

# 大規模無線センサネットワークにおける外乱を考慮した アーキテクチャ探索シミュレータの実装と評価

山下浩一郎<sup>†1†2</sup> 鈴木貴久<sup>†1</sup> 栗原康志<sup>†1</sup> 大友俊也<sup>†1</sup>  
木村啓二<sup>†2</sup> 笠原博徳<sup>†2</sup>

自然災害や老朽化に伴う構造物や崖面などの社会インフラの環境モニタリングにおいて、無線センサネットワーク (WSN) が着目されている。WSN に用いられるセンサノードは MEMS センサおよび MCU と無線通信モジュールに有限のバッテリーあるいはエネルギーハーベスティング (EH) 技術との組み合わせで実装されるが、より外乱の大きい自然環境下での長期安定動作といった観点ではまだ多くの課題を残している。本論文では WSN 技術の環境モニタリングシステムへの適用を想定したシミュレーション環境の提案と、これを用いた最適アーキテクチャの探索を行う。数百から数万ノード規模の WSN が電波干渉、通信距離に応じた無線ノイズ、発電量ばらつきなどの外乱の影響を受けながら動作する際の全体のビヘイビアを観測し、システム全体のエネルギー消費と冗長性の関連性をシミュレーションした。これにより、対象となるモニタリング対象の要求仕様を満たしつつ従来のゴシップ型接続よりも 13% エネルギー効率の良い最適解を得ることができた。

## Implementation and Evaluation of Architecture Search Simulator Including Disturbance for Wide-range Grid Wireless Sensor Network

KOICHIRO YAMASHITA<sup>†1†2</sup> TAKAHISA SUZUKI<sup>†2</sup>  
KOJI KURIHARA<sup>†2</sup> TOSHIYA OTOMO<sup>†2</sup>  
KEIJI KIMURA<sup>†1</sup> HIRONORI KASAHARA<sup>†1</sup>

### 1. はじめに

台風や局所豪雨などの風水害による地すべりや構造物に対する災害、あるいは、これに伴った社会インフラのダメージが大きな問題となっている。土木工学の分野ではこのような問題に対し、危険箇所に対する長期的な観測方法として、従来はレーザー計測や、掘削によるひずみ計など設置がおこなわれていた[1]。しかし、測定機器のコストやメンテナンスの手間から、限られた箇所の測定しかできない問題があった。

近年、より簡易なセンサ機器として MEMS センサに無線通信モジュールを組み合わせた測定手法が提案されているが、有限のバッテリーあるいは EH 技術との組み合わせでは、外乱やノイズの多い自然環境下での長期安定動作を実現するアーキテクチャの観点で多くの課題を残している[2]。

WSN 技術では、通信やデバイス、計測技術などに関して個々に独立した研究は行われている一方で、具体的な環境モニタリングのアプリケーションを想定し、容易に統合的な評価を行える研究開発は不十分な状況にある。

本論文では、WSN を防災システムへの適用を想定し、冗

長性を考慮したマルチノード構成の WSN アーキテクチャおよび、このアーキテクチャを探索するシミュレータの提案を行う。このシミュレータにより、環境のモニタリングの際に存在する外乱を考慮し、WSN システムのセンサノードの冗長性と全体のエネルギー効率のトレードオフの分析を容易にし、従来最も効率がいとされた手法よりも 13% のエネルギー効率を改善するアーキテクチャ構成を得ることができた。

### 2. 従来の研究

WSN とはセンサやアクチュエータをもつ無線デバイスを、測定する領域に配置し、ネットワークを構成するもので、多数のセンサが互いに接続を張りつつ、データを収集する仕組みである。センサノード単体でみた場合、小型のプロセッサを搭載した通信機能をもつプロセッサエレメントであり、センサネットワーク全体では分散・協調動作を行うコンピュータシステムとして捉えることができるが、通信、電力状態など、通常の計算機システムにはない諸々の限定条件・制約をもつシステムとなっている。このため、環境、通信、デバイスなど、各分野で多くの研究開発が行われている。

<sup>†1</sup> 株式会社富士通研究所ユビキタスプラットフォーム研究所  
アンビエントプラットフォーム研究部  
Ubiquitous platforms Labs. Fujitsu Laboratories LTD.

<sup>†2</sup> 早稲田大学 理工学術院 情報理工学科

Department of Computer Science and Engineering, Waseda University

## 2.1 WSNと環境モニタリング

環境モニタリングにおけるセンサ活用として、構造物壁面の劣化検出のための応力測定や、斜面崩落予知として光ファイバによるひずみ測定[1]が行われている。これは対象物に埋め込まれたファイバが亀裂や地層境界で歪むことによる、光学的な変化量を測定することで実現しており、歪面の圧力変化で40[Pa]程度の測定精度をもつ[1]。また、表層の傾斜および土壌水分(圧力、温度による補正)を、MEMSセンサを用いて測定する手法がある[4]。サンプリングは1/600[Hz](=10分に1回)程度で、バッテリー駆動の小型のセンサを用いることで、およそ1年の連続利用が可能となっている。具体的な研究として、格子状に並べた無線ノードに搭載された加速度センサの個々の応答時間を元に、測定対象物の状態変化の伝播を調査し、約10[m]の距離における100[s]のすべり面の伝播の相対時間差を計測している[5]。

## 2.2 WSNにおけるデータ伝搬・トポロジー構成

WSNをデータ収集源とするには、各ノードの情報をいかに効率的にノード間でやりとりするかが重要となってくる。基本的にはゲートウェイと個々のノードの1対1通信ではなく、ノード間マルチホップによる情報伝搬を前提としている。一般には、制御機構として、管理ノードを置き、あらかじめ組み込まれた制御ルールによる自律分散型制御機構が実装されている。このとき、ノード間のトポロジー構成がいくつか分類され、ほぼ100%の受信率を仮定した場合、図1に示すようなブロードキャスト型のゴシップ型接続が最も効率が良いとされている[3]。

図1はゴシップ型接続の例を示した図である。具体的なゴシップ型接続の動作シーケンスについては6.3節にて解説を行う。

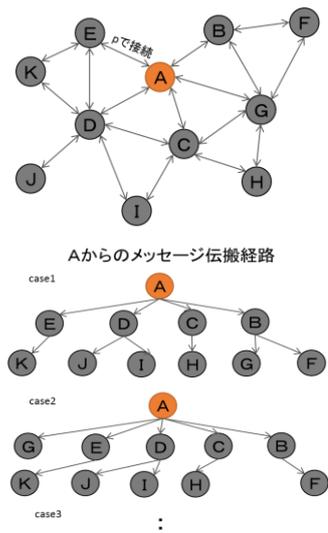


図1.ゴシップ型接続の例

## 2.3 ノードの消費電力とシステム全体のエネルギー効率

WSNではマルチホップ接続が主流で、データ送信のみを行うノードよりも、ホッピング通信の中継を行うノード(Sinkノード)の方が、受信も送信を行うため、プロセッシング量でも通信負荷の観点でも消費電力が大きい。このため、ノード群全体の情報伝播経路探索において、ロバストな通信経路を確立しつつ負荷分散する手法[8]や、ノード群をクラスタ分割し、そのクラスタ内での処理の冗長性を排除することでプロセッシング量を減らし、さらにクラスタ間で中継を行うSinkノードの選択を電力の観点からスケジューリングすることで全体のエネルギー効率化をはかり、従来の手法[8]に対し50%改善する提案[6]がある。

## 2.4 外乱とシステムレベルのリライアビリティ

環境モニタリングをするうえで、自然環境下での外乱を考慮する必要がある。外乱による影響は、通信不具合によるデータ未回収問題や、センサそのものの計測誤差のほか、ノード電力の枯渇、不慮の故障によるノードのエラーなどがある。システムを長期間要求仕様に基いて動作させるシステムの信頼性のほか、データのリライアビリティとして、生存するノードの動作結果を元に統計・補間処理を行うことで、より正確な値を得る手法[9]が提案されている。この手法では、たとえば30dBほどのノイズ影響下においては、約100サンプルのデータをもとに、6~7次の多項式補間をすることで1%未満の誤差補正ができることがわかっている。

## 3. 大規模無線センサネットワークの課題

WSNでは、ノードの消費電力、ノード間距離・通信、外乱に関して、次のようなトレードオフ関係が存在する。たとえば、ノード間距離(測定密度)に着目した場合、次のような値の大小の相関関係が生じる。

- ノード間距離：小
- ⇒送信に要する消費電力：小
- ⇒外乱に対する影響度：小
- ⇒無線輻輳頻度：大
- ⇒輻輳後の再送受送信に伴う電力：大
- ⇒データ補間演算：大(隣接ノードの増大)
- ⇒トポロジー複雑性：大(隣接ノードの増大)

このとき、消費電力に着目した場合、単純な送信(Tx)に対する出力と、輻輳に起因する受送信に要する電力は拮抗し、ノード間距離の大小関係がシステム全体のエネルギー効率の大小関係と一致しないことが感覚的にわかる。

大規模WSNでは、関連研究で引用した参考文献にあるように、土木工学・情報通信工学・電気工学・計測工学とい

った多岐分野にわたる知見と考慮が必要となり、現在これら広範囲にまたがった包括的なソリューション、トレードオフの検討に寄与するシミュレーション環境に関する研究開発は進んでいない。

#### 4. WSN システムアーキテクチャ

図 2 に考察対象とする WSN システムアーキテクチャの全体図を示す。アプリケーション UI レイヤではデータの可視化や制御を、サーバ・データベースおよびゲートウェイがネットワークを介して接続されている。

センシング対象のフィールドは、数百から数万個のノードで構成されている WSN となっている。

図 3 は、WSN の中の 1 つのノードの内部構成を示している。ノードは 1 つ、あるいは複数のセンサを搭載し、プロセッサ、EH 素子を含む電源、無線 RF で構成され、センシング対象のフィールドに、同一のノードがランダムに配置され、対象の状態をモニタリングしているものとする。

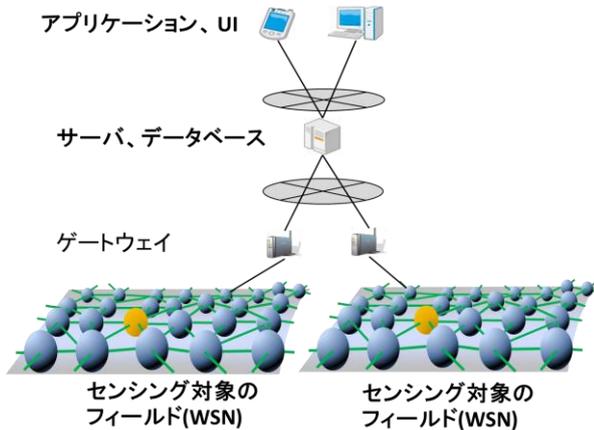


図 2.WSN システムアーキテクチャ

ノード間の接続方式は、搭載される無線 RF モジュールの機能によって異なるが、個々のノードで取得されたデータはマルチホップによりノード間を伝播し、ゲートウェイを介してサーバに集約され、アプリケーション UI により参照されるほか、アプリケーション UI 側からの制御信号がゲートウェイを介しフィールドに対して発信され、同様にマルチホップすることにより個々のセンサノードに通知される仕組みをもつ。

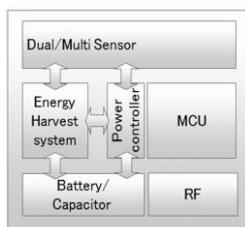


図 3.センサノードのハードウェア構成

#### 4.1 環境モニタリング WSN システムの要求仕様

本論文の具体的な検証の対象となるアプリケーションとして環境モニタリングシステムを考える。この環境モニタリングでは、傾斜地での斜面崩落の予兆検出を行うシステムとなっている [1][4][5]。

表 1.環境モニタリング要求仕様 (斜面測定)

	仕様	備考
測定間隔	10m 程度の間隔	
サンプリング	10min ごと	(1/600 Hz)
測定値	加速度	±20° 精度±0.01°
	圧力 (地圧)	60~120kpa 精度±1kpa
	水分量	
	温度(圧力などの温度補正用)	精度±0.1℃
測定期間	5~10 年単位	コストの観点から、電池交換など、頻繁なメンテナンスは好まれない。

予兆検出の仕組みとしては、表 1 の測定期間に示す通り、非常に長期間・長周期な変化量を観測し、多点観測に基づく微量の傾斜や地圧の変化を検出することで崩落前の異常状態を判断するものである。

崩落検出の詳細のメカニズムについては、専門分野にゆだねるが、斜面崩落現象に限らず、構造物モニタリングにも共通する特徴として、環境モニタリング WSN システムへの要求は、メンテナンスが容易で長期間システムが稼働し続けることが挙げられる。

このようなアプリケーションの要求仕様の特徴から、すべてのノードデータを、高いサンプリングレートで低遅延に毎回集約するよりも、全体傾向を長周期の特性変化として捉えることが重要といえる。したがって、100%の受信率ではなく、冗長性を含んだ大量のノード構成で、外乱や故障などによるノード欠損を許容しつつ要求仕様に対するリアビリティを担保可能にする冗長性を加味したノード構成が重要となってくる。

#### 4.2 ノードハードウェア/ソフトウェア

従来の WSN 分野における技術的興味対象は、いかに低電力に、いかに高効率にデータ伝搬していくかが課題となっている。しかし、前節で述べた長期間にわたり高機能・高精度を担保するデバイスを開発することは現実的には困難である。従って本論文で対象とするセンサノードのハードウェアは、汎用品モジュールの組み合わせを想定し、電力枯渇や通信不具合などについては、配置するノードの冗

長性をもって相互補間する仕組みを考える。

表 2 は、汎用的なハードウェアモジュールの仕様と消費電力をまとめたものである。単純には、これらのモジュールを組み合わせることでシングルノードのセンサを構築することができるが、バッテリーや EH 素子が十分に大きくない場合、省電力型の RF モジュールを利用しても、十分なデータサンプリングを行えるだけの通信を行えないほか、外乱により処理が途絶えた場合の信頼性の担保が困難である。

表 2. センサノードのハードウェアモジュール仕様

	仕様	消費電力
センサ	MEMS	0.2mW 程度
EH 素子	ソーラー型	200Lux, 5uW/cm <sup>2</sup>
MPU/メモリ	8/16bit/~8Kbyte RAM 数 MHz~100MHz 程度	10mW (30MHz 時)
RF	IEEE802.15.4, 2.4GHz	Tx:90mW/Rx:70mW 4.5dBm
バッテリー	10cm <sup>2</sup> 程度で 800mAh	

実際には上記表のほか、各モジュールのスリープモードへの遷移、無線出力の調整、プロセッサの動作周波数などに伴い消費電力が変化するものとする。

また、ノード上の MPU では表 3 に示すような、通信や隣接ノードとの協調動作、演算のためのソフトウェアが動作する。これにより 1 周期の動作における MPU 動作サイクルが算出されることになる。

表 3. センサノード上のソフトウェア

機能	処理内容	処理量
データ処理	波形解析 キャリブレーション	1Kstep~/sample 0.1Kstep~/sample
通信処理	パケット処理等	0.1Kstep~/octet
符号化	パリティ生成等	0.01Kstep~/octet
例外処理	ルーティング等	0.1Kstep~/trial
状態遷移	DVFS/PG 等	0.01Kstep/trial

### 4.3 環境モニタリングにおける外乱

環境モニタリング WSN システムは実験室や計算機室とは異なり、外界からの影響を多分に受ける。通信では、距離に応じた自由空間損失のほか、反射波、輻輳などによる影響で帯域や接続状態が刻々変化し、電力供給で EH による環境発電を行う場合、単なる EH 素子の発電効率だけでなく、エネルギー供給元のばらつきが給電（蓄電）状態を左右することとなる。

この課題解決にあたり、いかに高性能な RF、低電力なデ

バイスを用いても改善方向へ進むが影響がゼロになることはない。このため、ノード間連携処理においては、外乱によるデータ受送信の障害、電力枯渇による動作停止などをスケジューリング因子に含んだ管理が必要となる。

## 5. 提案する WSN シミュレーション

これまでの理論を整理し、実際の環境モニタリング WSN システムを構築する前に、シミュレーションによる全体挙動の検証が必要となる。以下にシミュレーションに求められる要件を整理する。

- 多数のノードが互いに連携して動作するシステムを再現し、システム全体としての動作が表 1 の要求を満たすものかどうかの判定を可能とする機能
- ノードのビヘイビアは、ノードを構成するハードソフトにより支配されるが、個々のノードは独立した振る舞いを行う仕組み
- 通常の通信や電力状態の遷移のほか、外乱を入力値としてもち、b)の個々のノードのビヘイビアに影響をおよぼす仕組み
- 初期パラメタなどは、表 2 および表 3 から与えられる仕組み

これらの操作を繰り返すことにより、各モジュールの変動値、ノード配置といった環境モニタリング WSN システムのアーキテクチャ探索を行うシミュレータを提案する。

### 5.1 シミュレーション環境の基本構成

提案するシミュレータは表 4 に示す複数のレイヤで構成されている。

個々のレイヤは部品化され、通信やデバイスモデルなどは評価するモジュールによってプラグイン入れ替え可能な状態で実装されている。

シミュレーション精度は MCU のクロックを 1 単位として時刻をカウントし、全てのノードのステート、電力状態をプロファイリングしている。

また、任意の数、配置の WSN 環境に対応し、すべてのノードは独立で動作を行う。また、数万ノード規模など、大量のノードで構成される WSN を現実的な時間で処理するため、各ハードウェアモジュールが互いに非依存状態にある動作時では抽象度の高いビヘイビアモデル、ノード間で通信（同期）が行われる場合には、クロック精度で動作するように、抽象度を混載してインプリメントすることで高速化をはかっている[10]。

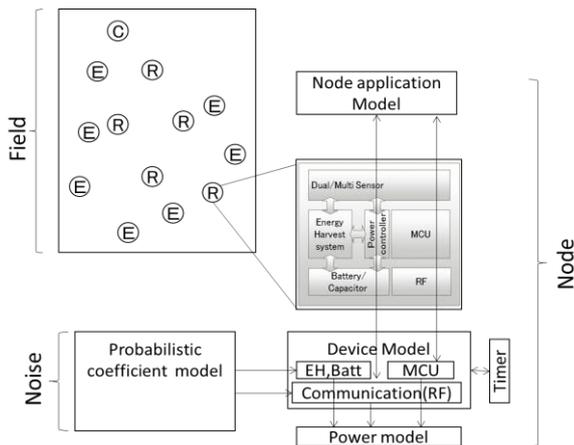


図 4.シミュレータ構成

表 4.シミュレータのレイヤ構成と機能

レイヤ	機能モデル	説明
Field	フィールドモデル (Field model)	多数の Node モデルを設置する測定対象環境を表現する
Node	ノードアプリ動作モデル (Node application model)	表 3 の機能が MCU 上での動作を表現する
	デバイスモデル (Device model)	ノード構成するハードモジュールのモデル
	電力モデル (Power model)	表 2 のモジュールの電力遷移状態による電力消費を表現する
	通信モデル (Communication model)	利用する通信デバイスの動作を再現する
Noise	確率係数モデル (Probabilistic coefficient model)	ノイズ源を発生させ外乱として各モジュールに影響を及ぼす

## 5.2 電力シミュレーション

環境 WSN では有線による給電は現実的ではなく、バッテリーや EH 素子による給電を想定している。このため、各ノードの電力特性を把握することが重要となってくる。電力シミュレーションは、次の3つの機能により動作することで電力状態を解析する機能をもつ。

- ・ソフトウェア制御による DVFS や PG (Power Gating) により実現する電力遷移状態の再現
- ・個々のモジュールの電力と動作時間に伴った電力の消費
- ・EH 素子による発電と充電、外乱の影響をうける発電状態の変化

実際には、利用する二次電池のエイジング (サイクル寿

命) や、自然放電 (0.3%~1.0%/日) などもあるが、今回の実験では未実装となっている。

図 5 は典型的な 1 ターン (受信~送信まで) の電力状態遷移を可視化したものである。待機 (deep sleep 状態)・受信・MCU 処理などの電力遷移状態が実装されている一方、EH 素子は他の電力遷移状態とは独立に動作し、バッテリーが満充電以外は常に発電状態の動作を再現している。

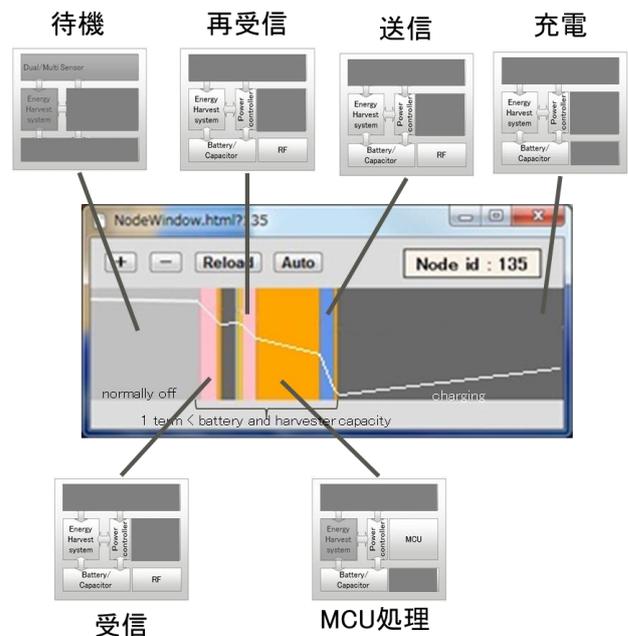


図 5.センサノードの電力遷移

## 5.3 通信シミュレーション

通信シミュレーションは、プラグインされた RF モジュールのビヘイビアに従って、大きく以下の3つの状態が実装されている。

- ・ノード内機能としての送信 (再送信含む) 状態
- ・ノード内機能としての受信 (待機含む) 状態
- ・ノード間同期機能として外乱により影響を受ける受送信状態

シミュレータの特徴的な機能として、ノード間連携は送信側ノードから信号が発信され、信号を受信可能なノードが受信状態となることでノード間同期を実現している。図 6 は、シミュレーション中の通信遷移状態を段階的に示したものである。通信可能な電波範囲は一律ではなく、相互の電波干渉や、通信距離に応じた損失、あるいはノードの電力枯渇状態による通信不成立などを考慮している。電力遷移状態を示した図 5 でも、1 回受信はしたが、ノイズなどにより通信不成立となり、デバイスのもつ固有機能として待機のためのインターバルの後、再送された電波で再受

信したことがプロフィール・可視化されている。

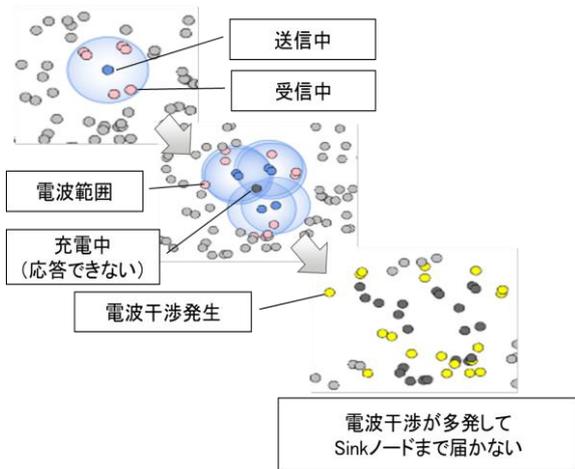


図 6.通信状態遷移

また、周囲のノードの設置密度が高い状態で電波が複数のノードから発信された場合、電波干渉が発生し正しく通信が行われない場合がある。本シミュレータでは、前述のタイミングカウントから、同時刻に発信された信号がノード上で重なる場合、設定した確率でそのノードとの通信が不成立となる仕組みも実装している。

#### 5.4 外乱と確率モデル

環境モニタリングを実証実験として実施する際、多様な外乱が発生する。現在把握している主要因として、下記の3つの外乱を想定し、提案するシミュレータの Probabilistic coefficient model として実装している。

- (1) 通信距離に応じた自由空間伝搬損失とノイズ
- (2) 日照時間モデルとノイズ
- (3) 故障、その他

実際のシミュレーションではこれらの外乱をノイズレベルのパラメータとして、与えたノイズレベルに対して全体がどのようなビヘイビアとなるのかを反復調査する。

##### 5.4.1 通信の外乱モデル

通信における理論的な外乱 5.4 (1)は、文献[11]で詳しく述べられているが、基本的な挙動は距離  $d$  の2乗、波長  $\lambda$  の-2乗に比例するとされている。このとき、損失を  $Li[dB]$  としたとき式(1)のように表現される。

$$Li [dB] = 10 \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (1)$$

さらに、地面や建造物による輻射波による反射・干渉のほか、降水、障害物などによって電波は減衰・阻害され、こ

れら環境によって刻々変化するような不確定要因を定式化することは困難である。またアンテナについても指向性や地上高などの設置状態要因が考えられる。ただし、環境モニタリングとして構造物や地表の数 cm の表面を、数 m から十数 m ほどの短距離で利用することを想定し、本シミュレーションでは、これらの要素による無線特性変化は、障害物などによる外乱をまとめてノイズ  $N$  として式(2)を与える。

$$N [dB] = LV_{noise} \times d \times P_{rand}(seed) \quad (2)$$

このとき、 $LV_{noise}$  は雑音係数となるノイズレベルで、式(1)(2)の代表的な伝搬損失特性( $LV_{noise}=0.1$  の例)をグラフ化したものを図 7 に示す。

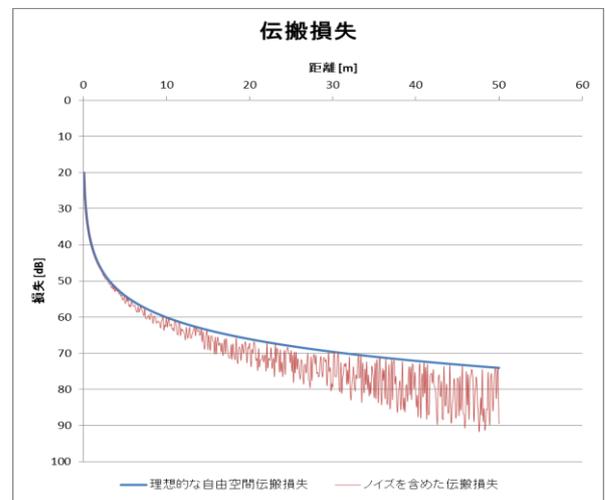


図 7.通信におけるノイズモデル

##### 5.4.2 電力の外乱モデル

外乱 5.4 (2)では、主に太陽光による EH ばらつきがある。基本的には日照時間に対し、天候による照度不足モデルを加味する。本論文では、まずノードの電力消費の傾向を把握することを目的とし、その結果に基づく最適な EH 素子のセッティングについては、今後の課題とする。

比例係数  $C$ 、電源電圧  $V_{dd}[V]$ 、MCU の動作周波数を  $f[\text{Hz}]$ 、動作時間を  $\Delta t[\text{s}]$ 、送信および受信に要したエネルギーをそれぞれ  $E_{Tx}$ 、 $E_{Rx}[J]$ 、内部バスやメモリなど、その他のモジュールの消費電力を  $P[\text{W}]$  とした場合、1つのノードが1回の動作で消費されるエネルギー  $\Delta E[J]$  は式(3)で与えられる。

$$\Delta E = C(V_{dd})^2 f \Delta t + E_{Tx} + E_{Rx} + P \Delta t \quad (3)$$

このとき、MCU は表 3 の演算を行うのだが、実際に動作する時間はその周波数により異なる。実行命令数は一定のため、周波数の変化により動作時間  $\Delta t$  が確定する。

一方で、発電の観点から電力モデルを考察する。図 8 は、ノード動作開始から測定インターバルを経て、次のノード動作開始までの時間を  $\Delta T$ 、EH 素子による発電効率を  $h_1, h_2, h_3 \dots [J/s]$  として、全体の電力挙動を模式的に表したものである。

ノードが  $N$  回動作する間の EH 素子による発電エネルギー  $J_H [J]$  は式(4)で与えられる。

$$J_H = \sum_{n=0}^N \int_0^{\Delta T} h_n dt \quad (4)$$

このとき、ノード電力状態としては、1 回の充電で 1 回の動作を行うのではなく、期待値  $p[\%]$  で  $N$  回動作できるかで考察する。これらの関係を数式化したものは式(5)である。

言い換えれば、 $1-p[\%]$  が電力の観点からみた冗長さの指標となる。

$$P_{possibility} = [J_H - \sum_{n=1}^N \Delta E_n > 0] \geq p \quad (5)$$

実際には、EH 素子としてソーラーパネルを利用する場合、 $h_n$  には測定エリアにおける日照モデル（昼夜・季節）が入力値となるが今回のシミュレーション動作検証では、簡易的な日照モデルを入力としている。

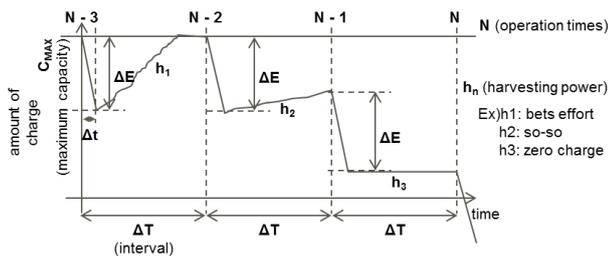


図 8. ノードの発電と消費の電力挙動

### 5.4.3 その他の外乱モデル

その他の外乱として 5.4 (3) に分類される突発的な外乱がある。シミュレータの機能として、利用者がランダムに故障ノードを設定する機能を設ける。

## 6. 提案シミュレータによる環境モニタリングシステムの特性測定

提案シミュレータを用い、環境モニタリング WSN として長期運用に適した設置計画とノードアーキテクチャの設計を行う。

### 6.1 測定方法

本論文での着目点として、通信と電力状態をポイントとし、与えられた標準的なハードウェアを用い、結果としてシステムとしてどのようなセッティングを行えばよいか、主にノードの冗長構成との関係を定量化する。

シミュレータを用いた実験の手順は以下となる。

- (1) モジュールに対する外乱(ノイズレベル)を変動させ、全体の挙動を観測する。
- (2) 乱数による確率モデルを導入しているため、100 回の試行を繰り返し、フィールド上のノードすべての平均をとる。
- (3) 結果的に要求仕様である表 1 を満たすものをシステムとして「可」とし、外乱レベルに対するノード構成の冗長性を評価する。

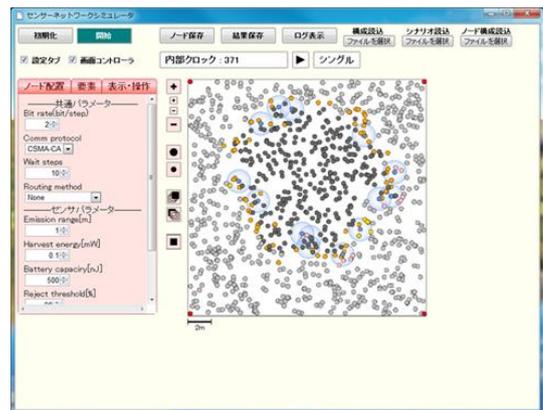


図 9. シミュレーション画面

図 9 は、実際インプリメントした提案シミュレーションの動作画面である。フロントエンドは JavaScript で実装され、Web ブラウザ上で動作する。ハードウェアモジュールはソースコードレベルでプラグインを行うが、ノード構成などのパラメタ設定は GUI で入力しながら実験を行えるようになっている。

実際の環境モニタリングでは図 10 のように多数のノードを斜面に展開した WSN の運用をイメージしている。

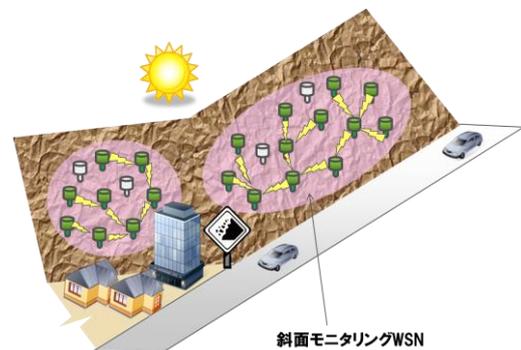


図 10. 実際の運用イメージ図

### 6.2 受送信回数に着目した特性評価

通常の無線モジュールでは、輻輳などによる接続の不成立が発生すると、CSMA-CA などの機能によりタイミングを変更し再送処理を行う。通常タイムアウト処理は実装されているが、送信機能 (Tx) では、再送のたびに動作し、

一方で、受信機能 (Rx) では、受信期間の間、常に受信状態をたもっている。また、表 2 に示した通り、電力消費の支配要因は RF モジュールであるため、今回の実験では、外乱による Tx,Rx の挙動に着目した。

図 11 はノイズレベルを変更しノードの反復送信回数について、通信範囲内に存在するアクティブノード数ごとにシミュレーションしたものである。試行回数 100 回で、Tx 回数はその平均をとっている。

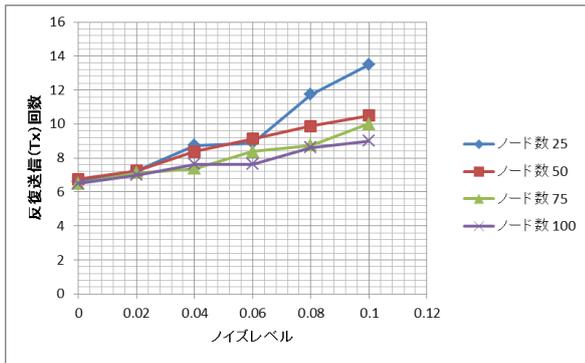


図 11.ノイズレベルに応じた Tx (送信) 回数

たとえば、アクティブノード数 50 の場合、ノイズレベルに比例して送信再送回数が増加していることが観測できている。しかし、その傾きはゆるやかで、今回のシミュレーションの範囲では、再送回数は 6~10 回程度となっている。

一方で、同様の実験の視点を変え、周囲のアクティブノード数に対する反復送信回数の関連をノイズレベルに応じて測定した結果を図 12 に示す。

これによると、アクティブノード数が少ないときは、ノイズレベルの大小関係により反復送信回数がばらつくが、アクティブノード数が増えると、ノイズレベルによらず反復送信回数は 7~9 回と収束方向にむかう傾向が読み取れる。

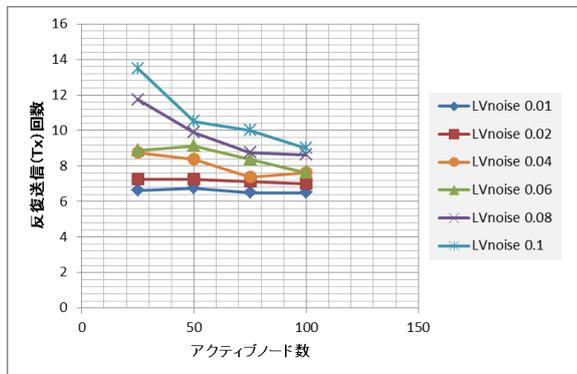


図 12.アクティブノード数に応じた Tx (送信) 回数

一方で、受信 (Rx) 部について、同様の実験を行った。図 13 はノイズレベルに応じた反復受信 (Rx) の回数の特性であ

る。

受信処理 (Rx) においても、シミュレーション試行を 100 回繰り返し Rx 回数はその平均をとっている。

受信処理として一般的には持続的な起動状態を実装するが、表 1 のサンプリング仕様にあるように、10[min]ごとの起動となっているため、本評価においても受信機構としては間欠動作を実装している。

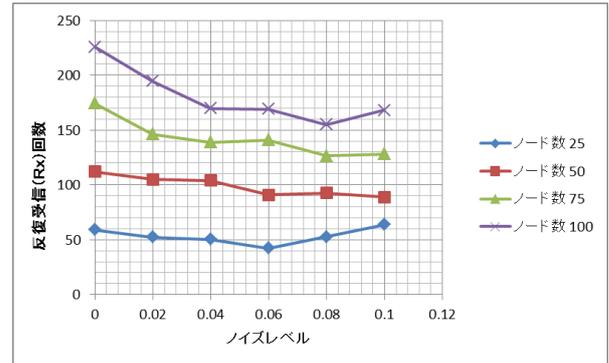


図 13.ノイズレベルに応じた Rx (受信) 回数

この測定結果では、例えば、アクティブノード数 25 では 60~70 回、100 では 120~230 回と、アクティブノード数が増えるほど反復受信回数が増大していく傾向が読み取れる。

これは、環境の外乱によるノイズが発生している状況でも、周囲のノードから電波が発信された場合、受信処理する・しないに関わらず一旦パケットの内容を解析するための動作もカウントされるためであり、当然、アクティブノード数が増えると、確認のための受信動作が増大する無線機器の特徴をよく示している。

一方で、周囲のアクティブノードに対する反復受信回数をノイズレベルに応じて測定した結果を図 14 に示す。

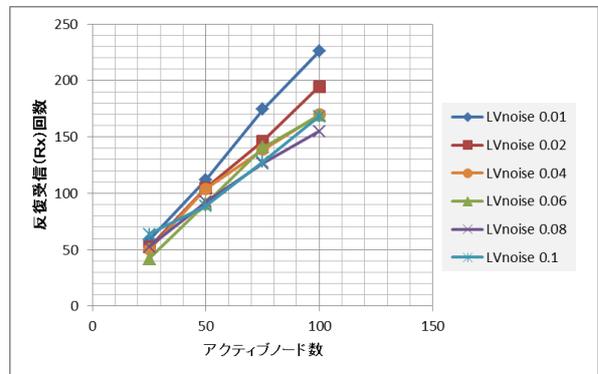


図 14.アクティブノード数に応じた Rx (受信) 回数

たとえば、どのノイズレベルにおいても、アクティブノード数に対して比例的に反復回数が増大している傾向が読み取れるが、アクティブノードが 25 個の場合 40~60 回、

100 個の場合 150~230 回と、ノイズレベルよりも周囲のアクティブノードの数のほうが反復待機回数の影響に対して支配的という傾向が読み取れる。

この反復回数は通信モジュールの動作回数であり、5.4.2 節で述べたノードの電力状態を表現した式(3)の送信および受信電力である  $E_{Tx}$ 、 $E_{Rx}$  の値を決定することになる。

### 6.3 従来手法との比較

従来手法との比較として文献[3]において最も効率が良いとされるゴシック型接続におけるエネルギー評価の観点で比較を行う。

ゴシック型接続は、図 1 に示すように、予めメッシュ状に接続可能状態が保存されており、ノード A から送信イベントが発生した際、ノード A がブロードキャストを行い、接続可能状態の受信ノード BCDEG に対し、メッシュルートの経路探索問題を変数パラメタ  $p$  の確率で接続状態を確立していく。Case1 では 1 ホップ目で受信したノード群として BCDE が再び送信ノードとなり、同様に接続可能状態のノードから 2 ホップ目のノードを  $B \Rightarrow GF, C \Rightarrow H \dots$  のように選択していく。

文献[3]では、 $400 \times 400m$  の範囲にランダムに配置された 100 ノード、ゴシック型で伝送確率  $p=0.5$ 、 $0.8$  と設定し、99%の受信率に収束するのに、それぞれ 675ms、752ms の状態が最も効率が良いと報告がされている。本論文の比較として、この伝搬時間をもとに、ノードの単位消費電力量に乗じて比較エネルギー量とした。従来手法と提案手法の条件について表 5 にまとめる。

表 5.従来手法との比較

条件	従来手法	提案手法
接続形態	ゴシック型	ツリー型
輻輳の考慮	あり	あり
ノイズの考慮	なし	あり
ノード構成	ハードウェア構成は Table に準ずる アクティブノード数：100 配置範囲： $400 \times 400m$	
完了状態の判断	99%(99 ノード)受信収束で完了	Coordinator Device 到着で完了 ただし実際に動作したノードが 99 以上のものを動作成功とする
測定パラメタ	伝送確率	ノイズレベル

提案手法では、予めメッシュ状の接続状態をつくらず、送信ノード (IEEE802.15.4 Zigbee で定義される End Device

ノード)、受送信可能ノード (Router ノード) と役割のみを定義し、図 15 に示すように、Router を Sink node とした単純なツリー構造のルーティングを想定している。この場合 End Device は電波到達範囲に存在する Router デバイスとの接続を確立し、最終的には全体を総括するノードである Coordinator Device に到達した時点で動作完了したものとする。

提案手法では、文献[3]と比較を行うため、結果的に通信確立できたノード数が 99 になったものを動作成功とみなし、99 ノード動作するために必要な冗長ノードを含むシステム全体のノード数を算出する。

ノイズレベル 0.1 の場合の Tx 反復送信回数とその出現頻度を表したものを図 16 に示す。このグラフは、6.2 節の結果をもとに、横軸に反復回数をとり、反復回数 N 回のノードについて、測定フィールド内にあるノード数をカウントし、その出現頻度を縦軸にとってある。たとえば 1 回の送信で通信を完了するノードはフィールド内で 1 個、8 回の反復送信で通信完了するノードが 15 個としてプロットしてある。

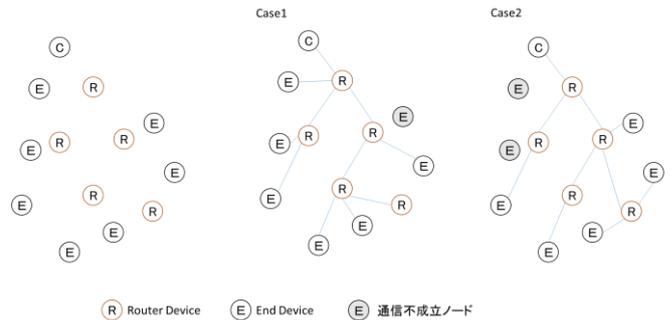


図 15. IEEE802.15.4 を用いた Route/End Device ツリー接続

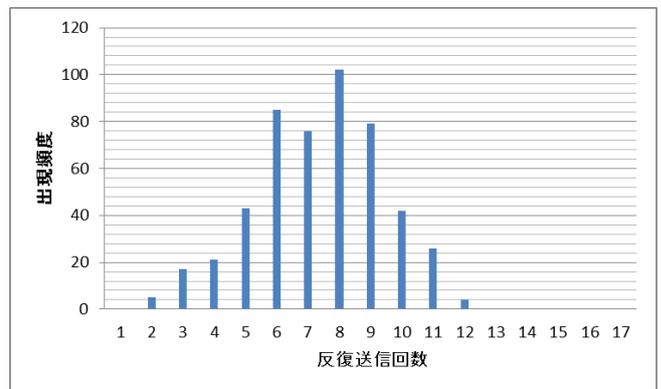


図 16.反復回数頻度

この結果では、99%の受信率 (100 ノード環境では、冗長ノード 1) の場合、最大で Tx を 11 回送信可能なだけの設計が必要であると読みとれる。

しかしながら、本論文の提案では、ノイズおよび冗長性を加味することで、要求仕様を満たすアーキテクチャを評価するのが目的のため、たとえば、Tx が 6 回までを上限と設定にした場合は、横軸で 6 よりも右側に分布している 48% のノードが接続不成立となる可能性があるため、実際のシステムでは 48% の冗長なノードで WSN を構成する必要がある。また、8 回までとした場合、7% の冗長度となることがわかる。

比較において、文献[3]では明示的なノイズモデルについては言及していないため、総エネルギー量比較において、外乱による通信再送回数について、図 11 および図 13 から、ノイズに伴った最大再送回数 (Tx : 10 回、Rx:226 回) に依存する電力量を加味してシステム全体のエネルギー量を算出した。

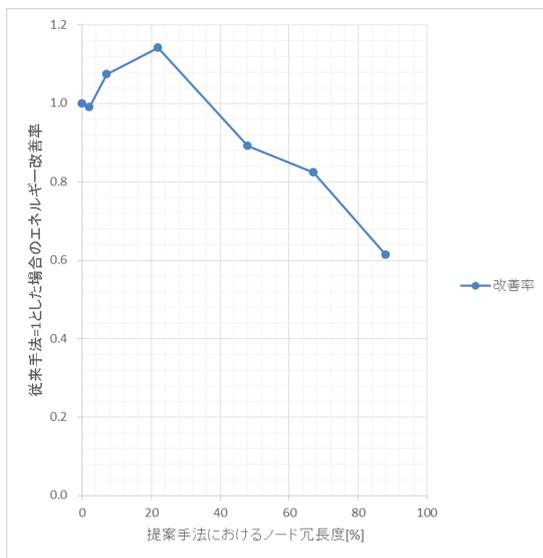


図 17.従来手法とのエネルギー効率の比較結果

図 17 はノイズレベル  $LV_{noise}=0.1$  における従来手法[3]と提案手法でのエネルギー総量を比較し、提案手法におけるノード冗長度に応じた改善率をプロットしたものである(従来手法のエネルギーを 1 とした)。

冗長度 1 すなわち 99% の受信率のシステムでは、システム全体でのエネルギーは 74.4[J]となっており、提案手法では 22% の冗長性を加味してノード配置することで 65.9[J]となり、13% のエネルギー効率がよくなることが分かった。

従来手法より劣化している 3~5% ほどの冗長度では、再送回数によるエネルギー増大が、38% を超える冗長性の場合、待機ノード自身の電力そのものがシステム全体のエネルギーを増大させてしまう特性が観測できた。

## 7. まとめ

環境モニタリングのための WSN システムの評価環境と

して、外乱を考慮したシミュレーション環境の提案と、提案シミュレータを用いて冗長性を許容した斜面モニタリング向けの WSN システムを評価した。

対象となるモニタリング対象の要求仕様を満たしつつ従来のゴシッピング型接続よりも 20% の冗長ノードを配置することで、全体として 13% エネルギー効率の良いアーキテクチャを探索することができた。

今後の課題としては、本シミュレーション結果に基づいた実験を通じ理論検証を行っていく。

## 参考文献

- [1] Le-na Yue, Jun Huang and Yan Yang “Application of FBG sensors in strengthening and maintenance monitoring of old bridges,” *In proc. 20<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors, 75030E*, Oct.2009.
- [2] 小泉 圭吾, 藤田行茂, 平田研二, 小田和広, 上出定幸, “土砂災害監視のための無線センサーネットワークの実用化に向けた実験的研究”, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.69, No.1, pp.46-57, 2013 年 2 月.
- [3] 田辺智行, 若宮直紀, 村田正幸, “無線センサネットワークにおける情報共有のための情報伝搬手法の比較”, 電子情報通信学会技術報告 USN ユビキタス・センサーネットワーク 111, pp.91-96, 2011 年 7 月.
- [4] 地すべり観測便覧編集委員会編, “地すべり観測便覧”, (社)斜面防災対策技術協会, 2012 年 10 月, 540p.
- [5] 岩井将行, 今井大樹, 西谷哲, 小林正典, 戸辺義人, 瀬崎薫, “iPicket: 無線センサ杭を用いた地すべり計測”, 情報処理学会研究報告 MBI モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会研究報告, 2010-MBL-52(1), pp.1-7, 2010 年 1 月
- [6] 首藤幸司, ランバツェン・ゲウテ, 西尾信彦, “ユビキタスセンシングネットワークにおける自律的なデータ集約機構”, 日本ソフトウェア科学会 第 8 回プログラミングおよび応用のシステムに関するワークショップ SPA2005, 2005 年 3 月.
- [7] Masaki IMAI, Masayuki IWAI, Ryosuke SHIBASAKI and Kaoru SEZAKI “A Design of slope failure detection system Using wireless sensor networks,” *Asian Association on Remote Sensing*, 2010.
- [8] Chalermek Intangonwivat, Ramesh Govindan and Debrah Estrin, “Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks,” *In Proc. MobiCom '00 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp.56-67, 2000.
- [9] 米田 嘉浩, 挾間 龍亮, 栗原 康志, 菅沼 隆史, 伊藤 浩之, 後藤 邦彦, 益 一哉, “環境モニタリング用無線センサネットワークのデータ信頼性評価指標に関する一検討”, 計測自動制御学会 第 41 回知能システムシンポジウム, 2014 年 2 月.
- [10] Koichiro Yamashita, “-Possibility of ESL: a software centric system design for multicore SoC in the upstream phase,” *In Proc. IEEE ASP-DAC*, pp.805-808, Jan. 2010.
- [11] 高田潤一, “電波伝搬の基礎理論”, *Microwave Workshops and Exhibition 2005*, 2005 年 11 月.