

# バックアップノードの導入による流れるセンサネットワークの信頼性向上手法の基礎評価

秦 小ゲツ†<sup>1</sup> 三竹 一馬†<sup>1</sup> 前川 寛†<sup>1</sup> 石原 進†<sup>1</sup>

近年、世界中の都市で下水管の老朽化の問題が顕著になっており、道路陥没等の問題が多発している。下水管老朽化の調査を安全で低コストに行うために、筆者らは複数の小型のセンサを利用した「流れるセンサネットワーク」のアーキテクチャを提案している。「流れるセンサネットワーク」について、水路沿いに設置されたアクセスポイントとセンサノードの接続機会が限定的であるという条件の下、消費電力、端末数を抑えるため、各ノードが間欠的に起動し、センシングと観測データの転送を行うという方式を利用する。また、各センサノードは定期的に1ホップ通信範囲で一つの代表ノードを選ぶ。センサノードは観測データを代表ノードに転送した後、休眠状態になる。代表ノードは起動状態を維持し、アクセスポイントと通信できる時に、収集したデータをアクセスポイントに転送する。しかし、代表ノードの故障や電力枯渇により、収集されたデータがアクセスポイントへ転送されなかった場合、収集したデータが失われ、流れるセンサネットワークのデータの回収率が低下する。本論文では、バックアップノードを導入し、代表ノードがアクセスポイントにデータを転送できなかった場合にも、バックアップノードがデータを保持し、代表ノードとして起動した時に、バックアップデータをアクセスポイントに転送することで、流れるセンサネットワークのデータの回収率を向上するための方式について検討する。シミュレーションの結果、バックアップノードを導入した流れるセンサネットワークによってより高い観測データの回収率が達成できることを確かめた。

## Basic evaluation of improving reliability of drifting wireless sensor networks using backup-nodes

Xiaoyue Qin†<sup>1</sup> Kazuma Mitake†<sup>1</sup> Hiroshi Maegawa†<sup>1</sup> Susumu Ishihara†<sup>1</sup>

### 1. はじめに

近年、世界中の高度成長期に整備した都市インフラの老朽化が目立ち、飲用水汚染や道路陥没等の多くの問題が発生している。そこで下水管の維持のために、人による目視および高価なロボットを使った方法による調査が行われるが、いずれも高いコストが伴ってしまう。筆者らはセンサノードを用いた下水管の検査を安価に行うシステムとして「流れるセンサネットワーク」を提案している[1]。

流れるセンサネットワーク(図1)では、カメラやガスセンサ等を搭載した小型無線センサノードを下水管のマンホールから投入する。複数のノードを用いるのは、下水管内で、ノードの故障や電力の枯渇に対処するためである。複数のセンサノードは水路を流れながら、定期的にセンシングや画像撮影を行う。マンホールの蓋の下にアクセスポイント(AP)が設置されている。設置場所にマンホールの蓋の下を選択するのは、そこでの設置の容易さと、APと外部との通信の容易性のためである。センサノードはAPと通信できる時に、これまでに観測したデータをAPに転送する。この後、データはAPを介して外部に送られる。

IEEE802.11あるいはIEEE802.15.4を用いた場合、マンホールの直下の周辺数メートルから十数メートル程度の範囲のみでセンサノードはAPとの通信機会を得らると考えら

れる。そのため、マンホールの蓋の下に設置されたAPと下水管内のセンサノードとの通信条件は厳しい。このほか、センサノードは小容量の電池、例えばボタン電池を利用しているため、常に起動状態を維持していると、下水管終端に着く前に電力が枯渇してしまう可能性がある。筆者らは、各センサノードはセンシング時のみ起動し、定期的に近隣ノード群から選出される代表ノード(CH)に管内の観測データを転送する方式を開発してきた[3]。センサノードは観測したデータを代表ノードに転送した後、睡眠状態になる。代表ノードは次の代表ノード選出まで起動状態を続けて、他のセンサノードからのセンシング情報を収集し、マンホールの蓋の下に設置されたAPと接続機会を得る時に、収集したデータをAPへ転送する。しかしながら、代表ノードが収集したデータをAPに転送する前に、代表ノードが故障したり、電力が枯渇した場合、代表ノードが収集したデータが損失してしまう可能性がある。このため、APにおける代表ノードから転送された観測データの回収率が低下する。そこで、観測データの回収率の低下を防ぐため、代表ノードの故障に備えて観測したデータのバックアップをする必要がある。

本稿では、各ノードが観測したデータを確実にAPへ送信するために、観測データをバックアップするノードを導入し、流れるセンサネットワークの信頼性を向上するためのバックアップ方法について検討する。以下、第2章で関連研究について述べた後、第3章で流れるセンサネットワ

†1 静岡大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Shizuoka University

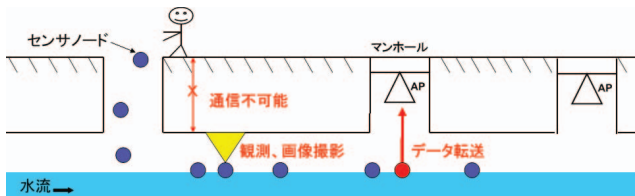


図1 流れるセンサネットワーク概念図

ークの基本設計、代表ノードの選択方法およびデータの回収方法について述べる。次に第4章で、バックアップノードの導入による流れるセンサネットワークの信頼性向上するためのバックアップ手法について考察する。第5章、流れるセンサネットワークとバックアップノードを導入した流れるセンサネットワークに対して、観測データの回収量についてシミュレーションに基づいて評価する。最後に第6章で本論文をまとめる。

## 2. 関連研究

センサネットワークを用いて下水管内の調査を行う試みがいくつか試みられている。固定のセンサノードを用いた試みとして、PIPENETがある[5]。PIPENETは、固定センサを利用して水位、水圧などを測定することによって下水管の漏れの検出を行っている。しかしながら、固定センサを用いる方法は管に沿って多数の固定センサを設置する必要があり、設置コストがかかる。

一方、移動するセンサノードを用いた取り組みには、SewerSort[6]やPipeProbe[7]等がある。SewerSortは、主に下水管のガス濃度を調べるために、浮き輪のついたセンサノードを下水道に流すシステムである。このシステムでは、マンホールの下等に設置したAPからの電波強度をあらかじめ測定しておき、センサノードからの通信の電波強度と明し合わせることでAPからの距離を推定している。PipeProbeは、圧力センサと角速度センサを搭載したセンサノードを排水管に流すことで、屋内の配管の構造の推定を行う。

しかし、これらはいずれもセンサノード間の通信を想定していない。一方、本研究では、管内で非自律移動するセンサからのデータ回収の信頼性の向上のために、センサノードとAP間の通信だけでなく、センサノード間の通信を用いる。また、センサノードの小型化と軽量化のために電池容量を小さくするため、省電力化の工夫を行っている点に特徴を持たせている。

河川等の水流環境のデータ回収にセンサノードを利用する取り組みとして、カリフォルニア大学バークレー校のFloating Sensor Network Projectがある[8]。Floating Sensor Network Projectは、ドリフタと呼ばれる任意の移動が可能移動センサノードを開発している。ドリフタには水質センサ、GPSのほかGSM、Zigbeeによる通信機能、浮力制御機能等が搭載されており、72時間の移動状態を維持する可能である。また、芝田らはGPS、Zigbeeによる通信機能

を持つセンサノード（GPSフロート）を開発し、海水浴場での表層流観測に用いる[9]。流れるセンサネットワークでは、ノードとAPとの通信機会を限られており、この点がこれらの取り組みと異なっている。

無線センサネットワークの信頼性を向上する試みが行われている。Qiaoは水域監視システムを提案している[10]。このシステムでは、複数の固定のセンサノードが観測したデータを代表ノードに転送した後、代表ノードは収集したデータをAPに転送する。代表ノードの電力が枯渇した時に、ネットワークが崩壊することを避けるために、筆者らは代表ノードのデータ転送の役割を分担する補助代表ノードを導入した。主代表ノードはクラスタ内の電力が最大ノードを補助代表ノードとして選ぶ。補助代表ノードは代表ノードが収集したデータを受信し、APに転送する。しかしながら、流れるセンサネットワークでは、すべてのセンサノードが水路に流れるので、ノード間の距離が固定ではない。従って、クラスタの構成が頻繁に変化するので、適切な補助代表ノードの選出処理のために、多くの電力を消費してしまう。また、流れるセンサネットワークにデータ転送の役割を分担する補助代表ノードを導入すると、接続機会が不定期に訪れるAPとの通信をするために、補助代表ノードも起動状態を維持し、多くの電力を消費する。

## 3. 流れるセンサネットワーク

流れるセンサネットワークは、複数のカメラやガスセンサを備えている小型かつ安価なセンサノードが下水管の水流に流れながら、水位や温度、画像等の観測を行うことを目的とする。以下、これまでの研究で想定している流れるセンサネットワークについて概説する。

### 3.1 流れるセンサネットワークの想定環境

筆者らは流れるセンサネットワークの利用条件として以下のものを仮定している。

- センサノードが大きく重い場合、管路で詰まったり水中に沈んでAPやノード間での通信が水で遮られたりすることが考えられる。そのため、管路内でセンサノードが詰まらず、通信が可能な状態を維持するために、センサノードは小型・軽量である必要がある。従って、センサノードに搭載する電池はボタン電池等小さいものになる。ボタン電池は小容量であるため、センサノード水路終端まで起動状態を維持できない可能性がある。
- センサノードにはスクリュウなどの推進器は搭載されていない。センサノードは下水管内の水流によって非自律的に移動する。また、センサノード群は水流の状態によって拡散するため、正確なノード位置の取得や予測などが困難である。
- アクセスポイント（AP）の設置位置は、下水管にお

ける一部のマンホールの蓋の下に限定され、アクセスポイントの通信範囲はマンホールの直下の周辺のみである。これは、各起動状態のノードは不定期的にアクセスポイントとの通信機会を得るものと考えられる。

- 水流環境ではセンサノードの水没や壁との衝突により、途中でノードが故障するや電池切れする可能性があり、それにより動作できなくなった場合にデータを回収できないものとする。

### 3.2 限定的なAPとの通信機会を得るのデータの回収方法

3.1 で述べた利用条件の下でセンサノードが観測したデータを確実に回収するために、以下の様な動作で観測データを回収する。

図2に示すように、各ノードはそれぞれ間欠的に起動し、センシング処理とデータ転送処理を行う。各ノードは定期的に近隣ノード群から1ホップで通信できる範囲内で一つ代表ノードを選ぶ。代表ノードは一度選出された後、次の代表ノード選出処理が始まるまで、起動状態を維持する。クラスタ内の他のノードは起動タイミングに従って観測したデータを代表ノードに転送した後、休眠状態になる。代表ノードはAPからのビーコンを受信し、APと通信可能であることを知ると、それまでに観測したデータと他のノードから収集したデータをAPに転送する。ノードの残存電力、接続性等の条件に応じて、代表ノードを定期的に交代させる。

### 3.3 代表ノードの選択方法

以上の観測データの回収方法を適用するに当たっては、適切に代表ノードを選択する必要がある。センサノードがAPと通信できる時に睡眠状態になっているため、観測データをAPに転送しなくなってしまう状態を避けなければならない。理想的には、すべてのノードがデータの観測後、少なくとも1台の代表ノードにデータ転送できる状態が作られていることが望ましい。代表ノードの選択方法に関しては、文献[11]でLEACHを使う方法、及びHEEDを改良した改良HEED[4]を使う方法について提案し、評価を行っているが、今回は簡単のため、比較的良好なHEEDを使った方法についてのみ取り扱う。

HEED [12]は、全てのノードが短時間起動状態となって代表ノードの選出処理を行う。この選出処理では、全てのノードが自身を含め少なくとも1台の代表ノードに接続できるように、ノードの残存電力による計算した立候補確率 $P_{CH}$ および他のノードとの接続状態などから得られるコストによって、代表ノードを選出する。立候補確率 $P_{CH}$ の

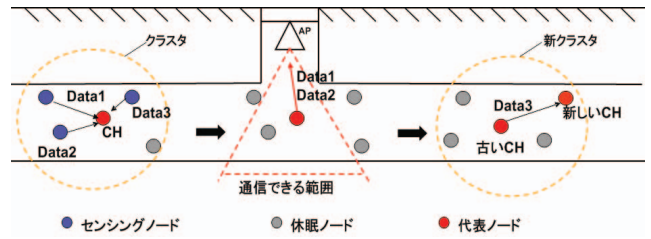


図2 流れるセンサネットワークの観測データの回収方法

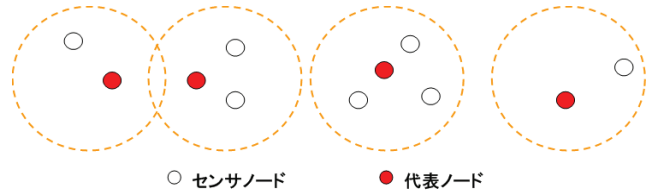


図3 HEEDで代表ノード選択方法

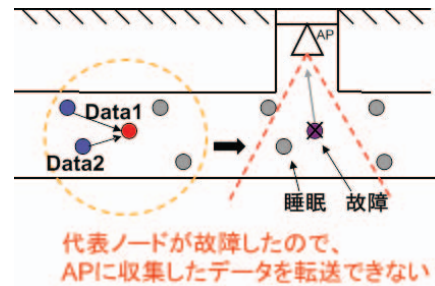


図4 代表ノードが故障した状況

計算式は式(1)になる。ここで、 $P_{HEED}$ は $P_{CH}$ の基準値、 $E_{residual}$ はノードの残存電力量、 $E_{max}$ は初期電力量、 $P_{min\_sleep}$ は $P_{CH}$ の取り得る最小値である。

$$P_{CH} = \max(P_{HEED} * E_{residual} / E_{max}, P_{min\_sleep}) \quad (1)$$

流れるセンサネットワークでは、HEEDの代表ノードの選択例を図3に示す。各ノードの1ホップ以内のノードの中に必ず代表ノードが存在するように代表ノードが選出される。これにより、代表ノードと通信できないセンサノードが存在しなくなる。

## 4. バックアップノードの導入による流れるセンサネットワークの信頼性向上方法

### 4.1 観測データ保護の必要性

前章で示した観測データの回収方式では、代表ノードがデータをAPに転送する前に、代表ノードが故障したり、電力が枯渇した場合、代表ノードがセンサノードから収集したデータが失われ、APにおけるデータの回収率が低下する(図4)。

そこで、代表ノード選出を行ったノード群の中から、バックアップノードを設定し、代表ノードが回収するデータのバックアップを取る。そうすることで、代表ノードが故障したり、電池切れになった場合でも、バックアップしたデータを保持しているノードが代表ノードとなった時にAPへ送ることができる。このように代表ノードの故障に備えてデータのバックアップを取ることで、データの回収率の低下を防ぐ。

## 4.2 バックアップノードの提案

本節では、観測したデータをバックアップするノードの導入について説明する。バックアップ用のノードを用いることにより、各観測データを少なくとも二つのノードが持つことができる。ここでは、Self Backup、Overhearing Backup と Assigning Backup 三通りのバックアップ方法について考えを提案する。

### 4.2.1 Self Backup

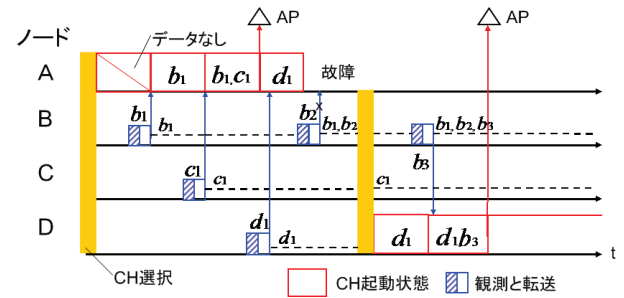
Self Backup ではセンシングノードが観測データを代表ノードに転送した後も、その観測データを保持する。そのノードは自身が代表ノードとなった時に保持していたデータを AP 通信時に AP へ転送する。それにより、他の代表ノードが故障により、転送できなかったとしても、観測データを AP へ通信することができる。

図 5(a)に示すように、まず、すべてのノードは一旦起動し、一つの代表ノードを選出する。ここで、ノード A が代表ノードとして選出されたとする。ノード A は次の新しい代表ノードを選出するまでに、起動状態を維持する。センサノード B は観測データ  $b_1$  を代表ノード A に転送した後、このデータを破棄せずに保持する。同様に、センサノード C は  $c_1$  を代表ノード A に送る時、そのデータを保持する。代表ノード A は AP と接続できる時に、収集したデータ  $b_1$  と  $c_1$  を AP に転送する。その後、センサノード D がデータ  $d_1$  を代表ノード A に送る。しかし、その直後に代表ノード A が故障してしまったとすると、図で示す代表ノード A はデータ  $d_1$  を AP に転送できなくなってしまう。しかしながら、センサノード D はそのデータ  $d_1$  を保持しているため、ノード D が代表ノードになった時に、ノード D は AP と通信できる時に、前にバックアップしたデータ  $d_1$  を他のセンサノードから収集したデータとともに AP に転送することができる。

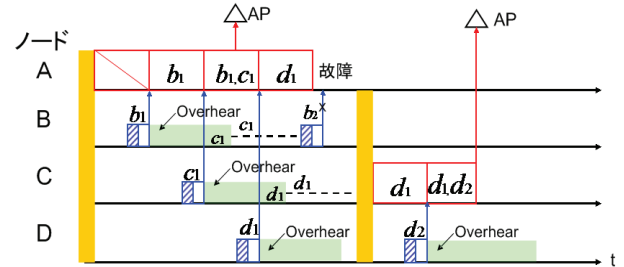
### 4.2.2 Overhearing Backup

Overhearing Backup では、代表ノード以外のノードが起動スケジュールに従って、観測データを代表ノードに転送した後、バックアップノードとしてオーバーヒア状態に移移する。オーバーヒア状態になるノードは自身の残存電力にしたがってオーバーヒアを行う時間を決める。この期間の間、バックアップノードは起動状態を維持し、他のセンシングノードが観測データを代表ノードに転送する時に、その転送データをオーバーヒアし、その観測データを保存する。代表ノードが AP にデータを転送する時に、バックアップノードは代表ノードから AP に転送されたデータに関しては、自身のストレージから破棄する。バックアップノードは自身が代表ノードになった時、保存済のデータを AP に転送する。

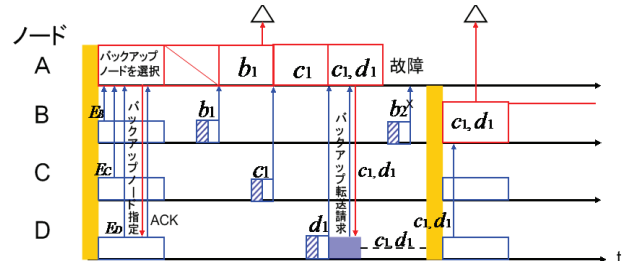
図 5(b)では、ノード A が代表ノードになったとする。メンバノード B は  $b_1$  を代表ノード A に転送した後、オーバーヒア状態を維持する。ノード B がオーバーヒアする時に、



(a) Self Backup



(b) Overhearing Backup



(c) Assigning Backup

図 5 三つのバックアップ方法

他のセンサノード C がデータ  $c_1$  を代表ノード A に送ると、オーバーヒアノード B はデータ  $c_1$  をオーバーヒアして保存する。オーバーヒアノード B は代表ノード A が AP にデータ  $b_1$  と  $c_1$  を送って AP はそれに対して ACK を送る。この時、オーバーヒアノード B は ACK によりデータ  $c_1$  が AP に届いたことが分かるため、データ  $c_1$  を破棄する。ある時刻に、代表ノード A が故障し、その時ノード A が収集したデータ  $d_1$  が失われたとしても、ノード C がそのデータを保存していたとする。この時、ノード C が次に代表ノードになり、AP と通信できる時に、自身が保存しているバックアップデータ  $d_1$  を収集したデータ  $d_2$  と一緒に AP に転送する。

### 4.2.3 Assigning Backup

Assigning Backup では、あるノードが代表ノードとして選出された時、そのノードはクラスタ内のメンバノードから受信したノードの情報（残存電力 E）に基づいて、残存電力の一番多いノードをバックアップノードとして選出し、バックアップ指定命令を送る。バックアップノードは命令を受け、代表ノードに ACK を返す。バックアップノードは観測データを代表ノードに転送する際、バックアップの転送請求を行う。代表ノードはこの請求を受信した時、AP に転送していないデータをバックアップノードに転送する。

バックアップノードは代表ノードからのバックアップデータを受信後、休眠状態になる。代表ノードが交代する時に、バックアップノードは保存しているデータを新しい代表ノードに転送する。

図4(c)では、センサノード A は代表ノードであったとする。メンバノード B、C、D は自分の残存電力の情報  $E_b$ 、 $E_c$ 、 $E_d$  を代表ノード A に送る。代表ノード A はこれらの情報により、電力が一番多くノードを選ぶ。たとえば、ノード D が最も残存電力多かつたとして、代表ノード A は「バックアップしてください」という命令を送信する。メンバノード D は命令を受信したら、ACK を返信する。これから、代表ノード A は観測データを回収する。メンバノード D は自分が観測したデータ  $d_i$  を代表ノード A に転送したら、バックアップ転送請求を代表ノード A に送る。代表ノード A はこの請求を届いたら、今持っているデータ  $c_i$  と  $d_i$  をメンバノード D に送る。メンバノード D はそのデータを持ち、選択された新しい代表ノード B に渡す。

### 4.3 三つの方法の比較

Self Backup では、各ノードは自身がバックアップノードとして観測データをバックアップするため、実現が容易である。また、バックアップのために追加のデータ送信を必要としないため、電力消費が最も少ない。一方、バックアップデータは各ノードが CH にならないかぎり CH に転送されないため、ノードが故障すると、回収されない可能性がある。

Overhearing Backup では、バックアップノードは CH と他のノード、及び AP との通信をオーバーヒアするので、CH が保存しているデータの状況を知っている。したがって、AP が受信済のデータをバックアップすることを避けることができる。しかし、この方法では、バックアップノードが起動状態を維持するため、多くの電力を消費する。また、CH が故障した場合、バックアップノードは各センシングノードが CH へ転送しようとするデータを取れない可能性がある。

Assigning Backup では、CH は各メンバノードの情報によって、メンバノードの中で残存電力の最も多いノードをバックアップノードとして選択する。そのため、各ノードはバランスよく電力を消費する。ただし、各ノードのデータ転送量は他の方法の倍になる。また、バックアップノードの選択が他の方法より複雑になるため、バックアップノードの設定時間が長くなることになる。加えて、バックアップノードがデータをバックアップする前に、CH が故障すると、センシングノードからの観測データを保護できない問題がある。

## 5. シミュレーション評価

Self Backup 方法を利用した流れるセンサネットワークの信頼性を評価するため、セルラオートマトンに基づく簡

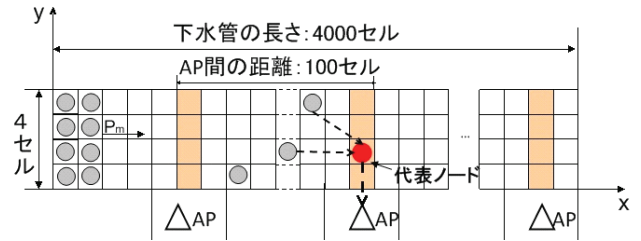


図6 シミュレーションモデル

略化したノード移動モデル、観測モデルおよび電力消費モデルをつくり、これを用いてシミュレーションを行った。

### 5.1 シミュレーションモデル

下水管の内で移動するノードの移動は、流速や水路の形状、その他さまざまな影響を受けるため、ノードの移動を物理的に正確にモデル化するのは容易ではない。ここでは簡単のため、セルラオートマトンを用いたモデル化を行った。図6にシミュレーションモデルの概略を示す。このモデルは4kmの下水管に100m間隔でAPがマンホールのふたの下に設置されている状況を想定したものである。4000桁×4行の正方形のセルに分割されたシミュレーション領域を2次元平面上に設置した。x軸正方向に100セル間隔でAPを設置した。各行の左端の二つのセルにそれぞれ1台ずつセンサノードが配置されている。

#### 5.1.1 ノード移動モデル

一つのセルには存在できるセンサノードは最大でも1台とする。各ノードはx軸正方向のみ移動し、1時間ステップにつき最大1セル移動できる。1時間ステップは0.5秒とするものと想定している。1つ先のセルにセンサノードが存在する時に、ノードが前進することはできない。1つ先のセルにセンサノードが存在しなければノードは移動確率  $P_m$  で前進する。

#### 5.1.2 観測モデル

各ノードは  $T_d$  時間ステップごとに現在位置のデータを取得し、自身の属するクラスタの代表ノードにデータを送る。データのサイズは1個であり、ノードのバッファ上でデータは1個分の領域を消費する。本モデルでは、y座標はノードの移動モデリングのためだけに設けたものである。同じx座標のy座標の異なるセルは理論的には水路内の同じ地点を表す。つまり、同様のy座標で観測されたデータがいくつあったとしても、データ数は1個とみなしてカウントし、同一y座標のデータを1種類とみなすようにしている。  $T_{CH}$  時間ステップに一度、すべてのノードで代表ノードの選出処理が行われる。代表ノードに選出されたノードは、次の代表ノード選出タイミングまで代表ノードとして動作する。APと同じ、あるいは隣接のx座標のセルに代表ノードが存在していたときのみ、1時間ステップに最大10個のデータをAPに転送することが出来る。

また、各ノードは観測データ保存用の記憶領域を所持する。記憶領域は、観測データ記憶域、バックアップ記憶域

と代表ノードになる時用の AP へ転送するデータを保存する記憶域を含めている。また、三つの記憶域の最大保存量はそれぞれ 30 個、30 個、45 個とする。記憶領域の最大保存量を超過してしまった場合、超過分のデータを削除する必要がある。観測データの削除方法に FIFO(First In First Out)方式のように古いデータから順に削除する方法が考えられる。

バックアップを用いない場合、流れるセンサネットワークでは、センサノードは観測時に観測を行い、観測したデータを観測データ記憶域から代表ノードの AP へ転送の記憶域に転送する。代表ノードは自身が観測データ記憶域内の未転送データを他のノードから受信したデータとともに AP に転送する ( 図 7(a) )。一方、Self Backup でバックアップデータを取る流れるセンサネットワークでは、センサノードのバックアップデータ記憶域は観測データ記憶域から、新データをコピーする。センサノードは観測データを代表ノードの AP へ転送の記憶域に送る後、観測データ記憶域内のデータを破棄し、バックアップデータ記憶域内のデータをそのまま保存する。代表ノードになったノードはバックアップデータ記憶域内のデータを他のセンサノードから収集したデータとともに AP へ転送する ( 図 7(b) )。

### 5.1.3 通信モデル

本シミュレーションの通信モデルはセンサノードー代表ノード間の通信及び代表ノードーAP 間の通信に分けられる。

- センサノードー代表ノード間の通信

ノード間の通信はノードの y 座標の差が 50 セル以内の場合に行うことが出来るものとする。センサノードは代表ノードと通信可能の判定は「センサノードと代表ノードまでの距離」と「ノード間の最大通信距離」(50 セル)によって行われ、「センサノードと代表ノードまでの距離」>「ノード間の最大通信距離」ならば通信不可、「センサノードと代表ノードまでの距離」≤「ノード間の最大通信距離」ならば通信可能とした。

- 代表ノードーAP 間の通信

代表ノードはセンサノードから観測データを収集後、AP と通信可能であるか判定を行う。代表ノードと AP 間の通信可能な通信半径は 1 セルであるとする。「代表ノードと AP 間の距離」>「AP と通信可能な通信半径」ならば通信不可、「代表ノードと AP 間の距離」≤「AP と通信可能な通信半径」ならば通信可能とした。

### 5.1.4 消費電力モデル

本シミュレーションでは、代表ノードのみが起動ノードである時間に応じて電力を消費するものとした。これは無線通信において待ち受けのために通信インタフェーズを受信可能にしている間の電力消費が支配的であるためであることに基づく。ノードのセンシング及びノード間でパケットの交換が行う電力消費は簡単のため省略した。つまり、

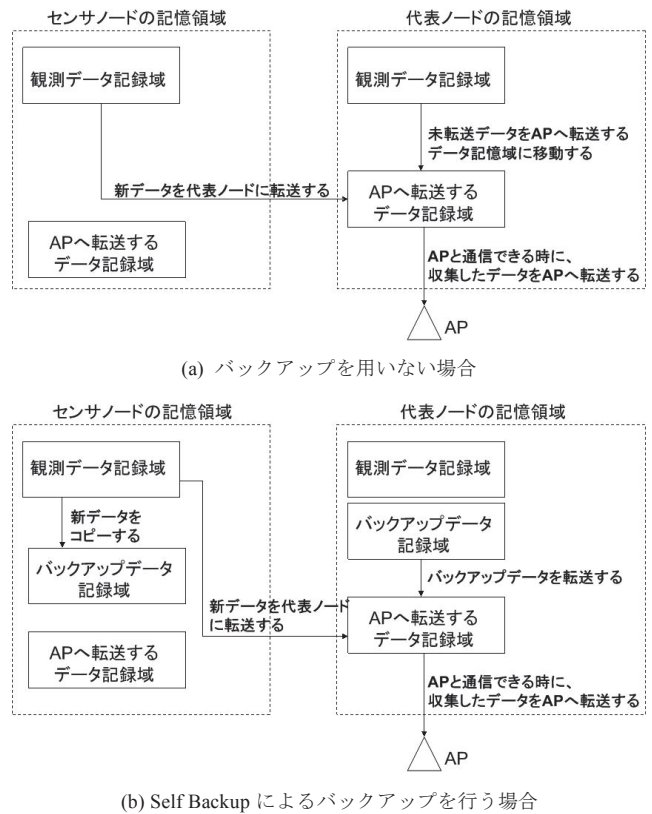


図 7 データ転送処理

表 1 シミュレーションパラメータ

パラメータ	値
$P_{HEED}$	0.35
転送バッファサイズ	50 個
センサノード数 $N_{all}$	8 台
代表ノード更新周期 $T_{CH}$	45 時間ステップ
初期電力量 $E_{max}$	500、1000 単位
移動確率 $P_m$	0.75/時間ステップ
故障率	0%、0.1%、1%
センシング間隔	20 時間ステップ/回

代表ノードのみが各時間ステップで 1 単位ずつ電力を消費するのみとなっている。電力が枯渇すると、そのノードはその後のすべての動作を行わない。

## 5.2 評価指標

シミュレーション終了時に、流れるセンサネットワーク及び Self Backup 方法を利用した流れるセンサネットワークはそれぞれ AP が受信したデータの個数の総和を評価指標とする。本シミュレーションでは、同様の x 座標で観測されたデータがいくつあったとしても、データ数は 1 個とみなしてカウントする。従って、本シミュレーションの評価指標はデータを回収できた領域 (x 座標) の数の平均である。

以下、シミュレーションにおけるパラメータは表 1 に示す通りである。

## 5.3 シミュレーション結果

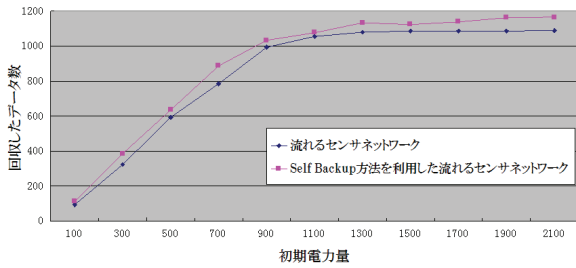
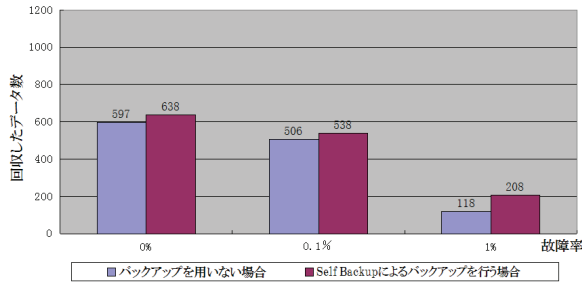
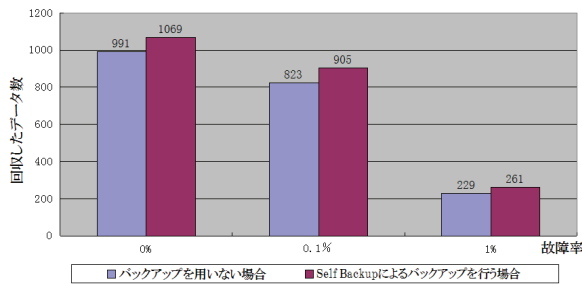


図8 故障率が0%である場合



(a) 初期電力量 500 単位



(b) 初期電力量 1000 単位

図9 電力を固定する場合

HEED 代表ノード選択方法を利用して、流れるセンサネットワーク及び Self Backup 方法を利用した流れるセンサネットワークにおけるシミュレーション結果について示す。以下に示すデータはすべて、各代表ノード選択方法におけるパラメータをデータの回収数の平均が最大となった時の値としたときのものである。また、各条件におけるシミュレーション結果の値は、それぞれ 200 回の試行の平均値である。

図8に流れるセンサネットワークの故障率を0%とした場合、HEED 代表ノード選択方法を用いた、流れるセンサネットワーク及び Self Backup 方法を利用した流れるセンサネットワークにおける回収データ数を示す。本シミュレーションの評価指標がデータをセンシングできた領域 (x 座標) の数であるので、理想的な最大のデータ回収数が4000のx座標の数である。今回のシミュレーションでは、ノードは1時間ステップにつき最大1セル移動し、移動確率を0.75/時間ステップ、ノードのセンシング間隔を20時間ステップ/回としている。従って、平均移動速度が0.75セル/時間ステップ、1台しかノードがくかつ電力が十分にあれば平均で  $4000/(20 \times 0.75) = 267$  個のセルのデータの回収を期待できる。8台ノードが重複なく観測した場合、こ

の8倍で2136個のデータ回収が出来るが、実際には複数のノードが同じ場所の記録をしたり、ノードが故障や電力の枯渇で動作しなくなるので、これよりも低いデータ回収数となる。

図8を見ると、元の流れるセンサネットワーク及び Self Backup 方法を利用した流れるセンサネットワークは、ノードの初期電力量の増加につれて、データの回収数が多くなる。また、Self Backup 方法を利用した流れるセンサネットワークの方はより多くのデータ回収数を得た。つまり、故障率が0%である場合、初期電力量の増加に従って、センサネットワークのデータ回収率が高くなることが分かった。また、Self Backup 方法を利用した流れるセンサネットワークは元の流れるセンサネットワークより高いデータの回収率が得られている。

図9(a)(b)に初期電力量を500及び1000単位、故障率を変化させた時の平均回収データ数を示す。図9(a)(b)を見ると、初期電力量が500単位と小さい場合にも、1500単位と大きな場合にも、ノードの故障率の増大につれて、データの回収数が減少し、データの回収率が低下することが分かった。しかし、いずれの場合も、Self Backup 方法を利用した流れるセンサネットワークの方が Self Backup を用いない場合に比べて、より多くのデータ回収数を得た。なお、初期電力量が500単位と小さい時に回収データ数の方がより小さい理由は、初期電力量が小さい場合、電力の枯渇のため、観測領域端末に到達する前に観測できないノード数が初期電力量が大きな場合のノード数より多いためである。

## 6. まとめ

下水管に小型の流れるセンサノードを複数流し、接続機会が限定されるアクセスポイントを介してデータを回収する「流れるセンサネットワーク」について、センサノードが観測したデータを確実にAPへ送信するために、代表ノードの他に観測データをバックアップするとノードを導入し、観測したデータの転送の信頼性を向上する三つの方法 Self Backup、Overhearing Backup、Assigning Backup を提案し、各方法の特徴について議論した。また、HEEDの代表ノードの選択方法を利用し、異なる故障率の場合、元の流れるセンサネットワークと Self Backup 方法でバックアップデータを取る流れるセンサネットワークの回収データ数についてシミュレーションを行った。結果により、Self Backup 方法でバックアップデータを取る流れるセンサネットワークの回収データ数は元の流れるセンサネットワークの回収数より多いということが分かった。バックアップノードを導入した流れるセンサネットワークはより高いデータの回収率を持っていることを確かめた。

今後、Overhearing Backup と Assigning Backup でシミュレーションを行い、流れるセンサネットワークにおけるデータ回収数及び消費電力についてを検討する予定である。

## 謝辞

本研究は（財）浜松科学技術研究振興会科学技術研究試験助成金の補助による。ここに記して謝意を示す。

## 参考文献

- 1) 石原進 :間欠通信を行う流れるセンサ群からの情報収集に関する考察, 情報処理学会研究報告. モバイルコンピュータとユビキタス通信研究会, Vol.22, No.22, pp.1-7 (2010).
- 2) Ishihara, S. And Sato, D.: Active node selection in flowing wireless sensor networks, Proc. 6th international conference on mobile computing and ubiquitous networking, pp.8-15 (ICMU 2012) (2012).
- 3) 石原進, 佐藤大輔 :アクセスポイントとの間欠的通信機会を持つ流れるセンサネットワークのための優先度を考慮したデータ回収方法, マルチメディアと分散, 協調シンポジウム, pp.1471-1478 (2012).
- 4) 佐藤大輔, 石原進 :アクセスポイントとの間欠的機会を持つ流れるセンサ群からの情報収集に関する基礎的評価, 電子情報通信学会技術研究報告, USN2011-74, Vol.111, No.386, pp.101-106 (2010).
- 5) Stoianov, I., Nachman, L., Madden, S., Tokmouline, T. and Csail, M.: PIPENET: A wireless sensor network for pipeline monitoring, Proc.IEEE IPSN 2007, pp.264-273 (2007).
- 6) Kim, J., Lim, J., Friedman, J., Lee, U., Vieira, L., Rosso, D., Gerla, M. and Srivastava, M.: SewerSnort: A drifting sensor for in-situ sewer gas monitoring, Proc.IEEE SECON 2009, pp.1-9 (2009).
- 7) Lai, T., Chen, Y., Huang, P. and Chu, H.: PipeProbe: a mobile sensor droplet for mapping hidden pipeline, Proc.8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor systems, pp.113-126 (2010).
- 8) University of California, Berkely, Floating Sensor Network Project, <http://lagrange.ce.berkeley.edu/fsn/>.
- 9) 芝田浩, 岡辺拓也, 青木伸一, 北山晋平, 上原秀幸: 海水浴場の表層流観測に対する無線センサネットワークの適用、電子情報通信学会技術研究報告, Vol.112, No31, pp.105-110, USN2012-14 (2012).
- 10) Xuegong Q. and Shaobin G.: A Water Area detective System based on wireless Sensor Networks. CMCSN'12 Proc. International Conference on Computing, Measurement, Control and Sensor Network, pp.121-124 (2012).
- 11) Heintzelman, W., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H.: Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, Proc. IEEE 33<sup>rd</sup> Annual Hawaii International Conference on System Science, pp.1-10 (2000).
- 12) Younis, O. and Fahmy, S.: HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks, IEEE Trans. on Mobile Computing, Vol.3, No.4, pp. 366-379 (2004).
- 13) 前川寛, 石原進 :複数の移動ノードを使った省スペース無線センサネットワークテストベッドの構築, マルチメディアと分散, 協調シンポジウム, pp.597-604 (2012).
- 14) 三竹一馬, 石原進 :流れるセンサネットワークにおけるデータ回収率の基礎検討, マルチメディアと分散, 協調シンポジウム, pp.1463-1470 (2012).