

# 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評価

シン ショウゲツ<sup>1,a)</sup> 三竹 一馬<sup>1</sup> 前川 寛<sup>1</sup> 石原 進<sup>1</sup>

**概要:** 近年、高度成長期に整備した都市インフラの老朽化が目立ち、道路陥没等の多くの事故が発生している。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。このシステムではカメラ等のセンサを搭載した小型無線センサノードを複数台下水路に流す。各ノードはセンシング時にのみ起動し、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。代表ノードは次の代表ノード選出まで起動を続けて他のノードからの観測情報を収集し、マンホールに設置されたアクセスポイント (AP) へ収集したデータを転送する。代表ノードの電力枯渇や故障により、代表ノードが収集したデータの損失が起こる可能性がある。本論文では流れるセンサネットワークのための3つのバックアップ方法 (i) Self backup, ii) Overhearing backup, iii) Assigning backup) を提案し、そのシミュレーション評価について述べる。シミュレーションの結果、故障がなく、初期電力が少ない場合、Self Backup のみがバックアップを用いない流れるセンサネットワークより多くのデータを回収できることが分かった。また、ノードの故障がある場合、Self Backup と Assigning Backup が効果的であり、特に故障率が高い場合に Assigning Backup の効果が大きいことが分かった。

## 1. はじめに

日々の快適な生活を送るために、下水管は必要不可欠な存在である。このうち下水管の維持にあたっては、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],[2]。

「流れるセンサネットワーク」(図1)では、水路沿いに設置されたアクセスポイント (AP) 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。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。

このシステムでは、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、効果的な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章では、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

<sup>1</sup> 静岡大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Shizuoka University, 432-8561, Japan  
a) qxy@ishilab.net

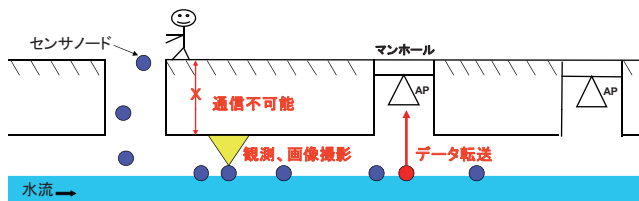


図 1 流れるセンサネットワークの概念図

試みとして、PipeTECT[3]がある。PipeTECTは、無線センサネットワークを用いた非破壊のパイプラインモニタリングシステムである。このシステムは、加速度センサを搭載するセンサノードで構成するセンシング層、データの転送役割を果たすアグリゲーション層とバックエンド・サーバー層三つの層から構成されている。センサノードは下水管の表面で固定され、下水管の振動位置を観測データとして監視する。センシング層はセンサノードが観測したデータを無線通信でアグリゲーション層を介してバックエンド・サーバー層に転送する。バックエンド・サーバー層では、収集した観測データを保存と分析し、管路の破損位置を判定する。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[7]やPipeProbe[8]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。また、本研究では、管内で非自律的に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必要があるので、省電力化の工夫を行っている点に特徴を持たせている。

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は水域監視のためのセンサネットワークのために、代表ノードの補助を行うノードを導入している[12]。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、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用いる。代表ノードはクラスタ内の電力が最大の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

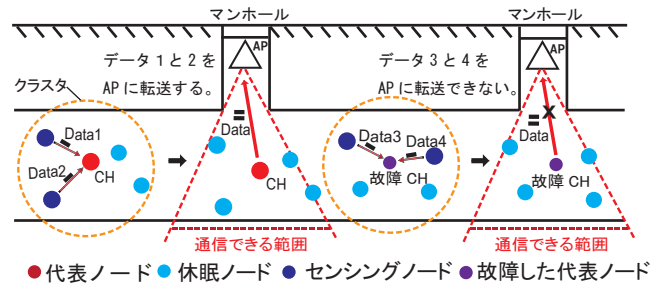


図 2 流れるセンサネットワークの観測データの回収方法

収集したデータを受信し、APに転送する。

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、ノード間の接続性が頻繁に変化する。従って、代表ノードが方法によっては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。そのため、補助用のノードを用いても電力消費を抑える工夫が必要である。

### 3. 流れるセンサネットワーク

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詳しく説明する。

#### 3.1 流れるセンサネットワークの前提条件

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[5]。

- センサノードが小容量の電池で駆動するので、水路終端まで起動状態を維持できない。
- ノードは水流によって非自律的に移動するので、正確なノード位置の取得、予想が困難。
- 通信範囲がAPの周辺部のみであるため、各ノードは不定期的にAPとの通信機会を得る。
- 観測の途中でノードが故障する可能性があるため、データを回収できないことがある。

#### 3.2 限定的なAPとの通信機会に備えたデータ回収方法

節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、以下のよう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に、観測データを AP に転送しなくなってしまう状況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 [9] で LEACH を使う方法、及び HEED [10] を改良をした改良 HEED [6] 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、比較的良好な特性を持つ HEED を使った方法についてのみ取り扱う。

HEED 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  $CH_{prob}$  を下の式 (1) で計算する。

$$CH_{prob} = \max \left( C_{prob} \frac{E_{residual}}{E_{max}}, P_{min} \right) \quad (1)$$

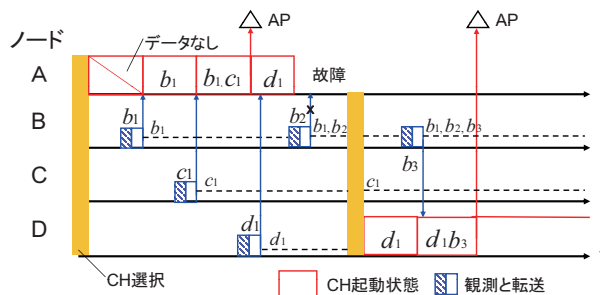
ここで、 $C_{prob}$  は予め定められた代表ノードの割合、 $E_{residual}$  はノードの残存電力、 $E_{max}$  はノードの初期電力、 $P_{min}$  は  $CH_{prob}$  の最小値を表している。流れるセンサネットワークでは、各ノードの 1 ホップ以内のノードの中に必ず代表ノードが存在するように代表ノードを選出される。これにより、代表ノードと通信できないセンサノードが存在しなくなる。

## 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

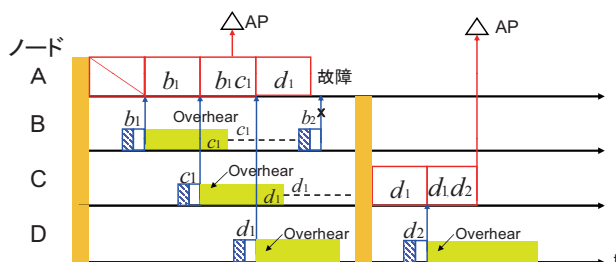
本節では、観測したデータをバックアップするノードの導入について説明する。バックアップ用のノードを用いることにより、各観測データを 2 台のノードがもつようにする。ここでは、Self Backup、Overhearing Backup と Assigning Backup 三通りのバックアップ方法を提案する。

### 4.1 Self Backup

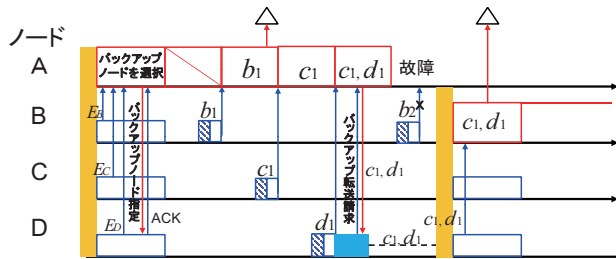
Self Backup(図 3a) ではセンシングノードが観測データを代表ノードに転送した後も、その観測データを保持する。そのノードは、自身が代表ノードとなった時に保持していたデータを AP 通信時に AP へ転送する。それにより、他



(a) Self Backup



(b) Overhearing Backup



(c) Assigning Backup

図 3 三つのバックアップ方法

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。

### 4.2 Overhearing Backup

Overhearing Backup(図 3b) 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行する。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。

### 4.3 Assigning Backup

Assigning Backup(図 3c) 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

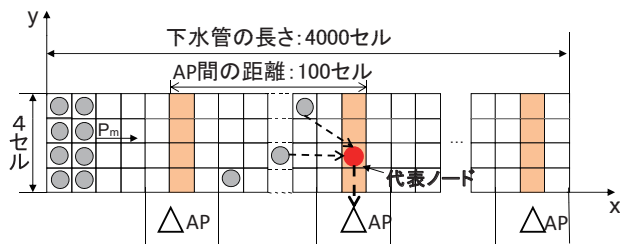


図 4 シミュレーションモデル

バノードから受信したノードの残存電力情報に基づいて、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この命令を受け、代表ノードに確認応答を返す。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。

## 5. シミュレーション評価

バックアップ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、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

#### 5.1.1 下水管を模擬した環境モデル

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 4 に環境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。つまり、1m を 1 セルとし、x 軸正方向に 100 セル間隔で AP を設置した。初期状態では、各行の左端のセル群にそれぞれ 1 台ずつセンサノードが配置されている。

#### 5.1.2 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 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。

#### 5.1.3 通信モデル

本シミュレーションの通信モデルでは、ノード間の通信

はノードの x 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。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。

#### 5.1.4 観測とバックアップモデル

本シミュレーションでは、Chipcon 社の無線通信モジュール CC2420[11] を想定し、パラメータを決定した。センサノードのデータ通信速度  $R$  は 250Kbps であるとした。各ノードは起動間隔  $T_d$  の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。ノードのバッファ上でデータ個は 1 個分の領域を消費する。本シミュレーションでは、時刻、ノード ID および温度等の小サイズの観測データを転送することを想定し、1 個のデータのサイズを固定値 100byte とした。1 個データのサイズ  $s$  とデータ通信速度  $R$  により、1 時間ステップ ( $=t[\text{sec}]$ ) で最大転送できるデータ個数  $D_{step}$  を式 (2) により算出する。

$$D_{step} = \frac{R \cdot t}{s} = \frac{32 \cdot 1000 \text{ byte/s} \cdot 0.5 \text{ s}}{100 \text{ byte}} = 160 \text{ [個]} \quad (2)$$

本モデルでは、同じ x 座標の y 座標の異なるセルは水路内の同じ地点を表す。そのため、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 個とみなすようにしている。

各ノードは観測データ保存用のバッファを持つ。このバッファは、観測データバッファ、バックアップバッファと代表ノードとして AP へ転送するデータを保存するバッファの 3 種類がある。また、3 つのバッファの最大保存量はそれぞれ 500 個、500 個、500 個とする。満杯になったバッファ内の観測データの削除方法には DropTail[5] 方式の他、RED(Random Early Detection)[5] 等の方法が考えられるが、本稿では DropTail のみを扱う。

#### 5.1.5 エネルギーモデル

本シミュレーションでは、代表ノードおよび Overhearing Backup におけるバックアップノードは起動状態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。モデルのパラメータの決定にあたり、CC2420[11] の消費電流値を参考にした。センサノードの送信と受信時の消費電流はそれぞれ 17.4mA と 18.8mA である。アイドルリスニング時の受信監視のための電流は 16.8mA であり、通信を行わない起動時の電流は 0.6mA である。簡単のため、1 時間ステップのアイドルリスニングのうち、10%を受信監視に用いると仮定する。従って、代表ノードあるいは Overhearing Backup におけるバックアップノードによるアイドルリスニング時の 1 時間ステップの消費電流  $I_{Idle}$  は下の式 (3) で表される。

$$I_{Idle} = 0.1 \cdot 16.8 + 0.9 \cdot 0.6 \text{ [ mA ]} \quad (3)$$

アイドルリスニング状態の電池容量消費量  $Q_{Idle}$  は式 (4) で示す。

$$Q_{Idle} = I_{Idle} \cdot T_{Idle} \text{ [ mAs ]} \quad (4)$$

ここで、 $T_{Idle}$  はアイドルリスニングの時間ステップである。また、センサノードの送・受信時の電池容量消費は転送データ量によって計算する。送信のための電池容量消費量は  $Q_{send}$  は式 (5) となる。

$$Q_{send} = I_{send} \cdot (n_{data} \cdot s/R) \text{ [ mAs ]} \quad (5)$$

受信のための電池容量消費量  $Q_{recv}$  は式 (6) の通りである。

$$Q_{recv} = I_{recv} \cdot (n_{data} \cdot s/R) \text{ [ mAs ]} \quad (6)$$

ここで、 $I_{send}$  は送信時の電流、 $I_{recv}$  は受信時の電流、 $n_{data}$  は転送するデータ数、 $s$  は1個のデータのサイズ、 $R$  はデータ通信速度である。本シミュレーションでは1mAsを1単位電力とする。なお、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 三つのバックアップ方法の評価

本シミュレーションの評価目的は二つある。一つはバックアップにより回収データが増加するかを判定することであり、二つ目の目的はノード数、初期電力と故障率がデータの回収数に及ぼす影響を確認することである。

各ノードはユニークなノードIDを持ち、小さいIDを持つノードから順に起動し、観測したデータを代表ノードに転送する。各時間ステップで一つノードだけが起動しているように、式 (7) で示しているように起動間隔  $T_d$  の値を決めている。

$$N_{node}/T_d = 1 \quad (7)$$

Overhearing Backup では、バックアップノードのオーバーヒア時間を1時間ステップとした。こうすると、各バックアップノードはその次に起動するセンサノードの観測したデータをバックアップできる。Assigning Backup については、代表ノードはバックアップノードを指定する時に、二つ以上のノードが最大の残存電力を持つ場合、ノードIDが最小のノードをバックアップノードとして指定する。

シミュレーション終了時に全てのAPが受信したデータの個数の総和を評価基準とした。本シミュレーションでは、同じ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。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5~8に流れるセンサネットワーク及び3つのバックアップ方法を利用する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を示す。

表1 シミュレーションのパラメータ

Parameter	Value
1セル	1m
1時間ステップ [t]	0.5s
下水管の総長 [L]	4000セル
ノード間の通信距離	50セル
APが通信できる範囲 [l]	3セル
1個データサイズ [s]	100byte
データ通信速度 [R]	250Kbps
ノード数 [ $N_{node}$ ]	4, 8, 16個
起動間隔 [ $T_d$ ]	4, 8, 16時間ステップ
移動確率 [ $P_m$ ]	0.75/時間ステップ
シミュレーション回数	20回

### 5.3.1 ノード数の回収データ数への影響

図5にノードの故障が発生しないものとして、初期電力を100単位から6000単位までに変化させた時のAPが収集したデータ数の平均を示す。本シミュレーションの評価基準がデータを観測できた領域(x座標)の数であるため、理想的な最大のデータ回収数は4000(x座標の数)である。

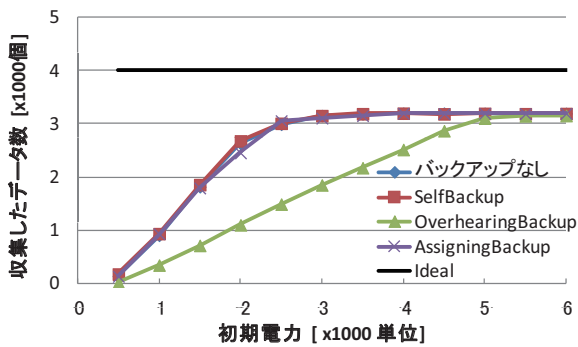
電力が十分の時、いずれのバックアップ方法でも、バックアップを利用しない流れるセンサネットワークの場合も収集データ数とほとんど同じである。これは、ノードが故障なし及び電力が十分の場合、バックアップを利用しない流れるセンサネットワークのノードは観測データをすべて転送でき、バックアップしなくても、観測データを収集できるためである。

観測が終わるまでに収集したデータ数は最大でも、理想値である4000個より少なくなっている。この原因は、各ノードが各時間ステップに移動確率0.75で1セル移動するので、二つ以上のノードが同じx座標で観測することがあるためである。

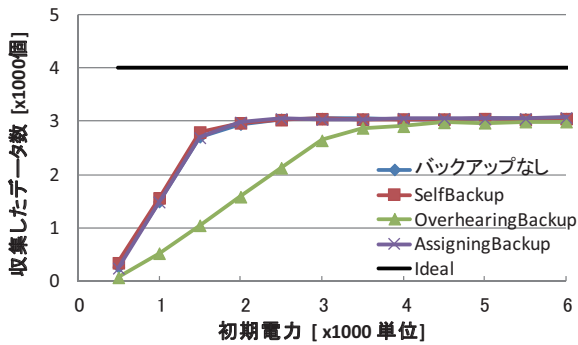
故障がなく、初期電力が少ない場合、ノード数が多いほど、収集したデータ数が多くなっている。例えば、初期電力が500単位の時、ノードが16の場合に収集できたデータ数はノード数が8と4の場合よりも多い。これは、式(7)で示す条件で、各時間ステップで一つノードだけが観測し、ノード数が多い方はノードの総電力が多いので、より長い範囲を観測でき、より多くのデータを収集できるためである。

初期電力が十分に大きい場合、つまり、各ノードが観測範囲の終端まで観測できる場合、ノード数が多いほど、収集したデータ数が少なくなる。本シミュレーションでは各時間ステップで一つノードが観測するようにノード数と起動間隔の関係を与えている、また、各ノードが各時間ステップに移動確率0.75で最大1セル移動する。そのため、二つ以上のノードが同じ座標で観測することがある。ノード数が多いほど、このようなことが発生する可能性が高くなる。全てのノードが観測範囲の終端まで観測できる場合、

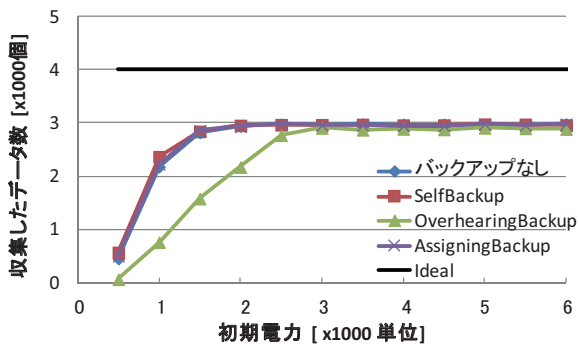




(a) ノード数：4、起動間隔：4 時間ステップ

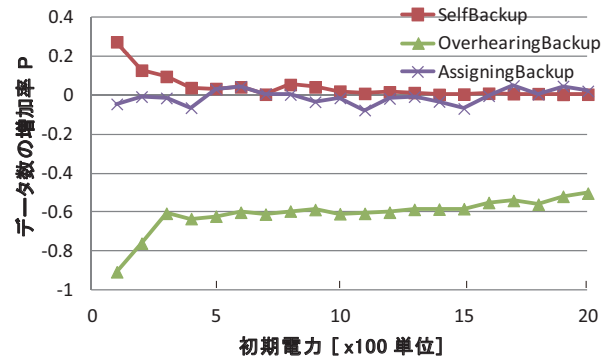


(b) ノード数：8、起動間隔：8 時間ステップ

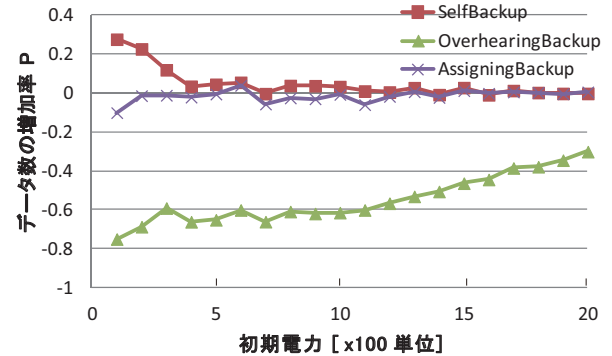


(c) ノード数：16、起動間隔：16 時間ステップ

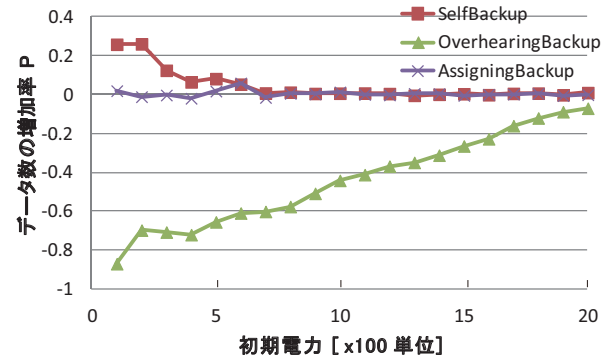
図 5 故障がない場合の収集データ数



(a) ノード数：4、起動間隔：4 時間ステップ



(b) ノード数：8、起動間隔：8 時間ステップ



(c) ノード数：16、起動間隔：16 時間ステップ

図 6 故障がない場合のデータ数増加率

ノード数が多い方は重複した観測データが多くなる。同じ 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ので、AP が収集したデータ数はノード数が小さい方より少なくなる。

### 5.3.2 初期電力の回収データ数への影響

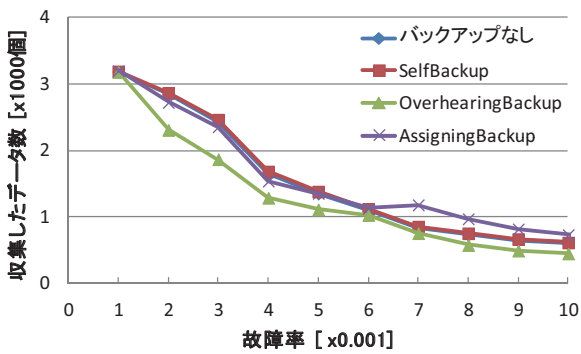
図 5 によると、故障がなく、電力が十分の場合、バックアップ方法を利用した流れるセンサネットワークによる収集データ数の優位性がないことが分かる。図 6 にノードの故障がない場合の各バックアップ方法による AP での収集データ数の増加率  $P$  を示す。 $P$  を式 (8) で計算される。 $D_{backup}$  はバックアップ方法を利用する流れるセンサネットワークの収集したデータ数であり、 $D_{nobackup}$  はバックアップ方法を利用しない流れるセンサネットワークの収集したデータ数である。 $P$  の値が正数であれば、バックアッ

プ効果が高く、負数であれば、バックアップ効果がないことを意味する。

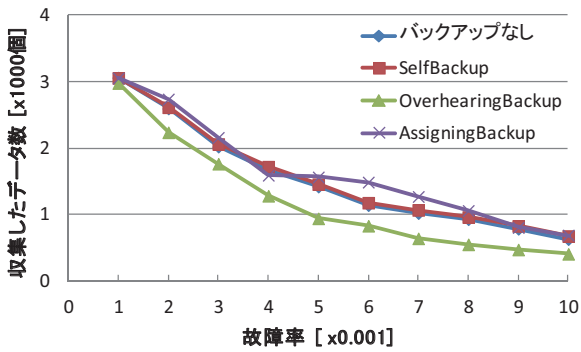
$$P = \frac{D_{backup} - D_{nobackup}}{D_{nobackup}} \quad (8)$$

図 6 のグラフにより、いずれの場合も、Self Backup 方法でバックアップを利用する流れるセンサネットワークの回収データ数は、バックアップを利用しない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る。また、初期電力が小さいほど、収集データの増加率が高くなり、バックアップ効果が高くなることを確かめられた。

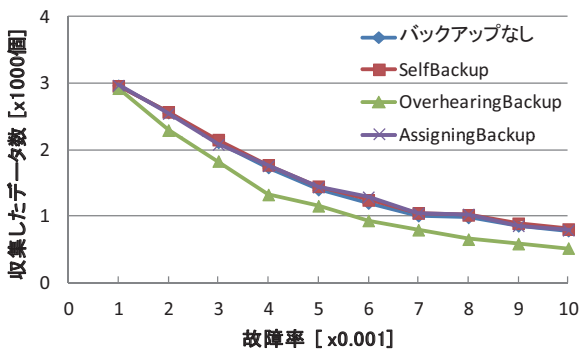
Overhearing Backup については、電力が不十分の場合、バックアップを利用しない流れるセンサネットワークより少ないデータしか収集できなかった。これは、各ノードがオーバーヒアするため、他の方法より多くの電力を消費する。初期電力が同じの場合、Overhearing Backup を利用



(a) ノード数：4、起動間隔：4 時間ステップ

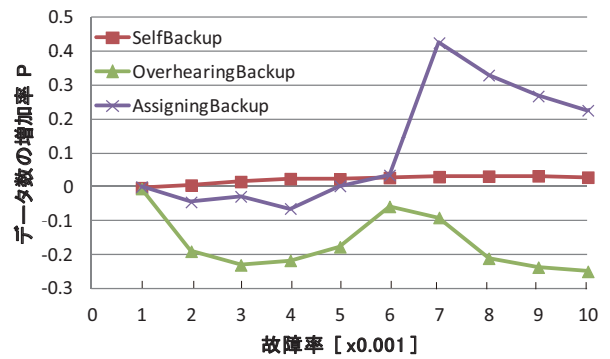


(b) ノード数：8、起動間隔：8 時間ステップ

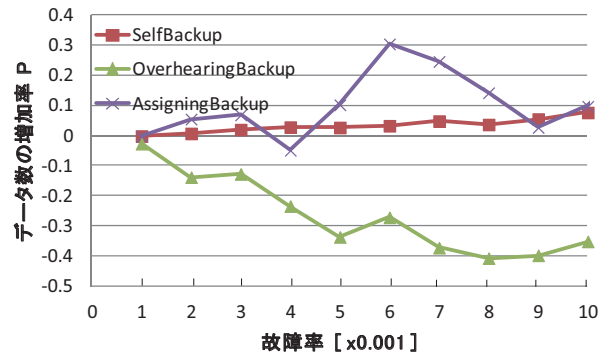


(c) ノード数：16、起動間隔：16 時間ステップ

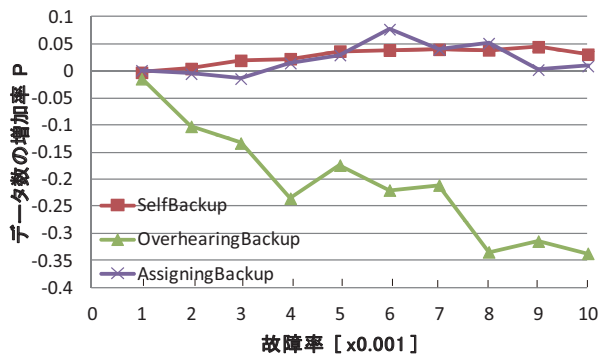
図 7 故障がある場合の収集データ数



(a) ノード数：4、起動間隔：4 時間ステップ



(b) ノード数：8、起動間隔：8 時間ステップ



(c) ノード数：16、起動間隔：16 時間ステップ

図 8 故障がある場合のデータ増加率

するセンサノードは早く電力が枯渇するので、他の方法より狭い範囲しか観測できない。

Assigning Backup については、電力が不十分の場合、バックアップを利用しない流れるセンサネットワークよりやや少ないデータ収集量となった。これは、バックアップする時、バックアップノードが代表ノードの全てのデータをバックアップするので、バックアップノードと代表ノードは他の方法より多くのバックアップデータを送・受信し、より多くの電力を消費するためである。

### 5.3.3 故障率の回収データ数への影響

ノードの故障が発生する時のバックアップ効果を確認するために、初期電力が十分 (6000 単位) で、故障率が 0~1% 場合のシミュレーションを行った。ここで、故障率とは各ノードにおいて各時間ステップで故障が発生する確率で

ある。図 7 と図 8 に各方法での AP が収集したデータ数とデータ増加率を示す。

図 7,8 により、いずれの場合でも、Self Backup 方法を利用する流れるセンサネットワークはバックアップしない流れるセンサネットワークより多いデータを収集できることが分かる。また、故障率が高くなるに伴って、データの増加率が高くなる。つまり、Self Backup 方法のバックアップ効果が故障率の増加により強くなる。これは、代表ノードが故障した場合にも、ノードは自身の観測データを持ち、自身が代表ノードになり、AP へ転送できないデータを転送できるためである。

Overhearing Backup においては、ノードの故障がある場合、バックアップを利用しない流れるセンサネットワークよりもデータ収集数が少なかった。故障のため、観測ノード

ドの総数が減少し、同じ期間でオーバーヒアノードになる確率が高くなる。そのため、より多くの電力を消費し、電力が他の方法より早く枯渇するので、バックアップを利用しない流れるセンサネットワークよりデータ収集量が少なくなる。

Assigning Backup においては、ノードの故障がある場合、バックアップを利用しない流れるセンサネットワークより多くのデータを収集できた。また、故障率が高い場合、バックアップ効果が高くなることが分かった。この理由は、代表ノードが故障したとしても、バックアップノードが代表ノードの全ての収集データを持っているので、新しい代表ノードがバックアップノードから収集データを取り、AP に転送できることにある。このように、代表ノードが故障した場合にも、バックアップデータは AP に転送される。一方、Self Backup 方法では、自身の未転送データのみを AP へ転送するため、Assigning Backup 方法は電力が十分の場合、Self Backup 方法よりも収集データ量が少なくなる。

## 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 3 つの方法 Self Backup、Overhearing Backup、Assigning Backup を提案した。

また、3 つのバックアップ方法の効果を検証するために、これらの方法に対して、アクセスポイントが収集したデータ量をシミュレーションに基づいて評価した。シミュレーションの結果、故障がなく、電力が十分の場合、バックアップを利用しない流れるセンサネットワークの収集したデータ数は利用した方の収集データ数とほとんど同じである。初期電力が不十分の場合、Self Backup のみがバックアップしない流れるセンサネットワークより多くのデータを回収できる。また、初期電力が小さいほど、バックアップ効果が高くなる。ノードの故障がある場合、Self Backup と Assigning Backup はバックアップしない流れるセンサネットワークより多くのデータを回収できる。また、故障率が高い時、Assigning Backup 方法はより高いバックアップ効果がある。Overhearing Backup は、電力が不足する場合でも、故障がある場合でも、バックアップノードがオーバーヒアするため、多くの電力を消費し、電力が早く枯渇するので、より少ないデータしか収集できない。

本論文での評価では、代表ノードの選択方法に HEED とバッファ管理方式に DropTail のみを用いた。今後、異なる代表ノード選択方法とバッファ管理方法を用いた場合の

検討も行う予定である。

## 謝辞

本研究の一部は (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一考察, 情報処理学会研究報告, モバイルコンピューティングとユビキタス通信, Vol.2010-MBL-56, 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] Shinozuka, M., Chou, P., Kim, S., Kim, H.R., Yoon, E., Mustatfa, H., Karmakar, D., and Pul, S.: Nondestructive monitoring of a pipe network using a mems-based wireless network, Proc. SPIE, Vol.7649, pp.145-167 (2010).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] Heinzelman, W., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H.: Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, Proc. IEEE 33rd Annual Hawaii International Conference on System Science, pp.1-10 (2000).
- [10] 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).
- [11] CC2420 smartRF Data Sheet - EECS instruction, <http://inst.eecs.berkeley.edu/cs150/documents/CC2420>
- [12] Qiao, X. and Gao, S.: 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).
- [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).