

## 特別研究報告

題目

複数アクセスポイントを用いた無線全二重通信による  
データ電力同時伝送手法の提案と評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

川崎 慈英

平成 29 年 2 月 14 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

## 内容梗概

真の意味でありとあらゆるモノをネットワークに接続するためには、センサネットワークをバッテリーの制約から開放する必要がある。このような観点から、本報告では電力伝送とデータ伝送を融合したセンサネットワークの実現を目指す。想定するネットワークでは、センサノードは定期的にアクセスポイントに収集したデータを送信して、アクセスポイントはセンサノードに電力や制御フレームを送信する。

このようなネットワークは主に2つの問題点を抱えている。1つ目は、現在の日本では電波資源が逼迫していて、電力伝送用の帯域を確保するためのコストが高いことである。2つ目は電波は距離減衰が大きく、電力を届けられる範囲と電力量に制約があることである。電波資源の逼迫問題に対しては、無線全二重通信の仕組みを利用して、同一帯域でデータと電力の同時伝送を行うことで解決を試みる。電波の距離減衰の問題に対しては、複数のアクセスポイントを設置して、それぞれのアクセスポイントが協調して電力伝送を行うことで解決を試みる。

複数のアクセスポイントを用いて無線全二重通信によるデータと電力の同時伝送を行った場合、2つの問題が発生する。1つ目は、アクセスポイント間でのセンサデータや電力信号の衝突が発生することである。複数アクセスポイント環境では、センサノード間だけではなく、アクセスポイント間での衝突問題も考慮したメディアアクセス制御を行う必要がある。2つ目は、センサノードとアクセスポイント通信割り当ての問題である。全二重通信によるデータ電力同時伝送では、センサノードとアクセスポイントの通信割り当てによって、各センサノードの得られる電力が異なる。各センサノードが得られる電力を調節して、電力資源を有効活用するために、センサノードとアクセスポイントの通信割り当ての工夫が必要となる。

本報告ではこれら2つの問題に対して、衝突を回避した上で適切な通信制御を行う手法を提案して、その有用性を議論する。具体的には、まずアクセスポイントとセンサノードを集中制御して電力伝送を行うアクセスポイントを制限することで衝突を回避する手法を考案した。次にセンサノードの蓄電量を推定して、蓄電量の大きな偏りを抑える通信割り当てを行

う PEBS(Power Estimating and Balancing Scheduling) の設計を行った。最後に、データ収集率の観点から、衝突回避手法と通信割り当て手法の2つの提案手法の評価を計算機シミュレーションを用いて行った。

計算機シミュレーションの結果、アクセスポイントの設置数を増やすことでデータ収集率の大きな改善が確認できた。提案手法は半二重通信を用いて同一帯域でデータ電力同時伝送を行う手法と比較して約30%データ収集率が向上しており、全二重通信を用いることの有用性を確認できた。提案した通信割り当て手法はランダム割り当てなどと比較して約20%データ収集率を改善を確認できた。

#### 主な用語

無線電力伝送, 無線全二重通信, データ電力同時伝送, 複数アクセスポイント協調

# 目次

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>序論</b>                                       | <b>7</b>  |
| <b>2</b> | <b>無線全二重通信によるデータ電力同時伝送</b>                      | <b>10</b> |
| 2.1      | 電波による無線電力伝送 . . . . .                           | 10        |
| 2.2      | 全二重通信によるデータ電力同時伝送 . . . . .                     | 11        |
| 2.3      | 全二重通信を用いたデータ電力同時伝送におけるメディアアクセス手法 . . .          | 12        |
| 2.3.1    | FD-SWIPT TDMA . . . . .                         | 13        |
| 2.3.2    | P-CSMA/CA . . . . .                             | 14        |
| 2.4      | 単一アクセスポイントを用いた無線全二重通信によるデータ電力同伝送の課題             | 15        |
| 2.5      | 複数アクセスポイントを用いた無線全二重通信によるデータ電力同伝送の課題             | 17        |
| 2.5.1    | 衝突の課題 . . . . .                                 | 17        |
| 2.5.2    | 通信割り当ての課題 . . . . .                             | 18        |
| <b>3</b> | <b>複数アクセスポイントを用いた無線全二重通信による<br/>データ電力同時伝送手法</b> | <b>21</b> |
| 3.1      | 無線センサネットワークモデル . . . . .                        | 21        |
| 3.2      | 集中制御による時分割衝突回避手法 . . . . .                      | 22        |
| 3.3      | 電力推定に基づく通信割り当て . . . . .                        | 25        |
| <b>4</b> | <b>評価</b>                                       | <b>29</b> |
| 4.1      | 衝突回避手法における比較手法 . . . . .                        | 29        |
| 4.1.1    | 拡張 P-CSMA/CA . . . . .                          | 30        |
| 4.1.2    | HD-SWIPT TDMA . . . . .                         | 31        |
| 4.2      | 通信割り当て手法における比較手法 . . . . .                      | 33        |
| 4.3      | シミュレーション条件 . . . . .                            | 33        |
| 4.4      | 評価結果 . . . . .                                  | 34        |
| 4.4.1    | ネットワーク全体のデータ収集率の評価 . . . . .                    | 34        |
| 4.4.2    | センサノードごとのデータ収集率の評価 . . . . .                    | 36        |
| 4.4.3    | 全探索による PEBS の評価 . . . . .                       | 37        |
| <b>5</b> | <b>結論</b>                                       | <b>40</b> |
|          | 謝辞  | 43        |



## 目 次

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1  | 想定する無線センサネットワークの通信                           | 8  |
| 2  | 自己干渉除去の概要                                    | 11 |
| 3  | 無線全二重通信によるデータ電力同時伝送で用いる アクセスポイントの構成          | 12 |
| 4  | FD-SWIPT TDMA の動作例                           | 13 |
| 5  | P-CSMA/CA の動作例                               | 14 |
| 6  | 複数 AP を用いた無線電力伝送                             | 16 |
| 7  | 電力と制御フレームの干渉                                 | 17 |
| 8  | 電力とデータの干渉                                    | 18 |
| 9  | 最近傍割り当てで供給電力量の偏りが起こる例                        | 19 |
| 10 | ノード 1 はアクセスポイント 1 に ノード 2 はアクセスポイント 1 にデータ送信 | 20 |
| 11 | ノード 1 はアクセスポイント 1 に ノード 2 はアクセスポイント 2 にデータ送信 | 20 |
| 12 | マスターアクセスポイントによる制御フレーム送信                      | 22 |
| 13 | センサノードによるセンサデータ送信                            | 23 |
| 14 | 電力信号のみの送信                                    | 23 |
| 15 | 提案手法の動作例                                     | 24 |
| 16 | 各センサノード不足電力量が偏っている場合の通信割り当ての例                | 26 |
| 17 | 各センサノードの不足電力量が偏っていない場合の通信割り当ての例              | 26 |
| 18 | 拡張 P-CSMA/CA の動作例                            | 31 |
| 19 | HD-SWIPT TDMA の動作例                           | 32 |
| 20 | 衝突回避手法ごとのデータ収集率                              | 35 |
| 21 | 通信割り当て手法ごとのデータ収集率                            | 36 |
| 22 | アクセスポイント数が 8 の時の 各センサノードのデータ収集率の累積グラフ        | 37 |
| 23 | PEBS と PEBS BruteForce の ネットワーク全体のデータ収集率の比較  | 39 |
| 24 | PEBS と PEBS BruteForce の センサノードごとのデータ収集率の比較  | 39 |

## 表目次

|                    |    |
|--------------------|----|
| 1 シミュレーション条件 ..... | 34 |
|--------------------|----|

## 1 序論

電力メータ、ガスメータ、サッカーボール、腕時計、歯ブラシ、吸入器、心拍センサ、火災報知器、スポーツシューズなど、多様なデバイスがネットワークに接続され始めている。「ありとあらゆるモノ」がネットワークに繋がって今まで取得することができなかった情報が収集・共有されることで、個人や社会が抱える問題を解決できるようになる。例えば、スポーツ用品に組み込まれたセンサによって個人の運動能力向上や健康に対するモチベーションの維持に貢献するサービスが提供されている。スマートメータではデマンドレスポンスなどのより巨視的な観点でのエネルギー生産・利用の効率化が実現されている。

このような「ありとあらゆるモノ」をネットワークに接続する機能の中核にあるのがセンサネットワーク技術である。センサネットワーク技術によってセンシング機能、計算機能、無線通信機能が1つに統合されたことで、実空間に存在する情報を高精細に取得することができるようになった。

しかしながら、センサネットワークには大きな課題が残されている。電源である。現在のセンサネットワークは一次電池や二次電池によって駆動している。一次電池を用いた場合にはバッテリー交換の問題が発生する。二次電池を用いる場合では、利用シーンの中に二次電池に電力を供給する手続きを組み込まなければならないことや、二次電池自体の劣化の問題が発生する。電源の問題を解決しなければ、真の意味で「ありとあらゆるモノ」をネットワークに接続することはできない [1]。

センサネットワークが抱える電源の問題を抜本的に解決する方法の一つとして、センサノードが電波から電力を得る方法が考えられる。電波からの電力供給では、センサノード自身が周囲に低密度で分布している環境電波から電力を得る方法 [2] [3] と、アクセスポイントなどが意図的に放出する電波から電力を得る方法 [4] [5] が考えられている。環境電波から電力を得る方法では、センサノードはエネルギーを自給して駆動する。しかしながら、環境電波から得られる電力は少なく、駆動可能なセンサノードの消費電力に制限が存在する。そこで本報告では、アクセスポイントが意図的に放出する電波によってセンサノードに電力を供給する手法について考える。

アクセスポイントが意図的に放出する電波によってセンサノードに電力を供給する方法には2つの課題が存在する。1つ目は、電力資源の枯渇問題だ。電波による無線電力伝送において、伝送電力は使用する帯域幅に比例する。現在、日本の電波資源は逼迫しているにも関わらず、無線ネットワークはますますトラヒックが増大する傾向にある。このような状況下で、新たに電力伝送用の帯域の確保を行うと電波資源をさらに逼迫してしまう。2つ目は、電波の距離減衰である。電力信号は距離減衰の影響が大きい。センサノードが得られる電力はフリスの公式に従って、アクセスポイントとの距離の2乗に反比例する。このため、アク

アクセスポイントが効率的に電力を供給できる範囲には制限が存在する

電力資源の枯渇問題に対して、本報告では無線全二重通信方式を用いてデータと電力を同時伝送することで、解決を試みる。[5] [6]。図1に本報告で想定する無線センサネットワークの通信を示す。図1では、データはアクセスポイントとセンサノードで双方向に、電力はアクセスポイントからセンサノードへと一方向に送信される。センサノードからアクセスポイントへはセンサデータが送られ、アクセスポイントからセンサノードへは制御フレームが送られる。その特徴からデータ通信の多くはセンサノードからの上り通信が占める。

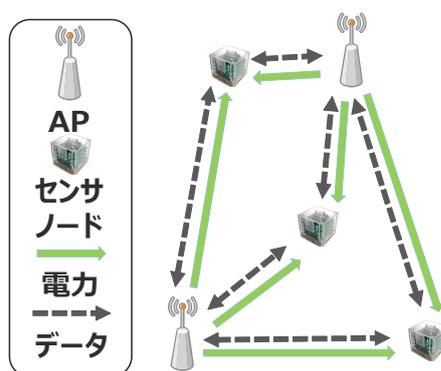


図 1: 想定する無線センサネットワークの通信

アクセスポイントは1つの周波数帯で電力信号の送信とセンサノードからのデータの受信を同時に行う。アクセスポイントは全二重通信の仕組みを利用することで、センサノードからデータを受信しながら電力信号を送信することができる。文献[5]ではセンサネットワークにおいて無線全二重通信によるデータと電力の同時伝送が十分に可能であることが示されている。

全二重通信による通信ではキャリアセンスが正常に動作しないので、CSMA/CAなどの従来のメディアアクセス制御手法が使用できない。文献[6]では全二重通信によるデータと電力の同時伝送のメディアアクセス制御方式の提案と評価がなされてる。

しかしながら、複数アクセスポイントを用いた全二重通信によるデータ電力同時伝送手法の検討は未だなされていない。単一アクセスポイントでは電力伝送ができる範囲と伝送電力量に制限が存在して、周囲のセンサノードに十分な電力を供給することができないという課題がある。この課題に対して、本報告では複数のアクセスポイントで電力伝送を行うことでセンサノードが抱える電力不足問題の解消を試みる。

センサネットワーク内に複数のアクセスポイント設置して電力伝送を行うことを考えた場合、2つの問題が生じる。1つ目はアクセスポイント間でのデータと電力信号の衝突である。

複数のアクセスポイントの設置により、センサノード間だけではなく、アクセスポイント間の信号の衝突も起こる可能性がある。それぞれのアクセスポイントが協調して通信を行わなければ衝突によって通信の品質は大きく落ちてしまう。2つ目は、センサノードとアクセスポイントの通信割り当ての問題だ。全二重通信によるデータ電力同時伝送では、センサノードとアクセスポイントの通信割り当てによって、各アクセスポイントの電力伝送時間が異なる。また、電力信号は距離減衰の影響が大きく、アクセスポイントとセンサノードの位置関係によって得られる電力は大きく異なる。センサノードの位置関係やアクセスポイントとの通信割り当てによっては、各センサノードが得られる電力量に大きな偏りが発生する可能性がある。必要量以上の電力供給は電力資源の無駄であり、余剰分の電力を必要量に満たないセンサノードに分配することで、電力伝送の効率を高めることができる。このためには、各アクセスポイントの電力伝送時間を調節するために、センサノードとアクセスポイントの通信割り当ての工夫が必要となる。

本報告では上記の衝突問題と通信割り当て問題に対して、複数アクセスポイントを用いたデータ電力伝送手法を提案する。集中制御を用いて衝突を回避した上で、電力推定に基づいて通信割り当てを行う手法を提案して、その有用性について議論する。また、提案手法適用時の通信の評価を計算機シミュレーションを用うことで、提案手法の有効性や適用領域について明らかにした。

## 2 無線全二重通信によるデータ電力同時伝送

### 2.1 電波による無線電力伝送

センサネットワークの抱える問題の中で、特に問題視されているのが電源の問題である。1次電池を用いた場合、定期的なバッテリーの交換が必要となり、2次電池を用いた場合においても、2次電池の劣化によってメンテナンスが不可欠となる。大量のセンサノードを用いることが多い、センサネットワークにおいて、バッテリーの交換のコストは大きく、バッテリーを必要としないバッテリーレス無線センサネットワークが注目を浴びている。現在、バッテリーレス無線センサネットワークの実現に向けて、様々な取り組みがなされている。本節では、電源に接続されていないセンサノードへの電力供給の方法を述べた上で、本研究で取り扱う電波による無線電力伝送の優位性について述べる。

バッテリーレス無線センサネットワークは、センサノード自身が周囲から電力を得るエネルギー自給型のセンサノードを用いる方法 [3] [2] と、他の機器からセンサノードに無線で電力を送る方法 [7] [4] に分けられる。エネルギー自給型のセンサノードを用いる方法としては、太陽光発電、環境電波、熱発電などの技術が用いられる。太陽光発電を用いて太陽光からエネルギーを得る方法では、センサノードは多くの電力を得ることができる [3]。しかしながら、夜間はエネルギーが得られない上に、季節や時刻によって得られるエネルギーの変動が大きいことが問題となる。太陽光発電を用いたセンサネットワークは、環境モニタリングシステムなどが想定される [8]。文献 [9] では、電源を用いずに太陽光のみで駆動するセンサノードである、Solar Biscuit が提案されている。環境電波を用いる方法では、テレビ塔からの電波 [10] [11] や電子レンジの漏れ電波 [12] など、周囲に分布する低密度電波をエネルギーとして収集して、電力供給が可能であることが確認されている。文献 [11] では、郊外の環境電波からセンサノードが駆動に十分な電力を得ることができることが示されている。環境電波を用いる方法では、季節や時刻に寄らず、恒常的にエネルギーを収集できるが、収集できるエネルギーが小さいことが課題となっている [3]。

他の機器からセンサノードに無線で電力を送る方法では、電波による無線電力伝送や、電磁誘導による非接触電力伝送が挙げられる。電磁誘導による無線電力伝送は伝送効率は高く 98%以上の伝送効率が確認されている。しかしながら、伝送できる距離が極端に小さく、センサデバイスごとに、電力伝送デバイスを設置する必要があるため、無線センサネットワークには向いていない。本研究では、電源に接続されていないセンサノードへの電力を供給する方法として、アクセスポイントが放出した電波を用いた無線電力伝送 [7] に着目する。

電波を用いた無線電力伝送では、センサノードは太陽光発電ほどの電力を得ることはできないが、季節や時刻に寄らず、恒常的に一定量のエネルギーを得ることができる。また、電波を用いた無線電力伝送では、センサノードは環境電波よりも多くの電力を得ることがで

きる。

想定するネットワークでは、アクセスポイントが意図的に放出する電波を用いて、センサノードを駆動させる。電波による電力供給では、センサノードは送信された電波から、レクテナを介して電力を得る。レクテナ (Rectenna) とは、整流器 (Rectifier) とアンテナ (Antenna) を組み合わせた回路である。レクテナはアンテナによって受信した電波を直流電流へ変換することができる。文献 [4] では、アクセスポイントが 2.4GHz 帯の電力信号を放出することで、センサノードに対して十分な電力伝送が可能であることが示されている。

## 2.2 全二重通信によるデータ電力同時伝送

無線全二重通信を用いて、同一帯域でデータと電力の同時伝送を行うことにより、周波数資源を節約しながら多くの電力を送ることが可能になる。アクセスポイントは、電力信号を送信しながら、自身の電力信号をキャンセル可能な自己干渉除去機能を具備する。

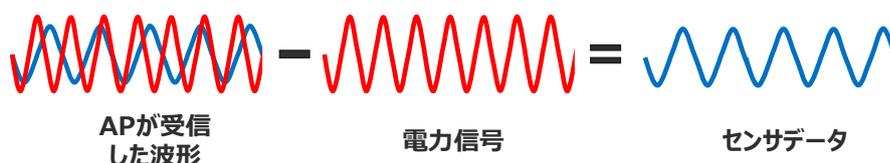


図 2: 自己干渉除去の概要

無線全二重通信によるデータ電力同時伝送では、受信電波に対して、アナログキャンセル回路とデジタルキャンセル回路による自己干渉除去を行うことで、センサデータを得る。図 2 に自己干渉除去の概要を示す。無線全二重通信によるデータ電力同時伝送において、アクセスポイントは送信アンテナから電力信号を送信する。送信した電力信号は受信アンテナにも届く。受信アンテナがセンサデータを受信している間に、送信アンテナから電力信号を送信すると、受信アンテナはセンサデータと電力信号が干渉した電波を受信することとなる。センサデータと電力信号が干渉した受信波から、自身の送信した電力信号の波形を減算することで、センサデータの波形を得ることができる [13] [14]。

想定するネットワークでは、アクセスポイントは電力信号を送信しながら自身の電力信号をキャンセル可能な自己干渉除去機能を具備する。図 3 に、無線全二重通信によるデータ電力同時伝送で用いるアクセスポイントの構成を示す。アクセスポイントでは、アナログキャンセル回路とデジタルキャンセル回路を組み合わせることによって、自己干渉除去を行う。まず、受信した電波に対してアナログキャンセル回路で電力信号の減算を行う。アナログキャンセル回路では、位相制御回路によって、自身が送信した電力信号と逆位相の信号を受信信号と足し合わせることでキャンセルを行う。次に、デジタルキャンセル回路で干渉除

去を行う。文献 [5] では電力伝送を行うアクセスポイントにおいて無線全二重通信を行うのに十分な自己干渉除去機能が実装可能であることが示されている。

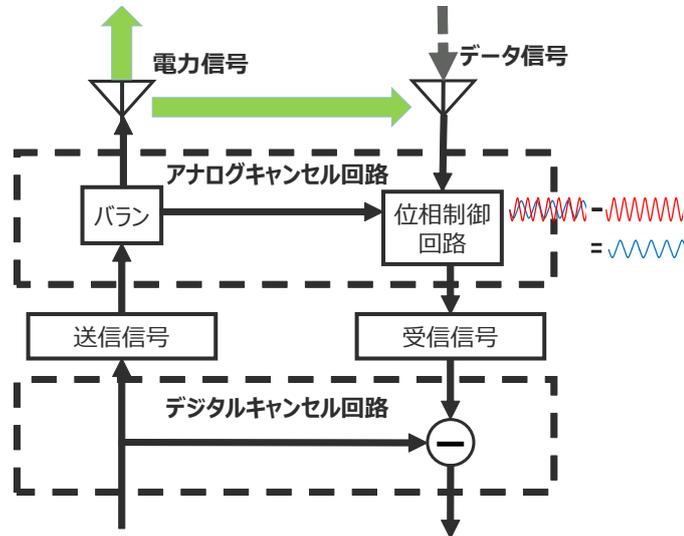


図 3: 無線全二重通信によるデータ電力同時伝送で用いる  
アクセスポイントの構成

### 2.3 全二重通信を用いたデータ電力同時伝送におけるメディアアクセス手法

無線全二重通信でデータ電力同時伝送を行う環境では、既存のメディアアクセス方式は前提条件が異なるため使用することができないといった問題が発生する。例えば、通常の CSMA/CA ではキャリアセンスをするため、電波の送信を検知した場合には送信を抑制する。アクセスポイントが電力を送信している場合、アクセスポイントが無線全二重の仕組みによってセンサノードからのフレームを受信できるにも関わらず、センサノードが通信を抑制してしまうという状況が起こりうる。

文献 [6] ではこの問題を解決するためのメディアアクセス方式が提案されている。本節では、全二重通信を前提とした集中制御型の FD-SWIPT TDMA (Full Duplex - Simultaneously Wireless Information and Power Transfer Time Division Media Access) と全二重通信を前提としない分散制御型の P-CSMA/CA (Power-CSMA/CA) について述べる。

#### 2.3.1 FD-SWIPT TDMA

FD-SWIPT TDMA は、制御フレームを用いてセンサノードを集中制御することで、センサデータ間の衝突を回避する手法である。FD-SWIPT TDMA は集中制御型のメディアア

アクセス手法である。アクセスポイントは全てのセンサノードのセンシングのタイミングを既知の情報として制御に利用する。FD-SWIPT TDMA ではセンサデータが発生すると、アクセスポイントが制御フレームを送信する。すべてのセンサノードは制御フレームを用いてアクセスポイントと同期されていて、制御フレームから、自分がどのスロットで送信すべきかの情報を取得する。全てのセンサノードの送信が終了したら、次のセンサデータが発生するまで、アクセスポイントは電力信号を送信しつづける。センサノードは電力消費を抑えるため、通常時はスリープしていて、自身の送受信のタイミングでウェイクする。センサノードはスリープ中も電力信号の受信を行って、電力信号から電力を得る。

FD-SWIPT TDMA は全てのセンサノードのデータ送信のタイミングが分かっているの  
 で、分散制御よりも電力伝送の効率は高い。一方で、制御フレームのタイミングやスロット  
 数が固定的に与えられるため、クライアントの追加などのシステムの変更や他のシステムの  
 干渉に弱いと考えられる。また、制御フレームによる同期のオーバーヘッドも生じる。

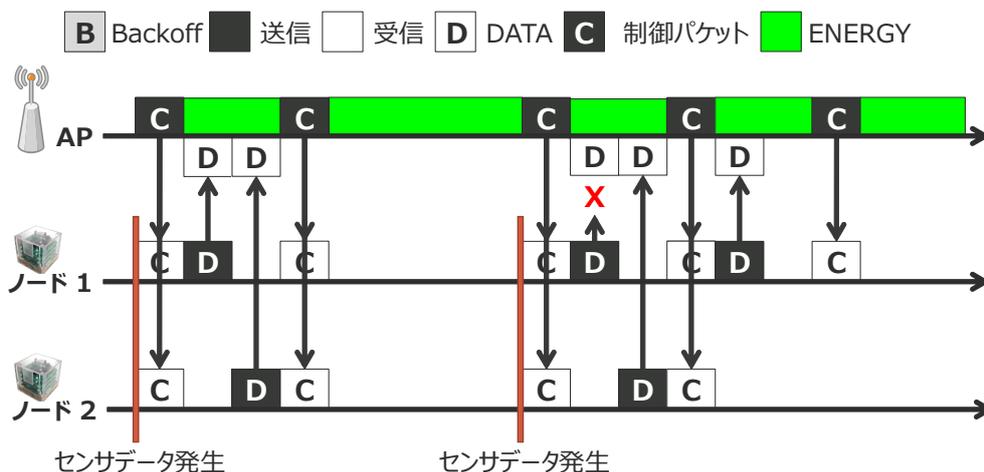


図 4: FD-SWIPT TDMA の動作例

図 4 に FD-SWIPT TDMA の動作例を示す。アクセスポイントはセンサデータの発生に  
 合わせて制御フレームをブロードキャストする。制御フレームには、センサノードの送信ス  
 ロットの情報が含まれている。制御フレームは、すべてのセンサデータの送信が完了するま  
 で定期的に送り続けられる。センサノードは自身のセンシング間隔でウェイクして、制御フ  
 レームを受信する。センサノードは自分の送信スロットでウェイクして、アクセスポイント  
 にセンサデータを送信する。その後、センサノードはスリープする。センサノードはセンサ  
 データを送信した後、次の制御フレームの送信タイミングでもウェイクして制御フレーム  
 を受信する。制御フレームは ACK の役割も担っていて、制御フレームに自身の送信が指定  
 されていなかった場合には、センサノードはデータの再送は行わず、スリープする。アクセ

スポイントは全てのセンサノードからセンサデータの受信を確認すると、次のセンシングまで、電力信号を送信し続ける。

### 2.3.2 P-CSMA/CA

P-CSMA/CA は、電力信号をフレームと見なして、データフレームと電力フレームをキャリアセンスを用いて送信するメディアアクセス制御方式である。FD-SWIPT TDMA と異なり、P-CSMA/CA は無線全二重通信を前提としていない。

P-CSMA/CA ではセンサノードは同期されておらず、センサデータの送信時に衝突が発生する可能性がある。しかしながら、P-CSMA/CA は制御フレームによるセンサノードの動機を必要としないので、集中制御型の FD-SWIPT TDMA と比較して、制御フレームによるオーバーヘッドが存在しない。

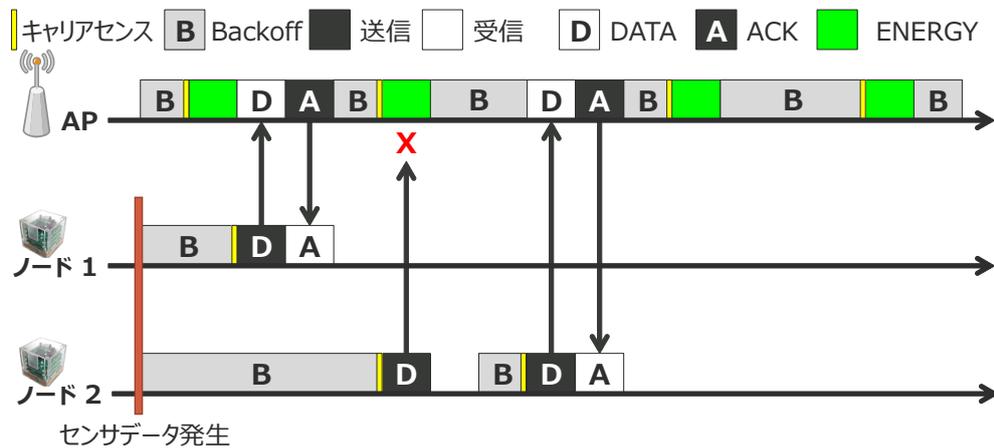


図 5: P-CSMA/CA の動作例

図 5 に P-CSMA/CA の動作を示す。P-CSMA/CA では、通常の CSMA/CA と同様にランダム時間バックオフした後、アクセスポイントがキャリアセンスを行う。アクセスポイントがキャリアセンスを行った後、センサノードがデータフレームを送信していなかった場合には、マスターアクセスポイントは電力フレームを送信する。アクセスポイントは電力フレームの送信が終了しても ACK の受信は行わない。アクセスポイントは電力フレームを送り終わると同時に、次の電力フレームを送信するためのコンテンションを開始する。センサノードは、センサデータが発生するとアクセスポイントと同様にランダム時間バックオフした後キャリアセンスを行う、アクセスポイントや自分以外のセンサノードが通信していなかった場合、センサノードはデータフレームを送信する。センサノードによるデータフレームの送信では、アクセスポイントによる電力フレームの送信と異なり、ACK を待ち受けて

再送制御を行う。この時の再送制御方式は通常の CSMA/CA と同様である。ACK を受信したセンサノードは消費電力を抑えるため、次のセンサデータが発生するまでスリープする。センサノードはスリープ中でも電力信号の受信を行って、電力信号から電力を得る。

## 2.4 単一アクセスポイントを用いた無線全二重通信によるデータ電力同伝送の課題

本節では無線全二重通信を用いたデータ電力同時伝送における課題について述べる。文献 [6] で前提とされている単一アクセスポイントによる電力データ同時伝送では、2つの問題が発生する。1つ目は送ることができる電力量に制限があることだ。2つ目は単一アクセスポイントではネットワーク全体に効率よく電力を伝送できない可能性があることだ。

文献 [6] で述べられているメディアアクセス方式はアクセスポイントが1つの場合を想定している。このような単一アクセスポイントによる無線全二重通信を用いたデータ電力同時伝送には2つの課題が存在する。1つ目は送ることができる電力量に制限があるということだ。2つ目はアクセスポイントから離れたセンサノードが得ることができる電力量が極端に少ないことだ。

単一アクセスポイントによる電力伝送は送ることができる電力に制限がある。例えば、電波法に基づく BRID 規格 [15] では、1MHz の周波数帯における空中線電力の平均電力量に制限がある。802.11a の通信規格では 1MHz の帯域幅における空中線電力の平均が約 25dB を超えてはならない。

センサノードが空間内に一様に設置されているとすると、単一アクセスポイントによる電力伝送では、どうしてもアクセスポイントから離れたセンサノードが発生してしまう。電力信号は距離減衰の影響を大きく受けるため、効率の良い電力伝送を行うことができない。

上記の2つの課題は複数のアクセスポイントを設置することで解決できる。電波は距離によって大きく減衰するため、複数のアクセスポイントで同時に電力伝送を行っても減衰後の空中線電力量が制限量を超える可能性は低いと考えられる。また、複数のアクセスポイントを設置することで、センサノードとアクセスポイントの距離平均が小さくなるので、距離減衰の影響を抑えられる。

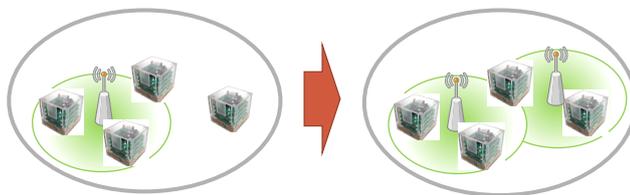


図 6: 複数 AP を用いた無線電力伝送

## 2.5 複数アクセスポイントを用いた無線全二重通信によるデータ電力同伝送の課題

単一アクセスポイント環境で起こる2つの問題はネットワーク内に複数のアクセスポイントを設置することで解決することができる。しかしながら、複数のアクセスポイントの設置を考えた場合、新たに2つの問題が生じる。1つ目はアクセスポイント間でのデータと電力信号の衝突である。2つ目はセンサノードが得られる電力量の偏りの問題である。

### 2.5.1 衝突の課題

複数のアクセスポイントが設置されているネットワークではアクセスポイント間でのデータの衝突が発生する。例えば、文献[6]のFD-SWIPT TDMAを複数アクセスポイントで実行した場合、センサデータと電力信号の衝突が発生する。

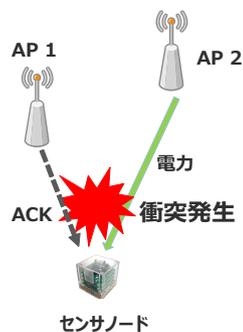


図 7: 電力と制御フレームの干渉

図 7 に、電力と制御フレームの衝突が起こる例を示す。アクセスポイント 1 はセンサノードに対して制御フレームを送信している。この時、アクセスポイント 2 が電力信号を送信すると制御フレームと電力信号との間で衝突が発生して、センサノードがアクセスポイント 1 からの制御フレームを正しく受信できない可能性がある。

図 8 に、電力とデータの衝突が起こる例を示す。アクセスポイント 1 はセンサノードに対して電力信号を送信しつつ、無線全二重通信の仕組みを使ってセンサノードからデータを受信している。この時、アクセスポイント 2 が電力信号を送信すると、センサノードからのセンサデータとアクセスポイント 2 からの電力信号との間で衝突が発生して、アクセスポイント 1 はセンサノードからのデータを正しく受信することができない。

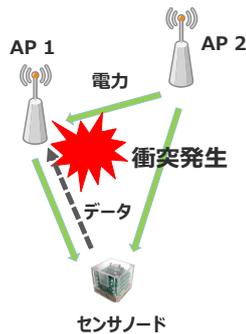


図 8: 電力とデータの干渉

### 2.5.2 通信割り当ての課題

複数アクセスポイントを用いた無線全二重通信を用いたデータ電力同時伝送では、各センサーノードが送信するセンサデータをどのアクセスポイントが受信するべきかという問題が発生する。複数アクセスポイントを用いた無線全二重通信を用いたデータ電力同時伝送では、センサーノードからデータを受信するアクセスポイントの割り当てによって、各センサーノードが得られる電力が変化する。アクセスポイントの割り当てを工夫することで、各センサーノードが得られる電力を調節して、電力不足による送受信の失敗を抑制することができる。

無線全二重通信によるデータ電力同時伝送では、アクセスポイントはセンサーノードからデータを受信している間、電力伝送を送信する。複数のアクセスポイントが設置されている環境では、衝突を抑えるために、1つのアクセスポイントのみがセンサーノードからデータを受信する。データの受信中は、データを受信しているアクセスポイントは電力信号を送信して、他のアクセスポイントは電力信号を送信しない。

複数アクセスポイントを用いた無線全二重通信を用いたデータ電力同時伝送では、各センサーノードが送信するセンサデータをどのアクセスポイントが受信するべきか問題が起こる。各アクセスポイントが電力伝送を行う時間は、センサデータを受信する時間によって異なる。アクセスポイントがセンサデータを受信しつつ電力伝送を行っている時、他のアクセスポイントは電力伝送を行わないからだ。また、センサーノードが得られる電力はアクセスポイントとの距離によって大きく異なる。電力信号は距離減衰の影響を大きく受けるからだ。各アクセスポイントが電力伝送を行う時間によって、周囲のアクセスポイントが得られる電力量は異なる。

どのアクセスポイントにどのセンサーノードからのデータ受信を割り当てるかについて、簡単な方法として、最近傍割り当てがあげられる。最近傍割り当ては、センサーノードは自身に最も近いアクセスポイントに対してセンサデータの送信を行うというものだ。最も近いアクセ

スポットと通信を行うことで、自身センサデータの送信中に自身が得られる電力が最大となる。しかしながら、最近傍割り当てではセンサノードが得られる電力に大きな偏りが生まれて、電力資源が無駄になる可能性がある。

図9に最近傍割り当てで各センサノードが得る電力量に偏りが起こる例を示す。図9のネットワークトポロジにおいて最近傍割り当てで各センサノードの通信するアクセスポイントを決めると、ノード1、ノード2、ノード3はアクセスポイント1と、ノード4はアクセスポイント2と通信を行う。この時、全二重通信中の電力伝送を確認すると、ノード1、ノード2、ノード3とノード4の間に大きな偏りが発生している。ノード1、ノード2、ノード3では電力が余っているにもかかわらず、ノード4では全く電力が足りないという状況が起こると電力資源が無駄となってしまう。

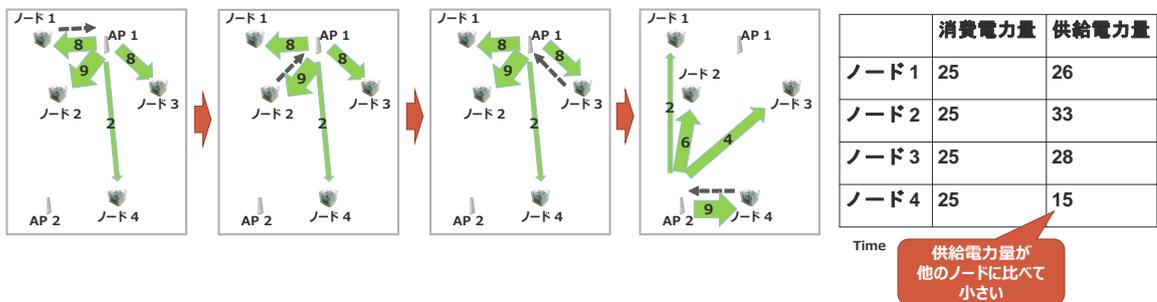


図9: 最近傍割り当てで供給電力量の偏りが起こる例

センサノードからデータを受信するアクセスポイントの割り当ての方法を工夫することで、各線センサノードが得られる電力量を調整することができる。図7、図8にセンサノードからデータを受信するアクセスポイントを制御することで、各センサノードの得る電力を調節できる例を示す。図7、図8では、センサノード1とセンサノード2はセンサデータをどちらかのアクセスポイントに対して送信する。電力伝送信号は距離減衰するので、アクセスポイントとの距離によってセンサノードが得られる電力が大きく変わる。例えば、アクセスポイント1に近いセンサノード1は、アクセスポイント1が電力伝送を行うときは多くの電力を得ることができる。しかしながら、アクセスポイント2が電力伝送を行うときは少しの電力しか得ることができない。

図7では、アクセスポイント1がセンサノード1とセンサノード2のセンサデータを受信している。アクセスポイント1はデータを受信しつつ、電力信号を送信する。アクセスポイント2はデータの受信を行わないので、電力信号は送信しない。アクセスポイント1だけが、電力伝送を行うとセンサノード1とセンサノード2が得られる電力量に大きな偏りが生じる。図7では、ノード2が電力が足りていないのにもかかわらず、ノード1は必要電力量よ

りも多くの電力を得ているため、電力資源に無駄が生じている。

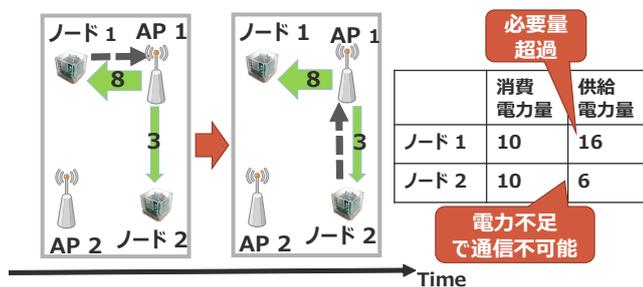


図 10: ノード 1 はアクセスポイント 1 に  
ノード 2 はアクセスポイント 1 にデータ送信

図 8 では、アクセスポイント 1 がセンサノード 1 のセンサデータを、アクセスポイント 2 がセンサノード 2 のセンサデータを受信している。アクセスポイント 1 とアクセスポイント 2 はデータを受信している間、電力信号を送信する。アクセスポイント 2 が電力供給を行うことによって、図 7 と比較して、センサノード 1 の電力供給量が減り、センサノード 2 の電力供給量が増加する。結果として、電力供給量を調節して電力資源の無駄を減らすことができる。

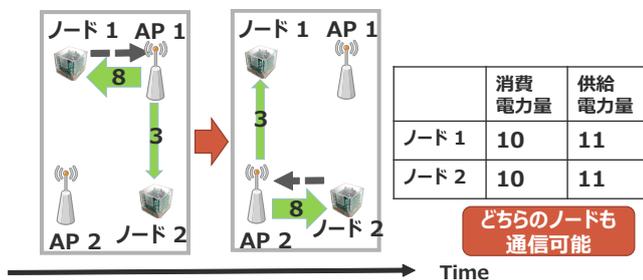


図 11: ノード 1 はアクセスポイント 1 に  
ノード 2 はアクセスポイント 2 にデータ送信

### 3 複数アクセスポイントを用いた無線全二重通信による データ電力同時伝送手法

本章では、複数アクセスポイントを用いた無線全二重通信によるデータ電力同時伝送の通信制御手法である TD-PEBS (Time Division Power Estimating and Balancing Scheduling) を提案する。まず、提案手法が想定する集中制御型ネットワークについて示す。次に、複数アクセスポイントによる電力伝送が引き起こす衝突を回避する手法について述べる。最後に、各センサノードの蓄電量の均衡を保つための、アクセスポイントとセンサノードの通信割り当て手法について詳細を述べる。

#### 3.1 無線センサネットワークモデル

本節では、本研究が想定しているネットワークモデルについて述べる。本研究では全二重通信による無線電力伝送を行う対象として、ノードの位置が固定されているバッテリーレス無線センサネットワークを想定する。ネットワーク内には、複数のセンサノードと複数のアクセスポイントが設置されている。センサノードとアクセスポイントの位置は固定されていて、センサノードの移動や新たなセンサノードの追加はないとする。センサノードは電源につながれておらず、バッテリーを具備していない。センサノードはレクテナを具備していて、電波から電力を得ることができる。アクセスポイントは電源に接続されていて、電力信号を送信することでセンサノードに電力供給を行う。

アクセスポイントは自身の送信電力をキャンセル可能な自己干渉除去機能を具備していて、電力信号を送信しながらセンサデータを受信することができる。アクセスポイントは有線を介して相互接続されていて、互いの情報を共有できる。

想定するネットワークモデルでは、アクセスポイントは1つのマスターアクセスポイントと、複数のスレイブアクセスポイントに分けられる。マスターアクセスポイントはセンサデータの受信や電力信号の送信の他に、制御フレームの送信、通信割り当て処理の実行、スレイブアクセスポイントの制御など、コントローラの役割も果たす。スレイブアクセスポイントはマスターアクセスポイントによって制御されて、センサデータの受信や電力信号の送信を行う。マスターアクセスポイントはネットワーク内のセンサノードとアクセスポイントの位置や、センサノードのセンシング間隔、消費電力量、送受信に必要な電力量、1回のセンシングで発生するデータサイズを既知の情報としてネットワークの制御に利用する。

センサノードは定期的にセンシングを行って、取得したセンサデータをアクセスポイントに送信する。センサノードは自己干渉除去機能を具備しておらず、センサデータを送信しながら制御フレームを受信することができない。センサノードがデータの送受信やキャリアセ

ンスを行う際、必要な電力が不足している場合、データの送受信やキャリアセンスを行わない。センサノードはバッテリーを具備せず、キャパシタレベルの電力しか蓄電することができない。アクセスポイントからセンサノードへの主な通信は電力信号の送信である。また、センサノードからアクセスポイントへの主な通信はセンサデータの送信である。

### 3.2 集中制御による時分割衝突回避手法

提案手法では、センサノードとアクセスポイントのセンサデータの通信を集中制御することで衝突を回避する。ネットワーク内には、センサデータの送受信に着目したマスターアクセスポイントによる制御フレーム送信、センサノードによるセンサデータ送信、電力信号のみの送信の3つの通信状態が存在する。それぞれの通信状態において、アクセスポイントの電力伝送を制御することでセンサデータと電力信号の衝突を回避することができる。

マスターアクセスポイントによる制御フレーム送信では、制御フレームを送信しないアクセスポイントは電力信号の送信を停止する。図12にマスターアクセスポイントによる制御フレーム送信の例を示す。マスターアクセスポイントが制御フレームを送信している際に、スレイブアクセスポイントが電力信号を送信すると、制御フレームと電力信号が衝突してセンサノードが制御情報を正しく受信できない。そこで、マスターアクセスポイントが制御フレームを送信している間は、スレイブアクセスポイントは電力信号を送信を停止する。

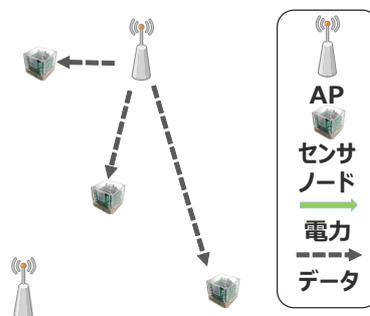


図 12: マスターアクセスポイントによる制御フレーム送信

センサノードによるセンサデータ送信では、センサデータを受信するアクセスポイント以外のアクセスポイントは電力信号の送信を停止する。図13にセンサノードによるセンサデータ送信の例を示す。アクセスポイントがセンサノードからセンサデータを受信している際に、他のアクセスポイントが電力信号を送信すると干渉が発生する。干渉によって、アクセスポイントはセンサデータを受信できなくなる可能性がある。アクセスポイントがセン

サデータを受信できなかった場合、アクセスポイントはセンサノードに対して再送を要求する。センサノードは再送を行うと、再送に必要な分の電力を消費することになる。

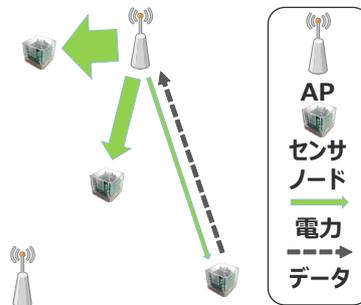


図 13: センサノードによるセンサデータ送信

電力信号のみの送信では、全てのアクセスポイントは一斉に電力信号を送信する。図 14 に電力信号のみの送信の例を示す。データ通信が行われていない場合、電力信号を送信してもデータと電力信号の衝突は起こらない。すべてのアクセスポイントが同時に電力信号を送信することで、より多くの電力をセンサノードへ伝送することができる。

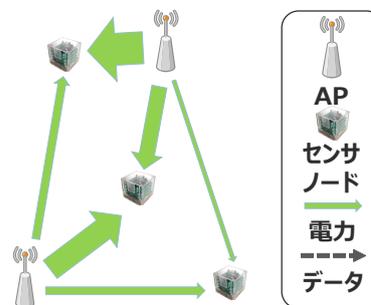


図 14: 電力信号のみの送信

図 15 に本提案手法による衝突回避の動作例を示す。センサノードは電力消費を抑えるため通常時はスリープしていて、データの送受信のタイミングに合わせてウェイクする。センサノードはスリープ中でも電力信号の受信を行って、電力信号から電力を得る。集中制御による衝突回避では、全てのセンサノードは制御フレームによって同期されている。センサノードは自身の送信タイミングでのみデータの送信を行うので、センサノードが送信したセンサデータ同士の衝突を回避できる。また、全てのアクセスポイントは有線を介して相互接続されていて制御情報を共有できるので、電力信号とセンサデータ、電力信号と制御フレームの

衝突を回避できる。

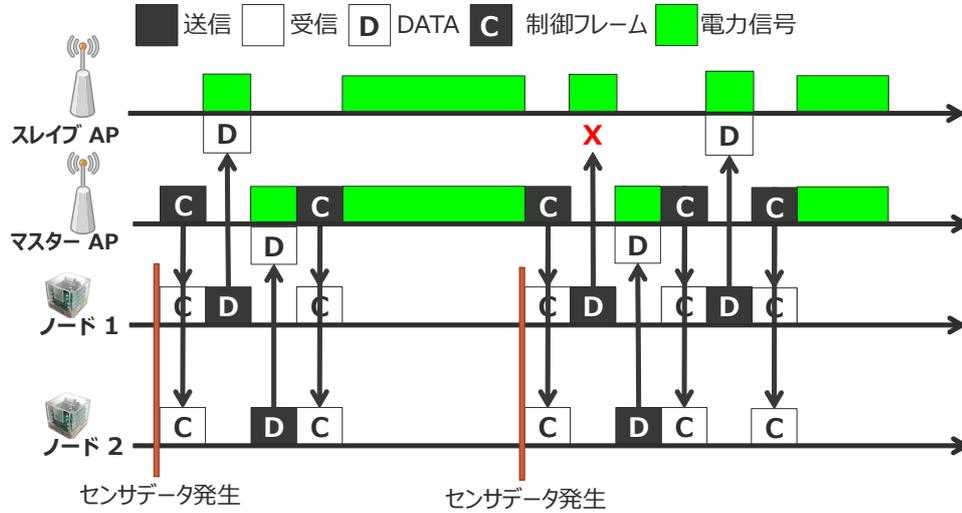


図 15: 提案手法の動作例

集中制御による衝突回避では、まずマスターアクセスポイントがセンサデータの発生に合わせて制御フレームをブロードキャストする。制御フレームは、すべてのセンサデータの送信が完了するまで定期的に送り続けられる。通信状態がマスターアクセスポイントによる制御フレーム送信である時は、スレイブアクセスポイントは電力信号の送信を停止する。マスターアクセスポイントが制御フレームを送信中にスレイブアクセスポイントが電力信号を送信すると、制御フレームと電力信号との間で衝突が発生して、センサノードが制御フレームを受信できないためである。制御フレームには、センサノードがセンサデータを送信するタイミングと送信先アクセスポイントの情報が含まれている。センサノードは自身のセンシング間隔でウェイクして、ブロードキャストされた制御フレームから、自分がセンサデータ送るタイミングと送信先アクセスポイントの情報を取得する。

次に、センサノードは制御フレームに含まれる自分の送信タイミングでウェイクして、送信先アクセスポイントにセンサデータを送信する。センサノードは、センサデータの送信を終えるとスリープする。通信状態がセンサノードによるセンサデータ送信である時は、センサデータを受信するアクセスポイントのみが電力信号を送信する。センサデータを受信するアクセスポイント以外のアクセスポイントはこの間、電力信号の送信を停止する。アクセスポイントがセンサデータを受信中に他のアクセスポイントが電力信号を送信すると、センサデータと他のアクセスポイントからの電力信号が衝突してしまう。センサデータと電力信号の間で衝突が起これると、アクセスポイントはセンサデータを正しく受信できない可能性が高い。

センサノードはセンサデータを送信した後、次の制御フレームの送信タイミングでもウェイクして制御フレームを受信する。制御フレームはACKの役割も担っていて、制御フレームに自身のセンサデータの送信が指定されていなかった場合には、センサノードはデータの再送は行わず、スリープする。マスターアクセスポイントは全てのセンサノードからセンサデータの受信を確認すると、制御フレームの定期的な送信を停止する。次のセンサデータが発生するまでデータ通信は行われない。通信状態が電力信号のみの送信である場合、全てのアクセスポイントが電力信号を送信する。データ通信が行われていないならば、信号と電力信号の衝突を考慮する必要がないので、すべてのアクセスポイントが一斉に電力信号を送信する。

### 3.3 電力推定に基づく通信割り当て

本節では提案する通信割り当て手法のPEBS (Power Estimating and Balancing Scheduling) について述べる。PEBSは、各アクセスポイントが電力伝送を行う時間を調節することで、センサノード間の不足電力量に極端な偏りが生まれることを防ぐことを目的とした通信割り当て手法である。不足電力とは、センサノードの消費電力から供給電力を差し引いた指標である。消費電力はセンサノードごとに異なるので、供給電力のみに着目すると消費電力が大きなセンサノードの通信に必要な電力が不足する。集中制御による衝突回避手法において、センサノードによるセンサデータ送信時には、センサノードからセンサデータを受信しているアクセスポイントのみが電力伝送を行う。センサノードからのセンサデータを受信するアクセスポイントを変更することで、各アクセスポイントが電力伝送を行う時間を調節することができる。

PEBSは既知の情報から各センサノードの不足電力量の推定を行って、不足電力量の偏りに応じてアクセスポイントとセンサノードの割り当てを変更する割り当て手法である。割り当て処理はマスターアクセスポイントによって実行される。実行結果は制御フレームや有線を通じてセンサノードとアクセスポイントに共有される。具体的には、まずセンサノードの中から、アクセスポイントとの通信が割り当てられていないセンサノードを選択する。次に、現在のセンサノード割り当てから、各センサノードの不足電力量を推定する。推定された各センサノードの不足電力量が偏っているならば、不足電力量の偏りを最小にするように、センサデータを送信するアクセスポイントを選択する。

図 16 に各センサノードの不足電力量が偏っている場合の通信割り当ての例を示す。各センサノードの不足電力量が偏っていないならば、伝送電力量が最大になるようにセンサデータを送信するアクセスポイントを選択する。図 17 に各センサノードの不足電力量が偏っていない場合の通信割り当ての例を示す。その後、まだ送信先アクセスポイントが割り当てられていないセンサノードに対して、逐次的に割り当て処理を行う。これを繰り返すことで全てのセンサノードに対して、送信先アクセスポイントの通信割り当てを行う。



図 16: 各センサノード不足電力量が偏っている場合の通信割り当ての例

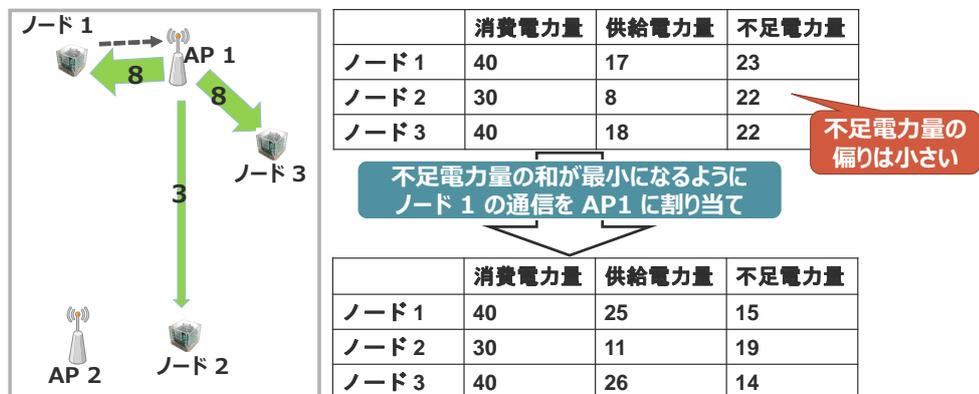


図 17: 各センサノードの不足電力量が偏っていない場合の通信割り当ての例

---

**Algorithm 1** Power Estimating and Balancing Scheduling

---

```
1:  $\mathbb{C} \leftarrow \phi$ 
2:  $\mathbb{T} \leftarrow \mathbb{S}$ 
3: while  $|\mathbb{T}| \neq 0$  do
4:    $x \leftarrow \text{getNode}(\mathbb{T})$ 
5:   if  $\text{variance}(\mathbb{E}_{\text{all}}(\mathbb{C})) < \alpha$  then
6:      $y \leftarrow \{j \in \mathbb{A} \mid \min[\sum_{i \in \mathbb{S}} e_i(\mathbb{C} + (x, j))]\}$ 
7:   else
8:      $y \leftarrow \{j \in \mathbb{A} \mid \min[\text{variance}(\mathbb{E}_{\text{all}}(\mathbb{C} + (x, j)))]\}$ 
9:   end if
10:   $\mathbb{C} \leftarrow \mathbb{C} + (x, y)$ 
11:   $\mathbb{T} \leftarrow \mathbb{T} - x$ 
12: end while
```

---

**Algorithm1** に PEBS のアルゴリズムを示す。  $\mathbb{A}$  はネットワーク内すべてのアクセスポイントの集合、  $\mathbb{S}$  はネットワーク内すべてのセンサノードの集合、  $\mathbb{C} = \{(i, j) \mid i \in \mathbb{S}, j \in \mathbb{A}\}$  はセンサノード  $i$  に対してアクセスポイント  $j$  の通信が割り当てられていることを表す集合、  $\mathbb{T}$  は割り当て待ちのセンサノードを表す集合である。  $\text{getNode}(\mathbb{T})$  は  $\mathbb{T}$  に含まれるセンサノードの中からセンサノードを 1 つ取得する関数、  $e_i(\mathbb{C})$  はアクセスポイントとセンサノードの割り当てが  $\mathbb{C}$  である場合のセンサノード  $i$  の不足電力量を表す関数、  $\text{variance}(\mathbb{E}_{\text{all}}(\mathbb{C}))$  は各センサノードの不足電力量の偏りの度合を表す関数である。  $\text{variance}(\mathbb{E}_{\text{all}}(\mathbb{C}))$  の引数は全てのセンサノードの不足電力量の集合  $\mathbb{E}_{\text{all}}(\mathbb{C}) = \{e_1(\mathbb{C}), e_2(\mathbb{C}) \cdots e_{|\mathbb{S}|}(\mathbb{C})\}$  である。  $x$  は  $\text{getFarestNode}(\mathbb{T})$  で取得されるセンサノードを格納する一時変数、  $y$  はセンサノード  $x$  に割り当てるアクセスポイントを格納する一時変数である。

PEBS では逐次的にセンサノードに送信先のアクセスポイントを割り当てていく。具体的にはまず **Algorithm1** の 2 行目で、割り当て待ちのセンサノードを表す集合  $\mathbb{T}$  を、全センサノードを表す集合  $\mathbb{S}$  で初期化した後、 **Algorithm1** の 4 行目で  $\text{getNode}(\mathbb{T})$  からまだ割り当てられていないセンサノードを選択、アクセスポイントを割り当てる。その後、選択したセンサノードを集合  $\mathbb{T}$  から取り除く。割り当て処理は集合  $\mathbb{T}$  の要素がなくなるまで繰り返される。

割り当ての際、各センサノードの単位時間あたりの不足電力量を推定して、センサノード間の不足電力量の均衡度合に応じてアクセスポイントの割り当て方法を変更する。具体的には **Algorithm1** の 5 から 9 行目で示される。各センサノードの単位時間あたりの不足電力量は周囲のセンサノードの既知の情報とアクセスポイントの通信割り当てから推定する。セ

センサーノード  $i$  の単位時間あたりの不足電力量を表す関数  $e_i(\mathbf{C})$  は、単位時間あたりの消費電力量を表す定数  $r_i$  と単位時間あたりの供給電力量を表す関数  $\text{supply}_i(\mathbf{C})$  を用いて以下の式で表される。

$$e_i(\mathbf{C}) = r_i - \text{supply}_i(\mathbf{C})$$

単位時間あたりの消費電力量を表す定数  $r_i$  は既知の情報である。  $\text{supply}_i(\mathbf{C})$  はセンサーノード  $i$  から各アクセスポイントへの距離と各アクセスポイントの通信スケジューリングから供給電力量を推定する。センサーノード  $i$  からアクセスポイント  $j$  までの距離を  $d_{ij}$ 、アクセスポイントから距離  $d$  のセンサーノードが単位時間あたりに電力信号から得ることができる電力を表す関数を  $f(d)$ 、単位時間の中でアクセスポイント  $j$  が電力信号の送信を行う時間を関数  $g_j(\mathbf{C})$  とすると、単位時間あたりの供給電力量  $\text{supply}_i(\mathbf{C})$  は以下の式で表される。

$$\text{supply}_i(\mathbf{C}) = \sum_{j \in \mathbf{A}} f(d_{ij})g_j(\mathbf{C})$$

推定した不足電力量を用いて、センサーノード間の不足電力量の均衡度合を求める。均衡度合は関数  $\text{variance}(\mathbb{E}_{\text{all}}(\mathbf{C}))$  を用いて算出する。  $\text{variance}(\mathbb{E}_{\text{all}}(\mathbf{C}))$  は以下の式で表される。

$$\text{variance}(\mathbb{E}_{\text{all}}(\mathbf{C})) = \frac{\max(\mathbb{E}_{\text{all}}(\mathbf{C})) - \min(\mathbb{E}_{\text{all}}(\mathbf{C}))}{|\text{average}(\mathbb{E}_{\text{all}}(\mathbf{C}))|}$$

$\text{variance}(\mathbb{E}_{\text{all}}(\mathbf{C}))$  は値が小さいほどセンサーノード間の不足電力量の偏りが小さいことを意味する。  $\text{variance}(\mathbb{E}_{\text{all}}(\mathbf{C}))$  の値が閾値  $\alpha$  未満の場合、センサーノード間に不足電力量の偏りが無いとして、不足電力の総和が最小になるように割り当てるアクセスポイントを決定する。一方、  $\text{variance}(\mathbb{E}_{\text{all}}(\mathbf{C}))$  の値が閾値  $\alpha$  以上ならば、センサーノード間に不足電力量の偏りがあるとして、センサーノード間の不足電力量の差が最小になるように割り当てる送信先アクセスポイントを決定する。決定したアクセスポイントを **Algorithm1** の 10 行目に示すように割り当てる。

## 4 評価

本章では提案手法の有用性を示すために、計算機シミュレーションを用いて性能評価を行った。具体的には、提案した衝突回避手法と通信割り当て手法について、他手法とのデータ収集率について比較して提案手法の有用性を示す。a 評価指標として用いるデータ収集率とは、ある時間内に発生するセンサデータのうち、アクセスポイントが受信できたセンサデータの割合である。本研究におけるデータ収集率とは、センサノードが送信する予定の packets 数に対するアクセスポイントが受信できた packets 数の割合で、次のように定義される。

$$\text{データ収集率} = \frac{\text{アクセスポイントが受信できた packets 数}}{\text{センサノードが送信する予定の packets 数}}$$

伝搬路中で衝突が発生したり、電力不足によってセンサデータの送信が失敗するとデータ収集率は低下する。

本章ではまず、提案手法の有用性を相対的に確かめるための比較対象について述べる。衝突回避手法の比較対象として、拡張 P-CSMA/CA (拡張 Power - CSMA/CA) と HD-SWIPT TDMA (Half Duplex Simultaneously Wireless Information and Power Transfer) の 2 つの衝突回避手法について説明する。通信割り当て手法の比較対象として、最近傍割り当てとランダム割り当ての 2 つの割り当て手法について説明する。次に、シミュレーションの条件について述べる。最後に、シミュレーションを用いた評価結果を示す。具体的には、提案する衝突回避手法について、ネットワーク全体のデータ収集率を拡張 P-CSMA/CA と HD-SWIPT TDMA の 2 つのアプローチと比較する。また、提案する通信割り当て手法について、ネットワーク全体のデータ収集率と、センサノードごとのデータ収集率を最近傍割り当てとランダム割り当ての 2 つのアプローチと比較する。最後に、PEBS が意図した割り当てを行うことができるのかについて、センサノード間の不足電力の偏りを抑えつつ、不足電力量を最小化する割り当てを全探索で計算する手法と比較することで評価する。これは、PEBS は逐次的にセンサノードのアクセスポイント割り当てを行うため、全ての組み合わせを計算していないという観点で最適な割り当てではないためだ。

### 4.1 衝突回避手法における比較手法

提案した衝突回避手法の電力伝送における有用性を確認するために拡張 P-CSMA/CA と、HD-SWIPT TDMA の 2 つの衝突回避手法を比較対象として挙げる。拡張 P-CSMA は制御フレームを用いない分散型の手法である。分散型ネットワークを対象とする拡張 P-CSMA と集中制御型ネットワークを対象にする TD-PEBS を比較することで、集中制御の有用性について議論する。HD-SWIPT TDMA は全二重通信を用いずに、同じ周波数帯でデータと電力

の同時伝送を行う手法である。全二重通信を用いない HD-SWIPT TDMA と TD-PEBS を比較することで、全二重通信を用いることの有用性について議論する。拡張 P-CSMA/CA, HD-SWIPT TDMA の 2 つの手法において、複数のアクセスポイントは有線を介して相互接続されていて、アクセスポイントは協調して通信を行う。ネットワーク内のアクセスポイントは 1 つのマスターアクセスポイントと複数のスレイブアクセスポイントに分けられる。マスターアクセスポイントは制御フレームのブロードキャストや ACK の送信などの通信制御を行いながら電力伝送とセンサデータの受信を行う。スレイブアクセスポイントはマスターアクセスポイントに追従して電力伝送とセンサデータの受信も行う。

#### 4.1.1 拡張 P-CSMA/CA

拡張 P-CSMA/CA は文献 [6] の P-CSMA/CA を複数アクセスポイントに拡張した衝突回避手法である。P-CSMA/CA と同様に電力信号を固定長のフレームとみなして、キャリアセンスを用いて電力フレームを送信する。P-CSMA/CA との違いは、電力フレームを送信する際、全てのセンサノードが同時に電力伝送を行う。拡張 P-CSMA/CA ではマスターアクセスポイントが代表してキャリアセンスと ACK の送信を行う。マスターアクセスポイントは電力フレームを送信する際、スレイブアクセスポイントと協調して一斉に電力伝送を行う。

拡張 P-CSMA/CA ではセンサノードとアクセスポイントは同期されておらず、データフレーム間やデータフレームと電力フレームの間で衝突が起こる可能性がある。しかしながら、拡張 P-CSMA は制御フレームによるセンサノードの同期を必要としないので、集中制御型の衝突回避手法と比較して、制御フレームによるオーバーヘッドが存在しない。

図 18 に拡張 P-CSMA/CA の動作例を示す。拡張 P-CSMA/CA では、通常の CSMA/CA と同様にランダム時間バックオフした後に、マスターアクセスポイントがキャリアセンスを行う。マスターアクセスポイントがキャリアセンスを行った後、センサノードがセンサデータを送信していなかった場合には、マスターアクセスポイントは全てのスレイブアクセスポイントと共に電力フレームを送信する。アクセスポイントは電力フレームの送信が終了しても ACK の受信は行わない。マスターアクセスポイントは電力フレームを送り終わると同時に、次の電力フレームを送信するためのコンテンションを開始する。センサノードは、センサデータが発生するとアクセスポイントと同様にランダム時間バックオフした後にキャリアセンスを行う、アクセスポイントや自分以外のセンサノードが通信していなかった場合、センサノードはデータフレームを送信する。マスターアクセスポイントとスレイブアクセスポイントは協調してセンサデータの受信を行う。スレイブアクセスポイントはデータフレームの受信を、有線を介してマスターアクセスポイントに通知する。マスターアクセスポイン

トがデータフレームを受信できなかった場合でも、スレイブアクセスポイントからデータフレーム受信の通知があれば、マスターアクセスポイントはデータの受信が成功したとみなして ACK を送信する。センサノードによるデータフレームの送信では、アクセスポイントの電力フレームの送信と異なり、ACK を待ち受けて再送制御を行う。この時の再送制御方式は通常の CSMA/CA と同様である。ACK を受信したセンサノードは消費電力を抑えるため、次のセンサデータが発生するまでスリープする。センサノードはスリープ中も電力信号の受信を行って、電力信号から電力を得る。

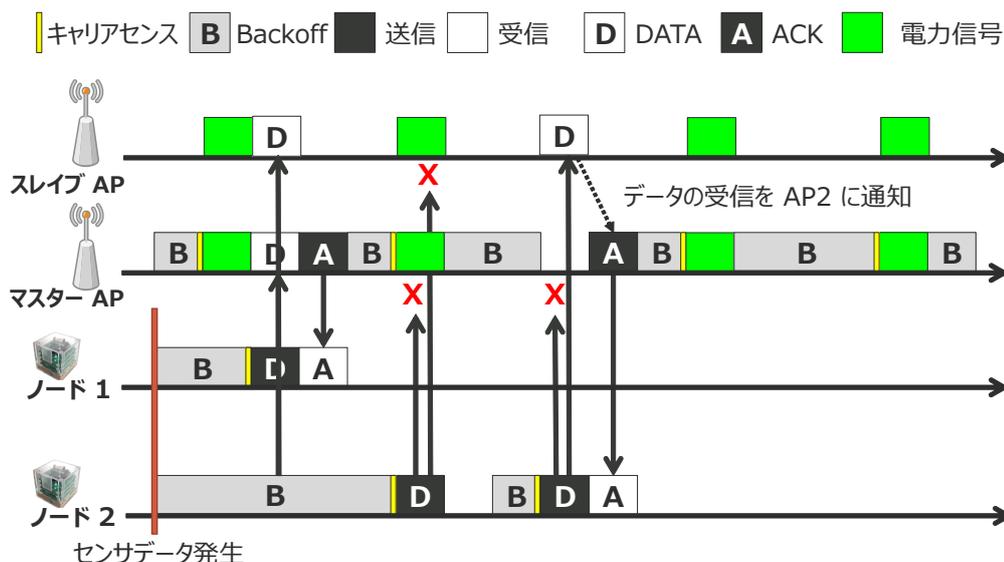


図 18: 拡張 P-CSMA/CA の動作例

#### 4.1.2 HD-SWIPT TDMA

HD-SWIPT TDMA は、センサノードがセンサデータ送信を送信する時間とアクセスポイントが電力信号を送信する時間を分けることで電力信号とセンサデータの衝突を回避する手法である。HD-SWIPT TDMA は集中制御型の衝突回避手法で、マスターアクセスポイントは全てのセンサノードのセンシングのタイミングを既知の情報として制御に利用する。HD-SWIPT TDMA ではセンサデータが発生すると、マスターアクセスポイントが制御フレームを送信する。全てのセンサノードは、制御フレームを用いてアクセスポイントと同期されていて、制御フレームから自分がどのスロットで送信すべきかの情報を取得する。全てのセンサデータの送信が終了したら、次のセンサデータが発生するまで、全てのアクセスポイントが一斉に電力信号を送信する。センサノードは電力消費を抑えるために通常時はス



センサノードからセンサデータの受信を確認すると、次のセンシングまで、スレイブアクセスポイントと共に一斉に電力伝送を行う。

## 4.2 通信割り当て手法における比較手法

提案した通信割り当て方法である PEBS の有効性を確かめるために、最近傍割り当て、ランダム割り当ての 2 つの通信割り当て手法を比較対象として挙げる。最近傍割り当て、ランダム割り当ては、提案手法である PEBS と同様に 3 章で説明した集中制御型ネットワークによる衝突回避を前提とした通信割り当て手法である。最近傍割り当てでは各センサノードは自分と最も近いアクセスポイントと通信を行う。ランダム割り当てでは各センサノードはランダムなアクセスポイントと通信を行う。

最近傍割り当て (TD-Nearest) は、各センサノードが全二重通信中に最も電力を得られるように、センサノードから最も近いアクセスポイントに通信を割り当て方法である。センサノードと通信するアクセスポイントとの距離が小さくなるほど、全二重通信中にセンサノードが得られる電力は大きくなる。最近傍割り当てでは、各センサノードが自身に最も近いアクセスポイントと通信を行うことで、全二重通信中に得られる電力の最大化を目指す。

ランダム割り当て (TD-Random) は、センサノードが通信を行うアクセスポイントを、ネットワーク内のアクセスポイントの中からランダムに選択する手法である。ランダム割り当ては、単純な通信割り当て手法として提案手法である PEBS と比較する。

## 4.3 シミュレーション条件

計算法シミュレーションを用いて、各手法のデータ収集率を評価した。表 1 にシミュレーション条件を示す。センサノードの設置エリアは機器内センサネットワークを想定して  $100[\text{cm}] \times 100[\text{cm}]$  の 2 次元平面上として、設置するセンサノードの数は 200 個とした [16]。設置するセンサノードの数は ATM の内部に 200 個以上のセンサが取り付けられていることを参考に設定した。センサノードとアクセスポイントの設置位置はランダムとした。センサノードの設置するアクセスポイントの数は 1 個から 8 個として、アクセスポイントの設置数を変化させた場合のデータ収集率について評価を行った。通信規格として IEEE802.15.4 を想定して、ビットレートを  $250 [\text{Kbps}]$  とした。IEEE802.15.4 は ZigBee で採用されている通信規格で、消費電力が低いことが特徴として挙げられる [17]。センサノードの消費電力は MICAz や TelosB で用いられている Texas Instruments 社の CC2420 [18] に基づいて、送信電力を  $62.64 [\text{mW}]$ 、受信電力を  $70.92 [\text{mW}]$ 、スリープ中の消費電力を  $0 [\text{mW}]$  と定めた。提案手法の PEBS で用いる、許容する偏りの閾値  $\alpha$  は 7 とした。閾値  $\alpha$  はいくつかの値で

シミュレーションを行ってネットワーク全体のデータ収集率が最も良くなるような結果が出た値を採用した。物理層におけるパケットエラー率は0として評価を行った。センサノードのセンシング間隔は1秒とした。集中制御型の衝突回避手法であるHD-SWIPT TDMAと提案手法の評価においては、センサデータは1秒間隔で発生する。分散制御型の衝突回避手法であるP-CSMA/CAの評価においては、キャリアセンスを用いた衝突回避を評価するために、1秒間に平均1回センサデータが発生するようなポアソン分布に基づいてセンサデータの発生間隔を定めた。

表 1: シミュレーション条件

|                |                              |
|----------------|------------------------------|
| センサノード設置エリア    | 100 × 100 [cm <sup>2</sup> ] |
| 設置センサノード数      | 200 [個]                      |
| 設置アクセスポイント数    | 1-8 [個]                      |
| ビットレート         | 250 [Kbps]                   |
| 送信時の消費電力       | 62.64 [mW]                   |
| 受信時の消費電力       | 70.92 [mW]                   |
| スリープ中の消費電力     | 0 [mW]                       |
| 伝送電力           | 80 [ $\mu$ W]                |
| 偏りの閾値 $\alpha$ | 7                            |
| センシング間隔        | 1 [秒]                        |

#### 4.4 評価結果

まず、提案した衝突回避手法と通信割り当て手法に関して、ネットワークネットワーク全体のデータ収集率を評価した。次に、通信割り当て手法について、ネットワークネットワーク全体のデータ収集率と各センサノードごとのデータ収集率を評価した。最後に、通信割り当て手法に関して、提案手法であるPEBSと全探索による割り当てのデータ収集率について評価した。

##### 4.4.1 ネットワーク全体のデータ収集率の評価

図 20 に、衝突回避手法の評価として、アクセスポイントの設置数を変化させた時のデータ収集率を示す。横軸がアクセスポイントの数、縦軸がデータ収集率である。評価結果から、2つのことがわかる。

1つ目は全二重通信を用いることで、伝送できる電力が増えて、データの収集率が上昇することである。HD-SWIPT TDMA と比較して提案手法はデータの収集率を最大 30%改善している。HD-SWIPT TDMA は半二重通信を用いて 1つの周波数帯でデータと電力の同時伝送を行う手法である。この結果から、無線データ電力同時伝送に全二重通信を用いることの優位性を確認できる。

2つ目は、分散型手法の P-CSMA/CA は、アクセスポイントの数が少ないときは提案手法の TD-PEBS よりも有効であるが、アクセスポイントの数が増えると TD-PEBS との優位性が逆転するということである。P-CSMA/CA はアクセスポイントの数が 1つの時は、提案手法である TD-PEBS よりもデータ収集率が高い。この結果は、P-CSMA/CA が制御フレームを用いない手法であるからと考えられる。TD-PEBS は制御フレームを用いてセンサノード間の同期をとる必要があるため、制御フレームのオーバーヘッドが存在する。アクセスポイント数が少なく供給電力が十分でない間は、制御フレームのオーバーヘッドの影響が大きく、TD-PEBS よりも P-CSMA/CA の方がデータ収集率が高いためだと考えられる。しかしながら、アクセスポイントの数が 5以上の時は TD-PEBS の方がデータ収集率が高い。一方、P-CSMA/CA ではアクセスポイントの数が 6以降はデータ収集率が一定の値に収束してデータ収集率の改善が見られない。この結果は、アクセスポイント数が多く供給電力が十分な状況では、データフレームと電力フレームが 1つの帯域を一定の割合で分け合うからだと考えられる。センサノードはキャリアセンスを行って、電力フレームの送信を確認するとデータフレームの送信を抑制する。このため、電力が十分に供給されていても、次のセンサデータが発生するまでにセンサデータを送信できない可能性がある。

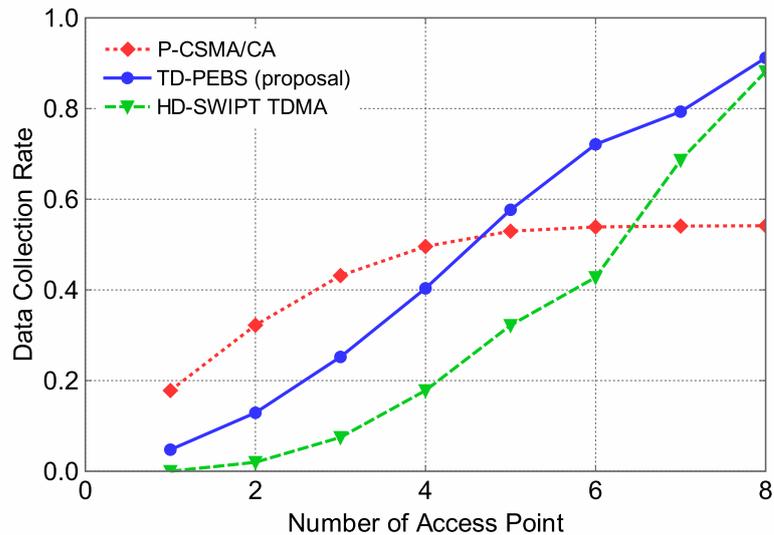


図 20: 衝突回避手法ごとのデータ収集率

図 21 に、通信割り当て手法の評価として、アクセスポイントの設置数を変化させた時のデータ収集率を示す。横軸がアクセスポイントの数、縦軸がデータ収集率である。

図 21 から、提案した通信割り当て手法である PEBS 割り当ては最近傍割り当てやランダム割り当てと比較してデータ収集率を最大で 15% から 20% 改善していることが分かる。この結果から、アクセスポイントが伝送する時間を調整して伝送電力量の偏りを抑制することで、ネットワーク全体のデータ収集率を改善できることが確認できる。

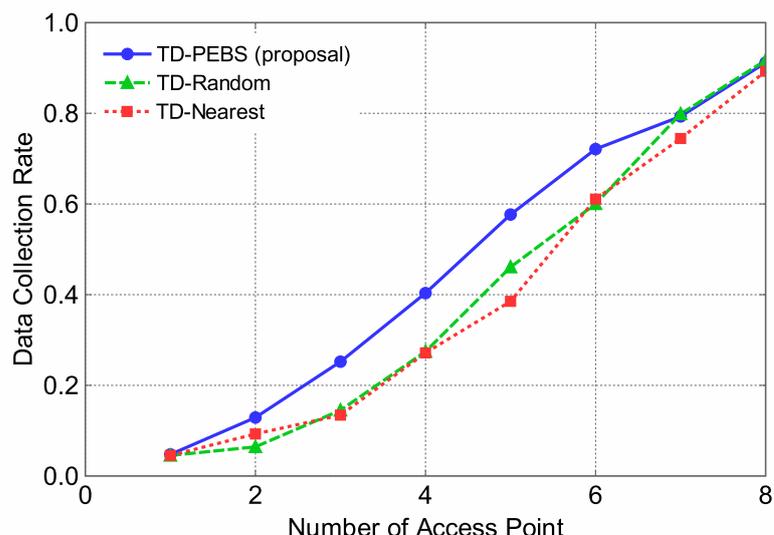


図 21: 通信割り当て手法ごとのデータ収集率

図 21 では、最近傍割り当てはランダム割り当てよりもデータ収集率が小さい場合が多いことが分かる。これは、最近傍割り当てはトポロジによっては、センサノードが得られる電力量に大きな偏りが生まれるからだと考えられる。

#### 4.4.2 センサノードごとのデータ収集率の評価

PEBS 割り当てはセンサノード間の電力量の極端な偏りを抑えて、全く通信ができないノードの存在を防ぐことを目的とした割り当て方法である。PEBS 割り当てによる電力量の極端な偏りを抑える効果を評価するために、センサノードごとのデータ収集率を評価した。

図 21 から、アクセスポイント数が 8 の時、ネットワーク全体のデータ収集率は 3 つの通信割り当て手法でほぼ同じということが分かる。ネットワーク全体のデータ収集率が 3 つの手法でほぼ等しいアクセスポイント数が 8 の時の各センサノードのデータ収集率の累積グラフを図 22 に示す。横軸はデータ収集率である。縦軸はセンサノード全体の中で、横軸のデータ収集率以下のセンサノードの割合を表す。

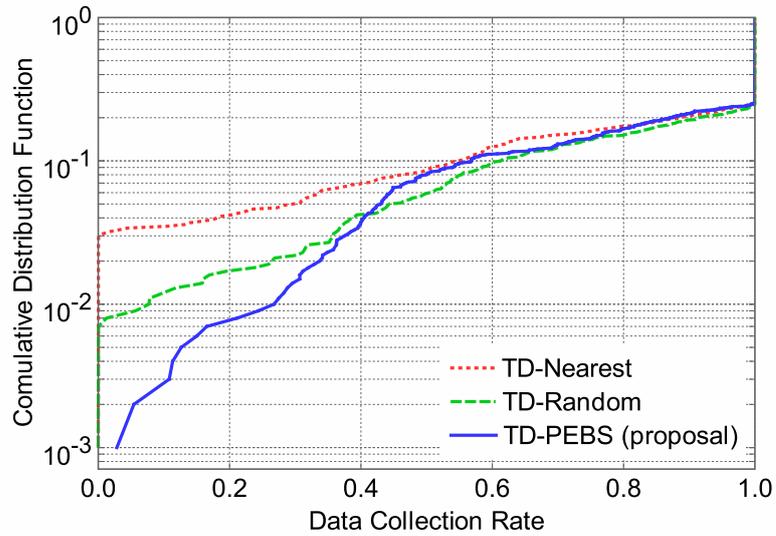


図 22: アクセスポイント数が 8 の時の各センサノードのデータ収集率の累積グラフ

図 22 から、2 つのことが分かる。1 つ目は、提案手法である TD-PEBS は最近傍割り当てとランダム割り当てと比較して、データ収集率が 0 に近いセンサノードの割合が大きく減少しているということである。この結果は、PEBS 割り当てが他の手法と比較して、データ収集率が 0 に近いセンサノードの割合が少ないことを示している。PEBS によって、センサノード間の不足電力量の偏りが抑えられ、全く通信ができないノードの出現が抑制されていることが確認できる。2 つ目は最近傍割り当てはランダム割り当てよりもデータ収集率の小さいセンサノードの割合が大きいということである。この結果から、最近傍割り当てはランダム割り当てよりもセンサノード間でのデータ収集率の偏りが大きいと言える。最近傍割り当てでは供給電力の極端な偏りが起こる可能性があるため、ランダム割り当てよりも最近傍割り当ての方がセンサノード間のデータ収集率の偏りが大きいのだと考えられる。

#### 4.4.3 全探索による PEBS の評価

PEBS は逐次的にセンサノードのアクセスポイント割り当てを行うため、全ての組み合わせを計算していないという観点で最適な割り当てではない。このような観点から、センサノード間の不足電力の偏りを抑えつつ、不足電力量を最小化する割り当てを全探索で計算する手法である PESB BruteForce と PEBS を比較した。PESB BruteForce では、前提となる衝突回避手法や許容する偏りを表す指標  $\alpha$  は PEBS と同じものを使用する。

図 23 に TD-PEBS と TD-PESB BruteForce データ収集率を比較した結果を示す。横軸

がアクセスポイント数，縦軸がデータ収集率である．図 24 にアクセスポイント数が 8 の時の各センサノードのデータ収集率の累積グラフを示す．図 23，図 24 から，提案手法である TD-PEBS が TD-PESB BruteForce と同程度のデータ収集率を達成する事が分かる．このことから，PEBS の逐次的な割り当てでも十分に意図した通信割り当てが可能ということが確認できる．また，計算量の観点では PEBS の方が優位である．ノードの数を  $N$ ，アクセスポイントの数を  $M$  として計算量を比較すると TD-PESB BruteForce の計算量は  $O(M^N)$  なのに対して，PEBS の計算量は  $O(MN)$  である．

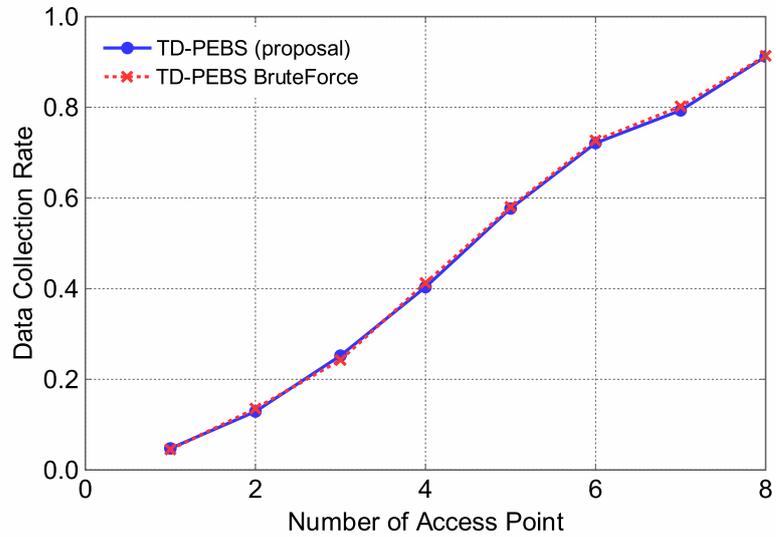


図 23: PEBS と PEBS BruteForce のネットワーク全体のデータ収集率の比較

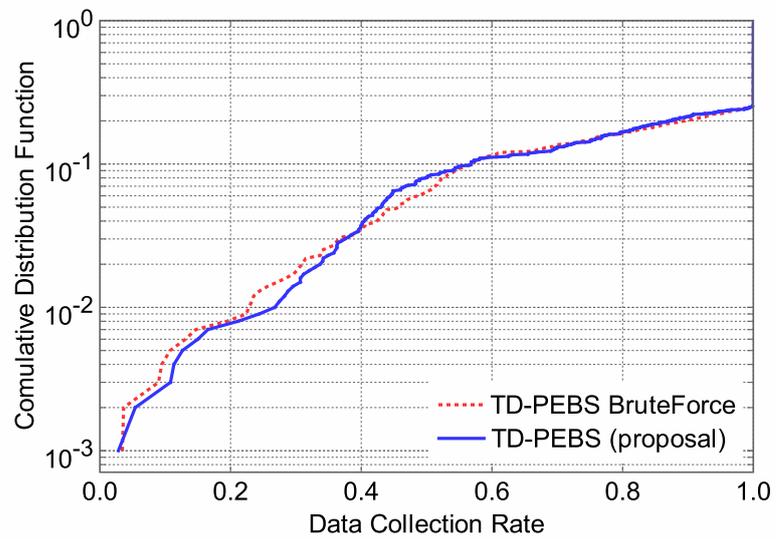


図 24: PEBS と PEBS BruteForce のセンサノードごとのデータ収集率の比較

## 5 結論

第1章では、複数アクセスポイントを用いた無線全二重通信によるデータ電力同時伝送の概要について述べた。センサネットワークにセンサノードを設置する際、大きな制約となるのが電源である。センサネットワークにおける電源の制約を根本的に解決するために、センサノードがバッテリーを必要としない無線センサネットワークへの期待が高まっている。その試みの一つが電波を用いてセンサノードに無線電力伝送を行うというものである。アクセスポイントが意図的に放出する電波によってセンサノードに電力を供給する方法には2つの課題が存在する。1つ目は、現在の日本では、電波資源が枯渇しており、電力伝送用の新たな帯域の確保が困難だということだ。2つ目は、電波は距離減衰の影響が大きいいため、アクセスポイントが電力伝送できる範囲と電力量に制限が存在することだ。これらの問題に対して本研究では、複数アクセスポイントを用いて、全二重通信によるデータ電力同時伝送を行うことで解決を目指す。無線全二重通信の仕組みを用いて1つの帯域でデータと電力の同時伝送を行うことで、電波資源の枯渇問題に対応する。複数アクセスポイントを設置して、アクセスポイント同士が協調して電力伝送を行うことで、電力伝送が可能な範囲と電力量の制限を解消する。センサネットワーク内に複数のアクセスポイント設置して電力伝送を行うことを考えた場合、2つの問題が生じる。1つ目はアクセスポイント間でのセンサデータと電力信号の衝突である。複数のアクセスポイントの設置により、センサノード間だけではなく、アクセスポイント間の信号の衝突も起こる可能性がある。2つ目は、センサノードとアクセスポイントの通信割り当ての問題だ。全二重通信によるデータ電力同時伝送では、センサノードの位置関係やアクセスポイントとの通信割り当てによっては、各センサノードが得られる電力量に大きな偏りが発生する可能性がある。各アクセスポイントの電力伝送時間を調節して電力伝送の効率を高めるために、センサノードとアクセスポイントの通信割り当ての工夫が必要となる。本研究では上記の衝突問題と通信割り当て問題に対して、複数アクセスポイントを用いたデータ電力伝送手法を提案する。集中制御を用いて衝突を回避した上で、電力推定に基づいて通信割り当てを行う手法を提案した。

第2章では、まず、バッテリーを必要としない無線センサネットワークにおける電力供給の手法について述べるとともに、本研究で用いる電波による電力伝送について述べた。その後、全二重通信の仕組みを用いてデータ電力同時伝送を行う方法について示した。続いて、全二重通信の仕組みを用いてデータ電力同時伝送を行う際のメディアアクセス手法について、FD-SWIPT TDMA(Full Duplex Simultaneously Wireless Information and Power transfer)とP-CSMA/CA(Power-CSMA/CA)について述べるとともに、単一アクセスポイントを用いた全二重通信によるデータ電力同時伝送の課題について述べた。最後に、複数アクセスポイントを用いた無線全二重通信によるデータ電力同時伝送の課題点について述べた。

第3章では、複数アクセスポイントを用いた無線全二重通信によるデータ電力同時伝送手法について提案した。まず、想定するネットワークモデルについて述べた。次に、集中制御によって電力信号とセンサデータの衝突を回避する方法について述べた。最後に、電力推定に基づいてセンサノード間の蓄電量の偏りを抑える通信割り当て手法について述べた。

第4章では、機器内無線センサネットワークを想定して、データ収集率の評価を行った。まず、衝突回避手法の相対的な評価のために、半二重通信を用いて時分割でデータ電力同時伝送を行う HD-SWIPT TDMA(Half Duplex Simultaneously Wireless Information and Power transfer) と、複数のアクセスポイント環境に拡張した P-CSMA とネットワーク全体のデータ収集率の比較を行った。次に、通信割り当て手法の相対的な評価のために、各センサノードが最も近いアクセスポイントと通信を行う最近傍割り当て、各センサノードがランダムに通信アクセスポイントを決定するランダム割り当てとネットワーク全体のデータ収集率、センサノードごとのデータ収集率の比較を行った。最後に、PEBS が意図した割り当てを行うことができるのかについて、センサノード間の不足電力の偏りを抑えつつ、不足電力量を最小化する割り当てを全探索で計算する手法と比較することで評価した。評価の結果、アクセスポイントを複数置くことで、データ収集率の大きな改善を確認できた。提案手法は HD-SWIPT TDMA よりも 30%データ収集率を改善しており、全二重通信を用いることの有用性を確認できた。提案手法はアクセスポイント数が少ないときは、分散手法の P-CSMA/CA よりも有効ではない。これ供給電力量が少ないときは制御フレームオーバーヘッドの影響が大きいからだと考えられる。アクセスポイント数が多い場合、提案手法は P-CSMA/CA よりも有効な手法である。このことから、提案手法がアクセスポイントの設置数が多い場合に、有用であることが確認できた。提案する PEBS は他の通信割り当て手法よりもネットワーク全体のデータ収集率を改善している。この結果から、PEBS が蓄電量の極端な偏りを抑えることで、無駄のない電力伝送を行えていることが確認できる。また、PEBS を含む3つの通信割り当て手法に対して、センサノードごとのデータ収集率を評価したところ、提案手法がデータ収集率の極端に悪いノードを抑制できていることが分かった。逐次的な割り当てを行う PEBS と、PEBS の割り当てを全探索で行う PEBS BruteForce を比較した結果、PEBS が全探索に近い精度で通信割り当てを行えていることが確認できた。

今後の課題として、無線電力伝送の伝送量の実験、アクセスポイントの消費電力を考慮した制御手法の検討が挙げられる。無線電力伝送の伝送効率は、周囲の環境によって異なる。例えば、機器内センサネットワークでは周囲が金属で囲われているために伝送効率は高くなる。実際に電力伝送可能な実数値を用いて評価を行うことで、より詳しい評価を行うことが可能だと考える。現在の提案手法はアクセスポイントの消費電力を考慮していない。提案手法では、たとえ全てのセンサノードに十分な電力が供給できる場合でも、すべてのアクセスポイントはできる限り電力信号を送信する。しかしながら、無線センサネットワークの制約によっ

ては、アクセスポイントが使用可能な電力量に制限があることや、無線センサネットワーク全体の消費電力量を抑えたいという要求が存在する。このような観点から、アクセスポイントの消費電量を考慮した制御手法の検討が必要である。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、種々の御指導、御鞭撻を賜りました大阪大学大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻 村田正幸 教授に心より感謝の意を表して、衷心より厚く御礼申し上げます。

本研究、および本論文の全過程を通して、大阪大学大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻 渡辺尚 教授には多大なる御指導、御鞭撻を賜りました。感謝の意を表すとともに、心より厚く御礼申しあげます。

本研究の全過程を通して大阪大学大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻の 猿渡俊介 准教授には絶えず有益な御助言、御討論、御鞭撻を戴きました。ここに深く感謝申し上げます。

また、本研究にあたり多大な御助言や御指導を戴きました大阪大学大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻の 廣田悠介 助教に謹んで深謝の意を捧げます。

平素から適切な御助言や御指導を戴きました大阪大学大学院情報科学研究科の 荒川 伸一 准教授， 大下裕一 助教， 大阪大学大学院経済学研究科の 小南 大智 助教に厚く御礼申し上げます。

本研究にあたり日頃から御討論、御協力を戴きました 小林 真 氏， 村上 遼 氏をはじめとする渡辺研究室の諸氏に心より感謝の意を表します。

本研究活動において、公私に渡り種々の面でお世話になった村田研究室の諸氏に深く感謝の意を表します。

最後になりましたが、ここに至るまでの間、私を見守り、支え続けてくださった家族と、両親に心より感謝いたします。ありがとうございました。

ここに記しまして、以上の方々に深甚なる感謝の意を捧げます。

## 参考文献

- [1] 猿渡俊介, 森川博之, “ユビキタスセンサネットワーク,” 日本ロボット学会誌, vol. 28, no. 3, pp. 284–287, 2010.
- [2] S. Kim, R. Vyas, J. Bitto, K. Niotaki, A. Collado, A. Georgiadis, and M. M. Tentzeris, “Ambient RF energy-harvesting technologies for self-sustainable standalone wireless sensor platforms,” in *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, pp. 1649–1666, 2014.
- [3] D. Bouchouicha, F. Dupont, M. Latrach, and L. Ventura, “Ambient RF energy harvesting,” in *Proceedings of International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPPQ'14)*, pp. 1–4, 2010.
- [4] N. Shinohara and T. Ichihara, “Coexistence of wireless power transfer via microwaves and wireless communication for battery-less ZigBee sensors,” in *Proceedings of International Symposium on Electromagnetic Compatibility (IEEE EMC'14)*, pp. 445–448, 2014.
- [5] K. Yamazaki, Y. Sugiyama, Y. Kawahara, S. Saruwatari, and T. Watanabe, “Preliminary evaluation of simultaneous data and power transmission in the same frequency channel,” in *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE WCNC'14)*, pp. 1237–1242, 2015.
- [6] 猿渡俊介, 小寺志保, 成末義哲, 川原圭博, 渡辺尚, “無線全二重通信によるデータと電力同時伝送のためのメディアアクセス制御方式,” 情報処理学会研究報告, vol. 2015-CDS-14, no. 7, pp. 1–8, 2015.
- [7] H. J. Visser and R. J. Vullers, “RF energy harvesting and transport for wireless sensor network applications: Principles and requirements,” in *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, pp. 1410–1423, 2013.
- [8] K. Kuroki, S. Kodera, N. Kurata, T. Hamamoto, and S. Saruwatari, “Poster: Data-centric task scheduling for battleship island monitoring,” in *Proceedings of the 13th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (ACM SenSys'15)*, pp. 417–418, 2015.

- [9] M. Minami, T. Morito, H. Morikawa, and T. Aoyama, “Solar biscuit: A battery-less wireless sensor network system for environmental monitoring applications,” in *Proceedings of The 2nd international workshop on networked sensing systems*, 2005.
- [10] H. Nishimoto, Y. Kawahara, and T. Asami, “Prototype implementation of ambient RF energy harvesting wireless sensor networks,” in *Proceedings of Sensors, 2010 IEEE*, pp. 1282–1287, IEEE, 2010.
- [11] M. Piñuela, P. D. Mitcheson, and S. Lucyszyn, “Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments,” in *Proceedings of IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, pp. 2715–2726, 2013.
- [12] Y. Kawahara, X. Bian, R. Shigeta, R. Vyas, M. M. Tentzeris, and T. Asami, “Power harvesting from microwave oven electromagnetic leakage,” in *Proceedings of the 2013 ACM international joint conference on Pervasive and ubiquitous computing (ACM Ubicomp’17)*, pp. 373–382, 2013.
- [13] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of wireless communication*. Cambridge university press, 2005.
- [14] M. Jain, J. I. Choi, T. Kim, D. Bharadia, S. Seth, K. Srinivasan, P. Levis, S. Katti, and P. Sinha, “Practical, real-time, full duplex wireless,” in *Proceedings of the 17th annual international conference on Mobile computing and networking (ACM MobiCom’11)*, pp. 301–312, 2011.
- [15] *ARIB STD-T71 6.1版*, 2016. [http://www.arib.or.jp/tyosakenkyu/kikaku\\_sample/sample-std-t71-6.1.pdf](http://www.arib.or.jp/tyosakenkyu/kikaku_sample/sample-std-t71-6.1.pdf)  
2017/02/3 アクセス.
- [16] 伴弘司, 北沢祥一, 小林聖, “省資源・省エネに有用なワイヤレスハーネス技術,” *電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン*, vol. 7, no. 1, pp. 25–32, 2013.
- [17] *IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks*, 2015.  
<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2015.pdf>  
2017/02/3 アクセス.
- [18] *2.4GHz IEEE 802.15.4/ZigBee-ready RF Transceiver*, 2013.  
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>  
2017/01/30 アクセス.