Information Science and Engineering*, pp. 2514-2517, Dec. 2010.
- [6] S. Ahmed, M. Rashid, F. Alam and B. Fakhrudin, "A Disaster Response Framework Based on IoT and D2D Communication under 5G Network Technology," *Proc. of 2019 29th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC)*, pp. 1-6, Nov. 2019.
- [7] P. P. Bairagi and M. Dutta, "Various Energy-Saving Approaches in Wireless Sensor Networks: An Overview," *Proc. of 2021 10th IEEE International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT)*, pp. 499-504, June 2021.
- [8] R. Soua and P. Minet, "A survey on energy efficient techniques in wireless sensor networks," *Proc. of 2011 4th Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC 2011)*, pp. 1-9, Oct. 2011.
- [9] S. Akbari, "Energy harvesting for wireless sensor networks review," *Proc. of 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, pp. 987-992, Sep. 2014.
- [10] D. Niyato, D. I. Kim, M. Maso and Z. Han, "Wireless Powered Communication Networks: Research Directions and Technological Approaches," *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 6, pp. 88-97, Dec. 2017.
- [11] D. Setiawan, A. A. Aziz, D. I. Kim and K. W. Choi, "Experiment, Modeling, and Analysis of Wireless-Powered Sensor Network for Energy Neutral Power Management," *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 4, pp. 3381-3392, Dec. 2018.
- [12] Z. Chu, F. Zhou, Z. Zhu, R. Q. Hu and P. Xiao, "Wireless Powered Sensor Networks for Internet of Things: Maximum Throughput and Optimal Power Allocation," *IEEE Internet of*

- Things Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 310-321, Feb. 2018.
- [13] S. Bi, Y. Zeng and R. Zhang, "Wireless powered communication networks: an overview," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 10-18, April 2016.
- [14] Y. Chen, D. B. da Costa and H. Ding, "Interference Analysis in Wireless Power Transfer," *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 10, pp. 2318-2321, Oct. 2017.
- [15] S. Bi and 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, March 2016.
- [16] K. Haraguchi, K. Sanada, H. Hatano and K. Mori, "Novel Network Configuration and its Clustering Scheme for Wireless Powered Sensor Networks," *Proc. of 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring)*, pp. 1-5, April 2021.
- [17] C. Zhang and Y. Chen, "Wireless Power Transfer Strategies for Cooperative Relay System to Maximize Information Throughput," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 2573-2582, Feb. 2017.
- [18] B. Lyu, D. T. Hoang and Z. Yang, "User Cooperation in Wireless-Powered Backscatter Communication Networks," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 2, pp. 632-635, April 2019.
- [19] H. T. Friis, "A Note on a Simple Transmission Formula," *Proc. of IRE*, vol. 34, no. 5, pp. 254-256, May 1946.
- [20] W. L. Stutzman, "Estimating directivity and gain of antennas," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 40, no. 4, pp. 7-11, Aug. 1998.
- [21] L. Xie, Y. Shi, Y. T. Hou and A. Lou, "Wireless power transfer and applications to sensor networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 20, no. 4, pp. 140-145, Aug. 2013.
- [22] IEEE802.15.4 standard, "Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks(WPANs)", Sep. 2006.
- [23] Z. Wang, L. Duan and 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.
- [24] L. Yuan, S. Bi, S. Zhang, X. Lin and H. Wang, "Multi-Antenna Enabled Cluster-Based Cooperation in Wireless Powered Communication Networks," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 13941-13950, July 2017.

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，管理などで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．