

# バッテリーレス無線センサネットワークと 省メモリ型データ収集プロトコル

猿渡 俊介<sup>1</sup> 森戸 貴<sup>2</sup> 南 正輝<sup>3</sup> 森川 博之<sup>2</sup>

受付日 25年4月1日, 採録日 25年10月10日

**概要:** 無線センサネットワークの課題の1つがセンサ端末への電力供給である。特に環境モニタリングにおいては、電源のない屋外へセンサノードを配置する必要があるため、バッテリー駆動が前提とされてきた。しかしながら、バッテリー交換のコストや環境への負荷を考慮すると、バッテリーを搭載したセンサノードを数多く環境に配布することは現実的ではない。本論文では、2次電池などのバッテリーを一切用いず、太陽電池とキャパシタのみによって駆動するセンサノード Solar Biscuit と、Solar Biscuit 上で動作するマルチホップのデータ収集プロトコルの設計と評価を示す。Solar Biscuit のデータ収集プロトコルは、電源状態が不安定かつ少ないメモリしか具備しないノードから構成されるバッテリーレス無線センサネットワークにおいても、得られる電力に適応的に動作しながらフラッディングの冗長性を利用してデータを配送することを可能とする。データ収集プロトコルの評価として、実装した Solar Biscuit から得られた実験データを用いて行ったデータ収集プロトコルのシミュレーション結果を示す。

**キーワード:** センサネットワーク, バッテリーレス, エナジハーベスト, MAC プロトコル, フラッディング

## A Batteryless Wireless Sensor Network and Its Memory Saving Data Collection Protocol

SHUNSUKE SARUWATARI<sup>1</sup> TAKASHI MORITO<sup>2</sup> MASTERU MINAMI<sup>3</sup> HIROYUKI MORIKAWA<sup>2</sup>

Received: April 1, 25, Accepted: October 10, 25

**Abstract:** One of the key challenges in wireless sensor networks is the limitation of an energy source. Current wireless sensor networks assume to use a battery as the energy source. However, the battery has lifetime, and we have to change the battery if the battery is dead. It is not realistic to change all batteries on sensor nodes, which are disseminated on a broad area. In view of this, the present study focuses on batteryless wireless sensor networks, which operate with harvesting energy from environments. The batteryless wireless sensor networks solve the battery problem, but the energy source is unstable because the amount of harvesting energy strongly depends on the environment. The paper shows a prototype of batteryless wireless sensor nodes, “Solar Biscuit”, and a multihop data collection protocol running on the Solar Biscuit. The data collection protocol consists of an energy aware data link layer and a flooding based network layer. The paper shows evaluation results of the data collection protocol with simulation.

**Keywords:** Wireless Sensor Networks, Batteryless System, Energy Harvest, MAC Protocol, Flooding

<sup>1</sup> 静岡大学 大学院情報学研究科  
Faculty of Informatics, Shizuoka University  
<sup>2</sup> 東京大学 先端科学技術研究センター  
Research Center for Advanced Science and Technology, The  
University of Tokyo  
<sup>3</sup> 芝浦工業大学 工学部電子工学科  
Department of Electronic Engineering, Shibaura Institute of  
Technology

### 1. はじめに

スマートメータへの応用を中心として、無線センサネットワークが実用化されつつある。現在普及しているセンサネットワークは電力網から直接電力を供給可能な応用が主である。センサノードが単独で駆動することで設置の自由

度が飛躍的に向上し、農業や医療など応用の広がりが期待できる。

センサノードの単独駆動では、バッテリーを用いることが一般的である。しかしながら、無線センサネットワークは数多くのノードで構築されるため、バッテリーでセンサノードを駆動する場合にはバッテリーの交換コストが問題となる。太陽電池、温度差による発電素子、振動エネルギーによる発電など、環境から電力を取得する技術 [1-4] を利用することができれば、バッテリーを交換するといった物理的なメンテナンスが不要になる。

このような観点から、本論文では、環境発電デバイスとキャパシタのみで構成されるセンサノードを用いたバッテリーレス無線センサネットワークを示す。まず、1次電池、2次電池を使用せずにソーラパネルとキャパシタのみで駆動可能なバッテリーレスの無線センサノード「Solar Biscuit」[5,6]の基本性能特性について述べる。また、電源が不安定かつメモリの小さいノードで構築されるバッテリーレス無線センサネットワーク上でデータ収集を可能とする通信プロトコルをも示す。Solar Biscuitの通信プロトコルは、得られる電力に適応的に動作するデータリンク層と、フラッディングでパケットの到達経路を冗長化するマルチホップのネットワーク層を組み合わせることで、電源が不安定な状態でもデータ収集を可能とする。試作した Solar Biscuit から取得した実験データを基に、通信プロトコルの性能をシミュレーションによって評価した。

本論文の貢献は、以下の3点である。

- Solar Biscuit のハードウェアの基本性能特性を詳細に示した点。
- Solar Biscuit 上の CPU がリセットしないように、得られる電力に適応的にスリープ時間を制御する MAC プロトコル「SB-MAC (Solar Biscuit Medium Access Control)」を詳細に示した点。
- バッテリーレスセンサネットワークにおいて、省メモリ型のデータ収集プロトコル「Spread Table Flooding」を提案・評価している点。

本論文の構成は以下のとおりである。まず、2節で、現在の無線センサネットワークで行われているセンサノードや通信プロトコルの研究開発を概観し、本研究の位置付けを明らかにする。次いで3節では、バッテリーレス無線センサノードのプロトタイプである Solar Biscuit のハードウェア構成と基本特性を示す。4節では、不安定な電源下でもデータ収集を可能とするフラッディングを基にしたマルチホップのデータ収集プロトコルを示す。データ収集プロトコルのシミュレーション評価を5節で示し、最後に6節で本論文のまとめとする。

## 2. 関連研究

無線センサノードを環境から得た電力で駆動することで

バッテリー交換が不要となり、大量のセンサノードを広域に配置したセンサネットワークが構築できる。センサノードを大量かつ広域に配置することで、広大な農場の日照状況を取得して日照量と農作物の生育状況の関係を把握することができる。また、広域での日照状況の測定は森林のエコシステムの状態の指標として用いられる林冠閉鎖率の測定にも応用できる [7]。これらのアプリケーションは、センサノード数が多く、全てのセンサノードからの情報を定期的に収集するものの、時間的な制約が緩いという特性を持っている。

環境から電力を取得する場合、場所や時間によって電源が不安定になる。例えば、太陽電池を用いて光から電力を得て、広大な農場で日照状況を収集するアプリケーションを想定した場合、各センサノード上空の雲の状態によって得られる電力にばらつきが生じる。また、振動から電力を得るデバイスを一般家庭で用いた場合、外を通るトラックや人の動き、洗濯機などの多くの振動源が存在する昼間には安定した電力を得ることができると考えられる。一方で、人々が寝静まる深夜では振動源が少なくなり、得られる電力は減少する。

環境から電力を取得する際に電源が不安定になるという問題に対し、2次電池を利用して電力を安定化する試みがなされている。ZebraNet [8]、LUSTER [9]、Trio [10]では、太陽電池から得られた電力を一度2次電池に蓄えることで、1次電池のみを用いた場合よりも長期間データ収集することを可能としている。

しかしながら、2次電池を用いた場合では、充電回路が複雑化することによるセンサノードの製造コストの増加、サイズの肥大化、2次電池の寿命などの問題が生じる。例えば、ZebraNet や LUSTER の2次電池は、太陽電池から取得した電力で充電しながら利用されるため、充放電サイクルの寿命から1~2年で使用不可能となる。

また、これまでの無線センサネットワークのデータリンク層で検討されてきた低消費電力 MAC プロトコル [11-16] は安定した電源を前提としており、本研究で対象としている不安定な電源下では安定して動作することができない。例えば、B-MAC [11] では受信側が一定間隔でスリープとウェイクを繰り返し、送信側がスリープとウェイクの間隔よりも長いプリアンプルを送ることで受信側がウェイクした時にプリアンプルを受信できるようにしている。センサノードの電源が不安定な場合には、スリープとウェイクの間隔を一定に保つことができないという問題が生じる。

データリンク層に加えて、無線センサネットワークのネットワーク層で提案されてきたデータ収集プロトコル [17,18] も電源が不安定なバッテリーレス無線センサネットワークでは使用できない。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は、安定した経路を選択して効率的にデータ収集を行うことを目的として、ブロードキャストを用い

た経路構築とユニキャストによるデータ収集の2段階で実現される。電源が不安定な場合、経路構築の際に構築された経路がデータ収集の時には使用できないという状況が発生する。例えばCTP [18]では、全てのノードがブロードキャストを繰り返して隣接ノードを検出しながら、信頼性の高いノードを親ノードに選択してシンクノードをルートとした配送木を構築する。電源が不安定な場合には、親ノードに選択されたノードが予測不能的にスリープすることでデータを収集できなくなるという問題が発生する。

環境から得られる電力で駆動する無線センサネットワークとして、環境発電型無線センサネットワークの名の下にMACプロトコル [19-24] やデータ収集プロトコル [25, 26] の観点から研究が進められている。例えば、文献 [22] では、得られる電力量に応じて送信電力と送信レートを適切に制御することでシングルホップでのスループットが向上することが示されている。

これらの環境発電型無線センサネットワークの研究では、将来的なハードウェアの進歩を見込んでシャノン限界を基盤に議論されていたり [22], MICAz [27] などの既存の無線センサネットワークのハードウェア特性を前提としていたり [25] する。しかしながら、二次電池を用いないバッテリーレスでの環境発電型無線センサネットワークを考えた場合、これまでの無線センサノードとは異なるハードウェア設計になると予想される。現段階でのハードウェア技術で実現可能な性能と理想的な性能を比較するためにも、バッテリーレス無線センサネットワークの基準となるようなプロトタイプが求められる。

### 3. Solar Biscuit

2節で述べたように、環境から得た電力で駆動するこれまでのセンサノードでは、二次電池を用いることで電源の安定化を実現している。これに対して筆者らは、センサノードの長寿命化やサイズの小型化の観点から、二次電池を用いないバッテリーレス無線センサネットワークを実現する。本節では、バッテリーレスの無線センサノードのプロト

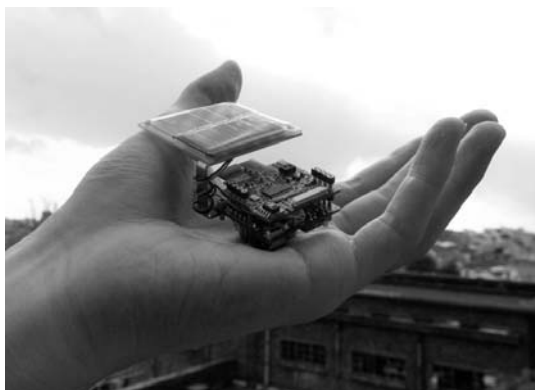


図 1 Solar Biscuit: バッテリーレス無線センサノード  
Fig. 1 Solar Biscuit: A batteryless wireless sensor node

タイプ「Solar Biscuit」のハードウェア構成と基本特性について述べる。ただし、本節で述べる Solar Biscuit はバッテリーレスの無線センサノードの基本特性を計測することを目的として試作したものであり、ハードウェア的な観点からはより高性能の部品を使用するなど改善の余地があることに注意されたい。試作した Solar Biscuit のハードウェア的な制約に関しては 3.4 で述べる。

#### 3.1 ハードウェア構成

試作した Solar Biscuit の外観を図 1 に、ハードウェア構成を図 2 に示す。Solar Biscuit は電源部と処理通信部の 2つの機構から構成される。

電源部では、環境から電力を得るデバイスとして太陽電池を使用した。使用した太陽電池は 44 [mm]×44 [mm] の単結晶シリコン太陽電池モジュールである。太陽電池の出力は充放電時の損失の少ない 5 [V], 1 [F] の低内部抵抗型電気二重層キャパシタ (FT0H105Z, NEC Tokin) に接続される。電気二重層キャパシタは 2 次電池と異なり、電力の蓄積に化学的な反応を用いていないため [28], 100 万回以上の充放電に耐えることができる。キャパシタと処理通信部の間には処理通信部に供給される電圧を制限する目的で低ドロップ型電圧レギュレータ (LP2992IM5-3.3, National Semiconductor) を接続している。

また、動作開始時の電圧急降下によって処理通信部が停止することを防ぐために、電源部ではリセット回路を搭載してハードウェアで電源の ON/OFF を制御する機構を備えている。リセット回路はキャパシタ電圧が 3.51 [V] に達するとレギュレータへの電源供給を開始し、2.64 [V] を下回ると電源供給を停止する。これにより、3.51 [V] で動作を開始した時に電圧が急低下したとしても電圧が 2.64 [V] を下回るまでは電源供給を継続することができる。

処理通信部では、3968 [byte] のメインメモリを具備した低電圧駆動の CPU (PIC18LF4620, Microchip), 315MHz 帯の無線通信モジュール (CC1000, Texas Instruments), 温湿度センサ (SHT11, Sensirion), リアルタイムクロック (RX-8581JE, EPSON) を搭載している。CPU は水晶発振子によって 20MHz で駆動され、無線モジュールや温湿度

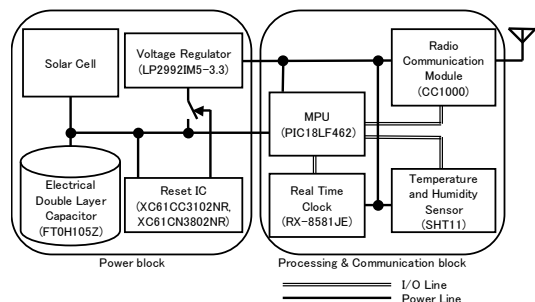


図 2 Solar Biscuit のハードウェア構成  
Fig. 2 Hardware organization of Solar Biscuit

表 1 センサノードの状態別消費電流

Table 1 Current consumption at each state of a sensor node

A state of a sensor node	Current
Receiving (MPU: Active, RF: Receiving, Sensor: Sleep, RTC: Active)	16.8mA
Sending (MPU: Active, RF: Sending, Sensor: Sleep, RTC: Active)	29.4mA
Sleep (MPU: Sleep, RF: Sleep, Sensor Sleep, RTC: Active)	530 $\mu$ A

センサを制御する。リアルタイムクロックはセンサデータのタイムスタンプのための計時やスリープから復帰するためのタイマとして利用する。また、電気二重層キャパシタをCPUのA/D変換端子に接続し、キャパシタ電圧を測定する。

3.2 Solar Biscuit の消費電流特性

表 1 にセンサノードの状態別の消費電流を示す。表中の受信状態および送信状態とは、それぞれ連続的なデータの受信、送信を行う状態を意味する。スリープ状態とは、CPU および無線モジュールのメモリ、レジスタの状態を保存したまま動作を停止した状態を意味する。センサノードの消費電流は、受信状態において 16.8 [mA]、送信電力が 10 [dBm] の送信状態において 29.4 [mA]、スリープ状態において 530 [ $\mu$ A] となった。

表 2 にスリープ時の消費電力 530 [ $\mu$ A] の内訳を示す。スリープ時の消費電流の大半は電気二重層キャパシタの 459 [ $\mu$ A] であり、その次が電圧レギュレータの 65 [ $\mu$ A] である。スリープ時の CPU や無線通信モジュールが消費する電流は 6 [ $\mu$ A] となる。

3.3 Solar Biscuit の充電特性

照度を変化させたときの充電時間と電気二重層キャパシタの電圧の関係を図 3 に示す。電気二重層キャパシタに

表 2 スリープ時の消費電流の内訳

Table 2 Current consumption details at a sleep mode

Leak current on a capacitor	459 [ $\mu$ A]
Standby current on a voltage regulator	65 [ $\mu$ A]
Leak current on CPU, RF, Sensor, and RTC	[6 $\mu$ A]

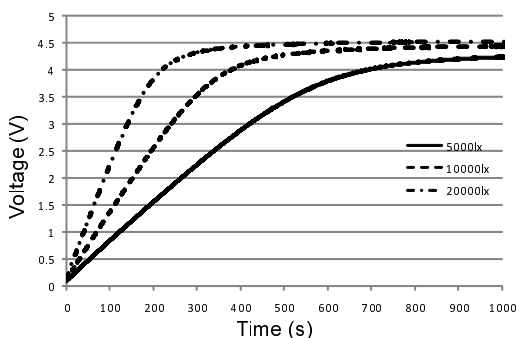


図 3 充電時間に対する電気二重層キャパシタの電圧

Fig. 3 Capacitor voltage while the charge time increases

電力を蓄えるのに要する時間は、太陽電池が受光する照度によって変化する。電気二重層キャパシタの電圧が高いほどキャパシタに電力が蓄えられていることを意味する。20,000 [lx] は晴天時、10,000 [lx] は薄曇り時、5,000 [lx] は曇天時の照度に相当する。図 3 から分かるように、電気二重層キャパシタの電圧が 3 [V] から 3.51 [V] に上昇するのに要する時間は、20,000 [lx] の場合に約 32.6 [s]、10,000 [lx] の場合に約 54.7 [s]、5,000 [lx] の場合に約 101.8 [s] である。

照度を変化させたときのキャパシタの平均充電電流を表 3 に示す。表 3 の値はキャパシタ電圧が 3V から 3.51 [V] に上昇する際に流れる電流の平均を取ったものである。照度が 20,000 [lx] の時 (晴天時) は 15.6 [mA]、10,000 [lx] の時 (薄曇り時) は 9.32 [mA]、5,000 [lx] の時 (曇天時) は 5.01 [mA] となる。

3.4 制約

現在の Solar Biscuit では、太陽光から電力を得ているため、夜間の動作はできない。また、電気二重層キャパシタはリーク電流をゼロにすることはできない。そのため、夜間での動作を想定する場合には、より面積の大きな太陽電池を用いたり、より大きな電気二重層キャパシタを用いる必要がある。

4. 通信プロトコル

Solar Biscuit では、受信待機時の消費電流が 16.8 [mA] (表 1) であるのに対し、晴天時の充電電流が 15.6 [mA] (表 3) となるため、晴天時であっても省電力動作をしなければ蓄積された電力が低下し続ける。3.1 節で述べたように、キャパシタに蓄積された電力がリセット回路の閾値である 2.64 [V] を下回った場合には、CPU への電力の供給が停止される。電力がなくなると、CPU がリセットしてレジスタやメインメモリが消去され、マルチホップでデータ中継されているパケットが途絶えるという問題が発生する。そ

表 3 キャパシタの平均充電電流

Table 3 Average charging current on a capacitor

Illuminance	Average charging current
20,000 [lx] (clear sky)	15.6 [mA]
10,000 [lx] (obscured sky)	9.32 [mA]
5,000 [lx] (clouded sky)	5.01 [mA]

ここで Solar Biscuit では、得られる電力に適応的に動作するデータリンク層と、フラディングの冗長性を提供するネットワーク層を組み合わせることで、電源が不安定な状態でのデータ収集を実現する。

#### 4.1 データリンク層：SB-MAC

バッテリーレスの無線センサネットワークの MAC プロトコルでは、既存の環境発電型無線センサネットワーク [25,29] でも議論されているように、電力に適応的に動作する必要がある。しかしながら、文献 [25,29] では、ハードウェアとして 2 次電池を用いた TI 社の eZ430-RF2500-SEH 等を前提としている。eZ430-RF2500-SEH は Cymbet 社の EnerChip というリチウムイオン蓄電池を用いており、充放電特性がスーパーキャパシタと異なる上に、数千回の充放電で使用できなくなる。バッテリーレスの無線センサネットワークでは、スーパーキャパシタの特性を踏まえた上で、現在スーパーキャパシタに蓄えられている電力や環境から得られる電力を把握してスリープ時間を決定するための仕組みを明らかにする必要がある。

このような観点から、3 節に示したバッテリーレス無線センサノード Solar Biscuit 上で動作する MAC プロトコル「SB-MAC」を設計した。SB-MAC では、Solar Biscuit 上のリセット回路によって CPU がリセットするのを避けるために、キャパシタの電圧が 3 [V] と 3.51 [V] の間に維持されるように省電力制御を行う。図 3 から分かるように、電圧が 3 [V] と 3.51 [V] の間は得られる電力に依らず時間に対して比例して電力が増加する。例えば照度が 10,000 [lx] の際には、3.51 [V] を超えて充電すると電圧の上昇が遅くなるため、充電効率が悪くなる。また、Solar Biscuit は 2.64 [V] を下回ると CPU への電力の供給を停止する。通信を開始するなどして消費電力が増えて瞬間的にキャパシタの電力が下がったとしてもキャパシタの電圧が 2.64 [V] を以下にならないように余裕を見て最低でも 3 [V] を維持できるようにスリープ時間を制御する。

図 4 に SB-MAC の動作を示す。SB-MAC では、スリープ状態、受信状態、送信状態の 3 つの状態を持つ。スリープ状態は全てのデバイスにほとんど電流が流れていないものの、CPU のメインメモリの状態は保持されている状態である。受信状態は隣接ノードがパケットを送信した場合にパケットを受信可能な状態である。送信状態は隣接ノードに対してパケットをブロードキャストしている状態である。

まず、センサノードでは、太陽電池を用いてキャパシタに電力を蓄積し、キャパシタの電圧が 3.51 [V] になると CPU に電力を供給する。CPU は起動すると直ちにキャパシタの電圧  $V$  を測定し、 $V$  が受信状態に移行する電圧  $V_{max}$  よりも大きかった場合には受信状態に移行する。受信状態の動作に関しては後述する。 $V$  が  $V_{max}$  より小さかった場合には以下の式で電力を蓄えるのに必要な時間  $T_{charge}$  [s] を

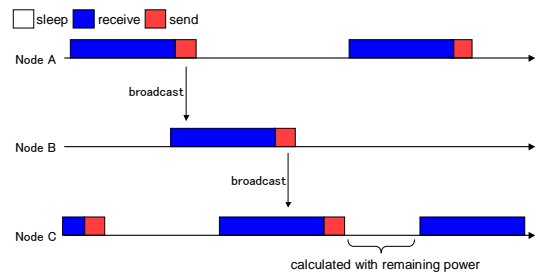


図 4 SB-MAC の動作  
Fig. 4 Operation of SB-MAC

算出する。 $T_{charge}$  は、受信状態に移行する電圧  $V_{max}$  [V] から現在の電圧を引いたものを、1 秒あたりに増加する電圧  $V_{1sec}$  [V] で割った時間で求められる。

$$T_{charge} = \frac{V_{max} - V}{V_{1sec}}$$

$C$  をキャパシタの容量 [F]、 $I$  を現在得られている電流量 [A] とすると、

$$V_{1sec} = \frac{I}{C}$$

であるため、 $T_{charge}$  は

$$T_{charge} = \frac{C}{I}(V_{max} - V)$$

となる。Solar Biscuit では、キャパシタが 1 [F]、受信状態に移行する電圧は 3.51 [V] であるため、 $T_{charge}$  は以下の式で表わされる。

$$T_{charge} = \frac{3.51 - V}{I} \tag{1}$$

$I$  は環境から得られる電力量に依存するため、前回のスリープ状態が終了する時に求められる。前回のスリープ時に 1 秒あたりに増加した電圧  $V'_{1sec}$  は、 $T'_{sleep}$  を前回のスリープ時間 [s]、 $V_{begin}$  を前回のスリープ開始時のキャパシタの電圧 [V]、 $V_{end}$  を  $T'_{sleep}$  秒間のスリープ終了時のキャパシタの電圧 [V] とすると以下の式で求められる。

$$V'_{1sec} = \frac{V_{end} - V_{begin}}{T'_{sleep}}$$

すなわち、 $I$  は

$$\begin{aligned} I &= V'_{1sec}C \\ &= \frac{V_{end} - V_{begin}}{T'_{sleep}}C \end{aligned}$$

となる。Solar Biscuit ではキャパシタの容量が 1 [F] であるため、

$$I = \frac{V_{end} - V_{begin}}{T'_{sleep}} \tag{2}$$

が得られる．ただし，初回の時のみ  $I$  が不明であるため，曇天時の電流量  $I = 0.00501[A]$  を用いる．

算出した  $T_{charge}$  を用いて，スリープ時間  $T_{sleep}$  を以下の式で求める．

$$T_{sleep} = T_{charge} + [0 \cdots T_{receive}] \quad (3)$$

$[0 \cdots T_{receive}]$  は 0 から  $T_{receive}$  の間でランダムに選択された値を意味する． $T_{receive}$  は固定値の受信時間 [s] である． $T_{receive}$  の具体的な値に関しては 5 節で議論する．スリープ時間にランダム性を持たせて同時にアクティブになる隣接センサノードを毎回変化させることで，ネットワーク層においてパケットが配送される経路に多様性を持たせる．

$T_{sleep}$  秒経過した後，CPU がウェイクしてキャパシタの電圧  $V$  をチェックする．また，式 (2) を用いて次回の  $T_{charge}$  を得るのに用いる  $I$  を算出する．キャパシタの電圧  $V$  が 3.51 [V] よりも小さかった場合には式 (1)，式 (3) を用いて  $T_{sleep}$  を算出し，再びスリープ状態を継続する．キャパシタの電圧  $V$  が 3.51 [V] よりも大きかった場合には受信状態へと移行する．

受信状態は  $T_{receive}$  秒間継続される． $T_{receive}$  秒経過した後，送信状態に移行する．

送信状態では，ネットワーク層の動作に応じてパケットを 1 つ送信する．ネットワーク層の詳細については 4.2 節で述べる．パケットを送信する際，WiFi や ZigBee ではキャリアセンスをするのが一般的である．しかしながら，マルチホップ環境下では，隠れ端末問題 [30]，さらされ端末問題 [31]，キャプチャ効果の存在によってキャリアセンスをすることが性能を劣化させる場合がある [32]．そのため，SB-MAC では法規制がある場合を除いてキャリアセンスを行わずにパケットを送信するものとする．送信が終了するとキャパシタの電圧  $V$  を測定し，式 (1)，式 (3) を用いて必要なスリープ時間  $T_{sleep}$  を算出し，再びスリープ状態に移行する．

#### 4.2 ネットワーク層：Spread Table Flooding

環境発電型無線センサネットワークを対象とした既存のネットワーク層の protocols [25, 26] では，位置情報を用いて通信効率を高めている．ネットワーク層において位置情報を用いることで通信効率が高まることは容易に想像できるものの，Solar Biscuit のネットワーク層では位置情報を利用しないこととする．ノード同士が常に相互に通信できるとは限らないバッテリーレス無線センサネットワークでは，相互に通信して自ノードの位置を算出する既存の位置検出技術 [33, 34] を用いることができないからである．バッテリーレス無線センサネットワークでは各ノードの位置をどのように取得するかも課題であると考えている．

4.1 節に示した SB-MAC では，得られる電力に応じて各ノードが独立にスリープ時間を決定するため，マルチホッ

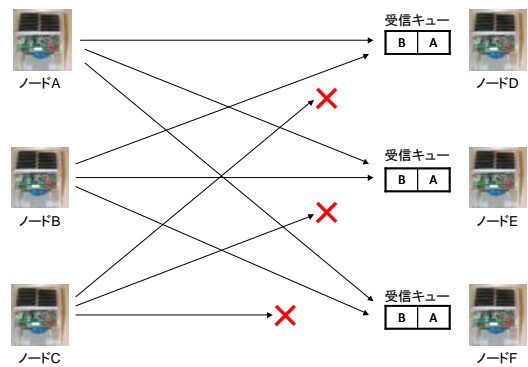


図 5 シンプルフラッディングを用いた際のパケット詰まり問題  
Fig. 5 Packet jamming problem in Simple Flooding

プでパケットを転送する場合の経路が不安定になる．そこでネットワーク層ではフラッディングプロトコルを用いて経路を冗長化することで電源が不安定なバッテリーレス無線センサネットワーク上でのデータ収集を実現する．

バッテリーレス無線センサネットワークでは，環境から得られる電力に制限があるため，できるだけ低消費電力でセンサノードを駆動することが求められる．一般的に，CPU では少ないメモリを搭載したものの低消費電力で動作する．フラッディングプロトコルとしてシンプルフラッディング [30] を用いた場合，メモリの制約から重複チェック用のテーブルやキューサイズを小さくすると受信キューが溢れて配送されるパケットに偏りが生じるといった問題が発生する．本稿ではこのような問題をパケット詰まり問題と定義する．

図 5 にパケット詰まり問題の例を示す．各ノードは 2 つのパケットを保持できる受信キューを備えていたとする．まず，ノード A がパケットをフラッディングするとノード D，ノード E，ノード F がノード A からのパケットを受信キューに挿入する．次にノード B がパケットをフラッディングすると，ノード A の時と同様にノード D，ノード E，ノード F がノード B からのパケットを受信キューに挿入する．この状態で，ノード D，ノード E，ノード F の受信キューは全部埋まっている．そのため，ノード C がパケットをフラッディングしようとしてもノード D，ノード E，ノード F の受信キューが溢れており，ノード C のパケットはフラッディングされない．ノード A とノード B のパケットはノード D，ノード E，ノード F により再度フラッディングされるのでノード A とノード B のパケットはネットワーク全体にさらに広がり，ノード C のパケットがよりシンクノードまで到達し辛い状況になる．また，重複チェック用のテーブルサイズに制限がある場合には同じパケットを何度も受け取ってしまうことになり，ネットワーク上でのパケットの偏りがより顕著になる．これまで提案されてきたフラッディング [25, 35, 36] でも同様に重複チェック用のテーブルと受信キューを持っているため，他

のフラディングを用いたとしても同様の問題が発生すると思われる。

そこで Solar Biscuit のネットワーク層では Spread Table Flooding でマルチホップ通信を実現する。Spread Table Flooding では、これまでシンプルフラディングで一般的に用いられていた重複チェック用のテーブルと受信キューの代わりに、拡散中継テーブルのみを用いる。拡散中継テーブルでは、新しいパケットは必ずテーブルに記録として追加され、テーブルが溢れた場合にはテーブルからランダムに 1 レコードを削除することで、キューを用いていた場合に発生していたパケットの偏りの問題を解消する。拡散中継テーブルはノード ID、センサ値、タイムスタンプの 3 つの項目を 1 つのレコードとして、最大のレコード数が  $n$  で構築されている。ノード ID は、各センサノードを示す値であり、該当するレコードがどのセンサノードの情報かを意味する。センサ値は、ノード ID によって指定されるセンサノードで取得されたセンサデータの値であり、照度や温度、湿度などである。タイムスタンプは、ノード ID に該当するセンサノードがセンサ値を取得した際の時刻である。

図 6 に Spread Table Flooding の動作を示す。まず、パケットの送信時では、拡散中継テーブルからランダムに 1 レコード選択し、選択したレコードのノード ID、センサ値、タイムスタンプを備えたセンサデータパケットをブロードキャストする。パケットをブロードキャストした後も選択されたレコードは保持される。センサノードはセンサデータパケットを受け取ると、拡散中継テーブル内に同じノード ID を含んだレコードがあるかどうかの検索を行う。同じノード ID を含んだレコードが見つかった場合には見つかったレコードのタイムスタンプを抽出してセンサデータパケットに含まれるタイムスタンプと比較する。センサデータパケットに含まれるタイムスタンプの方が見つかったレコードのタイムスタンプよりも新しかった場合にはレコードのセンサ値とタイムスタンプをパケットのセンサ値とタイムスタンプで更新する。同じノード ID を含んだレコードが見つからなかった場合には、拡散中継テー

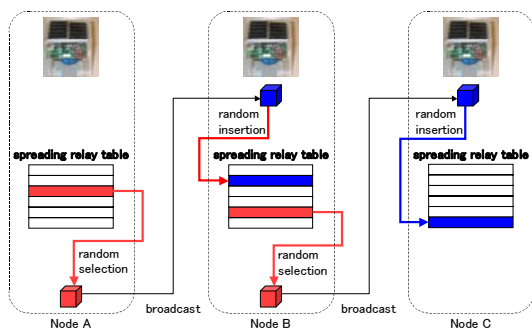


図 6 ネットワーク層の動作  
Fig. 6 Operation of a network layer

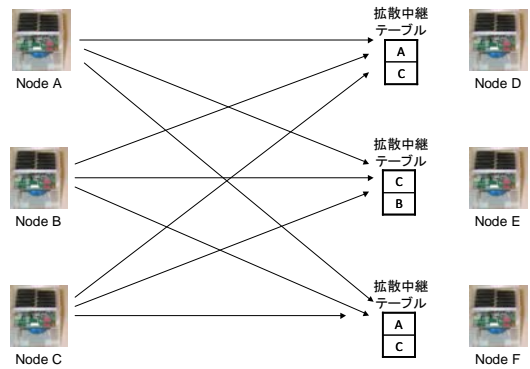


図 7 Spread Table Flooding によるパケット詰まり問題の解決  
Fig. 7 Spread Table Flooding solves the packet jamming

ルからランダムに 1 レコード削除し、受け取ったパケットのノード ID、センサ値、タイムスタンプを拡散中継テーブルに追加する。

図 7 に図 5 と同じ条件での Spread Table Flooding の動作を示す。各ノードは、2 つのパケットを保持できる拡散中継テーブルを保持していたとする。まず、ノード A がパケットをフラディングするとノード D、ノード E、ノード F がノード A からのパケットを拡散中継テーブルに挿入する。次にノード B がパケットをフラディングすると、ノード A の時と同様にノード D、ノード E、ノード F がノード B からのパケットを拡散中継テーブルに挿入する。この状態では、ノード D、ノード E、ノード F の拡散中継テーブルは全部埋まっている。ノード C がさらにパケットをフラディングした場合にシンプルフラディングと動作が異なる。まず、ノード D は、ノード C からのパケットを受信すると、拡散中継テーブルが全部埋まっていた場合には、ランダムに 1 項目選択してその項目を受信したパケットで上書きする。図 7 の例では、ノード D はノード B からのパケットを上書きしてノード C からのパケットを保持する。同様にしてノード E はノード A からのパケットを、ノード F はノード B からのパケットをそれぞれノード C からのパケットで上書きする。このような動作を繰り返すことにより、パケットが偏ることなくネットワークを配送される。

## 5. 評価

3 節で得られた Solar Biscuit の実験データを用いて、4 節に示した SB-MAC と Spread Table Flooding の性能評価を行った。

### 5.1 シミュレーション環境

シミュレーションでは、OMNeT++ [38] を用いた。評価では、評価パラメータ毎にそれぞれランダムに 10 個のネットワークを生成し、得られた結果の平均値を算出した。各ネットワークでは 200 個のノードをランダムに配置し、

ノードの1つをシンクノード,残りをセンサノードとした. シミュレーションの諸元を表4に示す. パケット長は16 [byte], 各センサノードは1分間に1回センサ値を送信するものとした. 1分間に1回のセンシングの場合, センシングに要する電力消費は計算や通信に要する電力消費に比べて非常に小さいので無視することとした.

無線通信は無線モジュールにCC1000を用いた場合を想定し,送信電力は10 [dBm],ビットレートは19.2 [kbps]とした. 電波伝播モデルは無線センサネットワークシミュレータ Castalia [39]でも使用されている [37]を用いた. [37]のモデルは実際の実験データを基に構築されており,片方向リンクなども再現される現実に近い電波伝搬モデルである. キャプチャ効果を再現するため,衝突モデルでは干渉波が累積的に加算し,1パケットの受信期間全体でSN比が一定以上保てる場合のみに受信する. 受信期間で干渉波によって一部でもSN比が悪くなる場合には衝突が発生する. 以上の条件下での電波の最大到達距離は約100メートルとなる.

SB-MACとSpread Flooding Protocolの性能を相対的に評価するために,次の3つの通信プロトコルをシミュレータ上に実装した.

1つ目は,Spread Table Flooding w/ SB-MACである. 4節に示したSB-MACとSpread Table Floodingを組み合わせた通信プロトコルである.

2つ目は,Simple Flooding w/ SB-MACである. SB-MACと,一般的なフラッディングプロトコルであるシンプルフラッディング [30]を組み合わせた通信プロトコルである. 1つ目のSpread Table Flooding w/ SB-MACと比較してSpread Table Floodingの効果を検証することを目的として実装した. シンプルフラッディングでは,パケットの重複受信チェック用のテーブルとパケットの受信キューが必要になる. 各評価においてSpread Table Floodingと公平に比較するために,シンプルフラッディングの重複チェック用のテーブルのサイズとパケットの受信キューのサイズを足した数がSpread Table Floodingの拡散中継テーブルのサイズと等しくなるように実装した.

3つ目は,Spread Table Flooding w/o SB-MACである. Spread Table Floodingと,スリープを行わないMACプロトコルを組み合わせた通信プロトコルである. 1つ目の

表4 シミュレーション諸元  
Table 4 Simulation parameters

ビットレート	19.2 [kbps]
送信電力	10 [dBm]
パケット長	16 [byte]
センサ値取得頻度	1回/分
電波伝搬モデル	文献 [37]
衝突モデル	累積的干渉

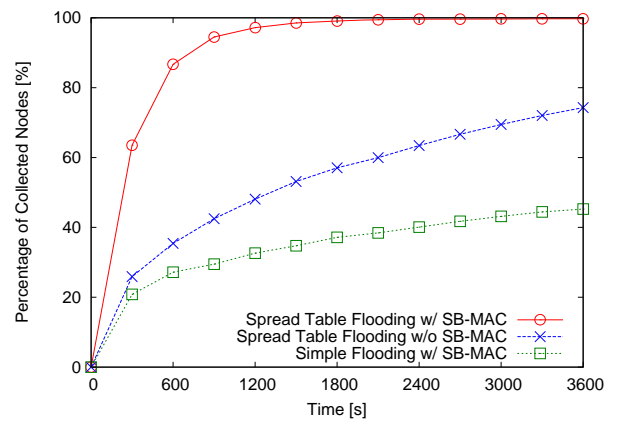


図8 時間経過に対するデータ収集率の変化  
Fig. 8 Percentage of collected nodes vs. Time line

Spread Table Flooding w/ SB-MACと比較して,SB-MACの効果を検証することを目的として実装した.

### 5.2 時間経過に対する収集率の変化

SB-MACとSpread Table Floodingの基本特性を見ることを目的として,時間経過に対するデータ収集率の評価を行った. データ収集率はシンクノードが受信したセンサデータの送信元ノード数を全ノード数で割ったものを用いた. フィールドは500 [m]×500 [m]である. 得られる充電電流は曇天時を想定して5.01 [mA],テーブルサイズは10,センサノードが受信状態である時間  $T_{receive}$  は1秒とした.

図8に時間経過に対するデータ収集率の変化を示す. 図8より,次の3つのことが分かった.

1つ目は,SB-MACを用いたSpread Table Floodingと,SB-MACを用いないSpread Table Floodingとの比較した場合,SB-MACを用いたSpread Table Floodingの方が高いデータ収集率を実現していることである. SB-MACとSB-MACを使わないものの違いは,SB-MACがスーパーキャパシタに蓄えられた電力がCPUの駆動電圧を下回らないように充電時間を制御しているのに対し,SB-MACを用いていないものはCPUの駆動電圧を下回るまで電力を使用する点である. SB-MACを用いない場合にはある一定の時間が経つとCPUがリセットされ,拡散中継テーブルの情報が全て消去される. SB-MACを用いないことで拡散中継テーブルの情報が全て消去されてしまうと中継途中のパケットも消失してしまうため,SB-MACを用いたSpread Table Floodingの方がSB-MACを用いないSpread Table Floodingよりもデータ収集率が高くなっていると考えられる.

2つ目は,SB-MACを用いたSpread Table Floodingと,SB-MACを用いたSimple Floodingを比較した場合,SB-MACを用いたSpread Table Floodingの方が高いデータ収集率を実現していることである. 両方ともにSB-MACを用いているため,CPUの駆動電圧を下回るまで電力を



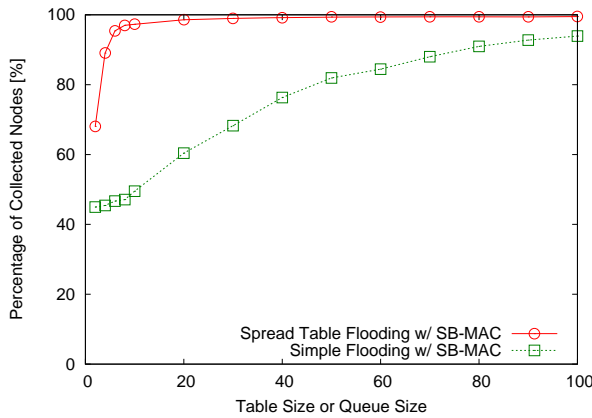


図 9 テーブルサイズがデータ収集率に与える影響  
Fig. 9 Percentage of collected nodes vs. Table size

消費することせず，Spread Table Flooding の拡散中継テーブルや Simple Flooding の受信キューや重複チェック用のテーブルの情報が消去されることはない．この場合，Simple Flooding の性能の方が悪くなるのは図 5 に示したパケット詰まり問題が発生することに起因していると考えられる．一方で Spread Table Flooding では，図 7 に示したように，パケット詰まり問題が発生しないためにデータ収集率が高くなっていると考えている．

3 つ目は，SB-MAC を用いていない Spread Table Flooding と，SB-MAC を用いた Simple Flooding を比較した場合，SB-MAC を用いない Spread Table Flooding の方が SB-MAC を用いない Simple Flooding よりも高いデータ収集率を実現していることである．Spread Table Flooding が SB-MAC を用いないことによる損失よりも，Simple Flooding を用いることの損失の方が大きいからだと考えている．

### 5.3 テーブルサイズがデータ収集率に与える影響

5.2 節でシンプルフラディングの性能が悪いのはテーブルサイズが小さいからであると述べた．テーブルサイズがデータ収集率に与える影響を明らかにするために，テーブルサイズを変えた場合の評価を行った．シミュレーションでは，テーブルサイズを 2~100 に変化させた．フィールドは 500 [m]×500 [m] である．各ノードの充電電流は曇天時を想定して 5.01 [mA]，センサノードが受信状態である時間  $T_{receive}$  は 1 秒とした．

図 9 にテーブルサイズを変えた際の 1 時間でのデータ収集率を示す．図 9 から次の 2 つのことが分かる．

1 つ目は，テーブルサイズが小さくても Spread Table Flooding は高いデータ収集率を実現できることである．テーブルサイズが 6 の時点で，6 よりも大きいテーブルサイズの時と比較してデータ収集率に大きな違いは見られない．Spread Table Flooding は少ない計算資源で実装可能であると言える．

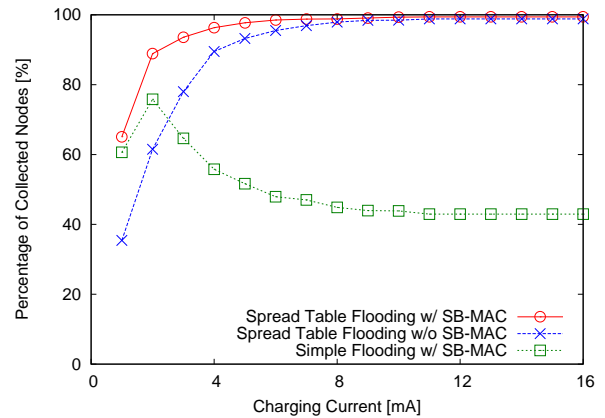


図 10 環境から得られる電力が変化した場合のデータ収集率の変化  
Fig. 10 Percentage of collected nodes vs. Charging current

2 つ目は，テーブルサイズが大きくなるにしたがってシンプルフラディングのデータ収集率が Spread Table Flooding に近づくことである．これは，テーブルサイズが大きくなると受信キュー溢れの問題が緩和されるからだと考えられる．

### 5.4 環境から得られる電力が変化した場合のデータ収集率の変化

これまでの評価では，各センサノードの充電電流は曇天時を想定した 5.01 [mA] であった．しかしながら，実際の環境では日照状況に応じて充電電流が異なる．そこで，環境から得られる電力が変化した場合のデータ収集率を評価した．具体的には，充電電流を 1~16 [mA] に変化させてデータ収集率の評価を行った．フィールドは 500 [m]×500 [m] である．テーブルサイズは 10，センサノードが受信状態である時間  $T_{receive}$  は 1 秒とした．

図 10 に充電電流を変化させたときのデータ収集率を示す．図 10 より，次の 4 つのことが分かる．

1 つ目は，充電電流が少ないときには Spread Table Flooding と SB-MAC の組み合わせが最も良いことである．SB-MAC と Spread Table Flooding が得られる電力に合わせて動作しながら効率的にデータ収集が実現できていることが分かる．

2 つ目は，充電電流が多い時には SB-MAC を用いた Spread Table Flooding も SB-MAC を用いない Spread Table Flooding も同程度のデータ収集率になることである．これは充電電流が多い場合には電力に適応的に動作しなかったとしてもリセットがかかる回数が少なくなるため，両者の動作の差が小さくなるからだと考えられる．

3 つ目は，充電電流が少ない場合には SB-MAC を用いたシンプルフラディングの方が SB-MAC を用いない Spread Table Flooding よりもデータ収集率が高いことである．これは，充電電流が少ない場合には，SB-MAC を用いた方が電力を有効利用できることに加えて，シンプルフ

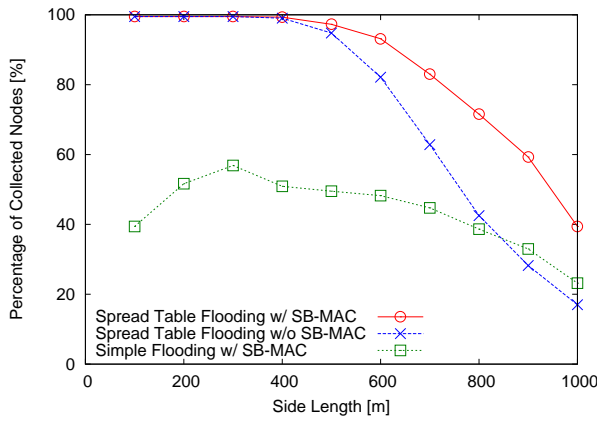


図 11 フィールドサイズに対するデータ収集率の変化  
Fig. 11 Percentage of collected nodes vs. Field size

ラッディングでは充電時間が増加することでパケットが減るため、受信キュー溢れの問題が緩和されるからだと考えられる。

4つ目は、シンプルフラッディングの充電電流が増加するにしたがってデータ収集率が最初は上昇するものの、途中から下降することである。これは、充電電流が少ないうちには受信キュー溢れの問題があまり起きず、充電電流の増加に伴って駆動時間が増えることで送信パケットが増加してデータ収集率が改善されるからであると考えられる。充電電流がさらに増えると送信パケットが増加し、受信キュー溢れの問題が発生してデータ収集率が低下する。

### 5.5 ノード密度に対するデータ収集率の変化

5.4節において、各センサノードのパケットの送信頻度、受信頻度が各通信プロトコルの性能に影響を与えることが分かった。パケットの受信頻度は、周囲のノード数が変わった場合にも変化する。そこで、ノード密度がデータ収集率に与える影響の評価を行った。シミュレーションでは、ノード密度を変えるためにフィールドの一辺の長さを 100 [m]~1000 [m] と変化させた。各センサノードの充電電流は曇天時を想定して 5.01 [mA]、テーブルサイズは 10、センサノードが受信状態である時間  $T_{receive}$  は 1 秒とした。

図 11 にノード密度を変化させた場合の 1 時間でのデータ収集率を示す。図 11 より、次の 4 つのことが分かる。

1つ目は、全ての通信プロトコルにおいてフィールドサイズが大きくなってノード密度が低くなるにしたがって、データ収集率が悪くなる傾向があることである。このデータ収集率の悪化は密度の低下によって経路の多様性が失われることに起因すると考えられる。

2つ目は、ノード密度が高い場合には SB-MAC を用いても用いなくても Spread Table Flooding の性能が変わらないことである。これは、SB-MAC を用いなかった場合にセンサノードがリセットされて拡散中継テーブルが消去されたとしても、密度が高い場合には経路が多様であるため、

拡散中継テーブルの消去の影響が小さくなるからであると考えられる。

3つ目は、密度が低い場合には SB-MAC を用いた方がデータ収集率が高くなることである。Spread Table Flooding では、SB-MAC を用いた場合と SB-MAC を用いない場合では、フィールドサイズが大きくなるにしたがって、徐々に SB-MAC を用いた方がデータ収集率が高くなり、データ収集率の差も密度が低くなればなるほど大きくなる。特にフィールドサイズの 1 辺が 900 [m] を超えると、SB-MAC を用いない Spread Table Flooding は、SB-MAC を用いたシンプルフラッディングよりもデータ収集率が悪くなる。これは、密度が低くなると配送経路の多様性が失われるため、SB-MAC を用いない場合に発生する CPU のリセットに伴う拡散中継テーブルの消去の影響が大きくなるからであると考えられる。

4つ目は、SB-MAC を用いたシンプルフラッディングにおいてフィールドが小さい場合にはフィールドサイズを大きくするにしたがってデータ収集率が向上することである。これは、フィールドサイズが大きくなるとセンサノード密度が低くなるため、受信キュー溢れが緩和されるからであると考えられる。

### 5.6 $T_{receive}$ に関する検証

これまでのシミュレーションでは、センサノードが受信状態である時間  $T_{receive}$  に 1 秒を用いた。しかしながら、状況によっては  $T_{receive}$  の値を変えた方がよい可能性がある。

$T_{receive}$  の値が性能に大きな影響を与えるのは、日照状況が良いために式 (3) における  $T_{charge}$  が 0 になった場合の状態である。 $T_{charge}$  が 0 かつ  $T_{receive}$  が大きい場合には各ノードのパケットの送信間隔が大きくなるのでスループットが低下する。一方で、 $T_{charge}$  が 0 かつ  $T_{receive}$  が小さい場合にはパケットの送信間隔が短くなり、衝突が発生しやすくなる。最適な  $T_{receive}$  は、障害物やパスロス係数など環境によって異なるため、実験的に決定する必要がある。

シミュレーションで想定している環境において  $T_{receive}$  を変化させた場合の 60 秒あたりのデータ収集率を比較した。フィールドの一辺の長さを 100 [m]~600 [m] と変化させ、各センサノードのテーブルサイズは 10 とした。

図 8 にセンサノードが受信状態である時間  $T_{receive}$  に対する収集率の変化を示す。図 8 より、次の 2 つのことが分かる。

1つ目は、 $T_{receive}$  が 0 から大きくなるに従ってデータ収集率が向上し、ある値の  $T_{receive}$  を境にデータ収集率が低下することである。まず、 $T_{receive}$  が大きくなるに従ってデータ収集率が向上する部分に関しては、 $T_{receive}$  が増加することで衝突が緩和されるからだと考えられる。 $T_{receive}$

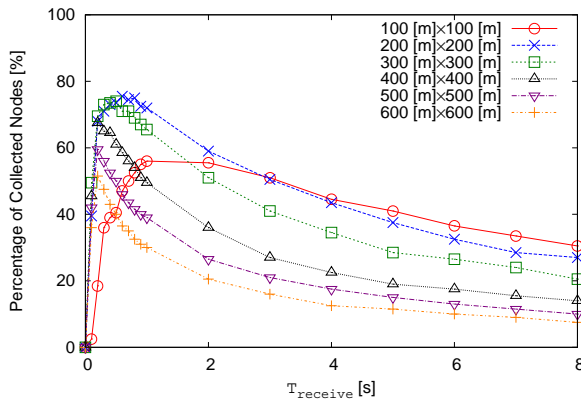


図 12  $T_{receive}$  に対するデータ収集率の変化

Fig. 12 Percentage of collected nodes vs.  $T_{receive}$

が大きくなるに従ってデータ収集率が低下する部分に関しては、衝突が緩和されることによるデータ収集率の向上よりも、センサデータの送信インターバルが長くなることで送信されるセンサデータの減少の方が大きくなるからだと考えられる。

2つ目は、データ収集率が最も高くなる  $T_{receive}$  はノード密度によって異なることである。例えば、フィールドサイズが 100 [m]×100 [m] の場合には最もデータ収集率が高くなる  $T_{receive}$  が 1 の時であるのに対し、300 [m]×300 [m] の場合には  $T_{receive}$  が 0.5 の時が最も高くなる。ノード密度が低い場合には衝突する可能性も低くなるため、ノード密度が高い場合よりも小さい  $T_{receive}$  でも高いデータ収集率を実現できているのだと考えられる。

### 5.7 Gossip との比較

図 5 に示したパケット詰まり問題は Solar Biscuit のメモリの少なさに起因するものの、ブロードキャストストーム [40] とも類似している。ブロードキャストストームの対応策としては、Gossip [41] を用いることが一般的である。このような観点から、Spread Table Flooding と Gossip との比較を行った。具体的には、充電電流を 1~16 [mA] に、Gossip の転送確率  $p$  を 0.2~1.0 に変化させた場合のデータ収集率を評価した。転送確率が 1.0 の場合にはこれまで評価した Simple Flooding と同じ動作となる。フィールドサイズは 500 [m]×500 [m]、テーブルサイズは 10、センサノードが受信状態である時間  $T_{receive}$  は 1 秒とした。データリンク層には全て SB-MAC を用いた。

図 13 に充電電流と Gossip の転送確率  $p$  を変えた場合の評価を示す。図 13 より、次の 3 つのことが分かる。

1つ目は、充電電流が多い場合には、Gossip の転送確率の低いものが転送確率の高いものよりもデータ収集率が高い傾向があることである。充電電流が多い場合にはノードの稼働時間が増えるため、パケット詰まり問題が発生しやすくなる。Gossip では、転送確率を低くすることによって

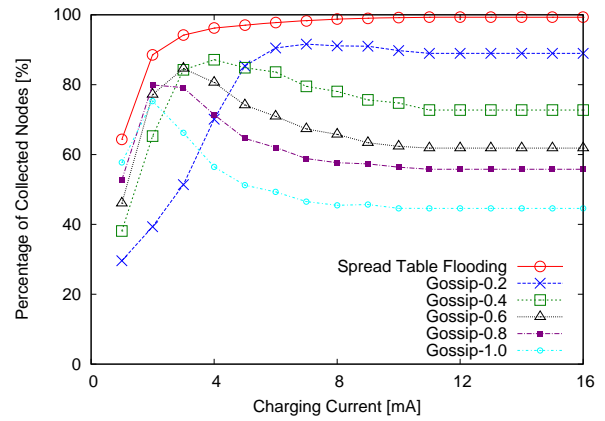


図 13 Spread Table Flooding と Gossip との比較

Fig. 13 Spread Table Flooding vs. Gossip

パケット詰まり問題を緩和することができているのだと考えている。

2つ目は、充電電流が少ない場合には Gossip の転送確率が低いものよりも Gossip の転送確率の高いものの方がデータ収集率が高い傾向があることである。充電電流が少ない場合には各ノードの稼働時間が減るため、Gossip によって転送確率を低くするとネットワーク全体にパケットが行き渡る確率も低くなるからだと考えられる。

3つ目は、充電電流に依らず、Spread Table Flooding が最も高いデータ収集率を実現していることである。充電電流が多い場合には、Gossip と同様に確率的にパケットが伝搬されるため、パケットの偏りを小さくできるからだと考えている。もし常に最適な転送確率  $p$  を設定することができ、メモリの制約がなければ、Spread Table Flooding と Gossip は同等のデータ収集率を実現する可能性があると考えている。一方で、充電電流が少ない場合には、各ノードの駆動時間が減り、結果として各ノードが送信するパケットのパケットロス率が高くなる。パケットロス率が高い状況においては、Spread Table Flooding における拡散中継テーブルの更新頻度が少なくなる。拡散中継テーブルの更新頻度が少ない場合には、既に送信されたパケットが再び送信される可能性が高くなるため、結果として再送と同じ役割を果たしているために Gossip よりも高いデータ収集率を達成していると考えている。

## 6. おわりに

本論文では、バッテリーレス無線センサネットワークのハードウェアプロトタイプ「Solar Biscuit」と Solar Biscuit 上で動作するデータ収集プロトコル「Spread Table Flooding」について述べた。Solar Biscuit は、既存のセンサノードと異なり、1 次電池や 2 次電池を用いずに環境から得た電力をキャパシタに一時的に蓄積しながら動作するため、電力が不安定になる。Solar Biscuit の通信プロトコルは、電力の不安定なバッテリーレスセンサネットワークにおいて、得

られる電力に適応的に動作する SB-MAC と、省メモリでフラディングを実現する Spread Table Flooding を組み合わせてデータ収集を実現する。Solar Biscuit から得られた実験パラメータに基づいて OMNeT++ を用いて SB-MAC と Spread Table Flooding をシミュレーションで評価した。その結果、SB-MAC を用いた Spread Table Flooding が SB-MAC を用いたシンプルフラディング、SB-MAC を用いない Spread Table Flooding のいずれよりもデータ収集率が得られた。

#### 参考文献

- [1] Ammar, Y., Buhrig, A., Marzencki, M., Charlot, B., Basrour, S., Matou, K. and Renaudin, M.: Wireless Sensor Network Node with Asynchronous Architecture and Vibration Harvesting Micro Power Generator, *Proceedings of the 2005 Joint Conference on Smart Objects and Ambient Intelligence*, Grenoble, France, pp. 287–292 (2005).
- [2] Paradiso, J. A. and Starner, T.: Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics, *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 4, No. 1, pp. 18–27 (2005).
- [3] Mitcheson, P. D., Green, T. C., Yeatman, E. M. and Holmes, A. S.: Architectures for Vibration-Driven Micropower Generators, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 13, No. 3, pp. 429–440 (2004).
- [4] Raghunathan, V., Kansal, A., Hsu, J., Friedman, J. and Srivastava, M.: Design Considerations for Solar Energy Harvesting Wireless Embedded Systems, *Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'05)*, Los Angeles, California, pp. 457–462 (2005).
- [5] 森戸 貴, 南 正輝, 鹿島拓也, 猿渡俊介, 森川博之, 青山友紀: バッテリレス無線センサネットワークの設計と実装, 電子情報通信学会技術研究報告 (2004).
- [6] Minami, M., Morito, T., Morikawa, H. and Aoyama, T.: Solar Biscuit: A Battery-less Wireless Sensor Network System for Environmental Monitoring Applications, *Proceedings of the 2nd International Workshop on Networked Sensing Systems (INSS'05)*, San Diego, CA (2005).
- [7] Mo, L., He, Y., Liu, Y., Zhao, J., Tang, S. J., Li, X. Y. and Dai, G.: Canopy Closure Estimates with GreenOrbs: Sustainable Sensing in the Forest, *Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'09)*, Berkeley, California, pp. 99–112 (2009).
- [8] Zhang, P., Sadler, C. M., Lyon, S. A. and Martonosi, M.: Hardware Design Experiences in ZebraNet, *Proceedings of the 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'04)*, Baltimore, Maryland, pp. 227–238 (2004).
- [9] Selavo, L., Wood, A., Cao, Q., Sookoor, T., Liu, H., Srinivasan, A., Wu, Y., Kang, W., Stankovic, J., Young, D. and Porter, J.: LUSTER: Wireless Sensor Network for Environmental Research, *Proceedings of the 5th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'07)*, Sydney, Australia, pp. 103–116 (2007).
- [10] Dutta, P., Hui, J., Jeong, J., Kim, S., Sharp, C., Taneja, J., Tolle, G., Whitehouse, K. and Culler, D.: Trio: Enabling Sustainable and Scalable Outdoor Wireless Sensor Network Deployments, *Proceedings of the 4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'06)*, pp. 407–415 (2006).
- [11] Polastre, J., Hill, J. and Culler, D.: Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'04)*, Baltimore, Maryland, pp. 95–107 (2004).
- [12] Ye, W., Heidemann, J. and Estrin, D.: An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 21st IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM'02)*, New York, New York, pp. 1567–1576 (2002).
- [13] Dam, T. V. and Langendoen, K.: An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03)*, Los Angeles, California, pp. 171–180 (2003).
- [14] Buettner, M., Yee, G. V., Anderson, E. and Han, R.: X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-Cycled Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'06)*, Boulder, Colorado, pp. 307–320 (2006).
- [15] Sun, Y., Gurewitz, O. and Johnson, D. B.: RI-MAC: A Receiver-Initiated Asynchronous Duty Cycle MAC Protocol for Dynamic Traffic Loads in Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'08)*, Raleigh, North Carolina, pp. 1–14 (2008).
- [16] Dutta, P., Haggerty, S. D., Chen, Y., Liang, C. J. M. and Terzis, A.: Design and Evaluation of a Versatile and Efficient Receiver-initiated Link Layer for Low-power Wireless, *Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'10)*, Zurich, Switzerland, pp. 1–14 (2010).
- [17] Intanagonwiwat, C., Govindan, R. and Estrin, D.: Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks, *Proceedings of the 6th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. (MobiCom'00)*, Boston, Massachusetts, pp. 56–67 (2000).
- [18] Gnawali, O., Fonseca, R., Jamieson, K., Moss, D. and Levis, P.: Collection Tree Protocol, *Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'09)*, Berkeley, California, pp. 1–14 (2009).
- [19] Iannello, F., Simeone, O. and Spagnolini, U.: Dynamic Framed-ALOHA for Energy-Constrained Wireless Sensor Networks with Energy Harvesting, *Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM'10)*, Miami, Florida, pp. 1–6 (2010).
- [20] Tadayon, N., Khoshroo, S., Askari, E., Wang, H. and Michel, H.: Power Management in SMAC-based Energy-harvesting Wireless Sensor Networks using Queuing Analysis, *Journal of Network and Computer Applications*, pp. 1–10 (2012).
- [21] Tacca, M., Monti, P. and Fumagalli, A.: Cooperative and Reliable ARQ Protocols for Energy Harvesting Wireless Sensor Nodes, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 6, No. 7, pp. 2519–2529 (2007).
- [22] Yang, J., Ozel, O. and Ulukus, S.: Optimal Packet Scheduling in a Broadcast Channel with an Energy Harvesting Transmitter, *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'11)*, Kyoto, Japan, pp. 1–5 (2011).
- [23] Reddy, S. and Murthy, C. R.: Profile-based Load

Scheduling in Wireless Energy Harvesting Sensors for Data Rate Maximization, *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'10)*, Cape Town, South Africa, pp. 1-5 (2010).

[24] Zhang, S. and Seyed, A.: Analysis and Design of Energy Harvesting Wireless Sensor Networks with Linear Topology, *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'11)*, Kyoto, Japan, pp. 1-5 (2011).

[25] Yoshida, M., Kitani, T., Bandai, M., Watanabe, T., Chou, P. H. and Seah, W. K. G.: Probabilistic Data Collection Protocols for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks, *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, Vol. 11, No. 2/3, pp. 82-96 (2012).

[26] Zeng, K., Ren, K., Lou, W. and Moran, P. J.: Energy Aware Efficient Geographic Routing in Lossy Wireless Sensor Networks with Environmental Energy Supply, *Wireless Networks*, Vol. 15, No. 1, pp. 39-51 (2009).

[27] Hill, J. and Culler, D.: MICA: A Wireless Platform for Deeply Embedded Networks, *IEEE Micro*, Vol. 22, No. 6, pp. 12-24 (2002).

[28] Burke, A.: Ultracapacitors: Why, How, and Where is the Technology, *Journal of Power Sources*, Vol. 91, No. 1, pp. 37-50 (2000).

[29] 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, *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'09)*, Budapest, Hungary, pp. 1-6 (2009).

[30] Tanenbaum, A. S.: *Computer Networks (4th Edition)*, Pearson Education (2002).

[31] Karn, P.: MACA - A New Channel Access Method for Packet Radio, *Proceedings of the ARRL 9th Computer Networking Conference*, Ontario, Canada, pp. 134-140 (1990).

[32] Takagi, H. and Kleinrock, L.: Optimal Transmission Ranges for Randomly Distributed Packet Radio Terminals, *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 32, No. 3, pp. 246-256 (1984).

[33] Mao, G., Fidan, B. and Anderson, B. D. O.: Wireless Sensor Network Localization Techniques, *Computer Networks*, Vol. 51, No. 10, pp. 2529-2553 (2007).

[34] Patwari, N., Ash, J. N., Kyperountas, S., III, A. O. H., Moses, R. L. and Correal, N. S.: Locating the Nodes: Cooperative Localization in Wireless Sensor Networks, *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 22, No. 4, pp. 54-69 (2005).

[35] Sun, Y., Gurewitz, O., Du, S., Tang, L. and Johnson, D. B.: ADB: An Efficient Multihop Broadcast Protocol based on Asynchronous Duty-cycling in Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'09)*, Berkeley, California, pp. 43-56 (2009).

[36] Guo, S., Gu, Y., Jiang, B. and He, T.: Opportunistic Flooding in Low-Duty-Cycle Wireless Sensor Networks with Unreliable Links, *Proceedings of the 15th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'09)*, Beijing, China, pp. 133-144 (2009).

[37] Zuniga, M. and Krishnamachari, B.: Analyzing the Transitional Region in Low Power Wireless Links, *Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON'04)*, Santa Clara, California, pp. 517-

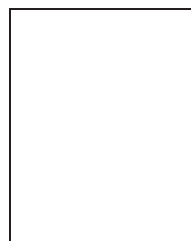
526 (2004).

[38] Varga, A.: The OMNeT++ Discrete Event Simulation System, *Proceedings of the 15th European Simulation Multiconference (ESM'01)*, Prague, Czech Republic, pp. 319-324 (2001).

[39] Boulis, A.: Castalia: Revealing Pitfalls in Designing Distributed Algorithms in WSN, *Proceedings of the 5th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'07)*, Sydney, Australia, pp. 407-408 (2007).

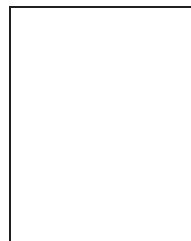
[40] Tseng, Y. C., Ni, S. Y., Chen, Y. S. and Sheu, J. P.: The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network, *Wireless Networks*, Vol. 8, No. 2-3, pp. 153-167 (2002).

[41] Haas, Z., Halpern, J. Y. and Li, L.: Gossip-Based Ad Hoc Routing, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 14, No. 3, pp. 479-491 (2006).



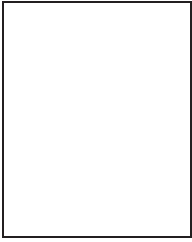
猿渡 俊介 (正会員)

2007年東京大学大学院博士課程修了。科学博士。2003~2004年IPA未踏ソフトウェア創造事業, 2006~2008年日本学術振興会学振特別研究員, 2007~2008年イリノイ大学客員研究員, 2008~20012年東京大学先端科学技術研究センター助教, 2012年より, 静岡大学大学院情報科学研究科助教。2013年より理化学研究所と産業技術総合研究所にて客員研究員。専門はワイヤレスネットワーク, センサネットワーク, システムソフトウェア等。2009年電子情報通信学会論文賞。2010年情報処理学会山下記念研究賞。電子情報通信学会, IEEE, ACM各会員。



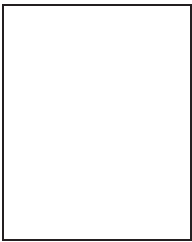
森戸 貴 (正会員)

2005年芝浦工業大学工学部卒業。2007年芝浦工業大学大学院修士課程修了。2011年東京大学大学院博士課程単位取得退学。2012年より東京大学先端技術研究センター研究員。専門は無線センサネットワーク。電子情報通信学会会員。



南 正輝 (正会員)

1996年芝浦工業大学工学部電子工学科卒業。1998年同大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。2001年東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻博士課程修了。工学博士。2006年スイス・ローザンヌ連邦工科大学客員研究員。2003~2007年芝浦工業大学工学部講師。2008~2010年東京大学先端技術研究センター准教授。2011年より芝浦工業大学工学部准教授。電子情報通信学会論文賞(2回)。電子情報通信学会会員。



森川 博之 (正会員)

昭62東大・工・電子卒。平4同大学院博士課程修了。現在、同大学・先端科学技術研究センター・教授。工博。平9~10コロンビア大学客員研究員。平14~18情報通信研究機構モバイルネットワークグループリーダー兼務。ユビキタスネットワーク、センサネットワーク、ビッグデータ/M2M、無線通信システムなどの研究に従事。本会論文賞、電子情報通信学会論文賞(3回)、ドコモモバイルサイエンス賞、志田林三郎賞、情報通信功績賞等本会論文賞、電子情報通信学会論文賞(3回)、ドコモモバイルサイエンス賞、志田林三郎賞、情報通信功績賞等受賞。電子情報通信学会フェロー、新世代M2Mコンソーシアム会長、OECD/ICCP副議長等。