

## エネルギーハーベスティング WSN における 電力管理手法が通信特性に与える影響の検討

宮坂 拓也<sup>†1</sup> 川原 圭博<sup>†1</sup> 浅見 徹<sup>†1</sup>

環境からの再生エネルギーを用いることで、より永続的な動作を実現するエネルギーハーベスティング WSN では、その電力管理手法は、単体ノードが環境から得るエネルギーを最大限活用しつつ、通信ネットワークとしての性能を最大限に発揮するものでなければならない。ところが、従来の電力管理手法ではノード間の通信に非同期 MAC プロトコルを用いることが多く送信側の待ち時間が増加し、ネットワークにおける通信に悪影響を与えていた。本稿では、電力管理手法が通信特性に与える影響を評価することで、同期型 MAC である DSMAC を適用可能な電力管理手法を提案する。シミュレーションにより既存の電力管理手法との比較を行い、本提案手法は一定な送信レートを保ちながら、獲得電力が 4mW より小さいときに遅延時間を短くできる。

### An Impact of Power Management Method for Energy Harvesting WSN on Communication Characteristic

TAKUYA MIYASAKA,<sup>†1</sup> YOSHIHIRO KAWAHARA<sup>†1</sup>  
and TOHRU ASAMI<sup>†1</sup>

For energy harvesting wireless sensor networks that aims at perpetual operation using recycle energy from ambient environment, the power management method should fully utilize the ambient power and maximize the performance as a network. However existing power management methods for energy harvesting WSN negatively affect communication between sensor nodes because these methods rely on asynchronous MAC to communicate. To tackle this problem, we propose a new power management method for synchronous MAC. We compare our proposed method with a existing method by simulation and show that our proposed method can keep constant transmission rate and shorten delay in the case of low harvested power (less than 4mW).

#### 1. はじめに

無線センサネットワーク (WSN) は、環境モニタリング、防災、農業、軍事など幅広い分野への応用が期待されている。WSN では広範囲にセンサノードを配置するという利用形態から、センサノードの電力源はバッテリーを用いることを前提としている。そのため、これまでの WSN に関する多くの研究は限られたエネルギーをいかに効率的に使いネットワーク全体のパフォーマンスを向上させ、ネットワークの運用可能時間を延ばすということに重点が置かれてきた。しかし、いかに効率を最適化したとしてもノードに搭載する電力量には限りがあるためネットワークの運用可能時間には限界がある。これに対して、ノードがバッテリーを使い果たした場合は人間によってバッテリーを交換するか、そのまま環境の中に捨てられ新たなノードを投下するという2通りの戦略が考えられる。しかし、両者ともコスト的な観点からあまり望ましいとは言えない。そこで、太陽光発電など環境からの再生エネルギーを利用してノードを駆動させることにより、ネットワークの運用可能時間を飛躍的に延ばす、エネルギーハーベスティング WSN (EHWSN) への取り組みが近年注目されている。環境から得られる電力は通常のノードを終始起動させるには少ないことがほとんどであるため、ノードはスリープ状態とアクティブ状態を繰り返す間欠動作を行う必要がある。

EHWSN では、この間欠動作戦略がパケット遅延といったネットワーク全体の性能を決定する要因となる。このような間欠動作は従来のバッテリー駆動 WSN においても省電力型の MAC プロトコルで採用されていたが、その戦略が大きく異なる。通常のバッテリー駆動の WSN では、既に与えられたエネルギーをいかに節約し、系として長寿命化を計ることが「最適」な考え方となり、エネルギーを使い果たさない限りはいつでも好きな時に好きなだけアクティブ状態になることが可能である。しかし EHWSN は、ある周期内で環境から得られたエネルギーを最大限使いいきることがそのノードにとって「最適」な動作となる。また、それぞれのノードのエネルギー獲得状況が異なるため、他のノードの都合に合わせて「起きたいときに起きる」といったこともままならないこともある。

この両者の考え方の違いは必ずしも相容れず、単純な組み合わせでは、それぞれの「最適」さが失われ、パケットの遅延時間等のネットワーク全体の通信特性が影響を受ける。たとえば、各ノードでアクティブ時間を最大とする考え方のもとでは、その間欠動作周期は各ノード

<sup>†1</sup> 東京大学  
The University of Tokyo

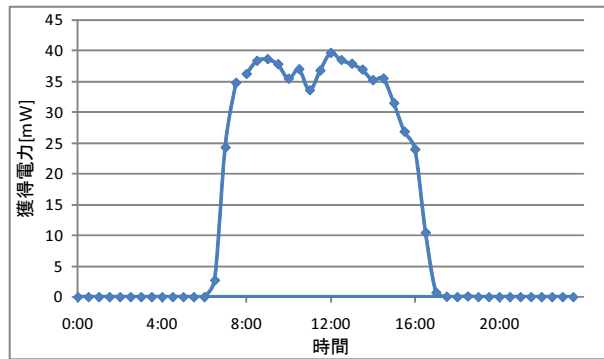


図1 太陽光発電の獲得電力  
Fig.1 Harvested Power by Solar

ドの局所的な情報のみを用いて決定されるために他の同様のノードと同時にアクティブとなり通信を行えることを担保しない。したがって異なる時間、異なるノードにおいてノードのアクティブ時間は異なり、他のノードと同期した通信は制限される。そのため、EHWSNでは送信ノードが受信ノードがアクティブとなるまで待つ非同期なMACを用いて通信を行うことが多い<sup>1)</sup>。しかし、曇天時の太陽光発電などのように獲得電力が小さい時にはノードのスリープ時間が長くなるため、送信側が待つ時間が増加し、無駄な消費電力が増加してしまう。つまり、特に獲得電力が小さくなるにつれて既存の電力管理手法では効率が悪くなってしまい、待ち時間が発生するため通信遅延も増加する。センシングしたパケットを低遅延で転送するネットワークを構築するためには、アクティブ時間を最大化させるだけでなくノード間で同期を取りやすい間欠動作を構築することに重点を置く必要がある。

本稿では、電力管理手法が通信特性に与える影響の検討を評価して、両者の調和をとるための方式を提案する。具体的には、S-MACに代表される同期型のMACプロトコルを用いることができるように、全ノードにおいてアクティブ間隔を一定にしながら獲得電力に合わせた電力管理手法を示す<sup>2)</sup>。また、シミュレーションにより既存の電力管理手法との比較を行い、本提案手法は一定な送信レートを保ちながら、獲得電力が4mWより小さいときに遅延時間を短くできることを明らかにする。

本稿の構成は以下のようになっている。第2節では、EHWSNにおける電力管理手法と既存のWSNにおけるMACを紹介し、問題点を述べ、第3節では、その問題を解決するために同期型MACのための電力管理手法について述べ、第4節では、既存の電力管理手

法との比較のためのシミュレーションとその結果について述べ、第5節で本稿をまとめる。

## 2. 関連研究

本章では関連研究としてEHWSNにおける電力管理手法と既存のWSNにおけるMAC手法について述べ、既存の電力管理手法の問題点を指摘する。

### 2.1 電力管理手法

EHWSNにおける電力管理手法とは、エネルギーハーベストによる獲得電力を“いつ”“どれくらい”ノードが消費すれば、全体のパフォーマンスが最適化されるのか、という問題を解決するものである。その結果により任意の時間のノードにおけるアクティブとスリープを繰り返す間欠動作におけるアクティブ期間の比(デューティサイクル比)が決定される。

この問題の難しさの一因はバッテリーと異なるエネルギーハーベスティングの獲得電力量の特性にある。図1は11月に東京大学構内で実験した太陽光発電の獲得電力の時間変動を表している。また、時間変動だけではなく場所や測定日時によっても獲得電力は変化してしまう。このような特性をもつエネルギー源に対して上の問題を解かなければならない。

そのような手法としては、バッテリー残量を一定に制御するように適応制御を用いデューティサイクル比を決定する手法<sup>3)</sup>、受信、送信動作を一定時間行った後に、バッテリーを完全に充電するまでスリープするというサイクルを繰り返す手法<sup>4)</sup>などがある。

また、Kansalらは1日を $\Delta T$ (彼らのシミュレーションでは30分としていた)の間隔のスロットに分け離散化(全体が1日の場合48個のスロット)させ、未来の獲得電力を推測し各スロットの最適なデューティサイクル比 $D(i)$ を以下の線形計画問題から求めた<sup>1)</sup>。

Kansal 手法

$$\max \sum_{i=1}^{N_w} D(i) \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{N_w} P_s(i) = \sum_{i \in D} D(i) \left[ \frac{P_c}{\eta} + P_s(i) \left( 1 - \frac{1}{\eta} \right) \right] + \sum_{i \in S} P_c D(i) \quad (2)$$

$$D_{min} \leq D(i) \leq D_{max} \quad \forall i \in \{1, \dots, N_w\} \quad (3)$$

$D(i)$ はスロット*i*におけるデューティサイクル比、 $N_w$ は全スロット数、 $P_c$ はアクティブ時の消費電力であり定数、 $P_s(i)$ はスロット*i*において予想される獲得電力量であり、このスロット内では一定という仮定、 $\eta$ はバッテリーの充放電時における効率、 $D_{min}$ と $D_{max}$ はアプリケー

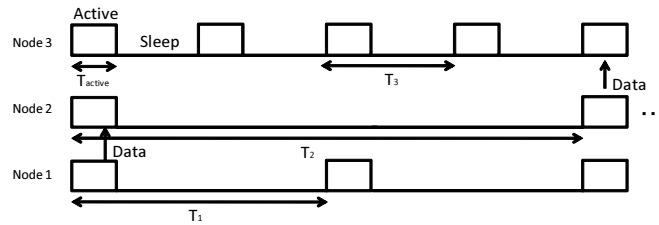


図 2 同期型 MAC(DSMAC)  
Fig. 2 Synchronous MAC(DSMAC)

ションが要求するデューティサイクル比の最小値と最大値であり、 $S = \{i | P_s(i) - P_c(i) \geq 0\}$   $D = \{i | P_s(i) - P_c(i)\}$  である、つまり  $S$  は再生電力の方が消費電力より大きくなっているスロットの集合ということである、 $D$  も同様。式 (1) が最適化問題であり、デューティサイクルの各スロットの合計値を最大にする。式 (2) が永続的な動作の制約条件であり、左辺が全体で獲得できるエネルギー量、右辺第 1 項が獲得電力が小さい時の充放電時のロス分も含めた消費エネルギー、第 2 項は獲得電力が大きい時の消費エネルギーを表わす。また、未来の再生電力量の推定は指数加重移動平均を用いた。この線形計画問題をノードに搭載するのに実用的なアルゴリズムを用いて解いた<sup>1)</sup>。

また、特定のイベントの検知に特化したものとして以下のものが提案されている。ネットワーク内のアクティブ状態にあるノード数を一定数超えないように調整することによってランダムに発生するイベントの検知率を理論最適値の 3/4 まで高める手法<sup>5)</sup> や、連続して発生するイベントの検知に特化した手法<sup>6)</sup> などがある。

## 2.2 MAC

WSN におけるメディアアクセス制御 (MAC) 手法は通信を行いつつに省電力にできるのかという観点で設計されてきた。そのような手法は大きく分けて同期型と非同期型に区別できる<sup>7)</sup>。

同期型の MAC では間欠動作におけるアクティブ期間を同期させその間で CSMA/CA により通信する S-MAC<sup>8)</sup>、S-MAC の拡張であるアクティブ間隔を適応的に変更できる DSMAC<sup>9)</sup>、ネットワークをクラスタに分け、各クラスタ内で TDMA によりスケジュールを決定する LEACH<sup>10)</sup> などがある。

図 2 は DSMAC の動作例を表している。図のように、通常の S-MAC では全ノードのアクティブ間隔は一定であるのに対して、DSMAC では各ノードの負荷などに合わせて動的

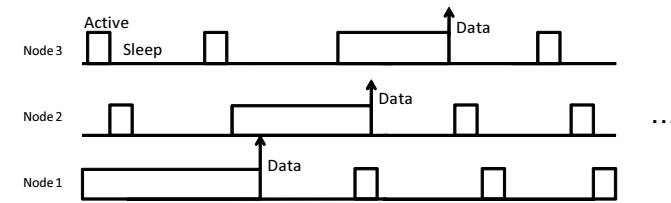


図 3 非同期型 MAC  
Fig. 3 Asynchronous MAC

にアクティブ間隔を調整することができる。しかし完全に自由に決定できるわけではなく、ノード間のアクティブ間隔の比は  $2^k (k = 0, 1, \dots)$  とならなければならない。図 2 の場合ノード 1 と 2 の間隔の比は 2 で、2 と 3 の比は 4 となっている。この理由は、このような比を満たした場合 1 度同期すれば、それぞれのアクティブ間隔の最小公倍数は必ず大きい方のアクティブ間隔となるため次のアクティブ時に同期がしやすくなるためである。実際の同期の取り方は S-MAC、DSMAC ではアクティブ期間を 2 つのフェーズに分け、前半のフェーズにおいて同期の調整を行い残りの時間にデータの通信を行っている。

非同期型の MAC では RICER<sup>11)</sup>、X-MAC<sup>12)</sup> などの手法がある。共通して言えることは、図 3 のように送信ノードは受信ノードがアクティブになるまで待機し、その後データの送信を開始することにある。つまり、送信ノードは受信ノードがアクティブになったことを検知するために受信デバイスを常に起動させないといけないため、送信側に負担がかかる。

受信ノードがアクティブであることを確認せずに送信を試み、もし相手ノードがアクティブであれば伝送するという図 4 のような確率的な配送を行う手法<sup>13)</sup> もある。このような手法では、送信側は待機時間がないため負担はなく実装も単純であるが、受信相手が同時にアクティブになり通信が確立する確率はノードのアクティブ間隔が長くなるにつれて小さくなるため、獲得電力の小さい EHWSN においては大きな遅延時間が発生する<sup>14)</sup>。

## 2.3 既存電力管理手法の問題点

獲得電力に合わせた既存の電力管理手法では異なる時間、異なる場所 (ノード) においては獲得電力量が異なるため、アクティブ間隔はばらばらになる。そのような状況で図 2 のような時間内で一定なアクティブ間隔が求められる S-MAC や DSMAC のような同期型の MAC は用いることができない。そのため、図 3 のような RICER、X-MAC などの非同期型の MAC を用いるか、図 4 のような確率的な配送<sup>13)</sup> を用いて通信を行うことが多い<sup>1)</sup>。

しかし RICER、X-MAC などの場合、曇天時の太陽光発電のように獲得電力が小さ

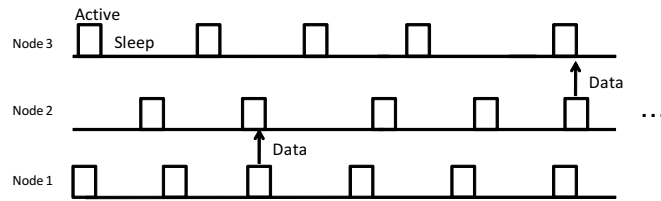


図 4 確率的配送  
Fig. 4 Probabilistic Transfer

い時には、管理手法により小さな獲得電力に合わせるためにノードのスリープ時間が長くなり、送信側が待つ時間が増加するため、無駄な消費電力が増加する。つまり、獲得電力が小さくなるにつれて既存の電力管理手法では効率が悪くなり、パケット伝送の遅延も増加する。最悪の場合、送信ノードが待機中に全てのバッテリーを使い果たし、エネルギーが空になることも考えられる。

確率的な配送<sup>13)</sup> の場合は獲得電力が小さくなると、通信が成功する確率が減少するため同様にパケットの伝送の遅延時間が大きくなる。例えば、 $600\mu\text{W}$  の獲得電力の場合確率的に配送した場合、9 ホップ経由するのに数日かかる<sup>14)</sup>。

このように、既存の電力管理手法は非同期な MAC に依存する設計であるが、EHWSN において非同期な MAC は送信側の無駄な消費電力が特に大きくなり、ノードからの AP までの遅延増大やエネルギーの枯渇という問題が発生する。そのため、獲得電力が少なくなるにつれて既存の電力管理手法が遅延時間等のネットワーク全体の通信特性への悪影響が増加することが予想される。

その問題を解決させるためには送信側の待ち時間を減らすために図 2 のような同期的な MAC を用いる必要がある。しかし、上記の通り既存の電力管理手法ではそのような MAC を用いるのは難しいため、我々は同期型の MAC を容易に使えるような電力管理手法を提案する。

### 3. 同期型 MAC のための電力管理手法

2.3 節で述べた問題を解決するために、本章では S-MAC, DSMAC を代表とする同期型の MAC を実行しながら、得られる電力に合わせた間欠動作を行う電力管理手法を示す。

#### 3.1 想定と要件

はじめに、本提案手法では以下の 3 点を想定している。

#### 想定

- (1) 得られるエネルギーは周期的であり、周期を  $T[\text{sec}]$  とし、各ノードは次周期の獲得電力量を  $E_{\text{next}}[\text{J}]$  と推測できる。
- (2) ノードのアクティブ時間長  $T_{\text{active}}[\text{sec}]$  はパケット長など、アプリケーションの特性により一意に定められ、全ノードで等しい。
- (3) 全ノードは最小アクティブ間隔  $T_{\text{min}}[\text{sec}]$  を共有する。

1 番目の想定については、例えば太陽光の場合、 $T$  は約 1 日であり、予想手法にも多くの研究が存在する<sup>1)</sup>。3 番目の想定については、実際にセンサノードを配置する時に初期設定としてくことで容易に実現可能である。

以上の想定の下で、図 2 のような同期型の MAC 動作を実現させるためには、ノード  $N_i (i = 1, 2, \dots, N)$  のアクティブ間隔  $T_i[\text{sec}]$  には以下の要件が求められる。

#### 要件

- (1)  $T_i$  は周期内で一定。
- (2)  $T_i$  は  $k$  を 0 以上の整数とし、 $T_{\text{min}}$  の  $2^k$  倍である。

2 番目の要件は図 2 のように、全ノード間の間隔の比を  $2^k$  倍にするためである。このように全ノードで最小アクティブ間隔  $T_{\text{min}}$  を定めておき、それを元に全ノードの間隔の比を図 2 のように調整できることにより、ノード間で各々の情報をやり取りせずに間隔の調整が可能である。もしこのような仕組みを用いなければ、全ノード間でアクティブ間隔等の情報をフラッディングするか、中央集権的に AP が間隔を調整する必要があるためスケーラビリティが悪くなってしまふ。つまり、各ノードはその他のノードの状態を知らずにスケーラブルで分散的な電力管理手法が可能であることが本提案手法の特徴でもある。以上の要件を満たすような各ノード  $T_i$  の導出の方法を次節にて述べていく。

#### 3.2 同期型 MAC のための電力管理手法

図 5 は我々が提案するエネルギー管理手法の手順の概要図であり、ネットワーク内に 1 から 4 のノードが存在する状態である。はじめに管理手法の実行に必要な各種パラメータについて説明する。

$E_{\text{active}}[\text{J}]$  はノードが 1 回のアクティブ間隔 ( $T_{\text{active}}$ ) において消費するエネルギーとする。ノードのアクティブ時の消費電力を  $W_{\text{active}}[\text{W}]$  とすれば、 $E_{\text{active}} = W_{\text{active}} \times T_{\text{active}}$  であ

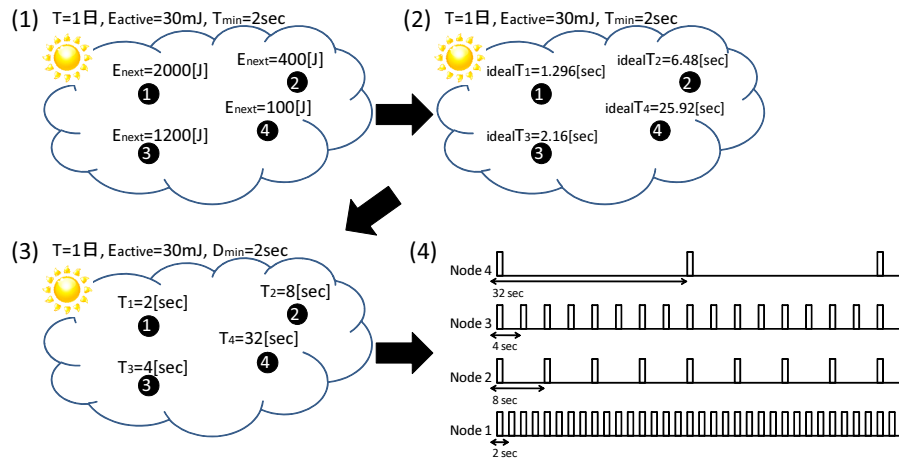


図 5 同期型 MAC のための電力管理手法の概要  
Fig. 5 Concept of Power Management Method for Synchronous MAC

る．図 5 では簡略化のために全てのノードの  $E_{active}$  は等しいものとしているが、各ノードで異なる場合も全く問題ではない．また、想定 3 番目である全ノードで共有される最小アクティブ間隔  $T_{min}$  は

$$T_{min} = 2 \times T_{active} \quad (4)$$

とする．これは最小間隔では  $T_{active}$  だけスリープすることを意味する．本提案では上式のようにしてあるが、3.1 節で述べたように  $T_{min}$  は全ノードで統一してアクティブ間隔の調整を簡単にするためのものなので、この値を変えても動作は可能である．また、図 5 では太陽光をイメージしているため獲得電力の周期は  $T = 1[\text{日}]$  とした．

次に前節の要件をみたく  $T_i$  を求める手順についての説明を行う．手順は図 5 のように (1) から (4) に分かれる．

図 5(1) では各ノードが次の周期 (この例では次の 1 日) の獲得電力  $E_{next}$  の予想を行う．3.1 節でも述べたように獲得電力の予想については先行研究も多くあるため、本稿では予想はできているものと想定して進める．

図 5(2) では各ノード  $N_i$  が予想獲得電力  $E_{next}$  を全て使い切る理想的な場合の周期内で一定なアクティブ間隔  $idealT_i[\text{sec}]$  を求める．周期  $T$  内で  $\frac{T}{idealT_i}$  回アクティブ状態になるため、完全に電力を使う場合  $idealT_i$  は以下の式を満たす．

$$E_{next} = \frac{T}{idealT_i} \times E_{active} \quad (5)$$

よって、 $idealT_i$  は、

$$idealT_i = \frac{T \times E_{active}}{E_{next}} \quad (6)$$

となる．この値は要件の 1 を満たす一定な  $T_i$  における最大値ではあるが、このままでは要件の 2 を満たしていない．

図 5(3) では要件の 2 を満たすように、各ノードの  $T_i$  を  $T_{min}$  を用い以下のように調整する．

$$T_i = T_{min} \times 2^k \quad (7)$$

ただし、 $k$  は以下の式を満たす 0 以上の整数である．

$$2^{k-1} \times T_{min} \leq idealT_i \leq 2^k \times T_{min} \quad (8)$$

つまり、 $idealT_i$  に最も近く、かつ要件の 2 番目を満たすものをアクティブ間隔  $T_i$  とする．各ノードにおいて上記のように分散的に得られた  $T_i$  を用いて間欠動作をすることにより、獲得電力に合わせながら図 5(4) のような同期的な動作を実現することができる．

その一方で、式 (7),(8) において実際に用いる  $T_i$  は獲得電力を完全に使う  $idealT_i$  に比べて大きくなるため、ノードが利用するエネルギーは少なくなり周期内で  $\Delta E[J]$  だけ余ってしまう． $\Delta E$  は

$$\Delta E = T \times E_{active} \times \left( \frac{1}{T_i} - \frac{1}{idealT_i} \right) \quad (9)$$

と表される．

#### 4. シミュレーションによる評価

本章では 3 章にて提案した手法と既存手法との比較をシミュレーションによって行う．

##### 4.1 シミュレーション環境と比較方法

まず、提案手法との比較対象としては、A. Kansal らの予想獲得電力とバッテリーの効率を元に線形計画問題を解くことにより 30 分毎のデューティサイクル比を求め最適な間欠動作を決定する手法<sup>1)</sup>とした．これらの手法では 2.3 節で述べたように図 3 の非同期型の MAC を用いて通信を行うようにした．提案手法については、DSMAC を用いて通信を行う

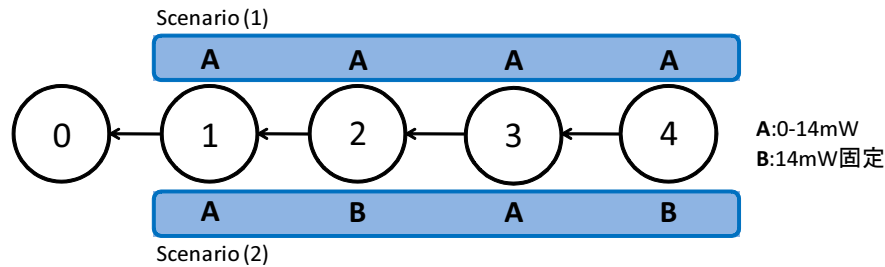


図 6 シミュレーション概要  
Fig. 6 Concept of Simulation

表 1 シミュレーション各種値  
Table 1 Simulation Parameters

変数名	値
シミュレーション時間	1 日
$T_{active}$	2sec
$W_{active}$	30mW
バッテリー効率	70%
最大デューティサイクル比	0.5
最小デューティサイクル比	0.01
同期ずれ確率	2%

ことを想定している。

シミュレーションにおけるノード配置は図 6 のように 5 ノードを直線状に並べ、右端のノードから左端へパケットを送信しシンクノードであるノード 0 にパケットが到着した時に遅延時間を測定し、その後再び右端のノード 4 からパケットを送信するということを 1 日間繰り返し、1 日間の平均遅延時間を測定した。このような測定をノードの獲得電力量を変更させながら繰り返し実行した。また、今回のシミュレーションでは複数のノード間の遅延の比較が目的であるため、ノードのトポロジーは単純に直線状にしたが、グリッド状やツリー状にした場合も同様な結果が得られる。

各ノードのエネルギー源としては図 1 のような太陽光発電のタイプを想定しており、各ノードの状態について図 6 にある 2 つのシナリオを考えた。各ノードの上下についている A と B は測定毎に獲得電力を変化させていくかどうかを表し、A では平均獲得電力を 0mW から 14mW まで変化させていく、B では測定毎に変化させずに常に図 1 のモデル (平均獲得

電力 14mW) を用いる。獲得電力を変化させる一例として図 9 は平均獲得電力量が 4.2mW の場合の獲得電力の時間による変化の様子を表している。図 9 のように獲得電力の変化は図 1 の標準モデル (平均獲得電力 14mW) に対して相似的に減少させる。

各シナリオの状態は以下のようにになっている。

シナリオ 1

シナリオ 1 では全てのノードにおいて等しく平均獲得電力を変更させながら 1 日間の平均遅延を測定し、両手法を比較する。例えば、図 9 を用いるならば、全ノードがこのモデルを用い、平均獲得電力が 4.2mW となっている。

シナリオ 2

それに対してシナリオ 2 は半分のノードは常に図 1 のモデルを用いるため隣り合うノード間で平均獲得電力にばらつきがある状態である。ノード 2,4 では獲得電力モデルは変化させずに図 1 を用い、残りのノードについてはシナリオ 1 と同様に変化させながら 1 日間の平均遅延を測定し、両手法を比較する。

シミュレーションの数値は表 1 のように設定した。最大、最小デューティサイクル比は A. Kansal らの手法に必要なパラメータであり、ノードにデューティサイクル比を割り当てる時の最大値と最小値である。クロックのドリフト等による同期ずれの確率も同様に表のように定めた。以上の環境にてシミュレーションによる評価を行った。

4.2 結果

4.2.1 シナリオ 1

はじめに、全てのノードの獲得電力を等しく変化させていくシナリオ 1 の両手法の遅延時間は図 7 のようになった。計測が途中 (1.4mW) から始まっているのはそれ以下では Kansal 手法において全ノードが最小のデューティサイクル比としたとしても、ノードの消費電力が獲得電力より大きくなってしまい、動作が不可能であるためであるが、それ以下でも同様の傾向が見られると思われる。図から、獲得電力が大きいときは既存手法である Kansal 手法のほうが遅延時間は短い、獲得電力が小さい場合に 2.3 節で述べたように提案手法のほうが遅延時間が短くなることがわかる。

図 8 はシナリオ 1 において平均獲得電力量が 4.2mW のとき (そのときの獲得電力の時間変動の様子は図 9) のシンクノード (ノード 0) に到着した総パケット数の時間 (シミュレーション開始時刻を 0 秒とした) による増加の様子を表している。この図から、提案手法では

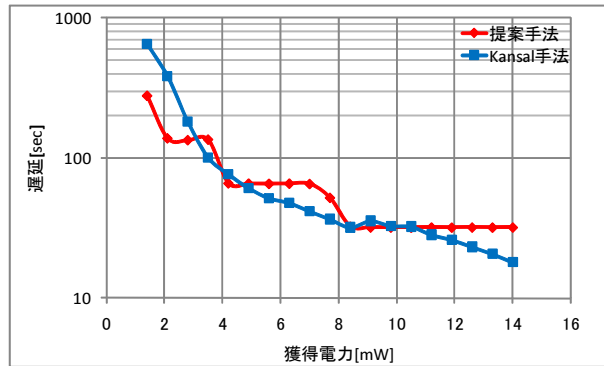


図 7 シナリオ 1 の結果  
Fig. 7 Result of Scenario 1

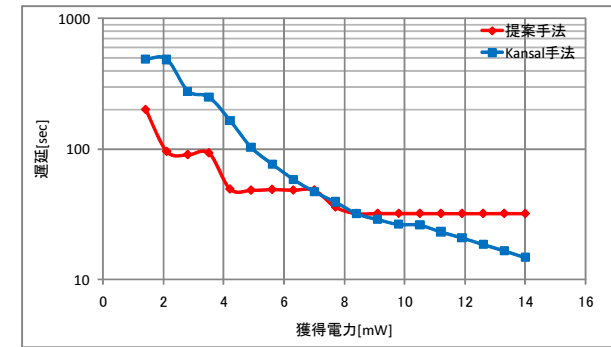


図 10 シナリオ 2 の結果  
Fig. 10 Result of Scenario 2

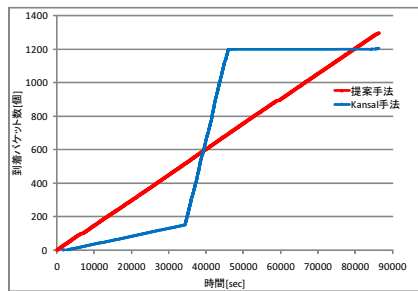


図 8 到着パケット数 (シナリオ 1)  
Fig. 8 The Number of Arrival Packets (Scenario 1)

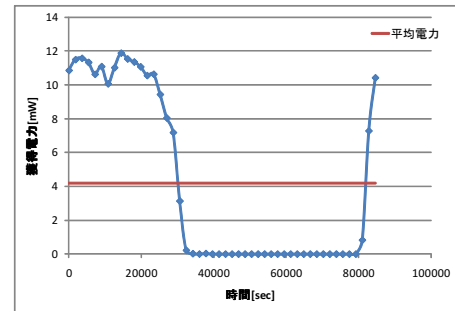


図 9 獲得電力モデルの一例 (平均獲得電力 4.2mW)  
Fig. 9 An Example of Harvested Power Model (Average Harvested Power 4.2mW)

一定のレートで送信が可能であることがわかる。それに比べ、Kansal 手法ではある一定の時間 (約 34000 秒後から 46000 秒後) では到着パケットのレートが高くなっており、それ以降ではほぼ到着していないことがわかる。これは図 9 のような太陽光発電のモデルを用いたために、夜間の獲得電力が 0 の間にデューティサイクル比が小さくなってしまったためだと考えられる。この図において両手法を比べると、本提案手法では安定した送信レートを維持できるという利点があることがわかる。

#### 4.2.2 シナリオ 2

半分のノードのみ獲得電力を変化させていく隣接ノード間で獲得電力にばらつきのあるシナリオ 2 の両手法の遅延時間は図 10 のようになった。こちらについても同様に半分のノードの獲得電力が少なくなるにつれて提案手法は Kansal 手法に比べて遅延時間が短くなる。しかし、シナリオ 1 と比べ獲得電力が少ない領域においてシナリオ 2 のほうが提案手法が Kansal 手法に比べ遅延時間がより短くなっていることがわかる。これは、図 6 のシナリオ 2 ではノード間の平均獲得電力量にばらつき (A と B) があるため、シナリオ 1 と異なり Kansal 手法においてもノード間でデューティサイクル比にばらつきが出るため自然な同期が取れなくなり、図 3 のように送信ノードにおいて待ち時間が発生したためであると考えられる。

現実に EHWSN を運用することを考えると、獲得電力量には場所によってばらつきがあることが自然であるため、シナリオ 2 のほうが全てのノードが同じ平均獲得電力量であるシナリオ 1 より現実的である。そのようなシナリオ 2 においても、提案手法では獲得電力量が少ないときに既存の手法より良い性能をあげることができる。

#### 4.3 考 察

シナリオ 1, シナリオ 2 においても本提案手法は一定した送信レートを保ち、獲得電力量が 4mW より小さい時に既存手法より短い遅延時間で伝送が可能という特徴を持つことがシミュレーションで明らかになった。これは、獲得電力が小さいとノードの遅延時間が増加し、ノード同士で同期が取りづらくなるためであり、2.3 節や 3 章における設計指針に即

したものである。獲得電力が 4mW 以上では Kansal 手法のほうが遅延時間が短いのは、式 (9) のように、提案手法では利用していない電力が存在すること、このシナリオでは全てのノードが同じ獲得電力で動作するため、Kansal 手法によって導出されるデューティサイクル比も各ノードで等しい値が出るため、同期がとれてしまったためと考えられる。

この結果から、獲得電力が 4mW より小さい場合には本提案手法を用い、それより大きい場合は既存の電力管理手法を用いるというような電力管理手法を適応的に切り替える手法の有効性が示される。また、獲得電力が 4mW 以下になるエネルギー源の具体例としては、電磁波、熱、振動<sup>15)</sup> など多数存在する。つまり、本提案手法と既存手法を適応的に用いることで、太陽光発電以外の多数のエナジーハーベスティング技術をカバーしたアプリケーションに適用できるのである。

## 5. おわりに

本稿では環境からの再生電力をエネルギー源とする EHWSN において、DSMAC のような同期型 MAC の動作が可能な電力管理手法を示した。シミュレーションにより、既存電力管理手法は獲得電力が特に 4mW より小さいときにノード間で同期が取りづらくなるために、ネットワーク内の遅延に悪影響を及ぼすことがわかった。それに比べ本提案手法ではそのような獲得電力が小さい時において一定の送信レートを保ちながら既存手法より遅延時間を短くすることができる。また獲得電力が大きい時は既存手法の方が遅延が短いため、獲得電力の 4mW の大小に応じて電力管理手法を切替える適応的な電力管理が有効であることもわかった。

謝辞 本研究は、NEDO 平成 21 年度産業技術研究助成事業の一環として実施された。

## 参考文献

- 1) Kansal, A., Hsu, J., Zahedi, S. and Srivastava, M.B.: Power management in energy harvesting sensor networks, *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, Vol.6, No.4 (2007).
- 2) 宮坂拓也, 川原圭博, 浅見 徹: エネルギーハーベスティング WSN における MAC プロトコルを意識したエネルギー管理手法の提案, 電子情報通信学会 総合大会 B-20-39 (2010).
- 3) Vigorito, C., Ganesan, D. and Barto, A.: Adaptive Control of Duty Cycling in Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks, *IEEE Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, pp.21–30 (2007).
- 4) Eu, Z.A., Tan, H.P. and Seah, W. K.G.: Routing and Relay Node Placement in

- Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp.1–6 (2009).
- 5) Kar, K., Krishnamurthy, A. and Jaggi, N.: Dynamic node activation in networks of rechargeable sensors, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.14, No.1, pp.15–26 (2006).
- 6) N.Jaggi, K.K. and Krishnamurthy, A.: Rechargeable Sensor Activation under Temporally Correlated Events, *5th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, pp.1–10 (2007).
- 7) 久保祐樹, 柳原健太郎, 野崎正典: 無線センサネットワークの省電力化技術, OKI テクニカルレビュー, Vol.76, No.1, pp.32–35 (2009).
- 8) Ye, W., Heidemann, J. and Estrin, D.: An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks, *IEEE INFOCOM*, pp.1567–1576 (2002).
- 9) Lin, P., Qiao, C. and Wang, X.: Medium access control with a dynamic duty cycle for sensor networks, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp.1534–1539 (2004).
- 10) Heinzelman, W.R., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H.: Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, *Hawaii International Conference on System Sciences* (2000).
- 11) Lin, E., Rabaey, J. and Wolisz, A.: Power-efficient rendez-vous schemes for dense wireless sensor networks, *IEEE International Conference on Communications*, Vol.7, pp.3769–3776 (2004).
- 12) Buettner, M., Yee, G.V., Anderson, E. and Han, R.: X-mac: A short preamble mac protocol for duty-cycled wireless sensor networks, pp.307–320 (2006).
- 13) 森戸 貴, 猿渡俊介, 南 正輝, 森川博之: バッテリーレス無線センサネットワークにおけるデータ収集プロトコルの設計と評価, 電子情報通信学会技術報告情報ネットワーク研究会 IN2008-157, Vol.108, No.458, pp.151–156 (2009).
- 14) 宮坂拓也, 川原圭博, 浅見 徹: 環境電磁界からの再生エネルギーを用いたバッテリーレス無線センサネットワークの検討, 電子情報通信学会 ソサイエティ大会 B-20-19 (2009).
- 15) Paradiso, J.A. and Starner, T.: Energy scavenging for mobile and wireless electronics, Vol.4, No.1 (2005).