

膨大な数で構成される 自律型無線センサーネットワークシステム設計

山下浩一郎^{†1†2}

近年着目されている技術として無線センサーネットワークシステム(WSN)がある。IoTの観点では、対象物を広域、網羅的にセンシングするために、膨大な数のセンサーが通信や電力などの限られた条件下で互助動作を行う必要がある。通常のデザイン手法では、ノード単体をいかに省電力に、いかに効率良く通信するか設計アプローチが重点とされていたが、WSNではシステム全体のバランスと挙動が重要となっている。本論文では、情報処理分野で着目されているマルチエージェントシステム(MAS)の概念と、従来からシステムLSIの上流設計で用いられているESLを融合した評価技術を紹介し、WSNの設計アプローチ手法について解説を行う。

System Architecture Design for Wide-range Grid Wireless Sensor Network

KOICHIRO YAMASHITA^{†1†2}

1. はじめに

環境やインフラストラクチャーに設置されるセンサーシステムにおいて、WSNが着目されているが、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。

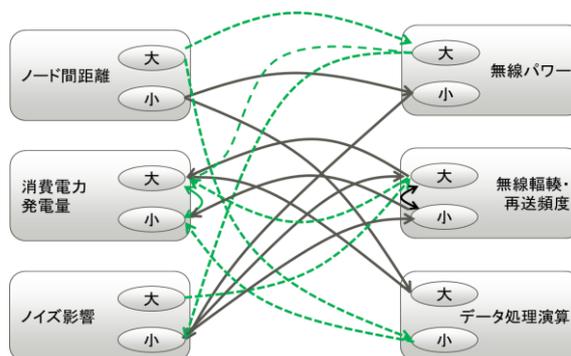
本論文では、WSNを環境モニタリングへの適用を想定し、冗長性を考慮したマルチノード構成のWSNアーキテクチャおよび、このアーキテクチャを探索するシミュレータの提案を行う。あわせて提案シミュレータを用いたエネルギー効率の実験を行った。

2. 従来の研究

WSNとはセンサー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ので、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。

3. 大規模無線センサー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、次のような相関関係が生じる。



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、輻射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、参考文献[1]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1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。

^{†1} 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.

^{†2} 早稲田大学大学院 基幹理工学研究科 情報理工

Department of Computer Science and Engineering, Waseda University

図 2 は、WSN 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ーを搭載し、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。

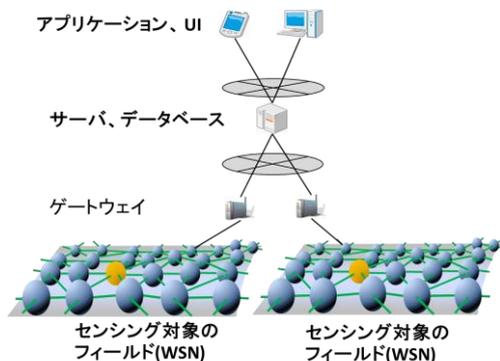


図 1.WSN システムアーキテクチャ

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。

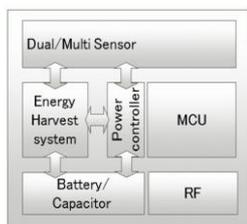


図 2.センサノード 1 つのハードウェア構成

4.1 ノードハードウェア/ソフトウェア

表 1 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ー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 1.センサノードのハードウェアモジュール仕様例

	仕様	消費電力
センサー	MEMS	0.2mW 程度
EH 素子	ソーラー型	200Lux, 5uW/cm ²
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 ² 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 2 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 2.センサノード上のソフトウェア例

機能	処理内容	処理量
データ処理	波形解析	1Kstep~/sample
	キャリブレーション	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

4.2 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。

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 ESL+MAS

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
- ただし個々のノードは独立した振る舞いを行う仕組み
- 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
- 初期パラメタ設定

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。

このシミュレーションシステムを構築するためには大きく以下の技術アプローチが必要となる。

- 1) ノードが個々に動作し、あるときは独立に、あるときは関連性をもちながらエージェントとして動作するシミュレーション MAS(Multi Agent System シミュレーション)

- 2) 1つのノードに搭載されるデバイス・LSIの挙動を再現するシミュレーション ESL(Electronic System Level シミュレーション)[3]
- 3) 外乱モデル

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 3 に示す 3 つのレイヤ (MAS, ESL, 外乱) で構成されている。

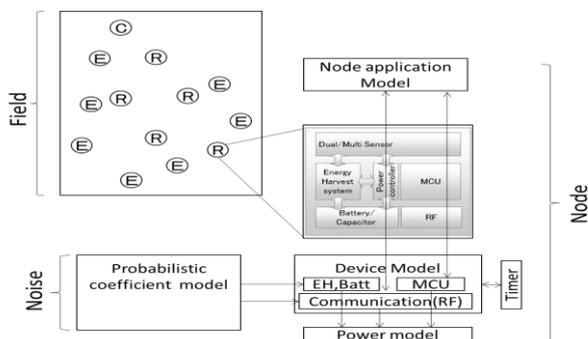


図 3.シミュレータ構成

表 3.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 MAS	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 ESL	ソフト動作モデル (Node application model)	表 2 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)	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)	ノイズ源を発生させ外乱として各所に影響を及ぼす

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 (ESL の特徴)。一方で、ノード間は通信時あるいは、電波送信時の電波競合あるいはデータ処理時の並列処理時にクラスタを形成しあるときは、独立に、あるときは連動して動作するモデル (MAS の特徴) を有している。

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。

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

図 4 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。

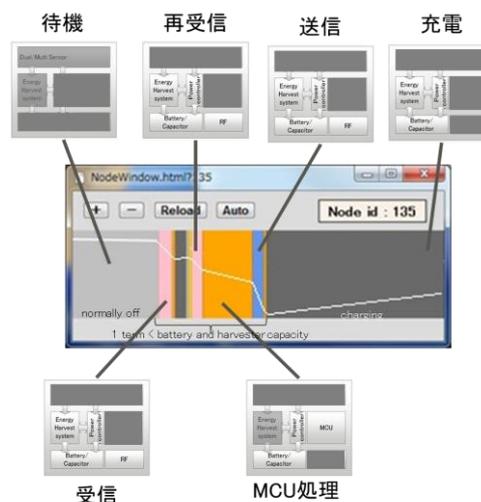


図 4.センサノードの電力遷移

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うが、通常は個々のノードは独立した挙動を示している (MAS ルール) 独立した挙動では、基本的に EH 素子を経由して充電を継続し、RF 部分は周囲からの信号を観測している。このとき、他のノード (エージェント) とは全く非同期な動作を行っている。続いて、どこかのノードが励起状態になり電波を発信したとする。電波の到達範囲 (通信可能な電波範囲) は一律ではなくノイズの影響を受ける (外乱モデルルール)、通常であれば、電波到達範囲にあるノードが電波をキャッチアップし、このとき、この 2 つのノード間に同期と連携動作が生まれる (MAS ルール)。しかしながら、このような状態が複数のノードで同時発生した場合、相互の電波干渉が一定確率で発生する。すなわち、多方向からの同時電波送出を受けたノードは機能停止状態になる (MAS ルール+外乱) このとき、通信モジュールはランダムなタイミングで受信モジュールを停止させ、再受信状態に遷移する。

また、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。これは ESL

モデルからくる挙動で、電力状態などが1ターンの動作に不十分であった場合、実装されるソフトウェアのアルゴリズムに関わりなく機能が停止するためである(ESL モデル)。これらの電力遷移状態は個々のノードに対して独立にシミュレーションしており、本提案のシミュレーションでは常にロギングを行っている。これを示した図 4 では、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ァイル・可視化されている。

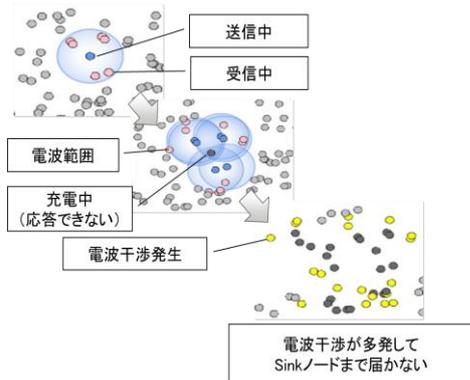


図 5.通信状態遷移

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。これらをノード（エージェント）の動作シナリオとして MAS の一環として処理を行っている。

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[4]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 λ 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。

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

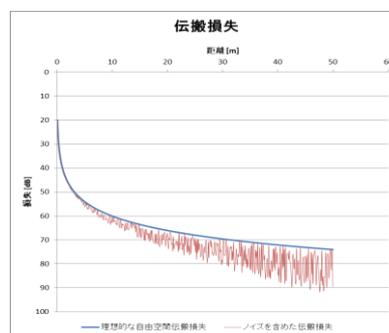


図 6.通信におけるノイズモデル

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 6 に示す。

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 $P[W]$ 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 2 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 Δt 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 7 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 ΔT 、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。

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

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。

前述したとおり、MAS モデルの領域では個々のノード（エージェント）は独立に充放電・動作を非同期に実行しているが、たとえば EH 素子としてソーラーパネルを定義した場合には、この日照パターンが個々のノードの電力状態を定義することとなるが、ここでも乱数要素として、同一の日照パターンでも日向と日蔭状態があり、かならずしも一様の変化をうけないものとしている。

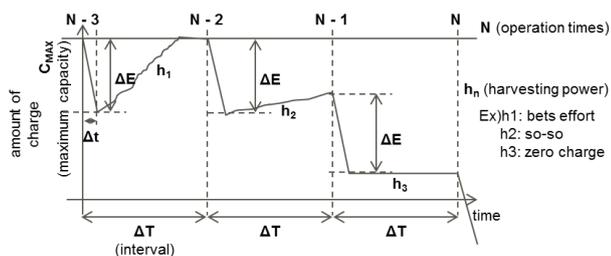


図 7. ノードの発電と消費の電力挙動

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
- (2) 100 回の試行を繰り返し、ノードすべての平均をとる。
- (3) 要求仕様を満たすノード構成の冗長性を評価する。

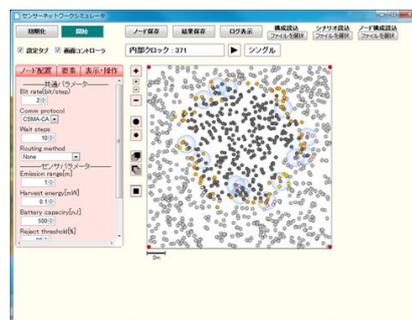


図 8. シミュレーション画面

図 8 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。

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 1 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 9 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。

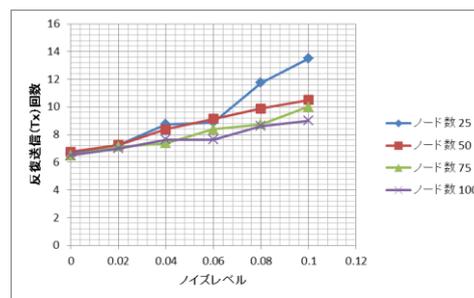


図 9. ノイズレベルに応じた Tx (送信) 回数

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に関連をノイズレベルに応じて測定した結果を図 10 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。

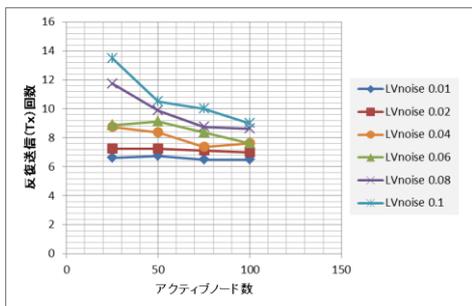


図 10.アクティブノード数に応じた Tx (送信) 回数

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。

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 11 に示す。このグラフは、6.2 節の結果をもとに、横軸に反復回数を取り、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。

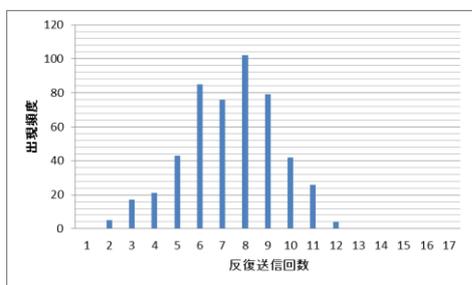


図 11.反復回数頻度

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%の冗長さノードで WSN を構成する必要がある。また、8 回までとした場合、7%の冗長さとなることからノイズに伴った最大再送回数を加味した電力量を算出してシステム全体のエネルギー量を求めた。

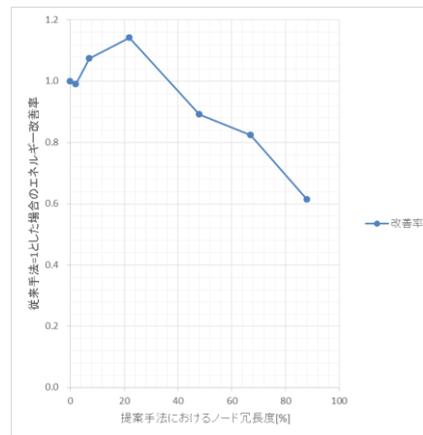


図 12.従来手法とのエネルギー効率の比較結果

図 12 はノイズレベル $LVnoise=0.1$ における従来手法[2]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)。

冗長さ 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。

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 ESL+MAS 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 WSN システムを評価した。

参考文献

- [1]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むけた実験的研究", 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.69, No.1, pp.46-57, 2013 年 2 月.
- [2] 田辺智行, 若宮直紀, 村田正幸, "無線センサー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.
- [3] 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.
- [4] 高田潤一, "電波伝搬の基礎理論", Microwave Workshops and Exhibition 2005, 2005 年 11 月.