

センサーネットワークアーキテクチャ
システム設計と実装評価に関する研究

Studies on System Design and
Implementation Evaluation
for Sensor Network Architecture

2017年2月

山下 浩一郎
Koichiro YAMASHITA

センサーネットワークアーキテクチャ
システム設計と実装評価に関する研究

Studies on System Design and
Implementation Evaluation
for Sensor Network Architecture

2017年2月

早稲田大学大学院
基幹理工学研究科 情報理工学専攻
アドバンスト・コンピューティング・システム研究

山下 浩一郎
Koichiro YAMASHITA

目次

第1章	序論	15
1.1	本研究の背景と目的	16
1.2	本論文の概要	21
第2章	環境系センサーネットワークシミュレータ	27
2.1	まえがき	28
2.2	従来の研究	31
2.3	前提とするセンサーネットワークの基本構成	33
2.4	アーキテクチャ設計の課題	37
2.4.1	データ伝播・トポロジー構成の課題	37
2.4.2	ノード消費電力とシステム全体のエネルギー効率の課題	39
2.4.3	外乱とシステムレベルの信頼性の課題	41
2.4.4	システムに内在するトレードオフの課題	42
2.5	センサーネットワークシステムアーキテクチャ	45
2.5.1	環境モニタリング要求仕様	45
2.5.2	ノードハードウェア・ソフトウェア	47
2.6	提案するシミュレーションシステム	49
2.6.1	シミュレーション環境の基本概念	49
2.6.2	シミュレーション環境の構成	49

2.6.3	電力シミュレーション	53
2.6.4	通信シミュレーション	55
2.6.5	電力の外乱シミュレーションモデル	57
2.6.6	通信の外乱シミュレーションモデル	59
2.7	インプリメンテーション	61
2.8	提案シミュレータによる環境モニタリング特性測定	67
2.8.1	評価方式	67
2.8.2	受信回数に着目した特性評価	67
2.9	従来手法との比較	71
2.10	シミュレーション性能評価	78
2.11	第2章のまとめ	83
第3章	センサーネットワークスケジューリング手法	85
3.1	まえがき	86
3.2	従来の研究	88
3.3	スケジューリングの課題	90
3.4	スケジューリングアルゴリズムの提案	92
3.4.1	LQI/PS 法	95
3.4.2	PS/LQI 法	98
3.4.3	NRC 法	101
3.4.4	周期間欠動作スケジューリング	104
3.4.5	バッテリー温度活性スケジューリング	110
3.5	提案スケジューリング手法の評価	116
3.5.1	LQI/PS, PS/LQI, NRC 法の比較	116
3.5.2	間接同期スケジューリング評価	122
3.5.3	バッテリー温度活性スケジューリング評価	123

3.6	第3章のまとめ	125
第4章	アーキテクチャ探索と実証実験	127
4.1	まえがき	128
4.2	従来の研究	129
4.3	実証実験内容	130
4.4	センサーネットワークシステムアーキテクチャ設計	137
4.4.1	ノードハードウェアと基本電力特性	138
4.4.2	屋外環境における通信特性	141
4.4.3	屋外環境における電力特性	151
4.5	実運用シミュレーション	158
4.6	ソフトウェア・ハードウェア実装	162
4.6.1	ソフトウェア実装	162
4.6.2	ハードウェア実装	165
4.7	現場実証実験と実験結果	167
4.7.1	台湾エリア実験	168
4.7.2	九州エリア実験	172
4.7.3	北海道エリア実験	185
4.7.4	実証実験結果と考察	194
4.8	第4章のまとめ	196
第5章	結論	197
5.1	本研究により得られた成果	198
5.2	今後の課題	199

目次

1.1 IoTシステム概念図	17
1.2 センサーネットワーク分野の研究の変遷	19
1.3 環境モニタリングの課題	21
2.1 定型配置 (Hexagon 配列)	33
2.2 ランダム配置 (600 × 600m)	34
2.3 ランダム配置 (1200 × 1200m)	35
2.4 ゴシッピング型接続	38
2.5 ノード種別による消費電力	40
2.6 センサーネットワークシステムのトレードオフ	43
2.7 シミュレーション環境構成ブロック図	50
2.8 シミュレーション環境画面構成図	52
2.9 シミュレーションを用いたワークフロー	53
2.10 センサーノードの電力遷移モデル	54
2.11 センサーノードの通信遷移モデル	56
2.12 発電ばらつきとチャージモデル例	58
2.13 自由伝播損失特性 ($L_{V_{noise}} = 0.1$)	60
2.14 全体構造	61
2.15 シミュレーション内部での field のイメージ	63

2.16	シミュレーション内部での field 内でのノード間連携イメージ	64
2.17	シミュレーション内部でのノードオブジェクト間連携グラフィメージ	65
2.18	ノイズレベルに応じた T_x 回数	68
2.19	アクティブノード数に応じた T_x 回数	69
2.20	ノイズレベルに応じた R_x 回数	70
2.21	アクティブノード数に応じた R_x 回数	71
2.22	IEEE802.15.4 を用いた Router/End Device ツリー接続	73
2.23	従来手法のモデルイメージ	74
2.24	提案手法のモデルイメージ	75
2.25	反復回数頻度	76
2.26	従来手法とのエネルギー効率の比較結果	77
2.27	ノイズ, 冗長度 (Active node), エネルギー (通信反復回数) の相関 関係	78
2.28	シミュレーション時間の比較	81
2.29	シミュレーション速度比 (NS-2 の実行スピード=1)	81
2.30	シミュレーションログサイズ	82
3.1	ルーティング時のデータフローによる負荷イメージ	91
3.2	負荷分散を考慮したスケジューリングイメージ	92
3.3	LQI/PS 法アルゴリズム (1)	96
3.4	LQI/PS 法アルゴリズム (2)	97
3.5	LQI/PS 法アルゴリズム動作イメージ	98
3.6	PS/LQI 法アルゴリズム (1)	99
3.7	PS/LQI 法アルゴリズム (2)	100
3.8	PS/LQI 法アルゴリズム動作イメージ	101
3.9	NRC 法アルゴリズム	102

3.10	NRC 法アルゴリズム動作イメージ	103
3.11	マルチホップによるデータ収容	104
3.12	周期間欠動作スケジューリング動作イメージ	105
3.13	データ到着時間	106
3.14	ノードアーキテクチャ	108
3.15	ノーマリオフ間接同期スケジューリングアルゴリズム	109
3.16	低温環境下でのリチウムイオンバッテリー特性	111
3.17	低温環境下での突入電流 (摂氏-5 度)	112
3.18	低温環境スケジューリングアルゴリズム	114
3.19	LQI/PS 法によるデータ収容率推移	117
3.20	PS/LQI 法によるデータ収容率推移	117
3.21	NRC 法によるデータ収推移	118
3.22	データ収容率の比較	120
3.23	間接同期スケジューリング結果	122
3.24	バッテリー温度活性スケジューリング結果	123
4.1	エリア 1: 台湾苗栗縣大規模造成地	132
4.2	エリア 2: 台湾新竹縣幹線道路切り通し斜面	132
4.3	エリア 3: 台湾尖石郷老朽化した石垣面	133
4.4	エリア 4: 長崎県佐世保市処分場	134
4.5	エリア 5: 北海道芦別市国道沿い越冬環境	134
4.6	エリア 6: 静岡県沼津市予備試験エリア	135
4.7	エリア 7: 北京市朝陽区予備試験エリア	135
4.8	アーキテクチャ探索ワークフロー	137
4.9	センサーノードブロック図	139
4.10	センサーノード	139

4.11	センサーノード消費電力波形（再掲）	141
4.12	屋外通信試験（エリア5・雑木林）	142
4.13	屋外通信試験（エリア5・グラウンド）	143
4.14	通信における雑草の影響	144
4.15	雑草エリアにおける通信品質	145
4.16	雑草エリアにおけるデータ伝播特性	145
4.17	長距離伝播における通信品質	146
4.18	長距離伝播におけるデータ伝播特性	146
4.19	通信における樹木の影響	147
4.20	樹木エリアにおけるデータ伝播特性	148
4.21	データ再送信頻度	148
4.22	段丘斜面状の通信品質	150
4.23	段丘斜面状斜面モデルの用例	151
4.24	ソーラーパネルによる発電データ	152
4.25	実証エリアの日照時間統計	153
4.26	発電量ばらつきの統計処理	154
4.27	発電パターン	155
4.28	バッテリーの放電特性	156
4.29	適用現場パラメタとシミュレーション概念図	161
4.30	ソフトウェア全体構成	162
4.31	データおよびプロファイルパケットログ	164
4.32	開発したセンサーノード外観	166
4.33	センシング構造	167
4.34	開発したセンサー設置状態（エリア1）	169
4.35	運用中のGUIスクリーンショット（エリア1）	169

4.36	開発したセンサー設置状態（エリア2）	170
4.37	観測データ（エリア1・抜粋）	171
4.38	エリア4ロケーション	173
4.39	エリア4地形と既設センサー位置	174
4.40	エリア4設置制約	175
4.41	エリア4シミュレーション結果に基づく中継ノード位置	176
4.42	エリア4設置中継ノード(冗長度40%)	177
4.43	エリア4現場地形写真（最上段～中段）	178
4.44	エリア4既設センサーの接続（中段P,S）	179
4.45	エリア4データ収容率	180
4.46	エリア4獣害(Animal injury)によるシステムトラブル	181
4.47	エリア4バッテリー電圧	182
4.48	エリア4バッテリー電圧(中継ノード6,7)	183
4.49	エリア4三軸加速計データ(中継ノード6,7)	184
4.50	エリア4小規模表層崩壊の観測	184
4.51	エリア5ロケーション	186
4.52	エリア5設置制約	187
4.53	エリア5シミュレーション結果に基づく中継ノード位置	188
4.54	エリア5中継ノード間の通信品質	189
4.55	エリア5中継ノードスケジューリングイメージ	190
4.56	エリア5越冬向けノード設置	191
4.57	エリア5データ収容率	192
4.58	エリア5計測データ	193

表 目 次

2.1	環境モニタリング（斜面崩落監視）における要求仕様	45
2.2	センサーノードに用いられる一般的なハードウェア仕様	47
2.3	センサーノードに用いられる一般的なソフトウェア仕様	48
2.4	シミュレーションの構成仕様	51
2.5	シミュレーションのプラグインライブラリ	62
2.6	従来手法との比較	72
2.7	シミュレーション時間比較環境	80
3.1	従来型計算機システムとセンサーノードの分散処理観点の違い	87
3.2	提案するスケジューリングアルゴリズム	94
3.3	データ到着時間実験仕様	107
3.4	スケジューリングアルゴリズム評価仕様	116
3.5	データ収容率の比較	119
3.6	各アルゴリズムの特徴と用途考察	121
4.1	実証実験エリア一覧	131
4.2	各遷移状態における消費電力	140
4.3	屋外通信試験仕様	143
4.4	地盤組成と電波電導度	150
4.5	屋外電力試験仕様	152

4.6	各状態における環境発電期待値	156
4.7	発電期待値の分散 σ に基づくバッテリーの生存期待確率	159
4.8	ex) $T_{\text{downtime}}=30[\text{s}]$ のときのバッテリーおよびソーラーパネル設計 .	160
4.9	ex) $T_{\text{downtime}}=60[\text{s}]$ のときのバッテリーおよびソーラーパネル設計 .	160
4.10	シミュレーションにより探索されたアーキテクチャ	161
4.11	ソフトウェア構成	163
4.12	実証実験結果まとめ	194

第1章

序論

1.1 本研究の背景と目的

現在, IoT(Internet of Things)に代表されるように, 各種センサーが人・機械・環境に設置されることにより様々なデータを集約することで新たな情報流と知見を生むことを狙いとしたセンサーネットワークシステムが注目を集めている。

アプリケーションの例として, 気象や生態系のデータを数値化して収集し, 環境状態を分析し, 自然災害に対する防災や減災に対応するもの [SMA⁺14]. 橋梁やトンネル, ビルなどの地上地下の構造物といったインフラからデータを収集し, 劣化診断や維持管理に対応するもの [YHY09][IISS10]. 自動車や道路施設からデータを収集し, 自動運転や交通流を分析し, 安全快適な交通システムに対応するもの. 医療機器や携帯機器から生体データや行動データを収集し, 治療や健康管理を行うものなどがある。

これらのセンサーネットワークシステムの多くは, センサーデバイスをネットワークで接続したセンサーフィールドと, 取得したセンシングデータをゲートウェイを介してサーバシステムに集約し, 演算処理を行う図 1.1 のようなシステムである。

また, これらのアプリケーションにおいて, センサーノードが単独で用いられることもあるが, 多くの利用形態では, 複数のセンサーが有線あるいは無線接続され, トポロジーを形成し, ゲートウェイにより集約された後にネットワーク回線からサーバにデータを送る仕組みがとられる。特にセンサーが無線接続する場合には WSN (Wireless Sensor Netwrok) と呼ばれている。

1.1. 本研究の背景と目的

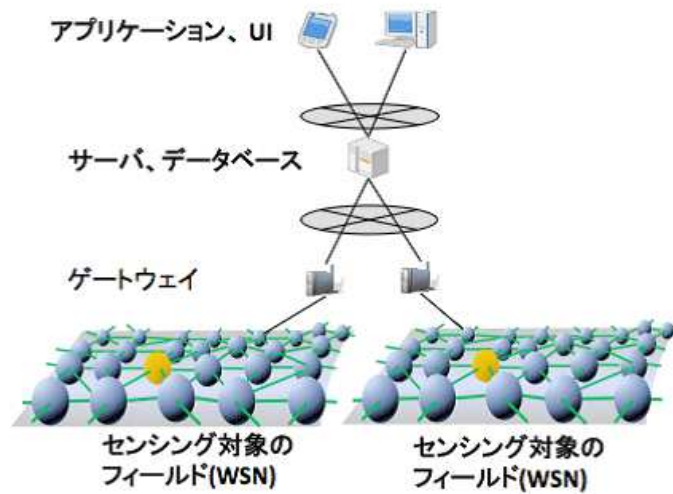


図 1.1: IoT システム概念図

このようなセンサーネットワークの研究は古くから行われており、代表的なものとして2000年代より、University of California Berkeleyにおける“Smart Dust Project” [KKP00]に端を発したWSNの実験的な取り組みなどがあり、WSNの可能性が体系付けられている [CK03][CRD00]。これらを構成する1つのセンサーノードのアーキテクチャは、小型のマイクロプロセッサに接続された無線モジュール、センシングデバイスおよびバッテリーで構成されている。センシングデバイスにより取得されたセンサーデータはマイクロプロセッサにより処理され、無線モジュールにより送信される仕組みとなっている。

黎明期におけるアプリケーションは、森林火災の監視や、石油パイプラインの状態検出、あるいはビルの温度監視といったメンテナンスを狙いとしていた。しかしながら2000年代における半導体および無線技術においては、消費電力や通信品質においてまだまだ途上状態であり、その多くは現実的なバッテリー容量では、稼働時間は数日程度であり、伝送距離や通信スループットにおいても課題が多かつ

た。Dust Project [KKP00]における mote と呼ばれるノードは、機器の小型化を最優先し、ペットボトルキャップ程度の大きさでの実装を行い、1次電池による使い捨てとなるような利用形態を想定していた。当時の技術目標は、より高度な低消費電力化と、より高効率な環境発電素子と2次電池の組み合わせによる長期動作であった。しかしながら、これらの課題を解決するためにはコスト課題を払拭することができずに、普及することはなかった¹。

2010年代になると、半導体の微細化が進み、安価な通信モジュールの普及により、より容易にセンサーネットワークを構築できるようになってきており、実証実験やツール環境など、さまざまな取り組みが行われてきている [戸辺 11] [DW06] [SSMM11] [YA08]。

文献 [SMA⁺14] では、Smart City をテーマに市街地に設置した約 2000 個ものノードを設置し、各種のデータ取得することに成功している。具体的には、街頭に設置したノードから、気温や交通状態を恒常的に習得している。このノードアーキテクチャは、小型のソーラーパネルと2次電池との組み合わせにより、Dust Project の課題を解決しているかのように捉えられるが、実際には、ノードの設置箇所は街灯のランプの直下などに設置することを前提としており、夜間や悪天候でも安定した発電状態が担保されている。

図 1.2 は当該分野の研究の変遷の図で、2000 年代から近年まで盛んに研究が実施されていることが IEEE/ACM の論文数からも読み取れる。また、図中の円チャートは論文のキーワードの相関と出現数を示したもので、基本的には通信に掛かるプロトコルの研究を中心に、電源制御や分散制御などについて研究が実施されていることがわかる。

¹当時のノード単価は US\$60~80 ほどであり、最終的には数\$程度までコストダウンしないと普及しないといわれていた

1.1. 本研究の背景と目的

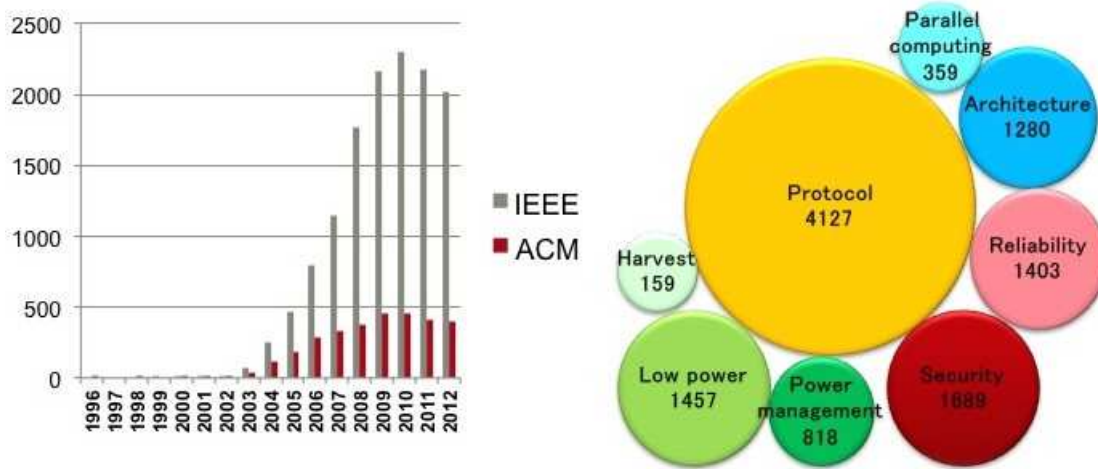


図 1.2: センサーネットワーク分野の研究の変遷

一方で、より過酷な屋外における WSN の実験的取り組みでは [池川 09][小泉 13] などがある。これらの先行研究のアプリケーションは、主に斜面の状態監視を目的とし、センサーノードを実際の現場に設置することで、いかに長期間安定してデータ取得ができるかを対象としたものである。これらの取り組みの課題としては、屋外設置環境における不安定な電力供給状態を条件としており [SMA⁺14] のような街灯下での安定した給電状態を前提条件としていない。しかしながら、結果として [池川 09] では自動車に搭載されるような大型バッテリーにおいて3ヶ月、[小泉 13] では電力制御をおこないつつも4~5ヶ月程度の連続稼働時間となっている。

上記先行研究で掲げられた課題のように、屋外に設置されるようなシステムでは、低消費電力かつ安定した電力供給を行うかが重要となるが、消費電力のもうひとつの課題として、ノードのアーキテクチャ、特に無線モジュールの特性に起因する各ノードの接続状態であるトポロジー構成によっても電力消費のビヘイビアが変化することが知られている [ASMS⁺12][田辺 11]。

本論文では、防災・減災を担うIoT基盤技術として、環境や社会基盤（インフラ）が装備するセンサーネットワークシステムをアプリケーションとして想定する。アプリケーションの要求仕様として以下を想定する。

- (1) 長期間かつ広範囲にばらまかれるように設置されるセンサーノード
- (2) センサーノードは環境発電素子と二次電池により自己完結する電力モデル
- (3) センサーノードはプロセッサと無線モジュールで構成され、互いのノードは無線接続する
- (4) 発電や通信が天候やノイズといった環境の外乱影響を受けながらノード間で協調動作することでリモートかつメンテナンスフリーで動作状態を維持する
- (5) 低コストシステムである

より具体的なモデルとして、造成地や山の斜面に傾斜計や土壌水分計といった土木工学の分野で用いられている現場設置されたデータロガーや手動計測していたデータ取得を、WSNにより自動収集するシステムを取り扱う。このようなシステムは、近年の防災意識の高まりから国内外において研究が実施されているが、不安定な無線通信やバッテリーの枯渇により安定動作しても4ヶ月テイドガ上限となっている。

しかしながら、このような環境やインフラモニタリングを行うためのWSNの実現するために、電力・無線挙動・環境外乱といった多角的観点で考察したアーキテクチャ設計が必要だが、現在これらを俯瞰した設計実装手法は確立されていない。

図1.3は環境やインフラのモニタリングの実情である。多くの現場では、作業員による目視確認が行われているが、この目視確認作業に置き換わるべきWSNが

1.2. 本論文の概要

バッテリー交換などのメンテナンスになってしまったり、高い信頼性を確保するために、大掛かりなシステムになってはいけないことが課題となっている。

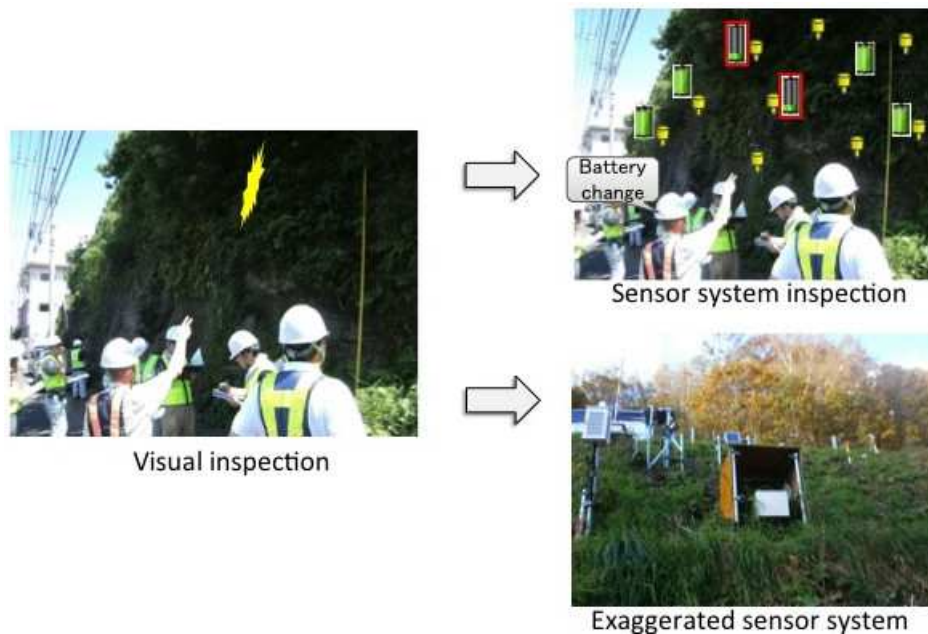


図 1.3: 環境モニタリングの課題

そこで本論文では、WSNの体系的なアーキテクチャ考察において、全体実装のポリシーとして個々のノードの100%の動作率を前提とするのではなく、動作環境化での外乱を考慮し、特性のばらつきや想定外動作も考慮した冗長設計を念頭に置くことで環境起因のノイズをパラメタとして取り込んだWSN提案し、その結果に基づいた実証評価を通じて提案手法の進歩性・優位性を検証する。

1.2 本論文の概要

本論文の第2章以降の概要を以下に述べる。

第2章「環境系センサーネットワークシミュレータ」では、実際に現場適用す

る WSN 検証で用いるシミュレーションの提案と評価について述べる。

従来のシミュレーションでは、デバイス情報を入力することで、ハードウェアのビヘイビアを評価する技術、通信や障害物のパラメタを入力することで無線信号の元帥や反射を再現評価する技術などがある。しかし実際の環境では多数のセンサーノードが相互作用し合い、通信によるデータの伝播とハードウェアの消費電力において相関関係が生じている。さらにこのようなノードが数百～数千個ばらまかれる環境の評価想定して現実的な時間で高速処理することが求められる。

提案する WSN シミュレータでは、詳細なパケット遷移やデバイス挙動ではなく、データ収容率や電力バランスのみの評価に特化し、高抽象モデリング技術である ESL(Electronic System Level) 技術 [山下 14], 及び個々のセンサーノード間の相互挙動には MAS(Multi Agent System) の技術を用い、環境の影響は確率分布モデルを組み込んで WSN 全体の挙動を分析する構造となっている。

ESL では、ハードウェアを抽象化可能な構造化言語で記述し、シミュレーション速度と分析精度を調整しながら高速にアーキテクチャを探索していく手法で、MAS とは動作条件 (シナリオ) に基づいて、個々のノード (エージェント) が個別に動作するときの相互作用をシミュレーションするシステムで、これらの技術を組み合わせることで、提案シミュレータは構成されている。

従来研究 [田辺 11] では 300 ノード以上の規模の場合、通信効率とエネルギー効率を両立するにはゴシップ型 (メッセージ転送に確率要素を取り込んだブロードキャスト方式) が最も効率がよいとされていたが、提案シミュレータによる分析では、冗長なノードを許容するツリー接続でも、冗長度 5~38% で最大 13% エネルギー効率のよい運用方式を発見した。また、シミュレーション速度においても、オープンソースである通信シミュレータ NS2² との比較評価では、100 ノード規模のシステムで約 1.3 倍、1000 ノード規模では約 96 倍 (約 5 時間→3 分) の高速化

²Network Simulator-2. URL : <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

1.2. 本論文の概要

を実現した。このシミュレータは第4章における実証システムのアーキテクチャ探索に用いる。

第3章「センサーネットワークスケジューリング手法」では、WSNを長期安定稼働させるための運用中のノード同士の接続方針や消費電力制御のスケジューリングについて述べる。携帯機器のマルチプロセッサやサーバなどの並列計算機といった従来の計算機システムでは、高速化や省電力化のため、ソフトの処理タイミングや空きプロセッサの状態、データ伝搬量などをパラメタとしてスケジューリング制御を行うが、本論文が対象とするような環境やインフラのモニタリングでは、従来の計算機と同様にプロセッサとデータ通信を行う多数のノードが連動する一方で、ノード間の明示的な同期処理ができない状態で、刻々変化する通信品質や電力状態で安定したデータ収集が可能ないようにノード間の接続状態（トポロジー）や消費電力の状態遷移のタイミングを制御しなければならない。

本章では、通信デバイスから容易に取得できる電波強度 [dBm] から換算した評価スコアである LQI(Linked Quality Indicator)、電源ユニットからの二次電池の蓄電状態である PS(Power Status[V])、近傍ノードの役割状態 NR(Neighbor's Role) を指標値として、その選択優先度の組み合わせとなる3つのスケジューリング手法 LQI/PS 法、PS/LQI 法、NRC 法 (Neighbor's Role Change) を提案している。

従来手法では、選択アルゴリズムである AODV 法 (Ad-hoc On-demand Distance Vector)³ による最短経路を選択する手法などが用いられているが、安定した外部給電のない環境での長期間の運用では局所的なノードの電池枯渇を招き、全てのノードが徐々に未接続となる傾向を示す。

一方で、提案するスケジューリング手法では、LQI や PS 情報の他、センサーノードにおけるデータ収集間の機能停止状態であるスリープ制御や、環境外乱による

³RFC3561

ノイズを考慮している。このノイズの具体的影響として、一般的な通信パケット収容率PDR(Packet Deliver Ratio)だけでなく、ソーラーパネルといった環境発電量のばらつき、さらに温度による電池活性変化を考慮している。

後述する実験環境をモデルとした、各スケジューリング・キーの組み合わせによる評価結果では、電池状態を第一キーとし、通信品質を第二キーとして提案するPS/LQI手法において、単純なツリー構造接続においても22%の冗長ノードを含ませることで従来最も効率がよいとされたゴシップ接続手法よりも13%電力効率の良いスケジューリング結果を得ることができた。この結果を元にデータ収容率のパターンの違いをモニタリング用途毎への適用時の提案として体系化し、第4章での実証システムへ適用をおこなっている。

第4章「アーキテクチャ探索と実証実験」では、第2章のシミュレーションによるアーキテクチャ評価、第3章のスケジューリング手法をもとに、実際に汎用ハードの組み合わせで試作システムを構築し台湾、北海道、九州といった異なる環境における延べ3年間にわたる運用を行った現場実装と評価結果について述べる。

実証実験では、台湾における実証実験では台湾工業技術研究院(ITRI)協力のもと、実際の造成地斜面、道路切り通し斜面、および盛土石垣の安定度調査のための定点観測を行った。

これらの環境は、環境発電(ソーラーパネル発電)に及ぼす日照条件や周囲の植生、あるいは無線ノイズの影響が異なり、第3章で提案を行ったスケジューリング手法の耐環境性の評価となっている。

実際の運用では、10~50[m]間隔に設置された20~100ノードの規模で設置を行い、斜面傾斜、土壌水分測定を10分毎に測定を行なうシステムで、従来の類似研究[小泉13]では7[Ah]の二次電池を用い、ほぼ同条件で約4カ月の運用に成功しているが、最終的にはバッテリー交換を要する結果となっている一方、提案手法により構築したシステムでは200[mW]のソーラーパネル(手のひら大)、3.2[Ah]

1.2. 本論文の概要

の二次電池（乾電池大）を組み合わせ、第3章で提案したNRC法を組み合わせることで約1年間停止することなく対象エリアの環境データ取得に成功し、冒頭で掲げた(1)~(5)の要望を満たしたシステムとなっている。

第5章「結論」では、本研究により得られた成果と今後の課題について述べる。

第2章

環境系センサーネットワークシミュ レータ

2.1 まえがき

センサーネットワークはセンサーデバイスを搭載した無線ノードを、測定する領域に配置し、ネットワークを構成するもので、多数のノードが互いにコネクションを張りつつ、データを収集する仕組みとなっている。

本論文のテーマとなっているアーキテクチャには2つの定義があり、1つはセンサーネットワークを構成するセンサーノードのアーキテクチャ、もう1つは多数のセンサーノードで構成されるセンサーネットワークのシステムのアーキテクチャである。

まず、センサノードのアーキテクチャを単体でみた場合、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、センサー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。たとえば、通信制御においては、間欠センシング動作に伴う通信機能の ON,OFF のタイミングについて、固定周期ではなく通信状態に影響を受けたデータ再送処理による通信機構の動作期間の変化、また、電力制御においては、上記通信機構の動作期間の変化による電力消費の遷移のほか、単純な省電力設計だけではなく、ソーラーパネルなどの環境発電素子との協調動作を考慮する必要がある。

これらの動作モデルをシミュレーションしていくためには、センシング対象のアプリケーション、および、その動作環境を十分に考慮する必要がある。本論文で対象としているアプリケーションとして、道路や造成地周辺に形成されている斜面やのり面といった傾斜地における状態監視システムを想定している。

土木工学や建築の分野では、このようなターゲットに対し、危険個所に対する長期観測方法として、従来は GPS 計測による変移観測、孔内ひずみ計による地盤

2.1. まえがき

応力の計測や、土壌水分計による帯水量の観測がおこなわれていた。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、センサー機器を構成するモジュールとして、より簡易に取り扱える小型安価なセンサーデバイス、無線通信モジュールおよび効率的な環境発電素子の登場により、センサーネットワークの構築は容易になってきているが、本論文が想定する環境やインフラをモニタリングするような屋外設置されるようなセンサーネットワークについては、課題が多い。

具体的な課題としては、過酷な環境下ともいえる屋外設置において電力や通信におけるワーストケース保障¹をするため、過剰品質ともいえる機能追加が、機器を肥大化させ、コスト増へとつながっている。また、現場設置された個々のノードの挙動（ビヘイビア）を探索する手法が十分に確立されておらず、センサーネットワークを構成するノード数の増加に伴い、システムシステムの複雑さが助長され、最適な解を得る手法が確立されていない点があげられる。

本論文で提案を行うセンサーネットワークアーキテクチャは、第1章でも述べたように、1つ1つのノードを最適化するのではなく、センサーネットワークを構成するノード数の冗長性を許容することで、不確定な外乱に対する耐環境性を保障していくアプローチをとっている。

本章では、対象となる環境にばらまかれたセンサーは個々に独立したビヘイビアを示しても、全体としてどのように動作するかをシミュレーションにより分析を行う手法を提案する。

提案するシミュレーションシステムは以下の機能、動作を行うものとする。

¹最悪の状況下でも所定の時間稼働しつづけるためのバッテリー搭載や、通信品質を担保するためのロバスト性保障

- (1) ランダム・スケーラブルなノード設置と設定
- (2) ノードを構成するハードウェアモジュールの電力的ビヘイビアモデル
- (3) ノード間の通信ビヘイビアモデル
- (4) 発電や通信障害といった外乱を考慮

本章では、提案するシミュレーションにより、センサノード数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行い、従来最も効率がよ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。

本章の内容については、主に著者の著述論文 [Yam10] [山下 14] [山下 15] から構成されている。

2.2 従来の研究

センサーネットワークのシミュレーション研究としては、システムを俯瞰したモデリング技術よりは、通信やデバイスに特化した研究が数多くなされている。

センサーネットワークに係る通信シミュレーションの従来研究では、大きく2つの分野に分類される。1つは、通信方式 [田辺 11] や周波数特性による電波伝搬 [高田 05] などについての研究が行われている。もう1つの観点は、無線ノードの設置に関する研究 [ASMS⁺12][WC06][ZC03] [Doh00] [LAX⁺16] [SKJ⁺08] [SPMC04] [WLC07] がある。

これらの従来研究では、反射や吸収、マルチパスなどによる自由伝播損失といった基本的な無線挙動を解析するために用いられ、基本的解析はフリーソフトである NS2² などによって容易にモデリングを行うことが可能となっている。

しかしながら、これらのシミュレーションでは Wi-Fi アクセスポイント設置に代表される屋内などの安定した環境、あるいは携帯電話といったセルラー通信などの基地局による広域通信モデリングには有効であるが、本論文が対象とするような環境モニタリングといった外乱の大きい環境と、数 10m~100m 程度の短距離通信ではシミュレーション結果と実際の通信結果に乖離が生じる。これらの乖離誤差を小さくするためには、複雑な地形や反射物となる土壌組成や障害物の殆どをモデリングする必要がある、その煩雑性からあらゆる環境に対応したシミュレーション環境を構築することは現実的ではない。

デバイスのシミュレーションでは、EDA ツールとして半導体の物理設計から回路 CAD、上位設計ツールとしてシステム LSI のような大規模回路のビヘイビアを解析する手法などがあり [Yam10]、これらの回路設計と同時に、モジュール毎の動作電力を見積もることで、電力評価を行う研究も行われている [Haz12]。

²Network Simulator-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

従来のデバイス設計においては、1つの機器単位での実装と評価が主流であり、センサーネットワークのように複数のノードが通信を行う場合以外は独立に動作するようなモデリングの研究開発は行われていない。

特に本論文が対象とするような、環境発電と二次電池による自己給電、間欠動作によりセンシングを行うシステムのように、電池枯渇による動作待機や、通信エラーに伴った再送による電力消費の変化を再現するようなモデリング手法は確立されていない。

また、センサーネットワークシステム全体の評価としては、文献[Aka74][Wit84]のように大規模なセンサーネットワークをスケーラブルに評価する論理的なモデリング手法のほか、文献[dSB15]のような工場内センサー配置といった狭義の特定用途に向けた手法がある。

従来研究の総括として、個々の要素技術研究は進められているものの、通信、回路、動作環境といった個別の要因がシステム設計全体に及ぼす俯瞰的研究は実施されていない。これは文献[SMS11]でも考察されているように、煩雑なモデリングを行い、現実との乖離が大きいのであればダイレクトに設置を行っていくほうがより効果的ではないかという考え方もあるためである。そこで、本章におけるシミュレーションの研究アプローチとしては、従来のシミュレーション手法を組み合わせるだけでなく、現実的な範囲で実装・アレンジおよび求解可能になることを目指す。

2.3 前提とするセンサーネットワークの基本構成

本論文で取り扱うセンサーネットワークの対象は、屋外の広範囲に設置することを想定しているほか、基本的なトポロジーとして、マルチホップ接続によるデータ収集を想定している。これは冒頭で掲げたコストや導入の容易性および消費電力の観点から、免許不要の特定小電力無線局の利用を前提とした場合、現在広く用いられている IEEE802.15.4(Zigbee) や 920MHz の通信モジュールを利用した場合、電波の到達レンジは見通しで数 100m、実効的な通信距離として数 10m となるため、対象領域の観測を集約機 1 に対して全てのノードをスター接続することは事実上困難なためである。

また、モニタリング対象が建造物の壁面あるいは、基礎となる平面状の物体であれば図 2.1 のように定型配置することで、特殊なケースを除き最も効率よくノード配置することが可能であるが、造成地や道路沿線斜面など地形の起伏や障害物がある場合には、結果的にランダムに配置することとなる。

図 2.1, 図 2.2, 図 2.3 はネットワークシミュレータ NS2 を用いて簡易的に接続状態を再現した結果である。

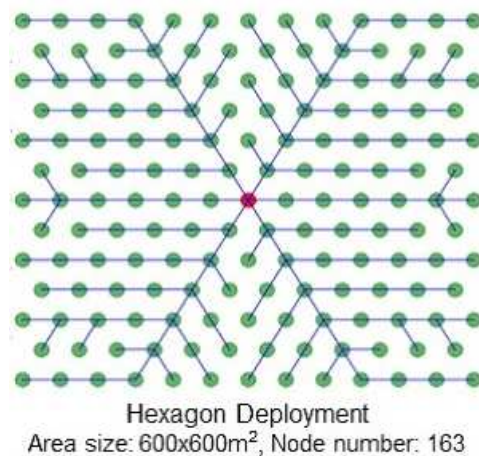


図 2.1: 定型配置 (Hexagon 配列)

図2.2, 図2.3のようにランダム配置を行う際には, 隠れ端末問題(電波衝突による通信が確立できないノード)による未加入ノードや, ネットワーク構築時のブランチ数制限, あるいは各種外乱によるパケットエラーによる孤立ノード(isolated node)が発生する. このような孤立ノードはランダム配置した結果, どのノードからも通信可能距離になく, 常に孤立しているケースを除きネットワークを構築したタイミングや外部環境によって任意に変化する.

孤立ノードの発生に対しては star 接続や mesh 接続といったトポロジーの工夫, データ再送や, ネットワーク再構築などの手法があるが, 常に100%の加入率を維持することは現実的ではない.

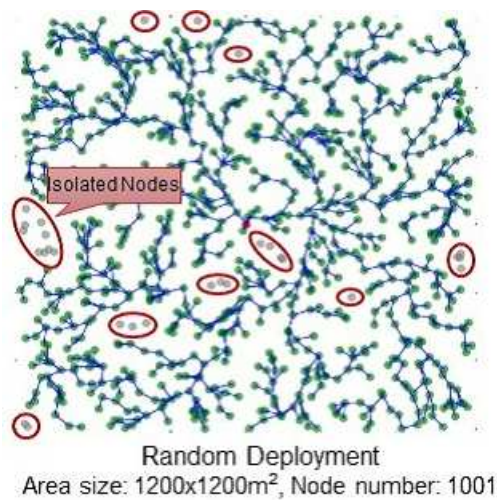


図 2.2: ランダム配置 (600 × 600m)

2.3. 前提とするセンサーネットワークの基本構成

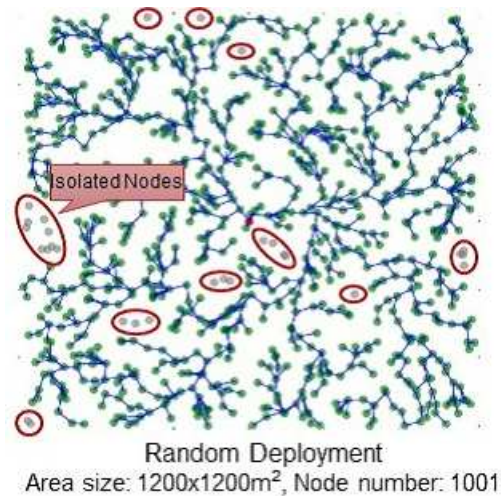


図 2.3: ランダム配置 (1200 × 1200m)

環境・インフラのモニタリングアプリケーションの目的から、異常値をリアルタイムかつ高精度に検出するのではなく、長期にわたる変化を捉えるのが目的であるため、ある程度の孤立ノードの存在を許容するアーキテクチャを想定する。

この孤立ノード出現比率はノードの設置状態から予測可能であり、最終的にはモニタリング要望である設置密度（空間密度）、測定間隔（時間密度）を充足するために冗長に設定を行うものとする。これらの冗長度の評価手法として、文献 [松崎 12][BS03] [JCC07] にある信頼性と安定性の評価に関する研究のほか、文献 [米田 14][Ohb16] [Yon14][Ohb15] や、著者の共著論文である [OYK⁺16] による多項式補間による欠損データの復元と包含誤差の評価手法、冗長性に関する考察と、それらのカバレッジに対する評価研究 [GL03][LC05] がある。

以下に、本論文の想定するセンサーネットワークアーキテクチャの基本構成・設計ポリシーを記載する。

- センサーノードは対象物にランダムにばらまかれている
- 通信による孤立ノードや故障や電池枯渇ノードによる欠損を許容する

- 欠損に対し、モニタリングの基本要望を満たすため、ノード数・運用周期などについて冗長性をもたせる
- シミュレーションでは欠損ノードの出現比率を算出し、ネットワーク全体の冗長度を評価する

最終的には、実際にシミュレーションによる事前設計に基づき、第4章において設置を行う際に実際に現場に設置を行うセンサーノードが、事前設計の冗長性とどの程度一致しているかをシミュレーションの評価基準とする。

2.4 アーキテクチャ設計の課題

ばらまかれたセンサーノードからデータを収集する場合、いかに効率的にノード間のトポロジを構築するかが重要となってくる。本節では、データ伝播・トポロジー・消費電力・外乱に着目し、これらのトレードオフ課題について整理を行う。

2.4.1 データ伝播・トポロジー構成の課題

センサーネットワークは大きく2つに分類され、1つは個々のノードが直接ゲートウェイと1対1通信してデータ集約するもの、もうひとつは、ノード同士がアドホック接続することにより、ノード間で情報伝搬をしながら全体のデータ集約を行うものがある。本論文では、後者のアーキテクチャを想定する。

このようなセンサーネットワークでは、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に分類され、ほぼ100%の受信率を仮定した場合、図2.4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よいとされている [田辺 11]。

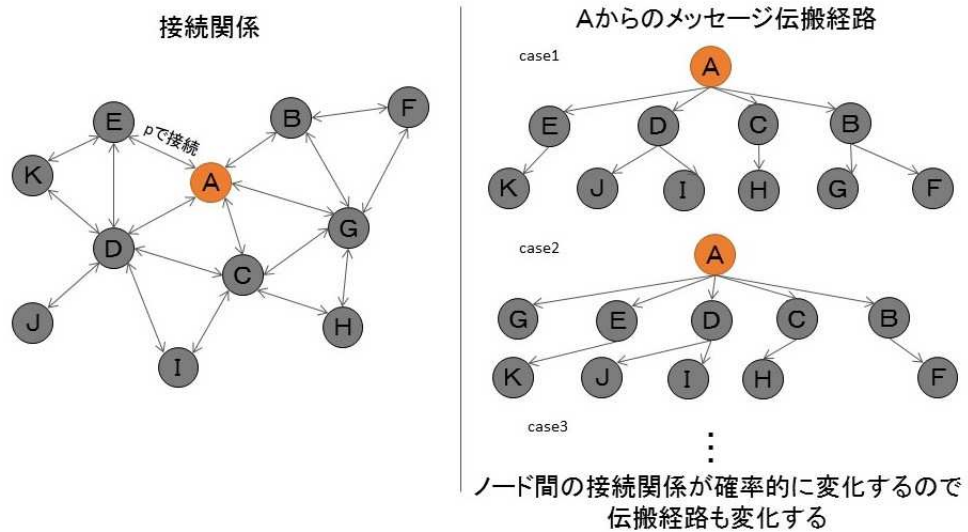


図 2.4: ゴシッピング型接続

このゴシッピング型の接続方法の特徴としては、メッシュ型の接続の最大の欠点としてあげられるノード数の増加に伴ったネットワークシステム全体の通信量の指数的增长を、確率的要素を取り込んだ隣接ノード間のブロードキャストを行うことで、設定した確率変数 p を適切に与えることで通信量を大幅に抑えることができる」とされている。

たとえば図中のノード A に着目した場合、あらかじめ設定されたメッシュ型のノードリストに記載されている隣接ノード B,C,D,E,G があるが、必ずしもすべてのノードにブロードキャストすることなく、B,C,D,E,G それぞれのブランチへの伝播確率 p により制御され、たとえば、case2 ではすべての隣接ノードに伝播するが、case1 では G には直接伝播されずに、B を経由して伝播していく。以上のような動作を各ノードに対して再帰的に適用していくことで、データ伝播を実現する [SA92].

しかしながら、このゴシッピング型の最大の課題としては、制御システム側が

2.4. アーキテクチャ設計の課題

すべてのノードの接続状態，あるいは各ノードの隣接ノードを管理する必要があるほか，すべてのノードは，自身の隣接ノードを管理する必要がある。このとき，スマートメータなどのように各家屋に設置されるような機器で，潤沢なハードウェアリソースを持ったノードや常時給電されているようなノードであれば問題ないが，本論文で取り扱おうとしているような低コストを実現する限られたハードウェアリソース，環境発電による電力自己完結型のアーキテクチャでは必ずしも最適なアルゴリズムとはいえない。

そこで，システム全体のエネルギー効率の観点から，センサーネットワークの課題を2.4.2節で分析していく。

2.4.2 ノード消費電力とシステム全体のエネルギー効率の課題

本論文で想定するマルチホップ型のセンサーネットワークの消費電力の観点での最大の特徴として，どのようなトポロジー構成をとったとしても，自身のノードから他のノードがブランチすることのないノード，すなわちデータ送信のみを行うノード（葉ノード）と，上流・下流に他のノードがあり，自身がホッピング通信の中継を行うノード（節ノード）が存在する。

葉ノードでは，アプリケーションレベルの通信では送信 (T_x) のみしかおこなわない一方で節ノードは，自身のノードよりも上流ノードからのデータ受信を行うための通信部分 (R_x) と，受信後，自身のデータを含めて下流のノードへ送信する2つのアクションが存在し，図2.5のように消費電力の観点で大きな違いが生じている。

図2.5は，実際に試作を行ったセンサーネットワーク用のノードの電力データである。無線モジュールにはIEEE802.15.4(Zigbee)を搭載しており，ソフトウェアの設定により葉ノード (End Device) もしくは節ノード (Router Device) として設定を行い，実際に End Device から Router Device に送信を行ったときの電力ログで

ある。

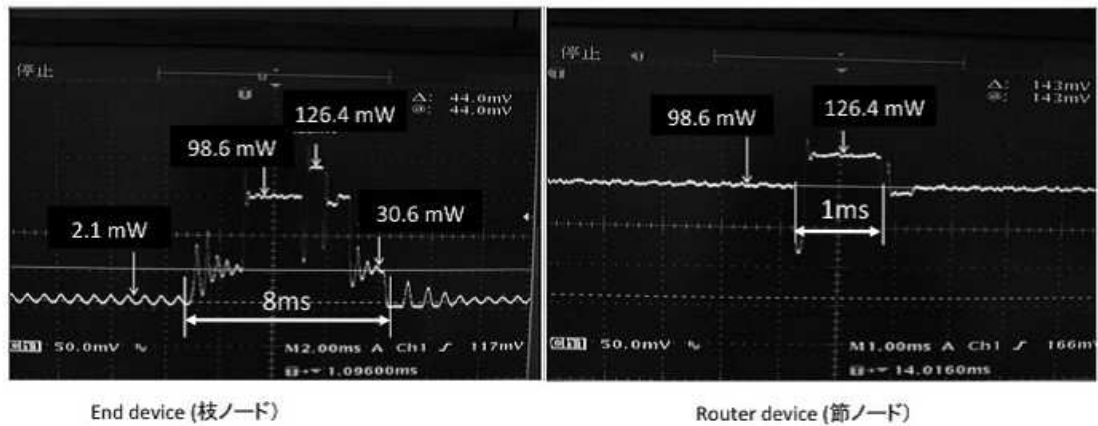


図 2.5: ノード種別による消費電力

図から、End Device の設定では、待機状態では 2.1 [mW] 程度、送信時には最大 126.4[mW] の電力を消費している一方で、Router Device では、End Device からの送信待ちうけを行っている待機状態で 98.6[mW]、中継送信時には End Device と同じ 126.4[mW] の電力を消費している。

消費電力の比較は、受信待ちうけ時間や、データ量に伴う送信時間によって異なるため単純比較はできないが、Router Device のほうが End Device に比べて消費電力が大きいことがわかる。

このため、エネルギー効率の観点からシステム全体の負荷バランスを考慮する必要があり、数多くの提案が行われている。古くはシステム全体の負荷バランスを考慮しつつロバストな通信経路探索を行う手法 [CRD00] や、中継を行う節ノードの消費電力に着目し、固定的なトポロジーではなく節ノードの選択を動的に行うことで全体のエネルギー効率化をはかり、文献 [CRD00] の手法に対し 50%改善する提案 [首藤 05] がある。

後者の研究では、節ノードの選択にあたり、近隣に存在するノードから候補を

2.4. アーキテクチャ設計の課題

選択するのであるが、最終的な候補選択には電池残量に基づいた選択候補期間を設けるほか、最終的には乱数による選択³が行われている。

文献[首藤 05]の手法では、単純な選択方式よりも消費電力の観点では効果があるが、システム動作の延命は行われている一方で、徐々に生存ノードは減少していくことが観測されている。

2.4.3 外乱とシステムレベルの信頼性の課題

本論文で最終的に適用を考えている環境モニタリングシステムではセンサーノードは屋外環境下に設置されることとなる。外乱による影響は、大きく2つあると考えられており、システムはこれらの外乱を吸収して機能を維持し続ける必要がある。

- (1) 環境発電素子を用いた場合の発電量
- (2) 無線通信時の通信障害

(1)の環境発電素子の課題では、たとえば電力の供給源としてソーラーパネルを用いた場合、設置現場における日照時間、あるいは草木や構造物の陰になるような場合の影響が考えられる。文献[SMA⁺14]では市街地に設置したソーラーパネルを装備したセンサーノードを用いているが、不安定な給電状態を解消するために街灯の下に設置するなどの工夫が行われている。

また、(2)では通信を行っている無線ノード間に障害物が出現したり、ノード数そのものが増えてきた場合に相互の電波干渉が発生する。

このような屋外の外乱環境下でシステムの信頼性を担保するために安定して動作させるためには、より大容量の発電素子とバッテリー、より安定稼動する無線モ

³論文では「じゃんけん理論」と定義

ジュールが必要となるが、ハードウェアリソースの投入により解決をはかることは可能であるが本論文の最初に掲げたポリシーであるコスト課題にそむくことになる。

基本的には与えられたリソースによって冗長に設置されたノードあるいは、サンプリング数を増加させた設定によりデータを回収することにより、システムの信頼性を統計処理することでより正確な値を得る手法[米田 14]が提案されている。この手法では、自然環境下でのデータは、非常に長周期の連続性をもつことに着目し、単純な補完処理ではなく6~7次の多項式演算を行うことで、たとえば30[dB]ほどのノイズ影響下においても、約100サンプルのデータをもとに、1%未満の誤差補正ができることがわかっている。

2.4.4 システムに内在するトレードオフの課題

2.4.1,2.4.2,2.4.3節で述べてきた課題にはそれぞれトレードオフの相関関係がある。

たとえば、図2.6のようなシステムを考察する場合、ノードの消費電力、ノード設置状態（ノード間距離）、通信の外乱に関して、次のようなトレードオフ関係が存在し、ノード間距離に着目した場合、次のような値の大小の相関関係が生じる。

2.4. アーキテクチャ設計の課題

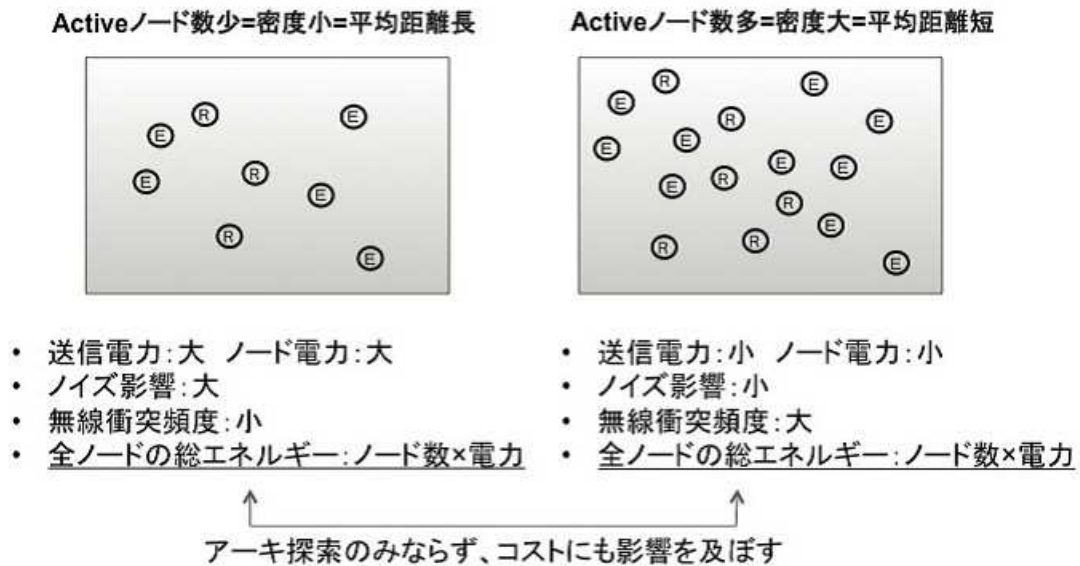


図 2.6: センサーネットワークシステムのトレードオフ

- ノード間距離：小
 - ⇒単位面積当たりのノード数（コスト）：大
 - ⇒送信に要する消費電力：小
 - ⇒外乱に対する影響度：小
 - ⇒機器設計上の電力容量：小
 - ⇒無線輻射頻度：大
 - ⇒輻射後の再送受送信に伴う電力：大
 - ⇒データ補間演算（信頼性誤差）：小
 - ⇒トポロジー複雑性：大
- ノード間距離：大
 - ⇒単位面積当たりのノード数（コスト）：小

- ⇒送信に要する消費電力：大
- ⇒外乱に対する影響度：大
- ⇒機器設計上の電力容量：大
- ⇒無線輻射頻度：小
- ⇒輻射後の再送受送信に伴う電力：小
- ⇒データ補間演算（信頼性誤差）：大
- ⇒トポロジー複雑性：大

総じて、単純なノードのばらまきでは解決せず、利用シーンごとの最適なノード数および、ノード構成するアーキテクチャの探索が必要となってくる。このため、ノードアーキテクチャのハードウェアパラメタ、ノード間の通信のビヘイビアを各種外乱の影響を受けつつ動作するシミュレーションモデルを構築する必要がある。

2.5 センサーネットワークシステムアーキテクチャ

本章で述べるシミュレーションシステムの提案するにあたり、本節では対象アプリケーションの定義を具体的に行う。

2.5.1 環境モニタリング要求仕様

ターゲットとする環境モニタリングシステムでは、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 [YHY09], [地す 12], [岩井 10], [池川 09],[小泉 13].

表 2.1: 環境モニタリング（斜面崩落監視）における要求仕様

	目的	仕様
測定間隔	(設置環境による)	10m～30m 間隔
サンプリング	定常観測	6 [sample/h] (10[min] 毎)
測定値	傾斜角	±20[deg] 精度 ±0.01[deg]
	地下水分量（負圧測定）	60～120[kpa] 精度 ±1[kpa]
	温度	精度 ±0.1[K]
測定期間	(設置環境による)	5～10[year]

このシステムでは、表 2.1 にあるとおり、対象となるエリアに多数のセンサーノードを設置し、各測定ポイントで刻々変化するセンサー値を取得することで斜面崩落前の異常状態の判断に用いるものである。

検出の詳細のメカニズムについては、[地す 12] 専門分野にゆだねるが、簡単には以下のような仕組みとなっている。

- 地盤安定状態では、傾斜角の変異はない

- 好天・乾燥状態では、地下水位は低く、地盤も乾燥してるため、地下水分量は少なく、検出圧力は低い
- 降雨などで地盤が帯水すると、地下水位があがり、検出圧力が高くなる
- 降雨後の天候回復に伴い、圧力は下がるが、保水力の高い地盤では圧力は下がりにくい
- 大規模崩落の前に、表層すべりの現象として、微小な傾斜角の変化が現れる
- 以上を天候サイクルとともに繰り返す、降水量と比較することで、地盤の安定度合いを評価する

また、センサーノードの観点からは、以下のような条件が課せられることになる。

- 対象エリアに多数のノードが設置される
- 一度現場設置された場合、電池交換などのメンテナンスは非効率的である
- ソーラーパネルを用いた場合、昼夜のみならず、年間を通した日照パターンの影響を受ける
- 長期現場設置の場合、周囲の植生（草木の成長）に伴った、発電や通信ノイズの影響をうける

このような環境条件は、斜面崩落現象に限らず、橋梁や構造物の外壁などのモニタリングにも共通する特徴となっており、提案シミュレーションでは多様な利用シーンにも適用できる設計を行うこととする。

2.5. センサーネットワークシステムアーキテクチャ

2.5.2 ノードハードウェア・ソフトウェア

センサーネットワークを構成するハードウェア設計の研究興味対象としてはいかに低電力に、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、本論文で考慮対象とするのは、低電力・高効率なデバイスの研究ではなく、市販されている汎用品モジュールの組み合わせにより、2.4.3節で述べたような外乱に対応可能なシステムレベルの制御を想定している。

表 2.2 は、一般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。シミュレーションのスタートポイントとしては、現実的なハードウェアパラメタを付与することで、これらの組み合わせから必要な設定を探索していく仕組みを考える。

表 2.2: センサーノードに用いられる一般的なハードウェア仕様

モジュール	仕様	消費電力
センサー	MEMS 型	0.1~0.5[mW]
環境発電素子	ソーラーパネル	5[uW/cm ²], 200[Lux]
CPU	8/16bit 1~100[MHz]	1~20[mW]
メモリ	8/16/32 [KByte]	1~20[mW]
RF	IEEE802.15.4, 2.4GHz (Zigbee)	送信 (Tx) : 100~150[mW] 受信 (Rx) : 50~80[mW]
2次電池	Li-ion	(3.7[V], 1~10 [Ah])

一方で、実際のセンサーノード上の CPU ではソフトウェアが動作しており、センサーモジュールから吸い上げられたデータ処理や、ノード間の協調動作、電力や通信制御などが行われている。

表 2.3 は想定されるノード上のソフトウェアの処理をまとめたものである。

表 2.3: センサーノードに用いられる一般的なソフトウェア仕様

機能	処理内容	実装（処理）量
データ処理	センサーデータ波形解析	1～5[Kstep/sample]
	キャリブレーション	0.1～1[Kstep/sample]
通信処理	パケット処理等	0.1～0.5 [Kstep/octet]
符号化処理	パリティ生成等	0.01～0.05 [Kstep/octet]
ハンドシェイク処理	ルーティング等	0.1～1 [Kstep/trial]
状態遷移	DVFS/Power Gating 等	0.01～0.05 [Kstep/trial]

2.6 提案するシミュレーションシステム

本節では、提案するシミュレーションシステムについて、その実装にあたり、前述した通信・電力・外乱の概念の実装方針に関する構成仕様について説明する。

2.6.1 シミュレーション環境の基本概念

シミュレーションに求められる基本概念を整理する。

- (1) 多数のノードが相互に連動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 2.1 の要求を満たすものかどうかの判定を目的とする。
- (2) ノード内のビヘイビアは、表 2.2 に従い個々のノードは独立した振る舞いを行う。
- (3) ノード間のビヘイビアは、与えられた通信モジュールのプロトコルに従い、通信障害や、伝送出力などは (2) の個々のノードのビヘイビアに影響をおよぼす。
- (4) 電波の衝突による通信障害や、発電ばらつきなどはノイズを入力可能とする。
- (5) 初期パラメタなどは、表 2.2 および表 2.3 から与えられる。

シミュレーションシステムとしては、対象のアプリケーション要求を満たすように各種パラメタを設定し、繰り返しシミュレーションを実行することで最終的なアーキテクチャを追い込んでいく仕組みを基本概念とする。

2.6.2 シミュレーション環境の構成

提案するシミュレータの構成をブロック図を図 2.7 に、各ブロックの仕様を表 2.4 に示す。

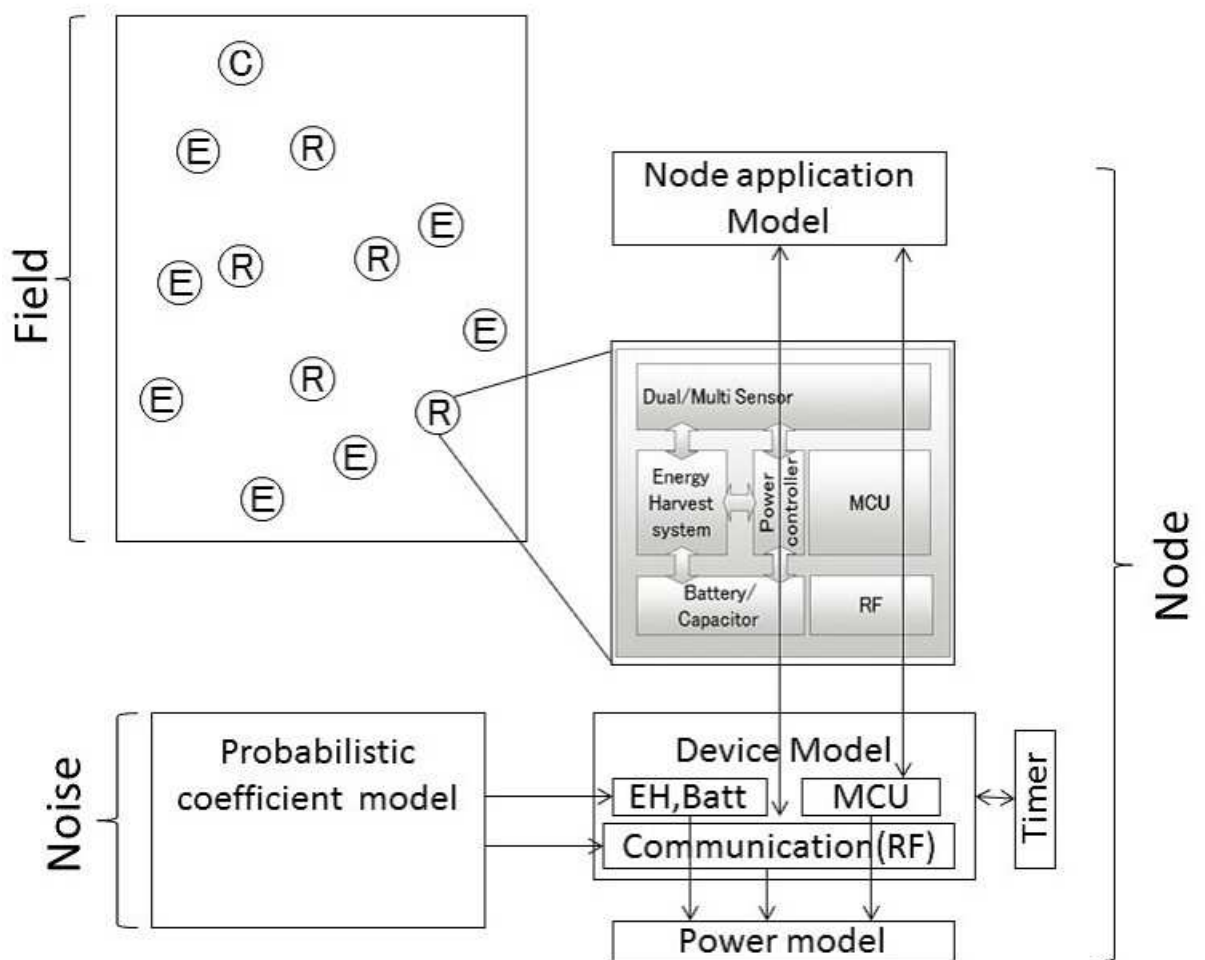


図 2.7: シミュレーション環境構成ブロック図

図中に示した Field, Noise, Node はそれぞれレイヤとして定義される。Field では、ターゲットにばらまかれたノードを表現し、図中 E や R は想定システムで用いる IEEE802.15.4(Zigbee) モジュールの、それぞれ End Device, Router Device を表している。Node のレイヤでは、表 2.2 に記されたノードハードウェアを構成するハードウェアモジュールで表現されており、内部は Device モデルとして、環境発電素子 (Energy Harvest=E.H) やバッテリー、RF モデルなどが実装されている。これ

2.6. 提案するシミュレーションシステム

らのハードウェア機能はシミュレーションモデルとしてモジュール化され、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。Noiseのレイヤは通信や発電に対して外乱を及ぼすモデルとなっている。

シミュレーションの精度は評価を行うCPUのクロックを1単位とし、時刻をカウントし、全てのノードのステート、電力状態をロギングするものとする。

以上をまとめたシミュレーションの構成仕様を表2.4にまとめる。

表 2.4: シミュレーションの構成仕様

レイヤ	モデル	仕様
Field	フィールドモデル (Field Model)	多数のNodeモデルで、設置する測定環境で表現
Node	ノードアプリ動作モデル (Node Application Model)	表 2.3 の機能がCPU上での動作を表現
	デバイスモデル (Device Model)	ノードを構成するハードウェアモジュールのモデル
	電力モデル (Power Model)	表 2.2 の電力消費を表現
	通信モデル (Communication Model)	利用する通信デバイスの動作を表現
Noise	確率係数モデル (Probabilistic Coefficient Model)	ノイズ源から発生させる外乱を各モジュールに影響を及ぼす

シミュレーションの実際のスクリーン構成は図2.8のようになっている。アーキテクチャを決定する繰り返し探索をより容易にするため、基本的なハードウェアモジュールの実装はシミュレーションソフトウェアのプラグイン構造になっているが、消費電力などのパラメータについてはGUIを通じた簡易入力可能な仕組み

みとなっている。



図 2.8: シミュレーション環境画面構成図

また、シミュレーションを用いたワークフローは図 2.9 のようになる。

2.6. 提案するシミュレーションシステム

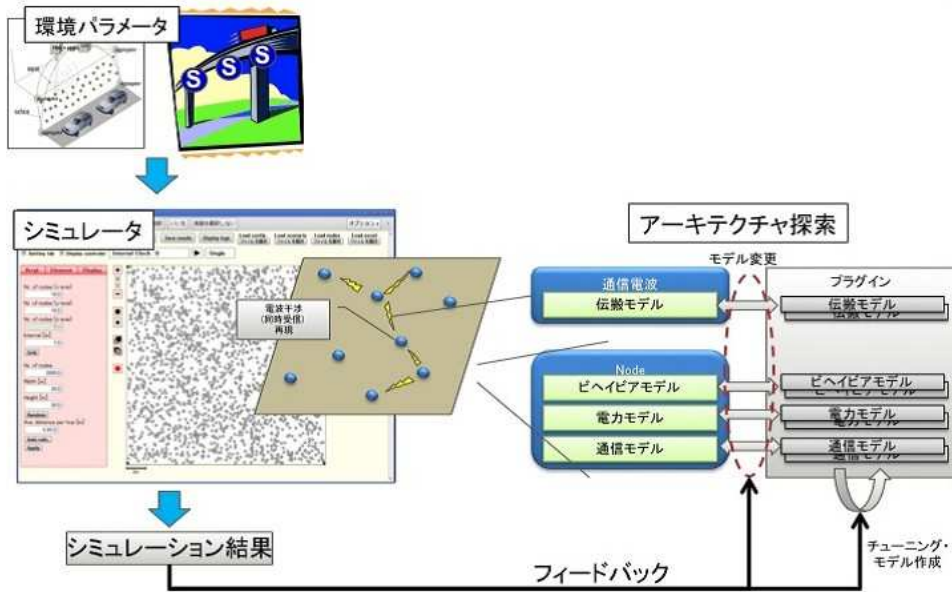


図 2.9: シミュレーションを用いたワークフロー

2.6.3 電力シミュレーション

提案シミュレーションでは、バッテリーや環境発電素子による給電を想定しており、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
- 環境発電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

DVFS 機能では、一般的なソフトウェア負荷量に応じた CPU のクロックサイクル調整だけではなく、接続するセンサーデバイスの動作周波数に応じた設定が行われる。実際の回路では、センサーデバイスを含むペリフェラルに必要な原振か

ら生成される分周率比から段階的に設定されることになる。また、PG 機能では、センサーノードを構成する、PMU・CPU・RF モジュールなどがそれぞれの遷移状態である、待機・受信・送信・演算処理・充電にあたって必要な機能モジュールのみが動作するような電力設計に対応したものである。

図 2.10 は典型的な 1 ターンの動作の電力状態遷移を可視化した例である。提案するシミュレータの実装上の特徴としてそれぞれの機能モジュールは、与えられた電力パラメタと、動作時間に基づいた電力消費モデルを再現しているだけではなく、待機状態で、かつ、与えられたバッテリーパラメタが満充電状態になっていない場合には環境発電素子による充電モデルが実行されている部分にある。また、この充電モデルでは、後述する 2.6.5 節における発電ばらつきも表現している。

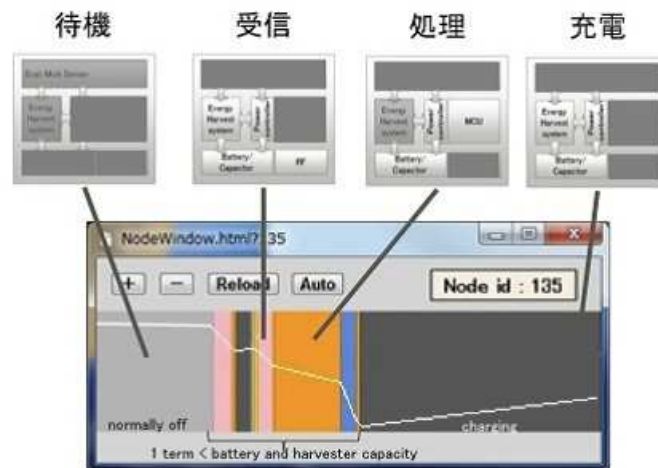


図 2.10: センサーノードの電力遷移モデル

図 2.10 の電力遷移モデル例表現されているグラフは、縦軸がバッテリーの充電状態を示しており、待機状態（満充電状態）では何も変化がないが、受信動作を経て R_x による電力消費（図では、wait をはさんで 2 度の受信状態）の後、CPU による演算処理とそれに応じた電力消費、続いてデータ送信 T_x とその電力消費が行われている。このノードはデータ送信を行ったあと休眠状態になるが、休眠状態

2.6. 提案するシミュレーションシステム

においてもソーラーパネルによる発電は行われるため、グラフはバッテリー状態の充電ステータスが上昇している様を示している。

2.6.4 通信シミュレーション

通信シミュレーションは、センサーノードに搭載される無線モジュール (RF モジュール) のプロトコルを再現している。2.6.3 節で実装を行っている電力モデルを表現しているノードのシミュレーションスレッドは個々に独立に動作するが、通信シミュレーションでは、個々に動作しているノードシミュレーションを連結する役割を持つ。

すなわち、通信処理をシミュレーションで再現するためには少なくとも送信側と受信側が必要であり、2.6.3 節で独立動作していたノード同士のうち、互いに受送信関係にあるものが、通信シミュレーションのフェーズでは同期動作を行う仕組みとなっている。したがって、通信シミュレーションでは基本的に次の3つの動作で構成されている。

- ペアとなってるノードからの受信状態、およびエラー発生時の再受信待機とそれに伴うペアとなっているノードとの同期連動動作
- ペアとなっているノードへの送信状態、およびエラー発生時の再送信とそれに伴うペアとなっているノードとの同期連動動作
- 通信中に発生した外乱により影響を受けコリジョン（衝突）状態や通信エラー動作

図 2.11 は、通信の遷移状態を示したものである。それぞれの小さい丸は1つのノードを示しており、送信中のノードから発せられた無線信号が隣接するノードまで電波を発信している様子を示している。

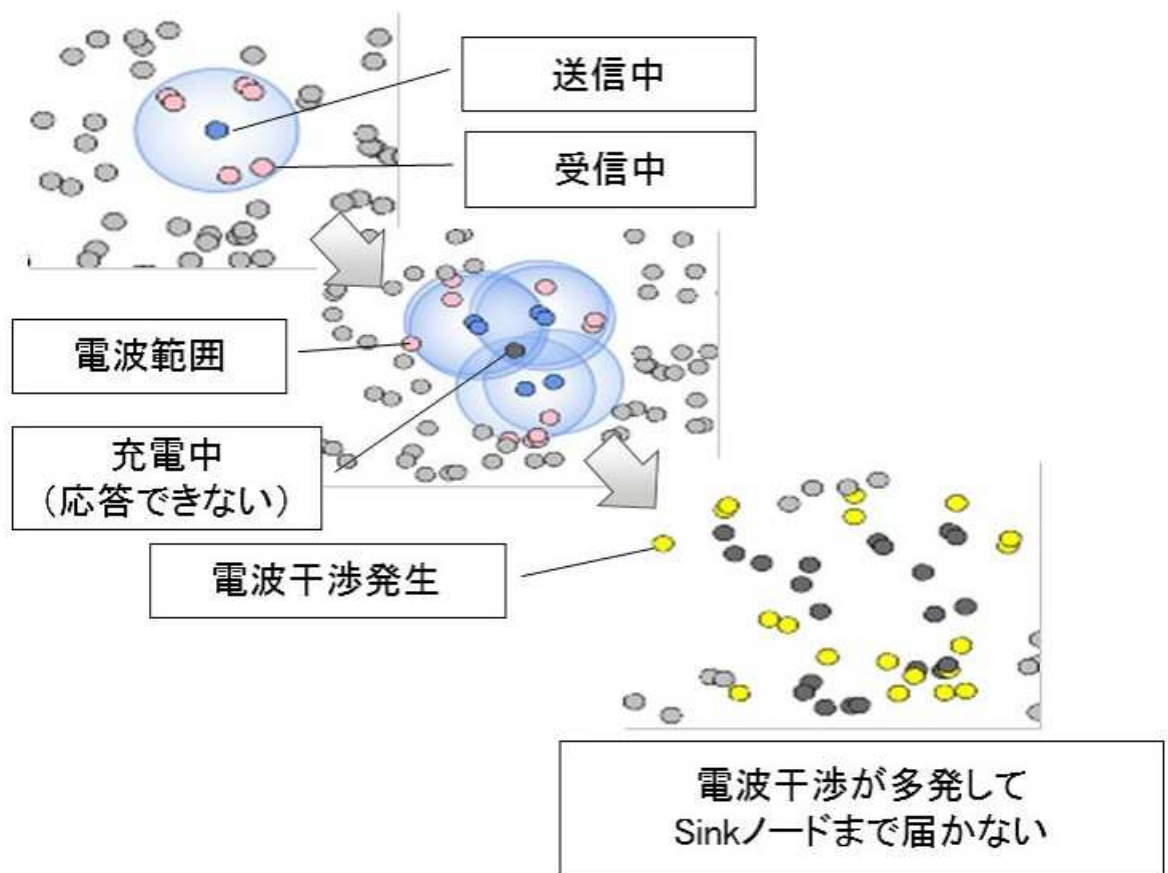


図 2.11: センサーノードの通信遷移モデル

このときパラメタ Emission Range で算出される電波到達範囲はデバイスモデルで RF モジュールに設定された T_x 出力パワーで決定されるだけでなく、後述する信号減衰も表現している。また、電波到達範囲に存在するノードでも、2.6.3 節で述べた充電状態にあり、かつ、バッテリー残量が 1 ターン動作に満たないノードについては応答しない仕組みをもつ。一方、複数のノードが同時に送信を行っている場合には、RF モジュールの特性上、信号が同じタイミングで発せられた場合電波干渉を起こし、接続が成立しない。一般的な RF モジュールでは、こういったコリジョン時の対策として、CSMA-CA といった任意のタイミングで wait 状態をつ

2.6. 提案するシミュレーションシステム

くことで受送信タイミングにばらつきを持たせることで接続確率をあげる機能を備えるが、本論文が提案するような多数ノードが同時動作するようなシステムではコリジョンに対する影響も少なくないため、電波衝突による通信不成立も再現している。

通信観点のシミュレーション結果からのアーキテクチャ探索では、最終的に通信が成立したノード数が表 2.1 の測定密度を満たすものかどうかを判断基準とする。

2.6.5 電力の外乱シミュレーションモデル

一般にこのようなセンサーノードのような組み込み機器では、消費電力の支配要因として、RF モジュールの消費電力、CPU の消費電力があげられる。そこで、提案シミュレータにおける電力シミュレーションの外乱考慮では以下をポイントとして実装している。

- 通信状態（電波障害によって発生した外乱状態）に伴った再受送信の影響
- 通信状態に伴い、CPU の演算時間への影響
- 日照時間や天候変化にともなった発電状態への影響

再受送信の影響については、単純に T_x, R_x 処理に相当する電力消費量を送信回数分乗じ、 E_{T_x}, E_{R_x} [J] として与えられるが、もうひとつの支配要因である CPU における消費電力も含めて、センサーノードが 1 回の動作で消費するエネルギー ΔE [J] は式 (2.1) で与えられる。

$$\Delta E = C(V_{dd})^2 f \Delta t + E_{T_x} + E_{R_x} + P \Delta t \quad (2.1)$$

なお、利用するハードウェアモジュール毎に決定される電源電圧を V_{dd} [V]、動作時の CPU の動作周波数を f [Hz]、動作時間を Δt [s] としたとき、同様に利用す

るモジュールから与えられる比例係数 C 、およびその他ペリフェラルの消費電力を $P[W]$ とする。

このとき、 Δt については、CPU は表 2.3 の演算を行うにあたり、実際に動作する実行時間はその周波数により確定する。

一方で、日照時間や天候変化にともなった発電モデルを考察する。図 2.12 は、ソーラーパネルによる発電効率を h_1 (best effort), h_2 (so-so), h_3 (zero charge)[J/s] とし、模式的に表現したものである。なお ΔT はサンプリング周期すなわちセンサーノードの動作周期となっている。

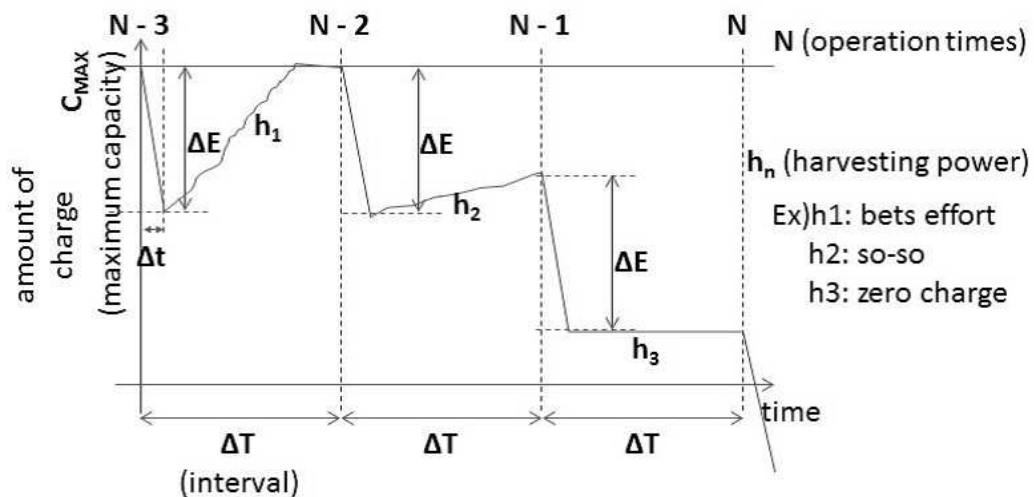


図 2.12: 発電ばらつきとチャージモデル例

図では N 回目のターンで発電が追いつかず、蓄電状態が 0 を割り込んでしまっている。これは電力バランスとして破綻を生じている。外乱を取り込んだシミュレーションによるアーキテクチャ探索では、発電状態がばらついても充電と発電でバランスがとれたバッテリー容量 C_{MAX} および環境発電素子のパラメタ（ソーラーパネルのサイズ）を算出していくことにある。

そこで、ノードが N 回動作する間の環境発電素子による発電エネルギー $J_H[J]$

2.6. 提案するシミュレーションシステム

の関係を求めていく。式(2.2)は、ノードが N 回動作する時間での総発電量（期待値）を示している。

$$J_H = \sum_{n=1}^N \int_0^{\Delta T} h_n dt \quad (2.2)$$

しかしながら J_H は常に期待した発電をすることはなく、天候不順などによる環境の影響をうけ、期待値を下回ることもある。そこで、単純にはワースト状態を想定して、必要十分以上のバッテリーや環境発電素子を搭載する解もあるが、本論文では、不幸なケースでは発電量が消費量を下回る可能性も加味することで式(2.3)に基づいたアーキテクチャ探索を試みる。

これは、「期待値 p [%]で N 回動作できるか」の観点で立式したもので、言い換えれば、 $1-p$ [%]が電力の観点からみた冗長性の指標となる。

$$P_{possibility} = \left[J_H - \sum_{n=1}^N \Delta E_n > 0 \right] \geq p \quad (2.3)$$

すなわち、センサーネットワークシステム的设计としては、 $1-p$ [%]のノード数の冗長性あるいはサンプリングの冗長性をもたせることでシステムが成立するアーキテクチャを探索していく。

なお、シミュレーションの初期状態では乱数を与えているが、実際には、与える h_n は測定エリアにおける日照モデル（昼夜・季節）を入力値とする。

2.6.6 通信の外乱シミュレーションモデル

通信における理論的な外乱は、[高田 05]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 L_i [dB]としたとき式(2.4)のように表現される。

$$L_i = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (2.4)$$

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_{noise} として式 (2.5) を与える。

$$N_{noise} = LV_{noise} \cdot d \cdot P_{rand}(seed) \quad (2.5)$$

このとき、 LV_{noise} は雑音係数となるノイズレベルで、式 (2.4)(2.5) 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 2.13 に示す。

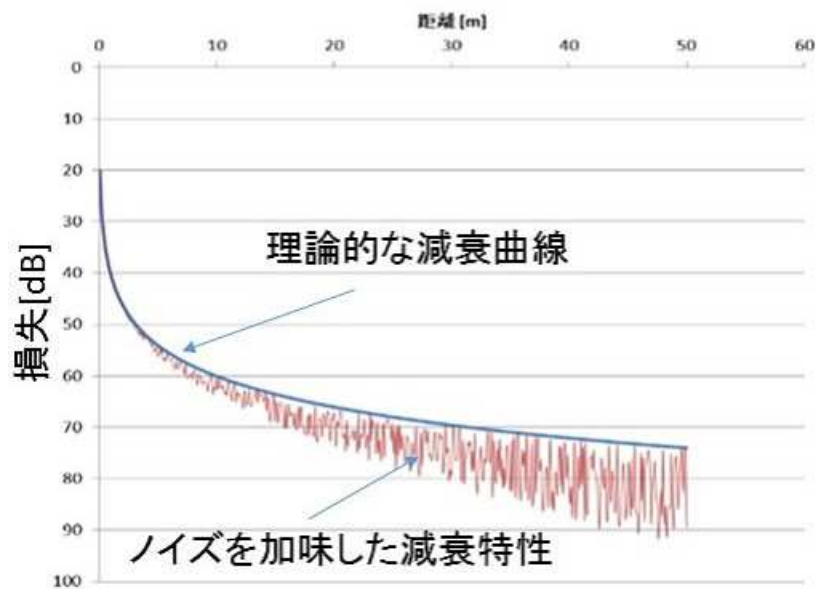


図 2.13: 自由伝播損失特性 ($LV_{noise} = 0.1$)

2.7 インプリメンテーション

本節では、今回提案を行ったシミュレータの実装について述べる。

図 2.14 は提案シミュレータの全体構造であり、GUI, データ管理 DMS(Data Manage Server) シミュレータ (コア部) で構成されている。GUI 部は、シミュレータの結果表示やユーザからシミュレーションのパラメタの変更や操作をするためのインターフェイスを提供し、上位部分は、html, webGUI で記述、下位部分は javascript で実装され、汎用のブラウザで動作する仕組みとなっている。

DMS はシミュレーションの動作履歴、あるいはシミュレーションそのもののプロフィール管理を行っている。本体部分は C++ コードで記述されているが、javascript との連携インターフェイスをもっている。

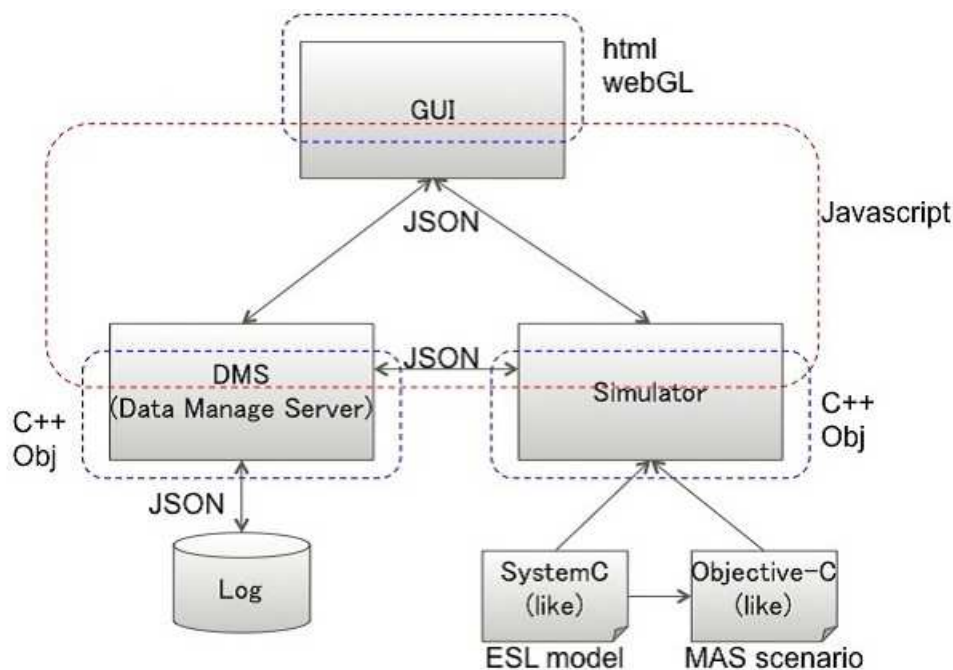


図 2.14: 全体構造

シミュレーションコア部は、提案シミュレータで最も特徴的な実装となってい

る。シミュレータコアは大きく表 2.5 の 2 つのライブラリをプラグイン可能な構造となっている。

表 2.5: シミュレーションのプラグインライブラリ

オブジェクト	モデル	内容
Field object	MAS	Multi Agent System の技術を応用したモデルで、MAS システムで一般に用いられている Objective-C ライクなコードで構成され、場に設置されたノード間の連携状態を再現していく
Node object	ESL	Electronic System Level の技術を応用したモデルで、ESL システムで一般に用いられている System-C ライクなコードで構成され、ノードの電氣的動作・状態を再現していく

MAS(Multi Agent System) とは、個別に動作を行うエージェントが互いに影響を及ぼしながら全体がどのような挙動を示すかを解析する複雑系の概念で、通常は、人の行動や、交通の解析などに用いられる [野間 14]。

具体例として、年齢や性別などのパラメタを元に、行動パターン（シナリオ）を設定し、商業施設での動線を解析することでマーケティングを行ったり、信号や車線のパラメタを元に、自動車の動きを解析することで渋滞の予測を行うような分析に用いられる。

本論文では、MAS の基本概念であるエージェントに与えられた個別のパラメタとして電氣的・通信的なパラメタを与え、センサーネットワークという場でノードというエージェントがどのように振舞うかについての解析に適用している。

一方で ESL(Electronic System Level) モデルは、SoC や LSI の設計において、そ

2.7. インプリメンテーション

の半導体的振る舞いをシミュレーションする概念で、LSIの黎明期でトランジスタやゲートレベルでのシミュレーションを実施してもある程度の現実時間で解析が行われていたのに対し、近年の大規模化するLSIのシミュレーションを効率的に行うために開発された技術である。

具体的には、LSIを機能モジュールで分割し、それぞれのモジュールの入出力をソフトウェアの関数の入出力に見立て、モジュールの内部動作をプログラムで記述する仕組みとなっている。このとき、モジュールの内部動作の記述にあたり、複雑なクロック単位の挙動を記述しても構わないが、経過時間や消費電力だけをカウント（抽象度を高める）して関数から抜けるような記述も可能としている。

提案シミュレータにおけるシミュレーションコンポーネントは、シミュレータ本体を表すオブジェクトを持ち、シミュレーションを行うにはGUI側あるいはユーザが生成した表2.4でのFieldオブジェクトを生成してMASモデルとしての場を表現し、MASのエージェントに相当するノードにESLモデルを組み込み、シミュレータオブジェクトにセットすることで動作する仕組みとなっている。

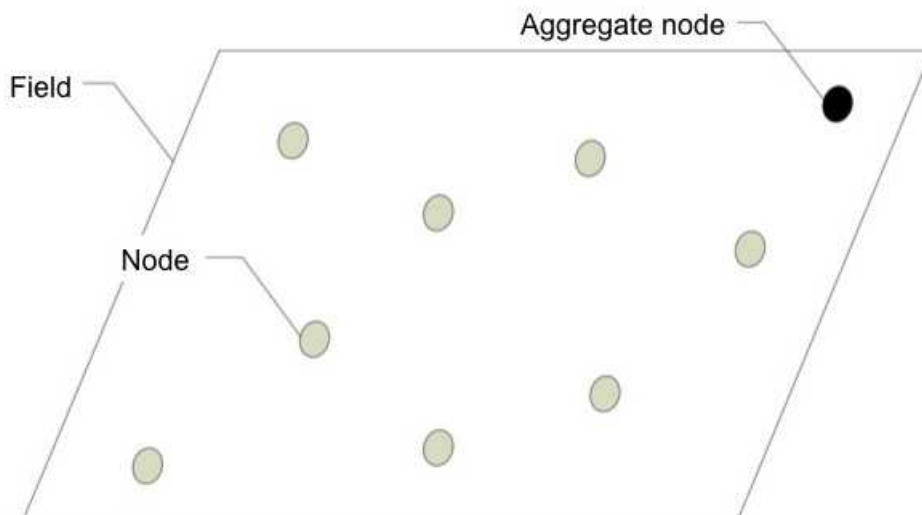


図 2.15: シミュレーション内部での field のイメージ

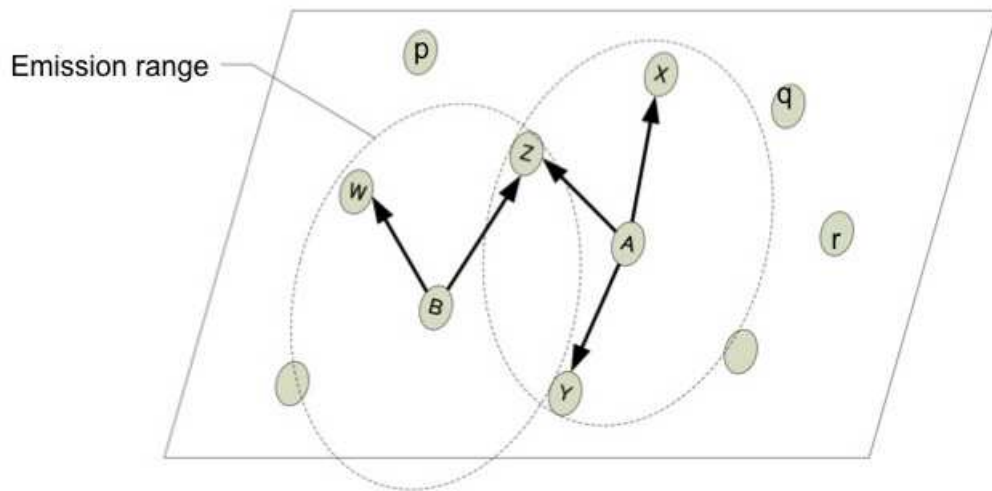


図 2.16: シミュレーション内部での field 内でのノード間連携イメージ

図 2.15 は、各ノードの座標と、ノードに搭載された無線モジュールの仕様も同時にセットされた状態のイメージである。図中の Aggregator node とは Field の終端であり、たとえば IEEE802.15.4(Zigbee) では Coordinator ノードなどがそれにあたり、最終的なデータが集約される部分となっている。

続いて ESL で設定された無線モジュールのスペックからデータ到達範囲である Emission Range により、座標面上のノードの連携モデルが MAS 上に形成されていく。このときの Emission Range は、考察対象である通信のノイズモデルも含んでおり状態によって到達距離は変化するものとする。

シミュレータ内部では、図 2.17 のようなグラフィイメージが生成される。図中の矢印はオブジェクトの参照の方向を示し、たとえば、送信側のノード (A,B) で送信を終了した状態に遷移すると、受信側のノード (X,Y,Z,W) では Receiver オブジェクトを経由して送信が完了したことを検出できる仕組みとなっており、同時に Radio Wave オブジェクトに格納された送信データを取得することで通信を完了する挙動を表現している。

2.7. インプリメンテーション

このときノード Z のように複数ノードからの信号を検出可能な座標にある場合複数の Receiver オブジェクトが生成されるが、シミュレーション内部のタイムスタンプを参照し、同時刻に出現したオブジェクトであれば、無線通信における輻輳が発生したとみなし、通信モジュールの CSMA-CA⁴ といったエラー処理が行われる。

MAS モデルでは座標情報と無線モジュールの特性から、このようなオブジェクトを次々生成し、シミュレーションの動作を続ける作用を行う。

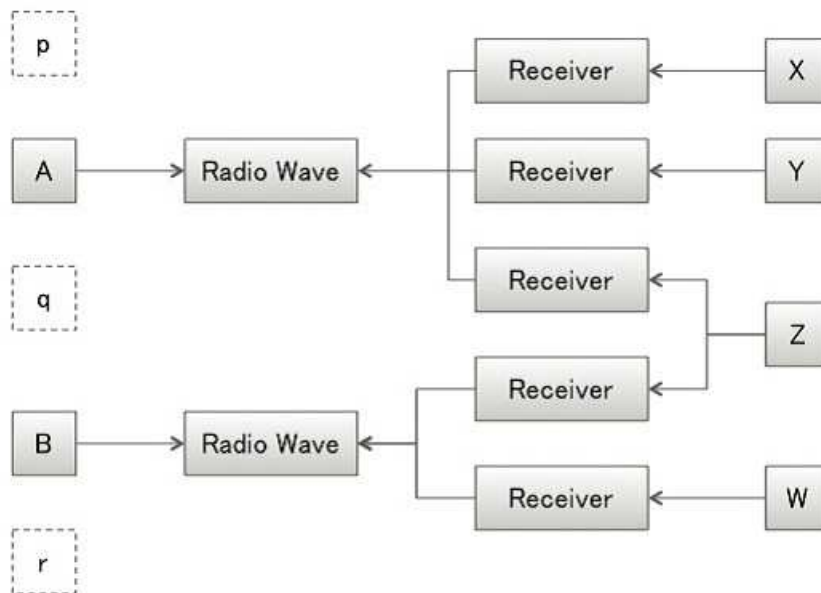


図 2.17: シミュレーション内部でのノードオブジェクト間連携グラフィイメージ

また、シミュレーションの高速化については、たとえば図 2.17 でのノード p,q,r のように、図中の状態ではどこのノードにも関与していないノードについても現実の無線モジュールの挙動としては、信号の探索やチャンネルの検索、ビーコンなどの信号を発生しているのだが、センサーネットワークシステムとしてはこれらの挙動を分析しても全体の影響は皆無に等しいため、提案シミュレータでは基

⁴輻輳時にタイミングをずらしてデータ再送を依頼することで、信号の受信率を高める処理

本的には処理は行わない仕組みになっている。

今回実装したシステムでは、MASモデルにおいてはオープンツールである Swarm⁵ ユーザの提供するモジュール、ESLについてはCoWare社(2011年当時)のPlatform Architect ツールの融合を試みたが、ライセンスの都合上利用が困難であったため、フルスクラッチで実装を行った。

このため、Objective CあるいはSystem Cのコードを直接読み込むのではなく、実際にはコードの記述方式としては、それぞれの実装に似たコードで記述したモジュールをリンクすることで実装している。

⁵http://www.swarm.org/wiki/Main_Page

2.8 提案シミュレータによる環境モニタリング特性測定

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。

2.8.1 評価方式

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 2.1 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。

2.8.2 受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 2.2 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 2.18 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。

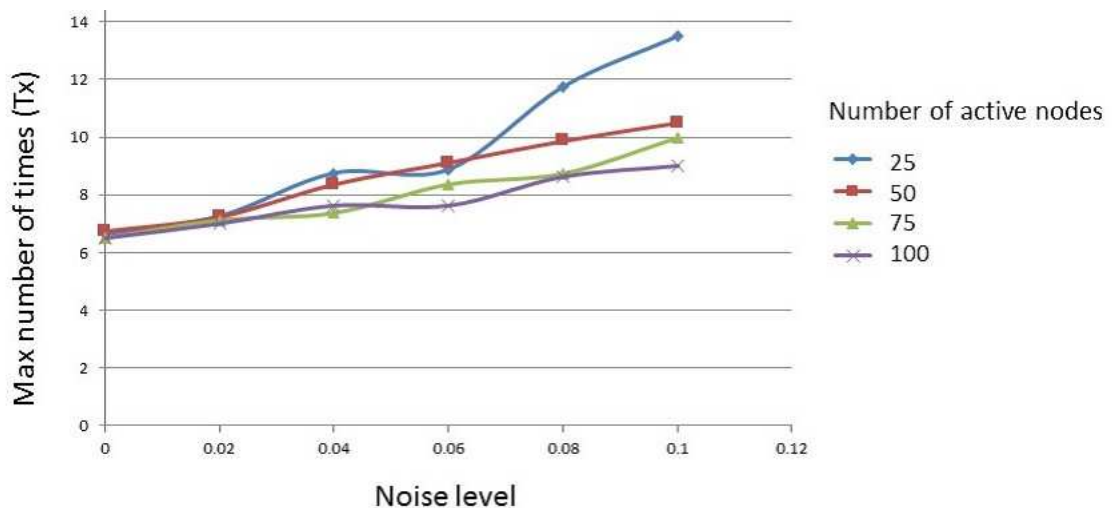


図 2.18: ノイズレベルに応じた Tx 回数

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 2.19 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。

2.8. 提案シミュレータによる環境モニタリング特性測定

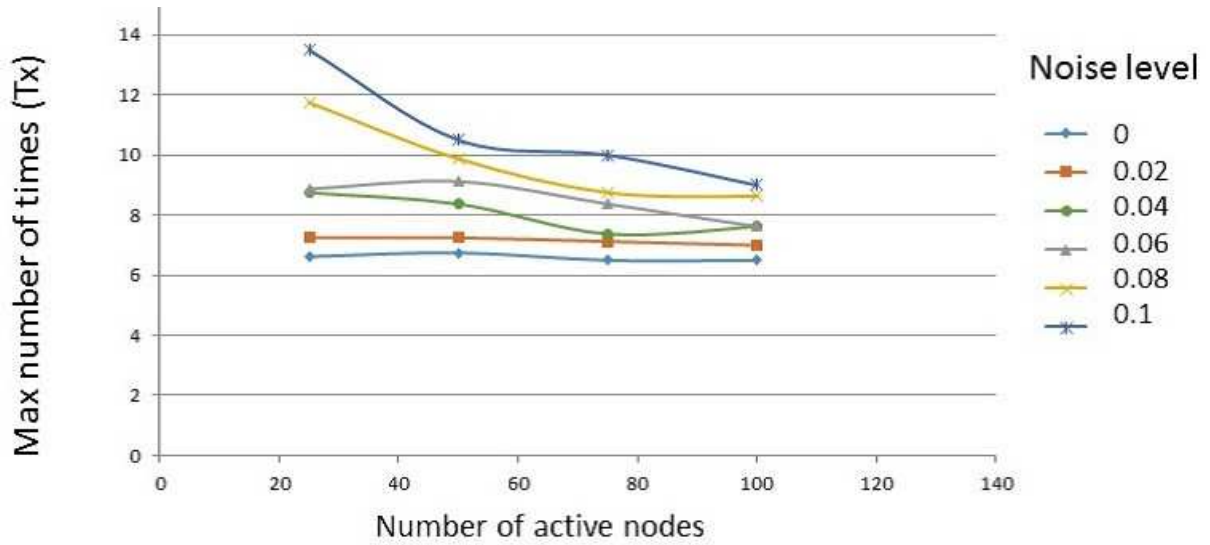
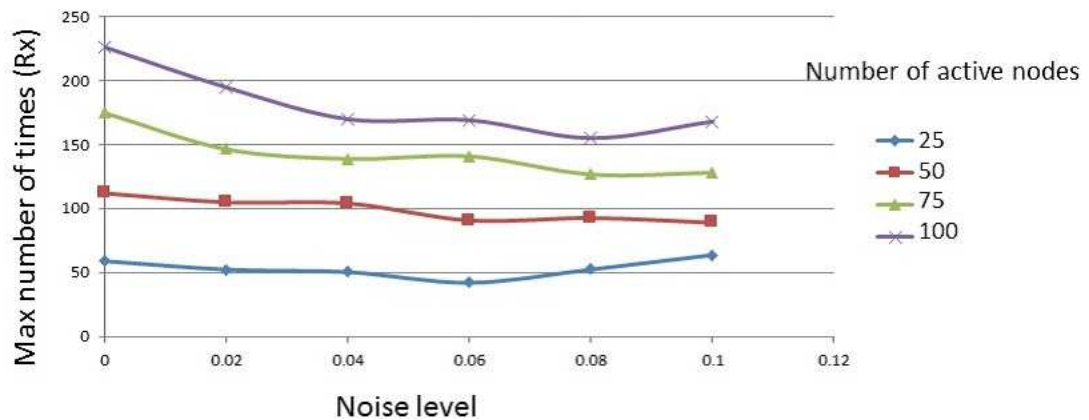


図 2.19: アクティブノード数に応じた Tx 回数

一方で、受信 (Rx) 部について、同様の実験を行った。図 2.20 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 2.20: ノイズレベルに応じた R_x 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 2.21 に示す。

2.9. 従来手法との比較

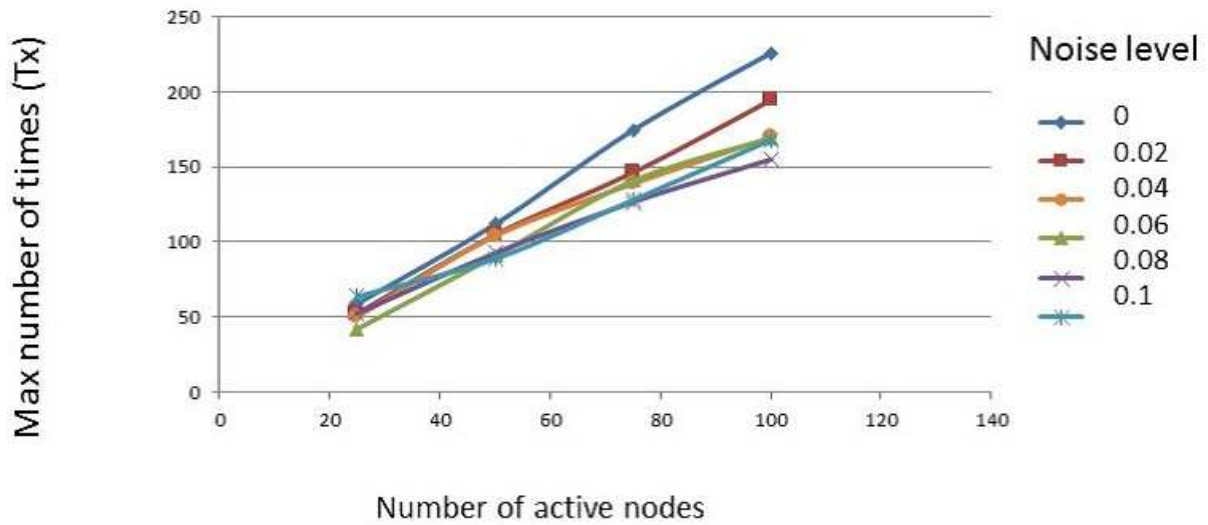


図 2.21: アクティブノード数に応じた R_x 回数

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、2.6.5 節で述べたノードの電力状態を表現した式 (2.1) の送信および受信電力である E_{T_x}, E_{R_x} の値を決定することになる。

2.9 従来手法との比較

従来手法との比較として文献 [田辺 11] において最も効率がよいとされるゴシッピング型接続におけるエネルギー評価の観点で比較を行う。ゴシッピング型接続は、図 2.4 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[田辺 11]では、 $400 \times 400\text{m}$ の範囲にランダムに配置された 100 ノード、ゴシップ型で伝送確率 $p=0.5, 0.8$ 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よ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 2.6 にまとめる。

表 2.6: 従来手法との比較

条件	従来手法	提案手法
接続形態	ゴシップ型	ツリー型
輻輳の考慮	あり	あり
ノイズの考慮	あり(自由伝播損失)	あり(自由伝播損失, 外乱)
ノード構成	アクティブノード数 100 (冗長ノード含まない) 設置範囲 $400 \times 400\text{m}$	
完了状態	99%受信収束完了	99 ノードのデータ収容
パラメタ	伝送確率 p	ノイズレベル LV_{noise}

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 2.22 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。

2.9. 従来手法との比較

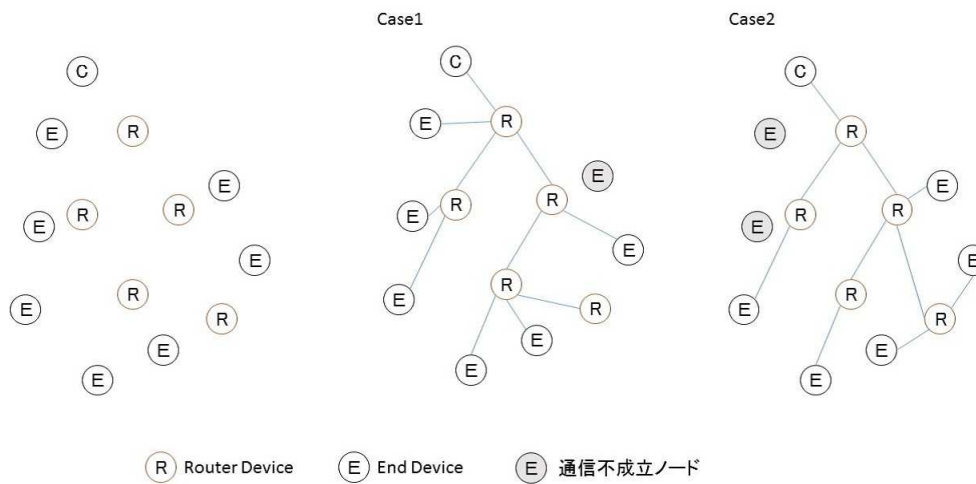


図 2.22: IEEE802.15.4 を用いた Router/End Device ツリー接続

提案手法では、文献 [田辺 11] 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。図 2.23 は従来手法のモデルイメージ図 2.24 となっており、いずれも $400 \times 400\text{m}$ のフィールド内にばらまかれたセンサーを対象としており、従来手法では 100 ノードのうち 99% ノードのデータ収容の完了、提案手法では 100 ノード+冗長ノードのうち 99 個のノードのデータ収容の完了をシミュレーション終了状態としている。

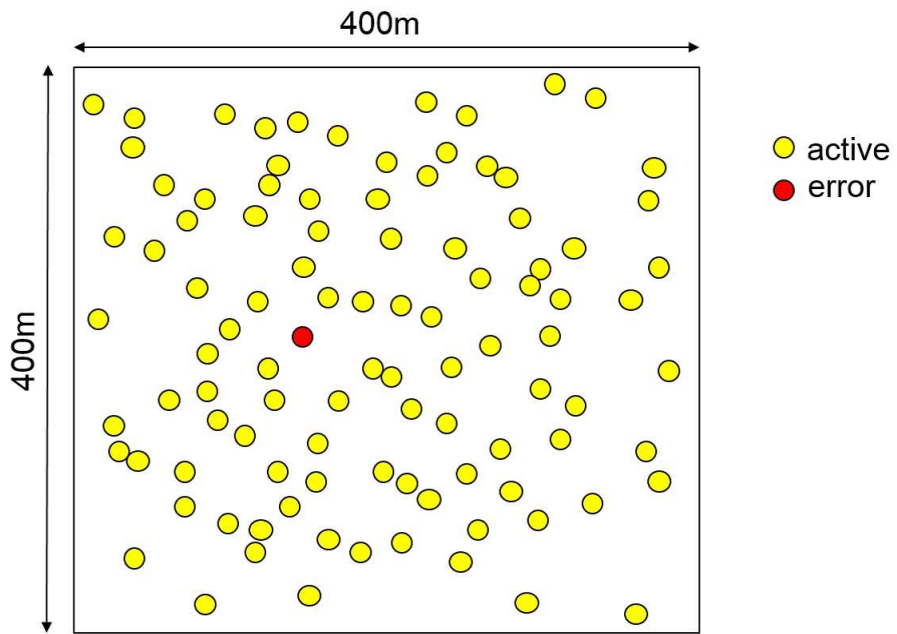


図 2.23: 従来手法のモデルイメージ

2.9. 従来手法との比較

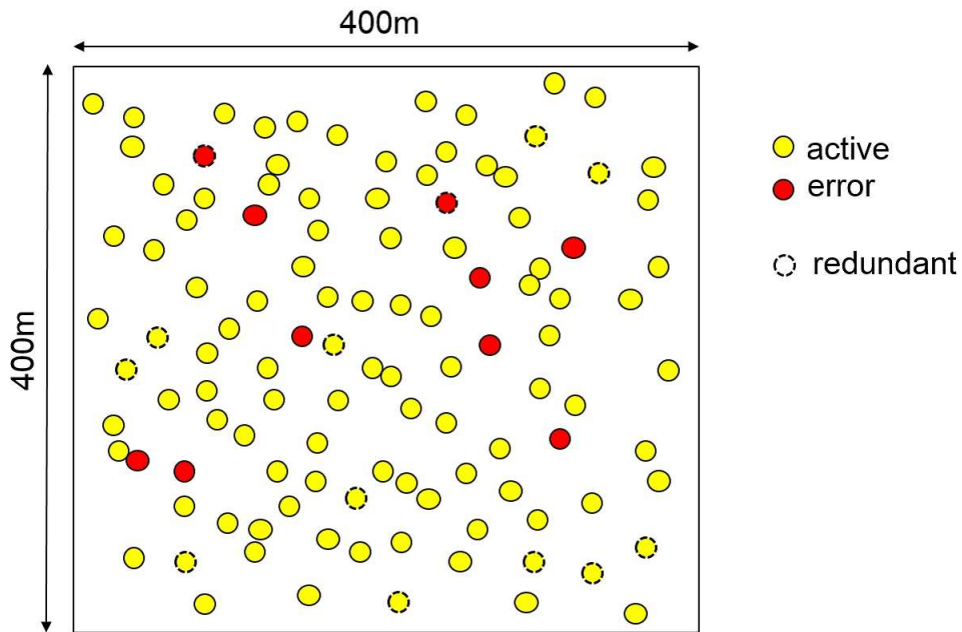


図 2.24: 提案手法のモデルイメージ

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 2.25 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。

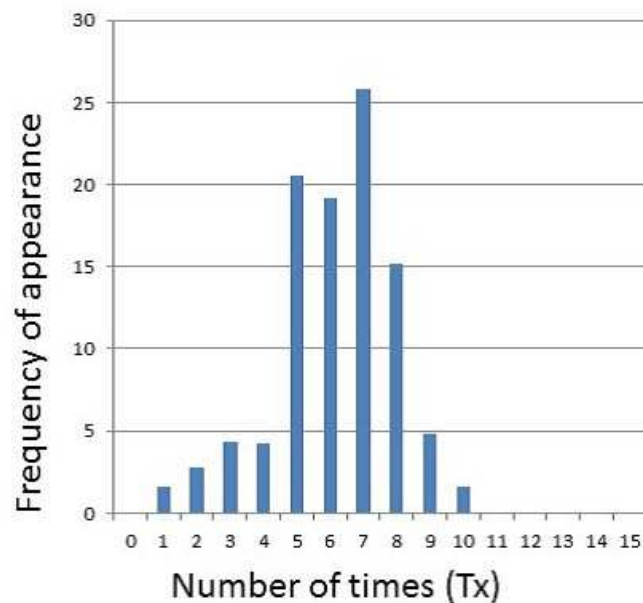


図 2.25: 反復回数頻度

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[田辺11]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2.26はノイズレベルLVnoise=0.1における従来手法[田辺11]と提案手法でのエネルギー総量を比

2.9. 従来手法との比較

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).

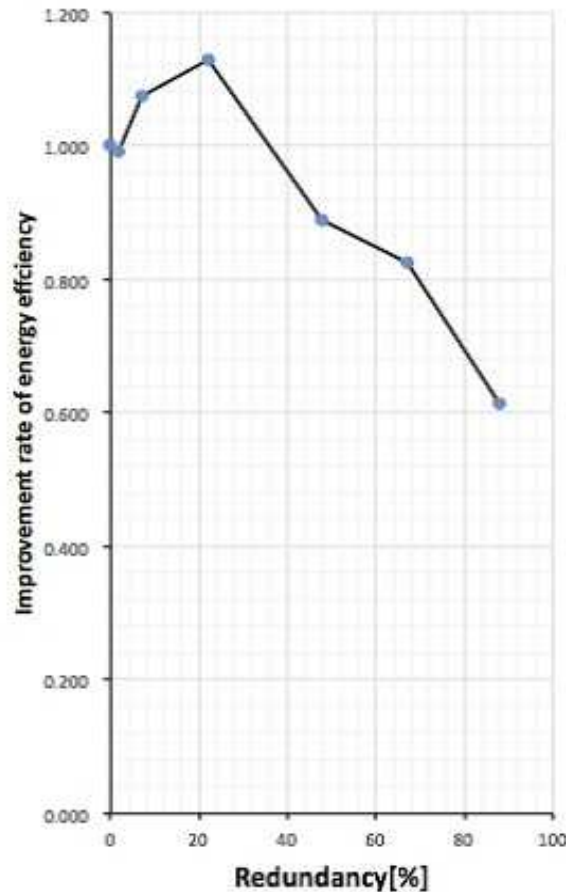


図 2.26: 従来手法とのエネルギー効率の比較結果

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%の冗長度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%を超える冗長度の場合、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。

図2.27はこれまでの結果、各要素の相関関係を模式的にまとめた図である。第4では、この傾向にしたがって、適用する環境のパラメタを取り込み、グラフの面積最小（エネルギー最小）となるアーキテクチャを探索することとなる。

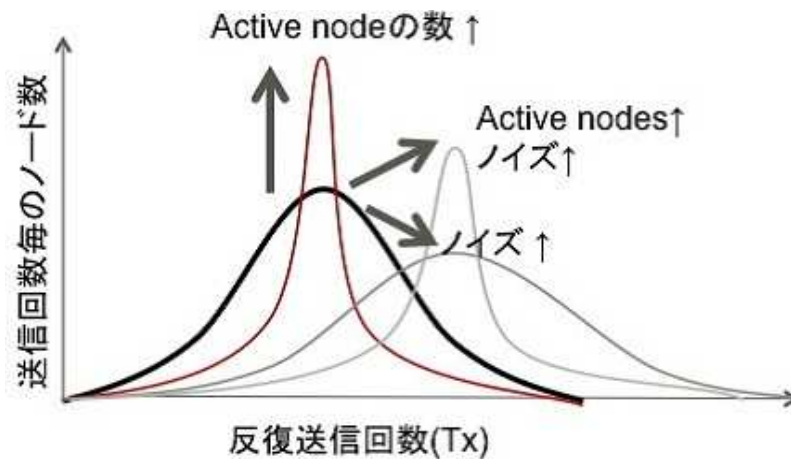


図 2.27: ノイズ，冗長度（Active node），エネルギー（通信反復回数）の相関関係

2.10 シミュレーション性能評価

小規模，短期運用のセンサーネットワークであれば，実験的な設置方法を通じ，トライ&エラーを繰り返すことによりシステムを構築することが可能であるが，本論文が適用しようとする環境では，数十～数百ノードあるいは設置範囲によっては数千規模のノードを運用する可能性がでてくる。数が増大するにつれ，検証やメンテナンスの工数も大きくなる以上に，運用期間も年単位であり，設置前のシミュレーションによるあたり付けは必須である。

しかしながらシミュレーションモデルによる検証が現実的な時間で収束しない場合，いかに優れた機能をもつシミュレーションシステムも用をなさない。

シミュレーションの高速化にあたり，以下の改善を行っている。

2.10. シミュレーション性能評価

(1) ハードウェアモデルの抽象化 (ESL)

通常ハードウェア (SoC や基板) 設計における抽象化では, クロックレベル, 信号レベル (デジタル信号の Lo/Hi パターンの単位) などに応じて抽象度を決定するが, 今回のモデルでは, ハードウェアモデルはモジュール単位での抽象化を行っている. 具体的には, 通信モジュールでは, MAC/PHY 層での詳細な挙動ではなく, アプリケーション層レベルでの通信のタイミングで表現したり, プロセッサモジュールでは, 命令発行やメモリ I/O 単位での詳細な挙動ではなくソフトウェア処理のブロック単位での処理時間のタイミングで表現し, それぞれの動作時間に各モジュールの単位消費電力を乗じて電力モデルを構築している.

(2) ノード群モデルの抽象化 (MAS) 通常 MAS モデルでは全てのノード (Agent)

の挙動を模擬するが, 今回のモデルの特徴として, 通信や発電イベントが発生していないノード (満充電状態で待機している状態) は基本的には何もアクションがおきていないとし, シミュレーションを実施するノードを必要最小限にするため, Active ではないノードのシミュレーションは行っていない.

(3) 実装並列化提案するシミュレーションは javascript をフロントエンドに, プ

ラグイン型の実装となっている. このときノードモデルは各モジュールのビヘイビアを記述したモジュールで構成されているが, ノード単位では通信イベント以外では並列動作していることに着目し, javascript 環境の擬似並列機能である worker.js を利用して, ノード単位の並列スレッド化を行うことで, シミュレーションを実行するマシン環境に応じて並列処理を行うよう実装されている.

シミュレーションの性能比較として, 現在広く活用されているネットワークシミュレータである NS-2 を用い, 49(7×7), 121(11×11), 225(13×13), 441(23×23), 625(25×

25), 729(27×27), 961(31×31)の規模のセンサーネットワークのシミュレーション時間の評価を行った。表 2.7 は評価環境をまとめる。

表 2.7: シミュレーション時間比較環境

	スペック	備考
CPU	Intel Xeon(4 Cores)@3.06GHz	キャッシュ 8M
メモリ	16GByte	
OS	Ubuntu 14.04 LTS	32bit
シミュレータ	NS2-2.34	http://www.isi.edu/nsnam/ns/
	提案シミュレータ	Code name = KABAYAKI Principal Simulator
シミュレーション対象時間	1時間	サンプリングレート 1[sample/10min]

図 2.28 はシミュレーションの実行時間の結果で、NS-2 による 31×31 (約 1000 ノード規模) の処理では約 5 時間もの処理時間がかかっている一方で、提案シミュレータは小規模ノード数 (7×7) では処理速度は遅いものの、規模が大きくなっても処理時間は現実的範囲 (1000 ノード規模で約 3 分) となっている。

図 2.29 は処理速度の比率に換算したもので、結果、100 ノード規模で 1.3 倍、1000 ノード規模では 96 倍の高速化を実現した。

2.10. シミュレーション性能評価

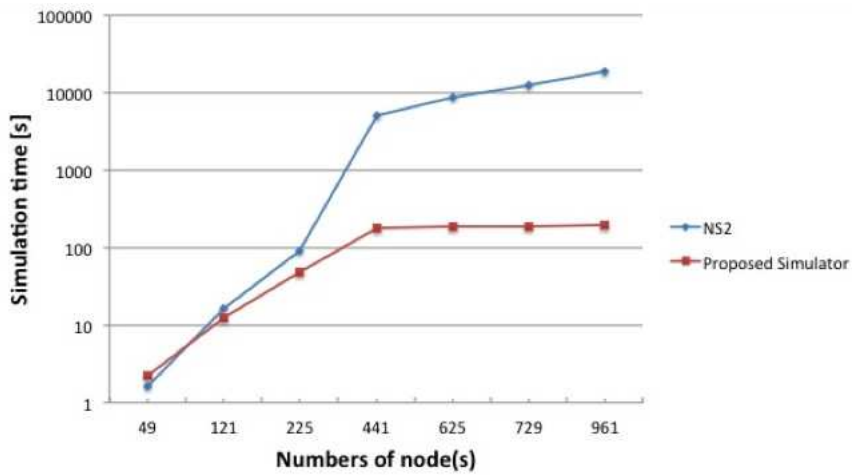


図 2.28: シミュレーション時間の比較

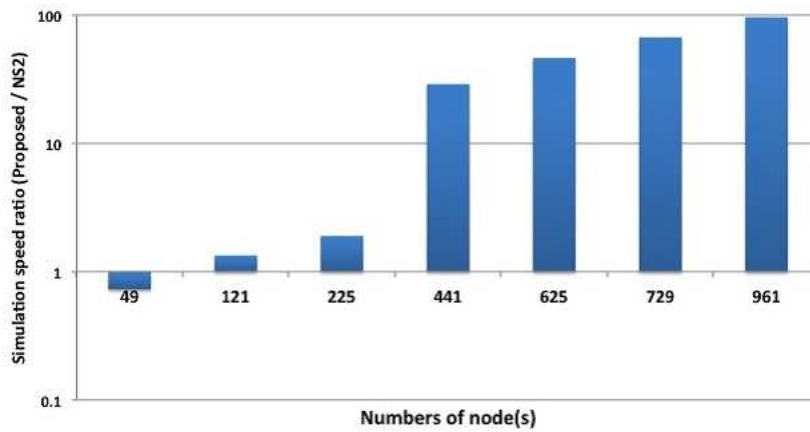


図 2.29: シミュレーション速度比 (NS-2 の実行スピード=1)

実際には、NS-2 において爆発的に処理時間が延びていることから、動作していないノードを含めて全ての動作ログを出力している結果プロファイルデータの I/O で大半の処理時間を要していると考えられる。具体的には、441 ノードから爆発的に処理速度が増加していることが読み取れ (100[s] → 8000[s])、ログファイルサイズにおいて 255 ノード時には 340MByte ほどだったものが、5.9GByte になってお

り、実際には測定環境での外部ストレージの書き込み速度に制約を受けているものと考えられる。

提案シミュレータでは前述したとおり、動作に関与しないノードのシミュレーションの実行を行わないため現在のところ、ノード数やシミュレーション時間の増加にともないログデータの極端な増加現象はみられない。

図 2.30 は今回の比較実験において生成されたログファイルのサイズの推移であり、約 1000 ノード規模でも 2GByte ほどとなっている。

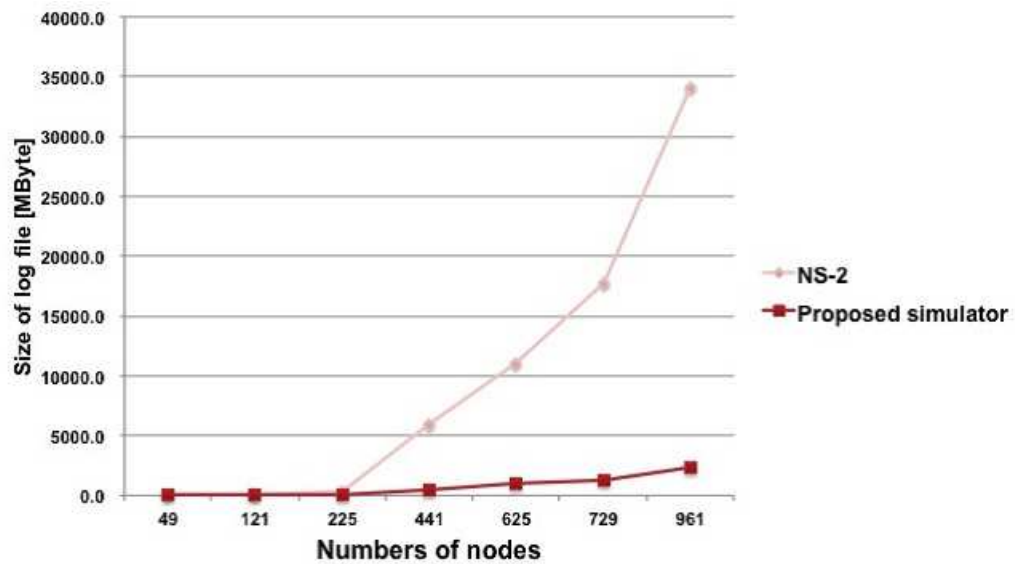


図 2.30: シミュレーションログサイズ

2.11 第2章のまとめ

本章では研究の最終目標である実際の現場における実証実験となる造成地や斜面の安定度分析を行うためのセンサーネットワークシステム設計に必要なシミュレータの提案と評価について述べた。

提案するセンサーネットワークシミュレータでは、センサーノードのハードはESL⁶技術、個々のセンサーノード間はMAS⁷の技術を用い、環境の影響は確率分布モデルを組み込んでセンサーネットワークシステム全体の挙動を分析する構造となっている。

従来研究[田辺11]では300ノード以上の規模の場合、通信効率とエネルギー効率を両立するにはゴシップ型（メッセージ転送に確率要素を取り込んだブロードキャスト方式）が最も効率がよいとされていたが、提案シミュレータによる分析では、冗長なノードを許容するツリー接続でも、冗長度5~38%で最大13%エネルギー効率のよい運用方式を発見した。また、シミュレーション速度においても、オープンソースである通信シミュレータNS2との比較評価では、100ノード規模のシステムで約1.3倍、1000ノード規模では約96倍（約5時間→3分）の高速化を実現することができ、十分実用的な処理時間でシミュレーションが可能であることがわかった。

このシミュレータは第4章における実証システムのアーキテクチャ探索に用いる。

実際の現場での事前シミュレーションの際には、2.9で従来手法と比較評価を行った一様なセンサーフィールドではなく、実際の地形や植生といった現場環境に従ったデータ伝搬確率(Packet Deliver Ratio)を加味して実施していくこととなるが、そ

⁶Electronic System Level

⁷Multi Agent System

それぞれの現場環境の入力パターンについては第4章における各々の実証現場パターンに沿って述べていく。

第3章

センサーネットワークスケジューリング手法

3.1 まえがき

センサーネットワークの個々のノードをプロセッサエレメントと考えた場合、センサーネットワークは、ある種の分散並列計算機とみなすことができる。通常計算機室で運用するような従来型の並列計算機の制御、あるいはオンチップマルチコア上でのソフトウェア実行制御では、計算速度を優先としたスケジューリングや、電力消費を優先としたスケジューリングが行われている。

一方でセンサーネットワークで第一に求められるのは安定した稼動状態と高いデータ収容率であり、その条件の中で、与えられたプロセッサやプロセッサ間通信のリソースを十分に活用し適切な制御が求められることとなる。

表3.1は、従来型計算機システムとセンサーネットワークの分散処理観点の違いをまとめたものである。表から、センサーネットワークにおけるノードの分散・並列制御の特徴としては、対象にばらまかれたセンサーで一定周期データを取得していく高いノード間並列性に対して、第2章で述べた各種の外乱の影響を受けた実行時間や電力、ノード間通信に着目したスケジューリングが必要であると考えられる。

本章では、この観点に基づき、簡易実験を通じたノードスケジューリング手法の検証を行っていく。また、本章の内容については、著者の著述論文[YSL⁺16]から構成されている。

3.1. まえがき

表 3.1: 従来型計算機システムとセンサーノードの分散処理観点の違い

	従来型計算機	センサーネットワーク
電源	常時接続の安定電源	バッテリーあるいは環境発電 (不安定電源)
電力制御	DVFS ¹ , PG ²	DVFS, PG, 周期間欠動作
プロセッサ	一般に高速	一般に低速
メモリ	キャッシュや揮発/不揮発メモリ	基本的に揮発メモリ
プロセッサ間通信	有線通信	無線通信
バス接続	クロスバやトーラスなど	搭載する無線プロトコルによる
ソフトウェア実行粒度	プロセス (スレッド) やタスク単位, 命令単位	センシングのサンプリング単位
ソフトウェアの性質	アプリケーションによる (複雑)	待機, 処理, 受送信の繰り返し (単純)
ソフトウェア処理量	アプリケーションによる	基本的に一定
通信オーバーヘッド	通信品質は一定, データ量で可変	通信品質は動作環境により変化. データ量は一定
ソフトウェアの並列性	並列性のあるタスク間 (アプリ依存)	通信処理時以外 (ほぼ同時動作可能)

¹Dynamic Voltage and Frequency Scaling

²Power Gating

3.2 従来の研究

センサーネットワークを実装するにあたり、以下のいくつかの観点におけるスケジューリング技術について研究開発が行われている。センサーネットワークシステムはノードが相互に接続や切断を繰り返す、かつ、限られた電力条件下においてバランスの取れた動作を行い、データを収集し続けなければならない。

- ノード間接続トポロジーを構成するネットワークスケジューリング
- ノード運用における電力制御を観点としたデバイススケジューリング

ネットワークスケジューリングでは、単純なノード間接続を解決するのではなく、効率的な接続方法を選択しなければならない。これらは自律的なデータ集約機構の検討を行った [首藤 05]、マルチホップ接続の階層構造における効率的なデータ収集について検証をおこなった [関根 03]、ノード間接続における同期手法について研究を行った [Siv04]、各種トポロジーの特性について纏めた [SA92][MDS10] などがある。

これらのネットワークスケジューリング技術の研究開発は、通信技術として古くから行われており、インターネット接続のバケツリレー式通信の実装や RFCなどで定義されるノード間プロトコル定義による安定した通信を実現するために貢献しているが、近年のモバイル通信やセンサーネットワークへの実装のにおいては決定的な最適手法の選択は定義されていない。このため、通信帯域の変化や任意のタイミングで発生する通信切断などの問題が発生している。

たとえば、アドホック接続をするネットワークなどノード毎に接続する経路の選択手法として、RFC3561¹ で定義される AODV(Ad-hoc On-demand Distance Vector) といった近傍の最短経路を選択手法などがよく用いられている。

¹<http://tools.ietf.org/html/rfc3561>

3.2. 従来の研究

このような課題の原因として、モバイル通信やセンサーネットワークは安定した通信環境になく、予測不能な各種環境外乱による不均一な通信品質が主な原因と考えられ、理論的な設計と実際の設置時の挙動の乖離が指摘されている [LSS07][IMP14].

後者のデバイススケジューリングでは、実装するソフトウェアのアレンジによるデバイス消費電力制御として、ハードウェア内部の不要な電力をカットするパワーゲーティング (Power Gating) 手法や、ソフトウェアの処理量に応じて動作周波数をダイナミックに変化させる DVFS (Dynamic Voltage and Frequency Scaling) 手法などがある.

このような技術はマルチコアシステムなどと併用してソフトウェアとの連動することでシステム全体の電力最適化が行われている [古山 14].

近年のデバイススケジューリング技術では、従来のサーバシステムやスーパーコンピュータ技術から、近年の組み込みシステムである携帯機器やマルチメディア機器などに活用されているが、センサーネットワークシステムで用いられるデバイスに対しては未だ黎明期といえる状態にある.

3.3 スケジューリングの課題

冒頭で述べたセンサーネットワークの最大の要件として安定してデータを収容していくことがあげられるが、表 3.1 にあげた電源の状態把握はもっとも重要なファクターとなっている。

すなわち、安定して動作を続けるためには二次電池を枯渇させることなく適切なタイミングで制御を与える必要がある。また電池枯渇の傾向は一様ではなく、第2章で述べた外乱要因のほかに第1章で述べたトポロジー形成時のノード間接続状態である節ノード葉ノードの違いによる電力消費の違いがあげられる。

図3.1はセンサーネットワークがデータ収集をする際のデータフローを模式的に表したものである。IEEE802.15.4(Zigbee)ではノード設定にあたり2つの役割(Role)が定義されておりひとつは中継を可能とする節ノード(Router device)と、データ送信のみを行う葉ノード(End Device)が存在する。

図からも容易に推察できるように、Routeは下流に接続されたノードからのデータを伝播させる役割があるため、図中にしめしたデータフローの補助線に従い、R1,R2,R3といったRouterは非常に高負荷となっている。

3.3. スケジューリングの課題

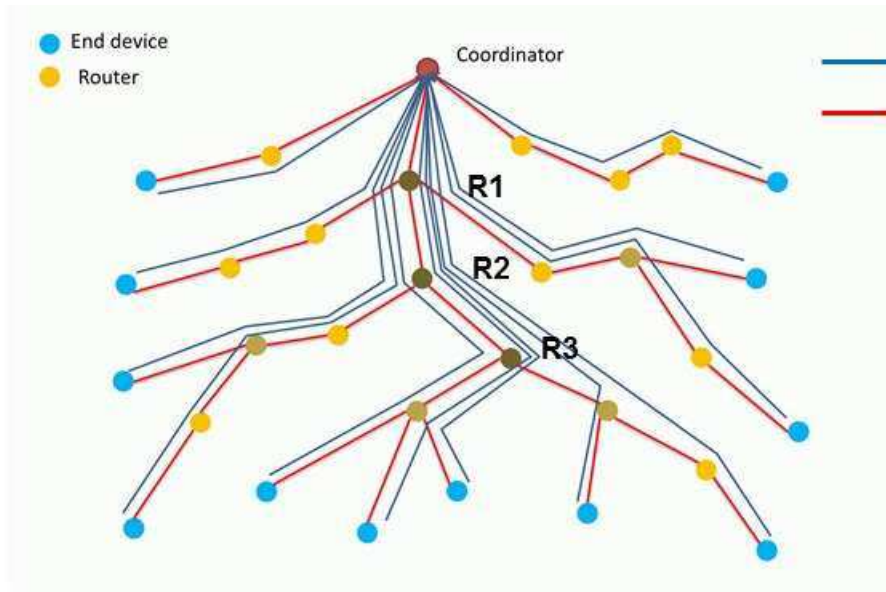


図 3.1: ルーティング時のデータフローによる負荷イメージ

以上のように、センサーネットワークを構成するノードは基本的には共通のアーキテクチャをもつが、その動作においては必ずしもすべてが共通であるとは限らない。

さらに、屋外に設置させるようなケースにおいて、このようなデータ収集時には環境外乱による通信品質変化による挙動の変化が発生する。このようなセンサーネットワーク設計における課題と設計手法の提案 [dSB15] は行われているが、ネットワークからデバイスに至る統合した実装技術は確立されていない。

本章ではこのような局所的な動作の違いをスケジューリング制御することによりシステム全体の動作安定化を測る手法を考察していく。

3.4 スケジューリングアルゴリズムの提案

本章で提案を行うスケジューリングメソッドでは、前述した Router device と End device の役割を決定する手法を、通信品質状態と電力状態をプロファイリングしながら探索していくスケジューリングアルゴリズムを提案していく。

図3.2は、スケジューリングイメージで、センサーノードのもつ状態から、適宜役割 (Role) を変更することでルーティングパスを変えることにより、データ収容を続けながらも負荷分散していくことを目指す。

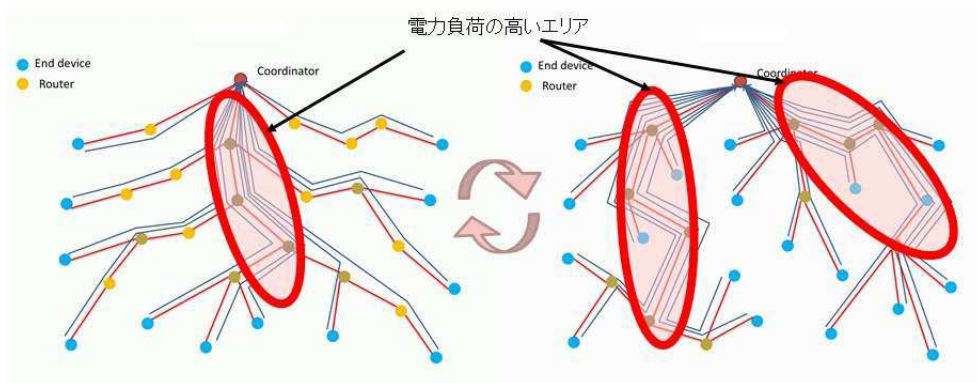


図 3.2: 負荷分散を考慮したスケジューリングイメージ

スケジューリングを行う際に判断材料となるキーには大きく以下の2つを考察対象とする。

- (1) 電池残量
- (2) 通信品質

安定したデータ収容を行うためには、各ノードの電池残量が一定水準以上であることが重要であり、言い換えれば、枯渇状態がある閾値を下回った場合に図3.2のような伝播経路の変更を行い、個々のノードの電池残量が平均化するような制御が必要となる。

3.4. スケジューリングアルゴリズムの提案

一方，通信品質については，ノードを固定設置した場合にはノード間の通信品質は外乱の影響を除いてほぼ一定であるが，たとえば携帯通信網の基地局は，安定した通信を確保するため，どの端末からも一定の通信品質を確保できるように基地局配置を行うが，環境モニタリングのためのセンサーネットワークでは，設置現場状況に応じて設置されたそれぞれのノード間の通信品質は一様ではない．なお，通信品質は一般にはRSSI²あるいはLQI³といった評価値が用いられ，無線通信において通信機器が受送信する信号の強度が定量化されており，一般に市販されている無線モジュールではチップ内の指定レジスタを読み出すことによって直近の通信品質値を読み出すことができる．今回実験で使用するIEEE802.15.4(Zigbee)デバイスでは，LQI値を取り扱っており以降，LQI値を指標として考察していく．

これらを踏まえて，表3.2に提案するスケジューリングアルゴリズムの概要をまとめると。

²Received Signal Strength Indicator

³Linked Quality Indicator

表 3.2: 提案するスケジューリングアルゴリズム

	名称	概要
1	LQI/PS 法	電池枯渇を生じた Router ノードの周囲ノードの LQI 値を第 1 キーに, バッテリ残量 (Power Status) を第 2 キーとして電池枯渇 Router の代替となる中継ノード候補をあげていく方式
2	PS/LQI 法	電池枯渇を生じた Router ノードの周囲ノードのバッテリー残量を第 1 キーに, LQI 値を第 2 キーとして電池枯渇 Router の代替となる中継ノード候補をあげていく方式
3	NRC 法	周辺ノード (Neighbor node) を一旦すべて中継ノード候補とし, ネットワーク構築後に再度 Router/End device を再設定 (ReConstruct) する方式

ここで, 各提案アルゴリズムで定義される隣接ノードとは, スケジューリングの契機となったノードからみて, 直接の接続関係はなくても, 電波到達範囲にあるノードを意味する. IEEE802.15.4 の仕様では, ある瞬間実際に接続はされていなくても MAC/PHY 層などが発生する alive packet やビーコンなどを観測可能なノードを指す. また, 調査対象となる隣接ノードの LQI 値は, そのノードを基点とした隣接ノードの LQI 値が保持されている. すなわち 1 つのノードは複数の LQI 値をもつが, スケジューリングで評価される LQI 値は, ゲートウェイ方向に対する LQI 値を用いる.

3.4. スケジューリングアルゴリズムの提案

3.4.1 LQI/PS 法

LQI/PS 法は表 3.2 に示したとおり，第 1 キーを通信品質 LQI に，第 2 キーをバッテリー残量 PS としている．中継ノードである Router device の機能継承先の選択候補順位が，通信品質のよいものから順に，同一品質であれば，よりバッテリー残量が多いものが選択される．しかしながら，このスケジューリング手法では，バッテリー残量が多くても通信品質がよくない，すなわち，隣接するノードであってもセンサーノードのばら撒かれ方によって無線通信的には離れ小島的なポジションのノードは選択されにくい性質をもつ．

図 3.3 は LQI/PS 法のアルゴリズムである．スケジューリングの契機は，バッテリー残量の枯渇であるが，枯渇状態の閾値付近にあるノードが頻繁にスケジューリング対象とならないように発電状態 (charging) か，放電状態 (discharging) かをチェックしている．これは，第 2 章における式 (2.2),(2.3) から，評価値式 (3.1) が $N=1$ あるいはスケジューリング評価対象期間に相当するサンプリング回数 N のときに正 (charging) か，負 (discharging) かで条件分岐し，発電状態である，すなわち電力的に回復の方向に向かっているノードはスケジューリング対象外であることを明に示している．

$$\sum_{n=1}^N \int_0^{\Delta T} h_n dt - \sum_{n=1}^N \Delta E_n \quad (3.1)$$

続いて，スケジューリング対象のノードが End device すなわち最も電力消費としては小さいノードの場合，それ以下の消費電力の電力遷移状態は存在しないため，ノード自体は休眠 (sleep) 状態とし，以降，次の隣接ノードのスケジューリングのタイミングまで発電 (charging) 状態を継続することで，バッテリーの回復を促す．

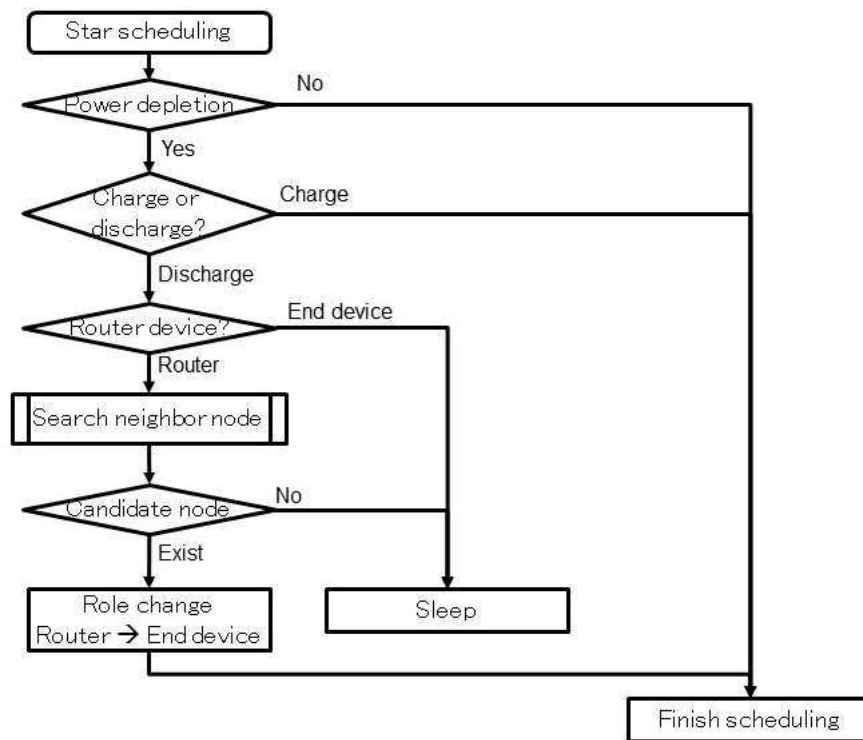


図 3.3: LQI/PS 法アルゴリズム (1)

スケジューリング対象のノードが Router device である場合、隣接ノードから、データ中継を行う代替ノードを選択する。隣接ノードからの候補選択のアルゴリズムを図 3.4 に示す。図 3.4 におけるソート後の選択事例は図 3.5 の動作イメージにおける候補選択を示している。

この選択方法では、選択候補を隣接ノードから順位付けを行うのだが、LQI 値は 0-0xFF(255) までの段階的な値をもち、かつ、周囲環境の変化で容易に 10-20 の値が変化するため、便宜的に 16 階調 (+0x0-+0xF) のレンジで段階を区切ることとする。

3.4. スケジューリングアルゴリズムの提案

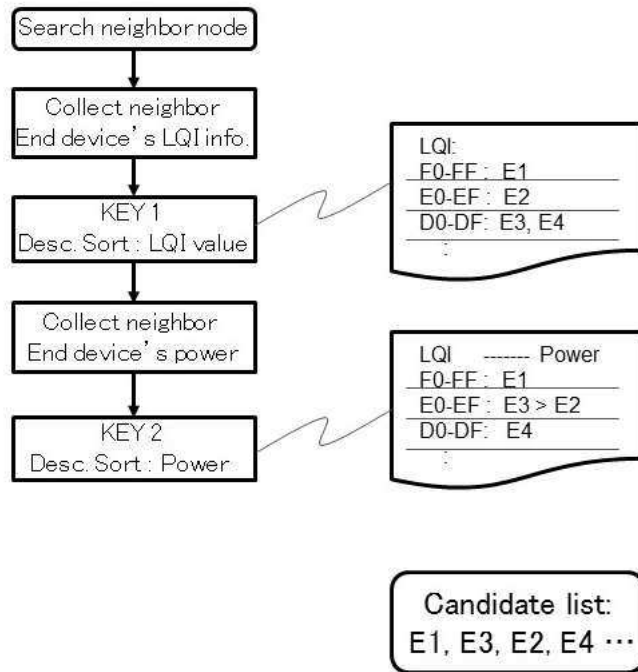


図 3.4: LQI/PS 法アルゴリズム (2)

図 3.5 は R1 が枯渇状態を起こしてから、隣接ノードである E1,E2 が最終的には新たな中継ノードとしての Router device に Role change される図となっている。このアルゴリズムの特徴は、いかにバッテリー容量が多くても E3 や E4 は選択されにくいところにある。

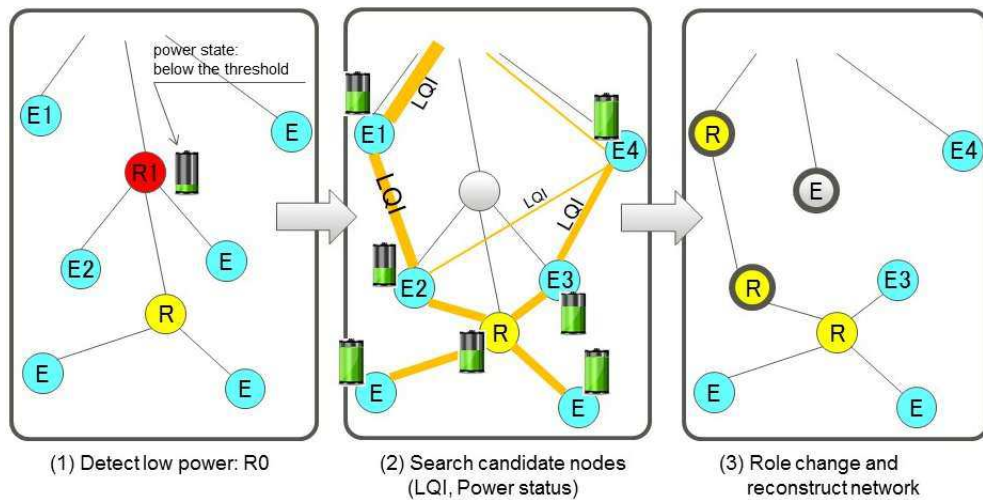


図 3.5: LQI/PS 法アルゴリズム動作イメージ

しかしながら未来永劫 E3 や E4 が選択されないということではなく、たとえば R2 が電力枯渇を起こした場合、E3 が選択候補の上位に現れる可能性がある。

3.4.2 PS/LQI 法

PS/LQI 法は表 3.2 に示したとおり、第 1 キーをバッテリー残量 PS に、第 2 キーを通信品質 LQI としている。中継ノードである Router device の機能継承先の選択候補順位が、バッテリー残量のよいものから順に、同一残量（残量レンジ）であれば、より通信品質がよいものが選択される。このスケジューリング手法では、通信品質が悪くてもバッテリー残量が高ければ選択候補の上位に入りやすい。この状態で運用を続けると、通信品質の悪さからデータ再送が頻発する可能性が高くなり、消費電力負荷が高くなるが、高いバッテリー残量がそれを補うアルゴリズムとなっている。

図 3.6 は LQI/PS 法のアルゴリズムである。スケジューリングの契機は、バッテ

3.4. スケジューリングアルゴリズムの提案

リー残量の枯渇であるが、枯渇状態の閾値付近にあるノードが頻繁にスケジューリング対象とならないように発電状態 (charging) か、放電状態 (discharging) かをチェックしている。基本的な構成は最終的な候補リストの作成の違いのみであるため図 3.3 と同じ実装となっている。

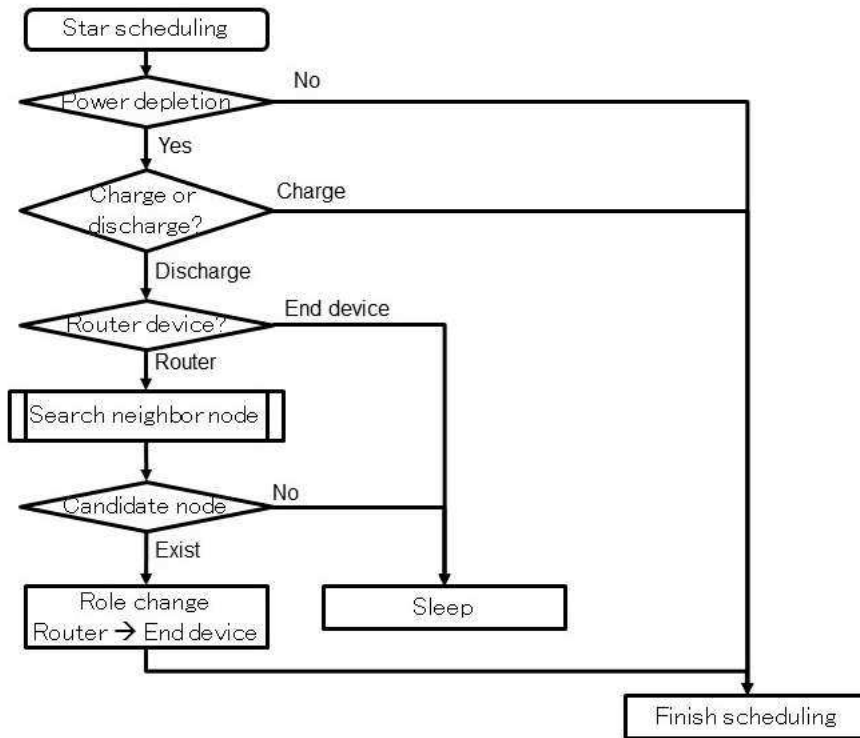


図 3.6: PS/LQI 法アルゴリズム (1)

スケジューリング対象のノードが Router device である場合、隣接ノードから、データ中継を行う代替ノードを選択する。隣接ノードからの候補選択のアルゴリズムを図 3.7 に示す。図 3.7 におけるソート後の選択事例は図 3.8 の動作イメージにおける候補選択を示している。

この選択方法では、選択候補を隣接ノードから順位付けを行うのだが、バッテリー残量は連続値をもち、かつ、周囲環境の変化で容易に容量の微小な変化がお

きるため、便宜的に 10%ごとの階調でレンジで段階を区切ることとする。

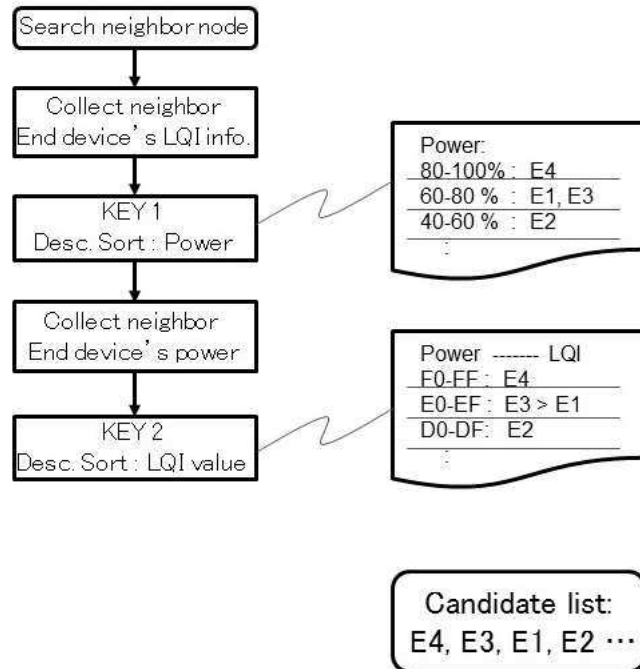


図 3.7: PS/LQI 法アルゴリズム (2)

図 3.8 は R1 が枯渇状態を起こしてから、隣接ノードである E1,E3,E4 が最終的には新たな中継ノードとしての Router device に Role change される図となっている。このアルゴリズムの特徴は、いかに通信品質がよくても E2 を中継経路とする状態は選択されにくいところにある。

3.4. スケジューリングアルゴリズムの提案

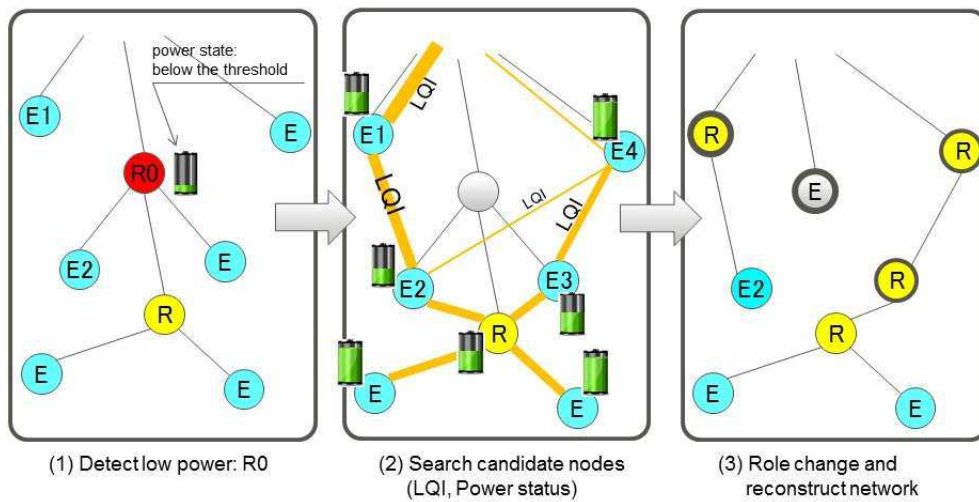


図 3.8: PS/LQI 法アルゴリズム動作イメージ

しかしながら、この選択法においても E2 が未来永劫選択されないことはなく、End device である E2 は運用の経過にともない発電が促されバッテリー残量の回復とともに、選択候補の上位に出現することとなる。

3.4.3 NRC 法

NRC(Neighbor Role Change) 法は前述の 2 つのアルゴリズム提案から視点を変え、バッテリー枯渇や通信不良のノードを除外した残りのノードの接続選択において、通信品質 LQI やバッテリー残量 PS といった選択キーを用いず、単に隣接ノードというくくりでスケジューリングを行うものであり、通信デバイスが本来搭載する AODV 選択アルゴリズムなどをそのまま用いることでまずは接続を確立したのちに、子ノードの接続があったノードを Router device に、子ノードの接続がなく、末端ノードとなったものを End device とするものである。図 3.9 は NRC 法のアルゴリズムである。

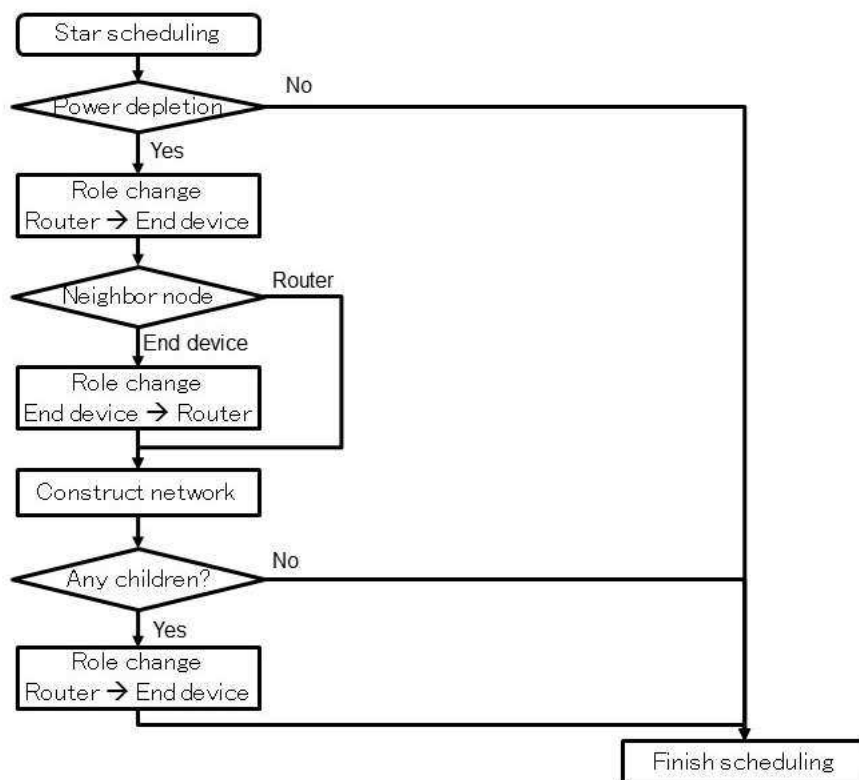


図 3.9: NRC 法アルゴリズム

アルゴリズム自体は非常にシンプルで、電力枯渇を起こしたノードを End device とし、隣接するノードを一旦すべて Router device とした上でネットワークを再構築し、結果的に中継を行わない Router device を End device にするものである。

3.4. スケジューリングアルゴリズムの提案

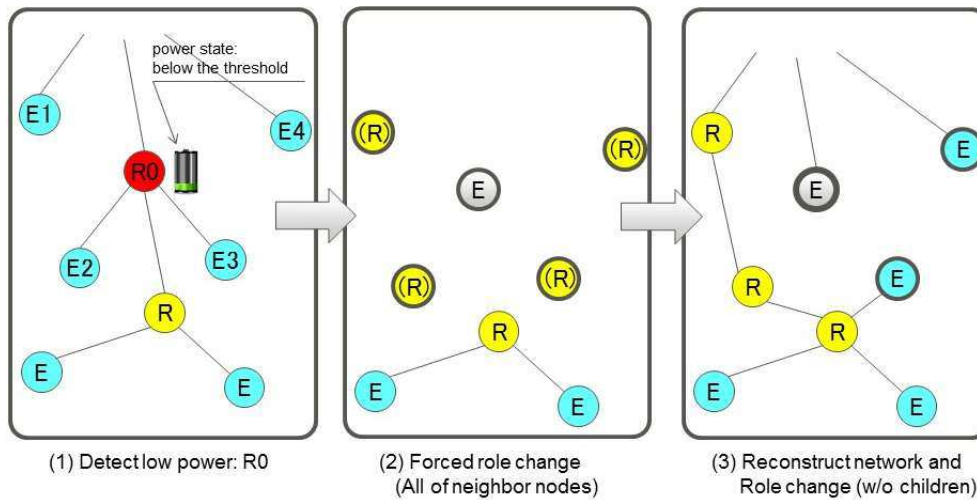


図 3.10: NRC 法アルゴリズム動作イメージ

図 3.10 は NRC 法の動作イメージを表現したもので、R1 が枯渇状態を起こしてから、隣接ノードすべてを Router device に変更するが、最終的には、もともと E3, E4 だったノードは、さらに中継を行う必要がないため、再び End device に変更してスケジューリングが完了している。

このアルゴリズムの特徴は、通信品質やバッテリー残量に関係なくトポロジーを再構築していくため、スケジューリング後に容易にデータ再送や接続切れ、あるいはバッテリー枯渇状態による再スケジューリングの頻発が懸念されるが、1 度のスケジューリング結果では、接続可能なノードは確実にネットワーク接続されるという特徴をもつ。

いずれのアルゴリズム提案も一長一短があり、後述する 3.5 節にて定量的に評価を行っていく。

3.4.4 周期間欠動作スケジューリング

センサーネットワークでは種々のデータ集約方法が提案されている。センシングを常時行い常にデータ送信を行うものと、一定のサンプリングレートを持ちインターバル時間を設定して動作するものがある。本論文で想定する環境系センサーネットワークでは、表 2.1 に挙げたように、一定間隔で動作するケースが多く、センシングを行っていない通常の間隔は常にスリープ（周期間欠動作）状態にしておくことが望ましい。

図 3.11 のようなセンサーネットワークが構築されている場合、たとえば R1 に着目した場合、E1, E2 で取得されたデータを中継し、R2 へ受け渡す。同様に、R2 に着目した場合、R2 は自身に接続された隣接 End device である E3, E4 からのデータ授受のほか、R1 を経由して到達する E1, E2 のデータも中継する必要がある。最終的に集約器 Coordinator である C に全ての接続ノードのデータが收容されることとなる。

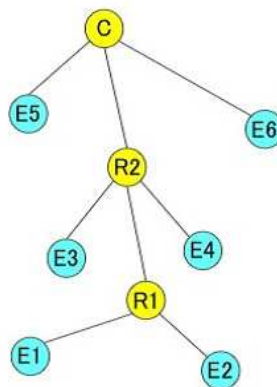


図 3.11: マルチホップによるデータ收容

図 3.12 はこのときの動作タイミングを模式的に表現したものである。本節で検討を行う周期間欠動作制御を考えた場合、単純にサンプリング周期で sleep と wakeup

3.4. スケジューリングアルゴリズムの提案

を繰り返すことはできない。すなわち、R1はE1、E2のデータを收容するまで、R2は、E3,E4およびR1から伝播してくるE1,E2,R1のデータを收容する間 wakeup 状態になっていないといけない。

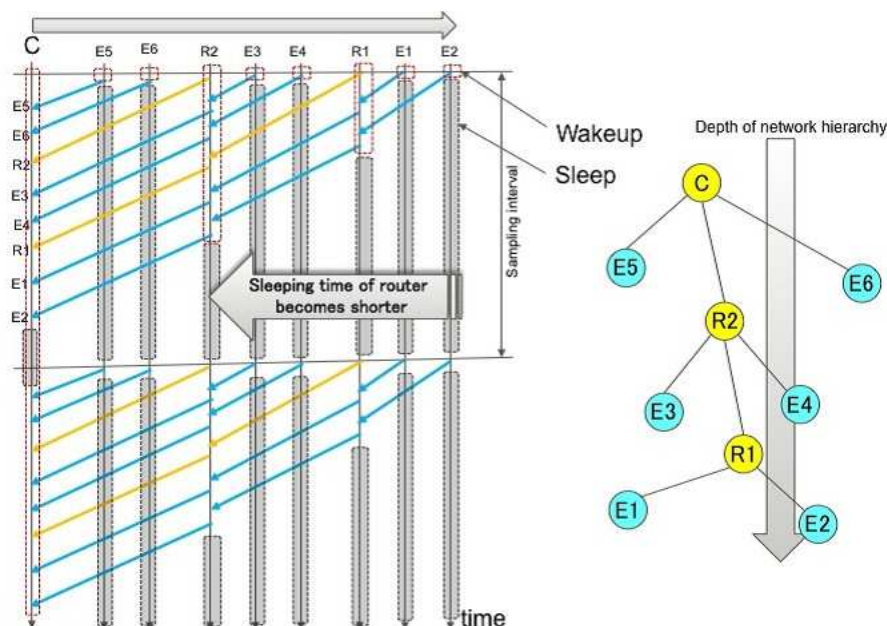


図 3.12: 周期間欠動作スケジューリング動作イメージ

電力制御を行うすなわち、データの受送信を行っていない時間は常に電源をカットする（周期間欠動作）することで、低電力化をはかることができるが、図 3.12 はあくまで理想的な環境におけるデータ伝播状態を示したものである。

実際には本論文で課題提起している外乱の影響を受けることで、タイミングは乱され、必ずしも定常的なタイミングで sleep 状態に遷移できるとは限らない。

実際のデータ到達のタイミングのばらつきを実験によって検証をおこなってみた。図 3.13 は、図 3.11 の構成のネットワークを実際に構築し、表 3.3 の実験仕様にに基づき、E1~E6,R1,R2 のそれぞれのデータがどのようなタイミングで Coordinator に到達したか実験したものである。

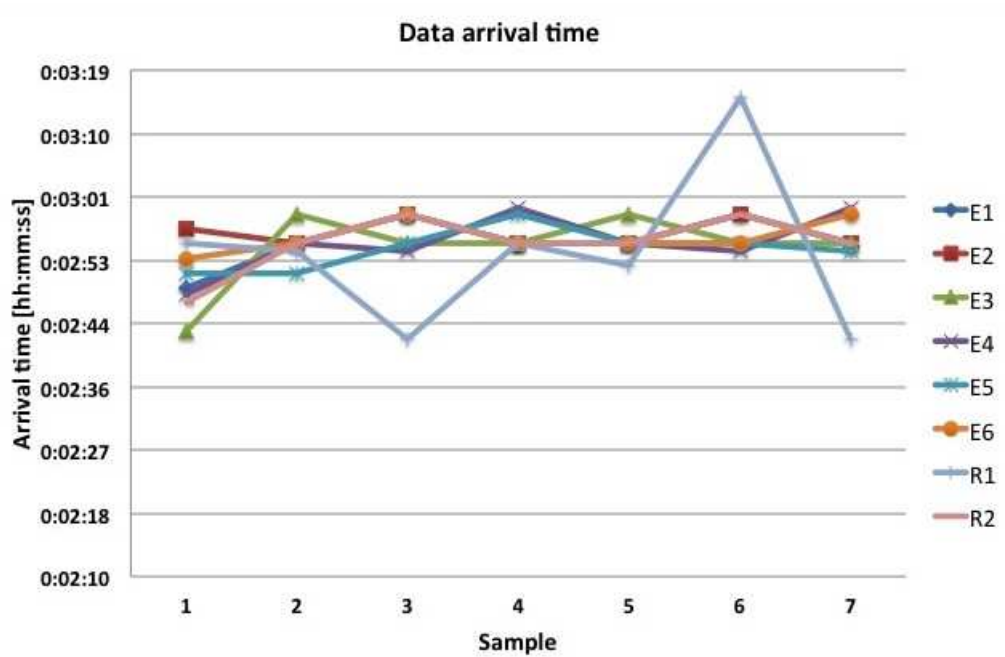


図 3.13: データ到着時間

図 3.13 では、実際には 24[h] 分のデータを取得しているが、特に長時間での特徴的傾向を示さなかったため、任意にクリップした 8 サンプル分のデータをグラフ化している。この実験では、データ集約のインターバルを 180[s](=3 分) と設定しているが、実際には 2 分 53 秒付近に集中しており、また、到着時刻についても 2 分 43 秒から 3 分 13 秒までと、最大で 16%もの非常に大きい誤差結果となっている。

3.4. スケジューリングアルゴリズムの提案

表 3.3: データ到着時間実験仕様

項目	仕様	備考
利用ハードウェア	市販のセンサーネットワーク実験キット	TI 製
無線 RF 部	IEEE802.15.4(Zigbee)	
利用ノード数	8 ノード	
実験エリア	屋外 (雑木林)	
データ集約インターバル	180[s]	
実験期間	24[h]	
時刻測定方法	Coordinator 到着時のタイムスタンプ	計測器の OS による打刻

このようなデータ到着時間のばらつきは以下の要因が原因となっている。

- (1) ノード間の時刻同期が行われていない (非同期システムである)
- (2) 通信輻輳が発生した際に、MAC/PHY レベルでの CSMA/CA による待機 wait が発生している ([s][ms] オーダ)
- (3) センサーノード内の内部タイマーなどの設定誤差, 精度 ([ms][us] オーダ)

センサーネットワークでは、一般的な計算機と異なり、全てのノードが共有するような基準クロックもなければ、バリア同期のような物理配線を用いた同期信号のやりとりを行うことができない非同期システムとなっている。このため、処理を行っていない期間 sleep 状態に遷移することは可能でも、そのままでは非常に非効率なものとなっている。

そこで、本論文ではこのような非同期システムにおいて間接的な同期処理を行うことで同期処理を行うことで、ばらつきの支配要因と考えられる前述の(1)を解決する。

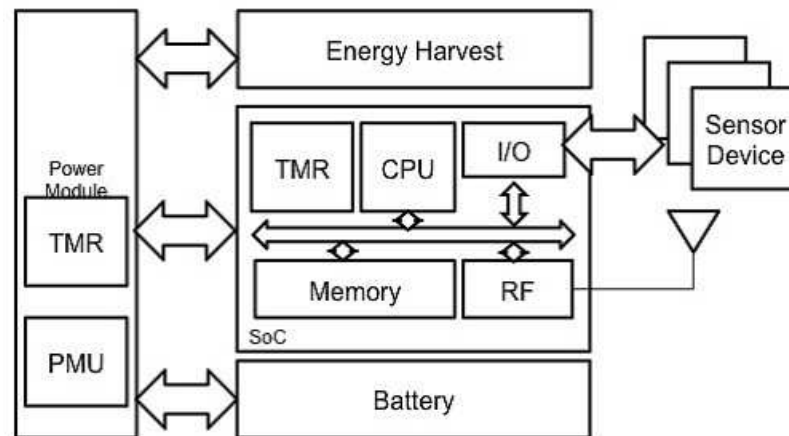


図 3.14: ノードアーキテクチャ

図 3.14 はセンサーネットワークで用いられる 1 つのノードのアーキテクチャの例である。電力の制御を行っている Power Module は PMU(Power Management Unit)とタイマー(TMR)で構成されており、一般的なコンピュータアーキテクチャと同様に、メインプロセッサ側の CPU やメモリ、RF モジュールのパワーゲーティングを行うほか、ハングアップ検出のための Watch dog timer や、周期動作制御のためのタイマーが組み込まれている。

提案する周期間欠動作のためのスケジューリング制御において、前述した(1)の課題を解決するために、図 3.15 のような動作を行う仕組みを実装する。

3.4. スケジューリングアルゴリズムの提案

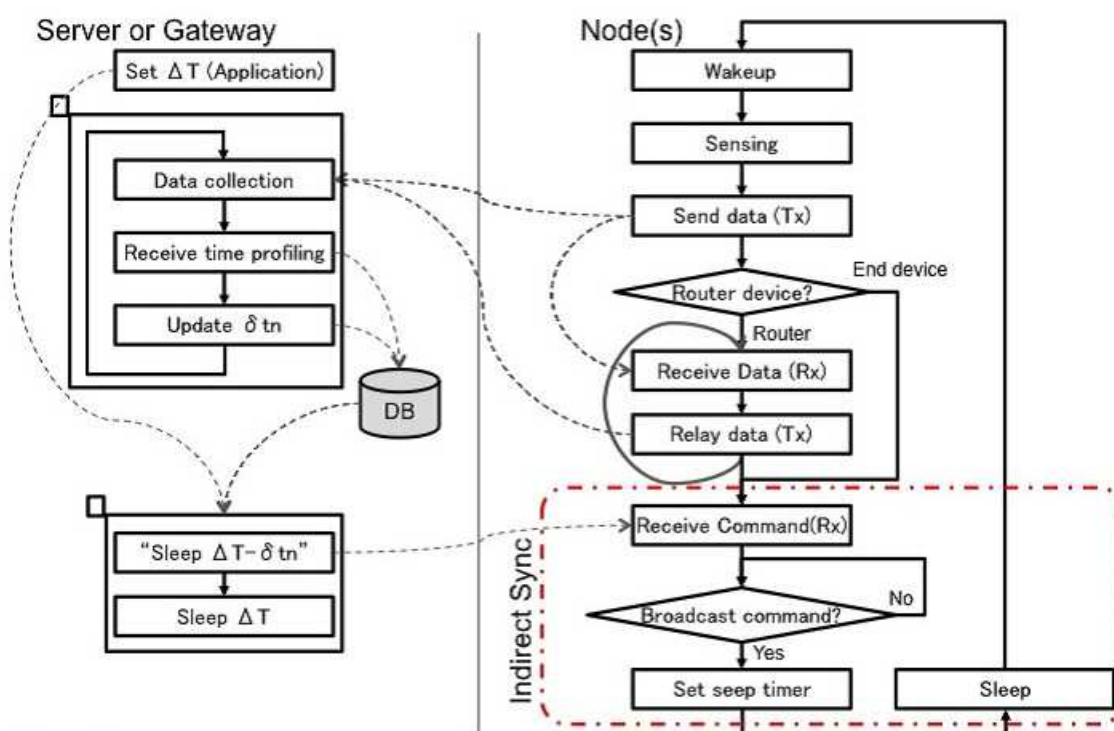


図 3.15: ノーマリオフ間接同期スケジューリングアルゴリズム

周期動作インターバルを ΔT ，データ到着時刻ばらつきを δt_n としたとき，サーバあるいはゲートウェイ側において，データ集約とともに，データ到達時刻をプロファイルしておき， $\Delta T - \delta t_n$ を生成し，これを， ΔT の周期でノードに “sleep $\Delta T - \delta t_n$ ” をブロードキャストする仕組みである．サーバあるいはゲートウェイで時刻を生成する理由は，ノード側で共有するタイマがないため，唯一の基準時刻をサーバやゲートウェイで生成し，かつ，コマンドブロードキャストという形で比較的正確に基準時間をノード側へ伝えるためである．

この仕組みでは，プロファイルしているデータ到着時刻は運用状態によりまちまちであるため，随時プロファイルすることにより，より確度の高い値へと収束していくものであり，ある種の機械学習と同じ効果を期待している．

このとき， δt_n の n は，センサーネットワークの接続階層に依存する．これは図

3.12からもわかるように、ネットワークがCoordinatorに収束していくに従い、受信・転送すべきデータが増殖するため、待ち受け時間がネットワーク階層により異なるためである。

3.4.5 バッテリ温度活性スケジューリング

このセクションでは、もう一つのデバイススケジューリングの観点として、屋外環境におけるもう一つの環境外乱である温度特性に着目する[YSL⁺16]。本論文で対象とするような環境モニタリングでは、屋外環境にセンサーノードを設置するだけでなく、そのセンサーネットワークシステムを数年にわたって運用し続ける必要がある。

この際、冬季における屋外運用においては動作温度が氷点下に及ぶことが容易に想像される。自律した電源で動作するセンサーネットワークでは、バッテリーが基本的に用いられているが、従来は[池川09]のように鉛蓄電池が用いられてきた。

鉛蓄電池はその安定した温度特性から、従来から自動車などに用いられ、その入手の容易性や低いコストから黎明期の実用的なセンサーネットワークにおいても活用がされてきた。しかしながら、近年携帯電話で用いられているリチウムイオンバッテリーに比べて重量あるいは体積あたりの充電容量パフォーマンスは悪く、ポータビリティの点で問題がある。

一方で、リチウムイオンバッテリーは軽量小型において大容量の電力を得ることが可能であるが、その温度特性において低温環境下での不活性状態といった欠点がある[ZXJ03]。

図3.16は、実際のリチウムイオンバッテリーを段階的に温度を変化させたときの容量を示した実験グラフである。実験では、100%にチャージしたバッテリーを無負荷状態で低温室に置き、各温度における電池残量を計測したものである。

実際には無負荷状態においても自然放電を起こすが、実際の屋外使用において

3.4. スケジューリングアルゴリズムの提案

も長期運用中においては同様の環境であるため、本実験においては自然放電現象についての考察は行っていない。

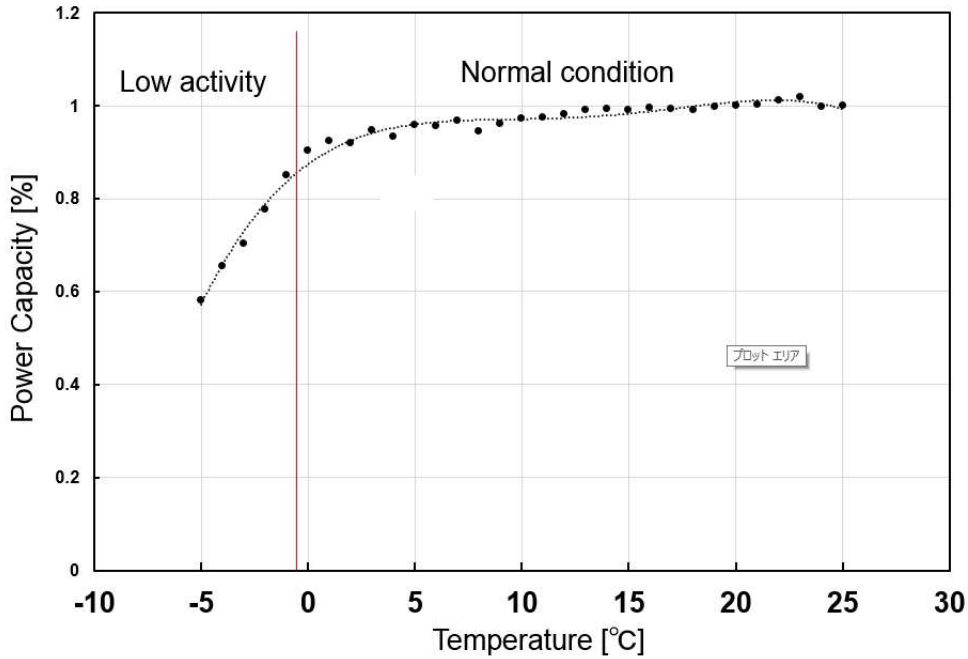


図 3.16: 低温環境下でのリチウムイオンバッテリー特性

図 3.16 で得られた結果の通り、常温（摂氏 10 度以上）では容量 100%を示しているが、それ以下では徐々に容量が低下し、氷点下では急激に低下し、摂氏-5 度においては 60%まで低下している。

このような特性は本章で提案する電力制御スケジューリングに影響を及ぼす。具体的には、式 3.1 に示した電力パラメタを修正する必要がある。図 3.16 から得られる近似式から得られる温度毎の係数 $K_{Temperature}$ を取得し、式 3.2 のように表記することができる。

$$K_{Temperature} \times \sum_{n=1}^N \int_0^{\Delta T} h_n dt - \sum_{n=1}^N \Delta E_n \quad (3.2)$$

また、温度特性にかかるデバイスの挙動として、バッテリーの低温活性の考慮のほか、パワーゲーティング処理を行っているシステムでは、低温状態での突入電流についても考察が必用となってくる。突入電流とは、通常のシステム起動時のパワーオンのタイミングのほか、パワーゲーティングのように動作しない期間には回路に電気を流さず、動作開始とともに回路に電気が流れるようなケースにおいて瞬間的に巨大な電流が流れる現象である。

このような現象は、常温動作であれば通常は考慮する必要はないが、低温による不活性状態において、容量が小さい状況では、バッテリーへのダメージが大きくなる。

図 3.17 は摂氏-5 度の状態でバッテリーを含めた外部チャージ回路を接続し、実際に連続して回路をパワーゲーティングドライブしたときのバッテリー電圧を計測したものである。

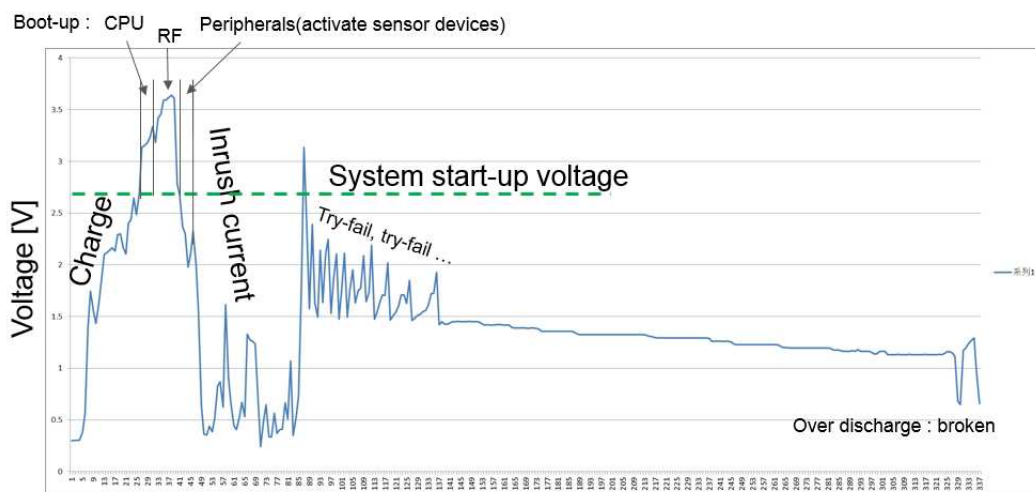


図 3.17: 低温環境下での突入電流 (摂氏-5 度)

実験では、連続パワーゲーティングにおいて通常通り動作した部分は割愛しており、徐々に低温による活性低下と、電力消費に伴うバッテリー容量の枯渇で、機

3.4. スケジューリングアルゴリズムの提案

能停止の最終状態となったパワーログである。

このログでは、外部チャージは行われるものの、パワーオンに伴ったりセットのタイミングで、段階的に回路モジュールが起動されていく。しかしながら、回路リセットのプロセスで発生する突入電流により、瞬間的な放電が行われる。その後回路は数回パワーオンリセット動作をしようとするが、その都度発生する突入電流によりバッテリーが過放電状態へ陥ってしまった。

過放電状態とは、リチウムイオン電池のような二次電池において、チャージドライブのための必用電力容量が不足してしまうと、二度と充電ができなくなる現象である。もしこのような現象が冬季に屋外設置しているセンサーネットワーク上で発生した場合、単なる電池枯渇ではなくノードそのものが故障状態となってしまう、バッテリー交換が必用となってしまう。

そこでセンサーノードアーキテクチャに対する追加機能要望として、温度センサーを搭載し、この温度情報をもとに低温かつ電池枯渇状態において突入電流および過放電による機器故障を避けるため、図 3.18 に示すアルゴリズムの提案を行う。

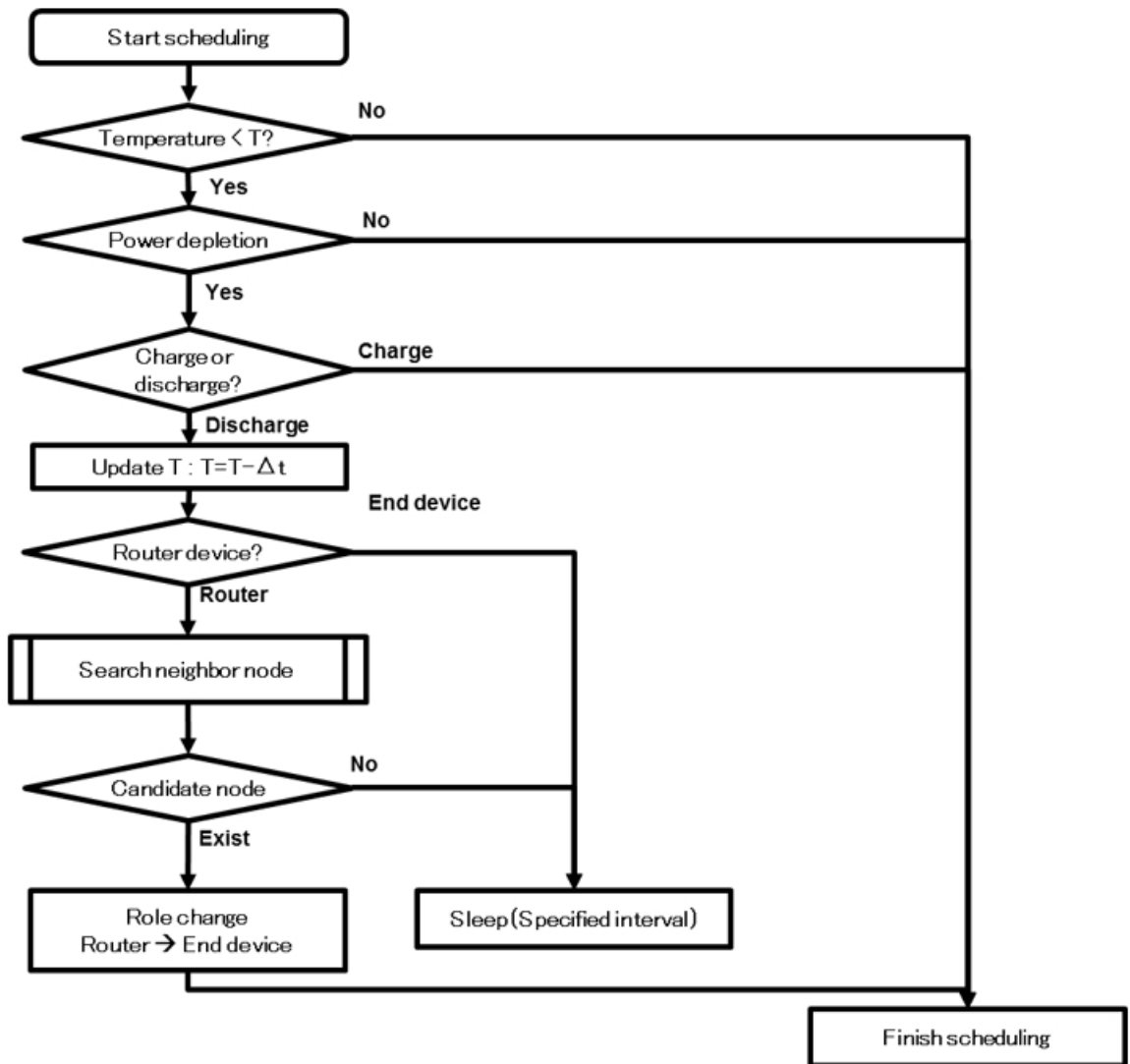


図 3.18: 低温環境スケジューリングアルゴリズム

このアルゴリズムでは、動作中のセンサーノードの（低温不活性状態で得られる）バッテリー容量と、動作外気温を考慮し、周期的にデータサンプリングしている収集周期とは独立して、長期間スリープを与えるアルゴリズムとなっている。

具体的には 10 分周期で動作しているシステムにおいて、上記問題ポイントにおいて低温、動作モード (Role)、バッテリー状態（枯渇）の条件がそろった場合、通常

3.4. スケジューリングアルゴリズムの提案

のセンシングや通信処理を行う前に即座に3時間ほどの長期スリープを与えることで、故障状態の発生をしにくくするスケジューリング手法となっている。

また、このアルゴリズムでは単純に低温状態だけの理由で長期スリープ状態の制御を行ってしまうと、外気温が氷点下状態になった時点で全てのノードがスリープ状態になってしまい、結果的には同時に全てのノードがスリープ状態になってしまう可能性が考えられるが、アルゴリズム中において動作中のノードの Role (End device もしくは Router device) も考慮することで、同時に全てのバッテリーが容量低下+低温不活性状態にならない仕組みとなっている。

3.5 提案スケジューリング手法の評価

本節では、これまで提案を行ってきたスケジューリング手法の評価を行っていく。提案スケジューリング手法は第2章において実装を行ったシミュレーションシステムへ導入し、ハードウェアや外乱などのパラメタを入力し、シミュレータ内で反復運用を行い、最終的な生存ノード率あるいはデータ収容率を評価値として用いる。

3.5.1 LQI/PS, PS/LQI, NRC 法の比較

各提案手法の比較方法について具体的な評価試験の仕様を表 3.4 に示す。

表 3.4: スケジューリングアルゴリズム評価仕様

項目	仕様	備考
利用ハードウェア	市販のセンサーネットワーク実験キット	TI 製
無線 RF 部	IEEE802.15.4(Zigbee)	
利用ノード数	100 ノード	ランダム配置
外乱	発電, 通信の外乱 $LV_{noise} = 0.1, 0.25, 0.5, 0.75$ の 4 段階. $LV_{noise} = 1$ で常に影響を受ける状態.	外乱は乱数により生成

図 3.19, 図 3.20, 図 3.21 はそれぞれ LQI/PS 法, PS/LQI 法, NRC 法によるデータ収容率の評価結果である。

3.5. 提案スケジューリング手法の評価

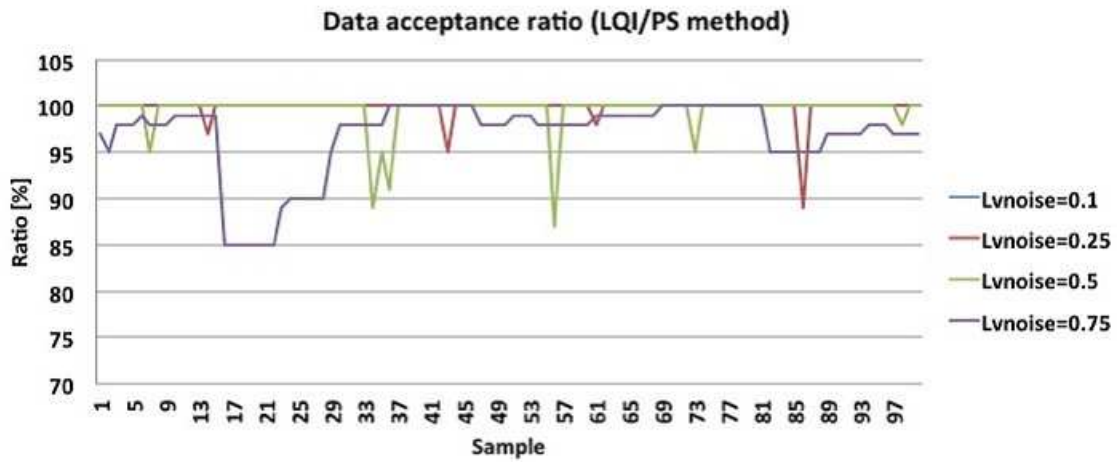


図 3.19: LQI/PS 法によるデータ収容率推移

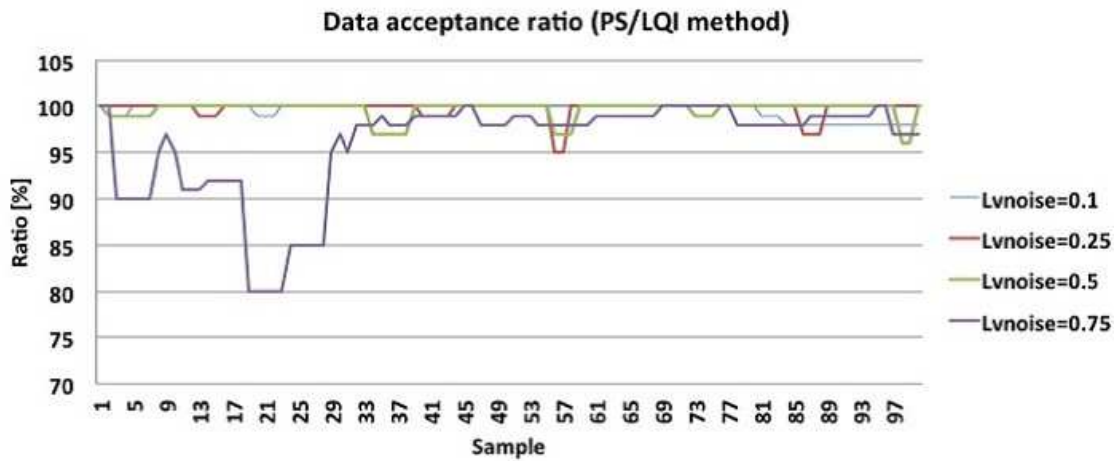


図 3.20: PS/LQI 法によるデータ収容率推移

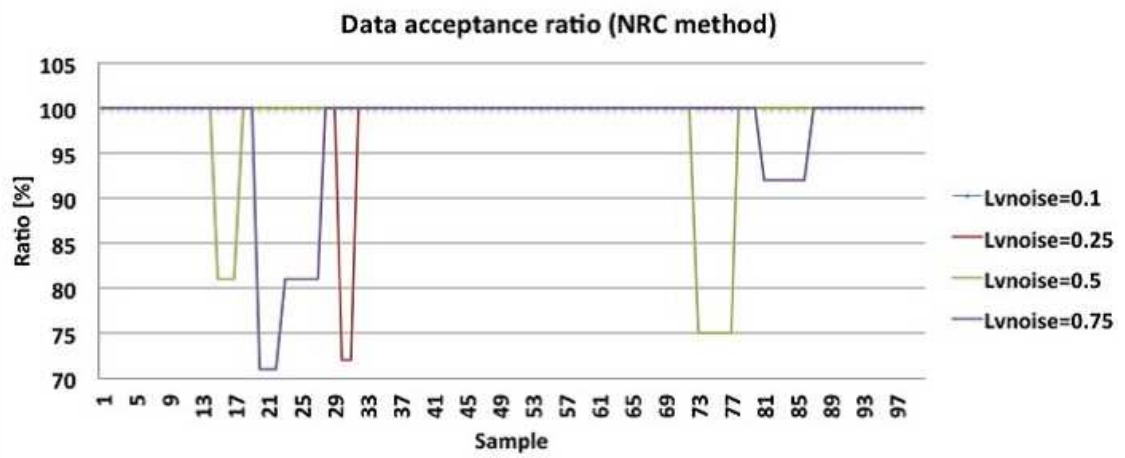


図 3.21: NRC 法によるデータ取推移

表 3.5 および図 3.22 はそれぞれのアルゴリズムのデータ収容率の比較となっている。

3.5. 提案スケジューリング手法の評価

表 3.5: データ収容率の比較

アルゴリズム	外乱	収容率 [%]
LQI/PS 法	0.1	100
	0.25	99.79
	0.5	99.5
	0.75	96.89
PS/LQI 法	0.1	99.57
	0.25	99.74
	0.5	99.59
	0.75	95.92
NRC 法	0.1	100
	0.25	99.44
	0.5	98.18
	0.75	99.7

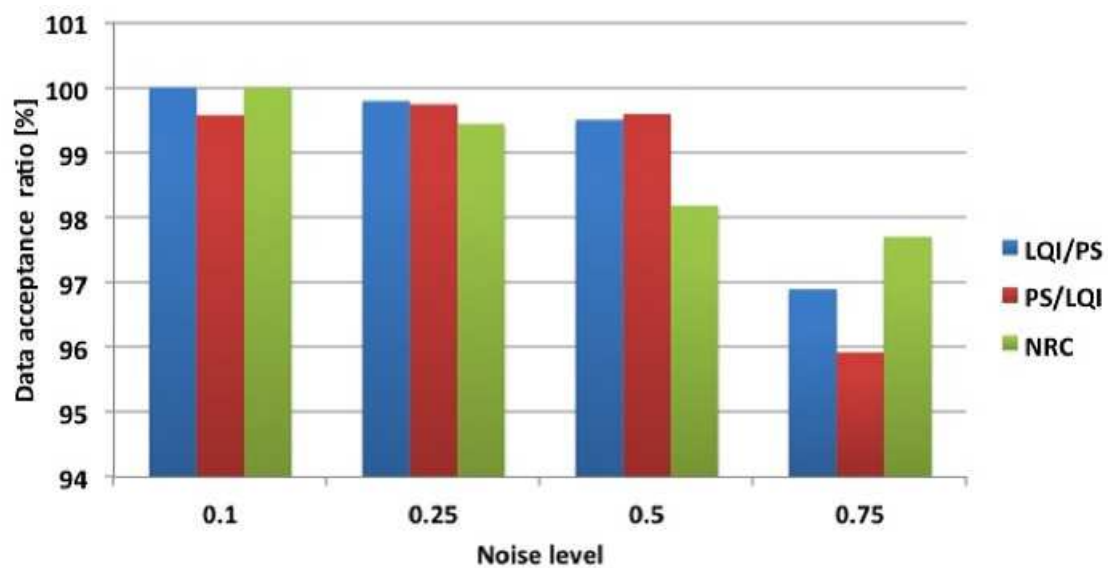


図 3.22: データ収容率の比較

データ収容率の推移および統計的結果であるデータ収容率については、各々のアルゴリズムで外乱が大きいと大幅な収容率の低下が発生する以外は大差がないように見えるが、その推移によって大きな違いがあり、表 3.6 に示した用途により使い分けが可能であると考察できる。

3.5. 提案スケジューリング手法の評価

表 3.6: 各アルゴリズムの特徴と用途考察

アルゴリズム	傾向	用途
LQI/PS 法	外乱に比例してデータ収容率も落ちるが、比較的安定している。外乱が大きくなる環境では、冗長ノードの追加で収容率を上げられると考えられる。	設置ノードが増えても高い収容率を保持したいアプリケーション。(橋梁やビルなどの構造物)
PS/LQI 法	外乱の影響と収容率に相関関係はみられないが、外乱が小さくても収容率が100%とまらない場合がある。	多少のデータ欠けがあっても、低コストでモニタリングを継続したいアプリケーション。(造成面や護岸など)
NRC 法	大きな外乱がかかっても100%の収容率を得る場合がある。一方で、小さな外乱でも従属ノードの多い中継ノードが消えた場合従属ノードがまとめてネットワークから切断されるリスクがある。	設置箇所の外乱影響の環境情報が不明だが、とにかくデータを観測したいアプリケーション。(森林や砂防などの従来未観測領域のモニタリング)

3.5.2 間接同期スケジューリング評価

ノードの電力制御で重要となる周期間欠動作制御を安定動作させるための3.4.4で述べた間接同期スケジューリングを実装し、評価を行った。評価実験の仕様は表3.3に基づき実施を行った。図3.13で最も不安定だったR1におけるデータ到着時間を計測した結果を図3.23に示す。

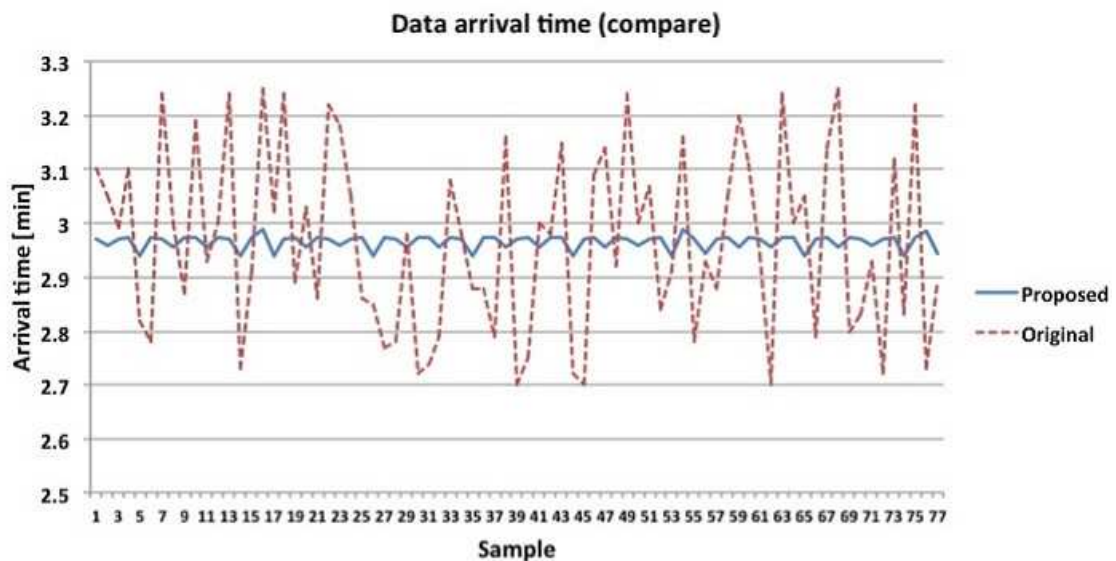


図 3.23: 間接同期スケジューリング結果

図中、Originalと示したのがハードウェアそのものの機構を用いデータ到着時間を計測したもので、Proposedと示したものが提案手法による間接同期を行ったものである。

結果からも明らかなように、サーバあるいはゲートウェイによる到着時間プロファイリングとsleep時間のブロードキャストによる間接的同期処理によりデータ到着時間が明らかに安定化していることがわかる。

3.5.3 バッテリ温度活性スケジューリング評価

バッテリーの低温不活性および過放電現象を避けるためのスケジューリングについて、実験を行った結果を図3.24に示す。実験では、図3.18と同一条件において、制御側に提案スケジューラを組み込んで実装を行っている。

より実践的な評価としては、実際に多数のノードをフィールドに並べ、かつ、氷点下環境を実現した上で確認すべきであるが、当該実験を実施するためには広大なエリアを必用とし、実証実験と同規模の検証環境を必用とするため、本章においては、機能停止を阻止するアルゴリズムが正常に動作し、過放電現象によるバッテリー障害を回避できているかについてまずは実験を行った。

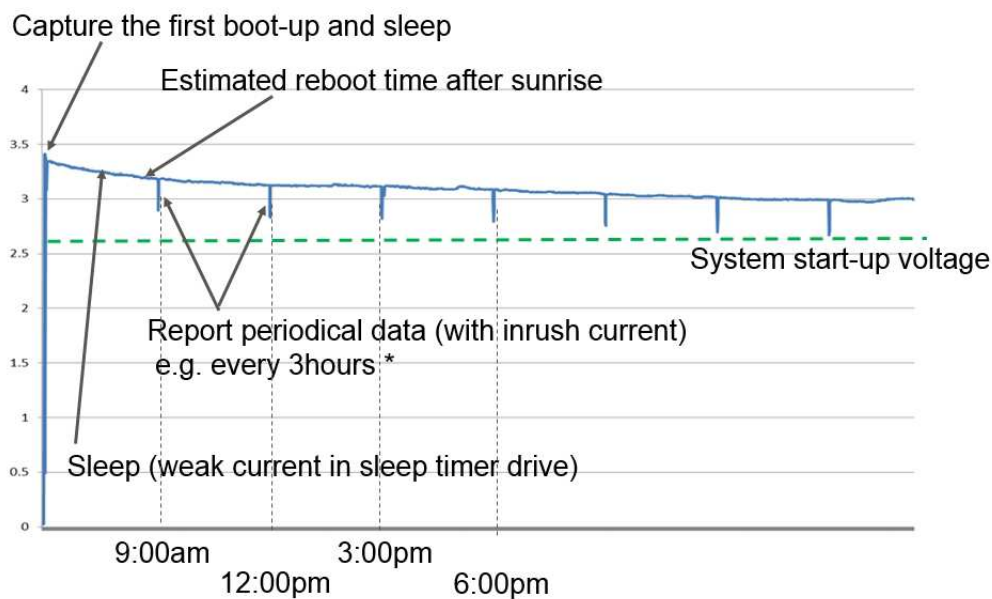


図 3.24: バッテリ温度活性スケジューリング結果

図より、低温不活性状態でバッテリー枯渇状態のノードが間欠動作により起動直後、センシングや通信処理を行わず、即座にスリープモードへ遷移することで、不要な突入電流が流れることなく低活性状態にあるバッテリーの負担を最小限に抑え

ることで安定した状態で推移していることが確認された。

実際のフィールドにおける検証は、第4章において確認を行う。

3.6 第3章のまとめ

本章では、センサーネットワークを分散計算機システムとみだてて、ノード間の協調動作におけるスケジューリング手法の提案、および、周期動作を行うセンサーネットワークにおける、サンプリング間における電源制御をより高精度に行うための、同期スケジューリング手法について提案を行い、各々の提案の評価と検証を行った。

提案手法では、通信品質 (LQI)、バッテリー状態 (PS) あるいは隣接ノードの役割 (Role) をキーとしたスケジューリング手法となっており、ネットワークシステムの安定度の評価指標としてデータ受容率の推移をそれぞれの提案アルゴリズムで評価を行った。

評価では、通信障害や発電に対する外乱を与え、既存の無線 RF モジュールに搭載されるトポロジスケジューラでは解決できない制御を行うことで、LQI/PS 法ではより高いデータ受容率の確保、PS/LQI 法ではデータ欠けを許容しつつも安定したデータ受容率の確保、NRC 法では、環境状態が不明な観測地でも可能な限りデータを取得し続ける制御方式を体系化した。

また、ノードの間における周期間欠動作制御では、ノード間だけではなく、サーバあるいはゲートウェイとの連携により既存システムでは実現できなかった安定したデータ到着時刻の制御に成功し、より高精度な電力制御を行えることを確認した。

これらの提案は第4章において実施する実際の環境モニタリングシステムの設計にフィードバックを行った。これまでシミュレーションや実験環境のみで与えていたパラメタについて実際の環境から得られる情報を加味することで、実証実験において検証していく。

第4章

アーキテクチャ探索と実証実験

4.1 まえがき

本論文では具体アプリケーションとして、斜面や造成面のモニタリングシステムを考える。本章では、実際の実証実験を行うにあたり、第2章で提案を行ったシミュレーションシステムに実際の適用現場のパラメタを導入することでシステム設計を行い、第3章で述べたセンサーネットワークシステムの制御シミュレーションを適用することで対象となる環境モニタリングシステムの長期安定稼動を検証する。

検証にあたってのポリシーとして、同一ノードアーキテクチャのハードウェアを用い、環境への対応については、冗長度を含めた配置、運用制御において継続的なモニタリングが可能であることを確認することである。

本章で実施する実証実験には、台湾エリアでは台湾工業技術研究院 (ITRI)、九州エリアでは長崎大学、北海道エリアでは国土交通省のモニタリング実証プロジェクトのセンサーネットワーク通信技術評価の観点で協力いただき、基本動作の確認およびシミュレーションに必要な環境パラメタの取得において、北京エリアでは Fujitsu R&D Center China (FRDC) ならびに富士通沼津工場において実験が行われた。

本章の内容については、著者の著述論文 [山下 14] [山下 15] [YKL⁺16] [YSL⁺16] から構成されている。

4.2 従来の研究

環境やインフラのモニタリング実証に関する研究は数多く実施されており、センサーネットワークの環境調査応用に関する研究 [MCP⁺02][CWJ⁺11]、火山や洪水など、自然災害に対しての調査に関する研究 [WALJ⁺06][伊藤 10]、構造物のヘルスマニタリングに関する研究 [長井 03]、また、本論文が具体アプリケーションとして検証を行おうとしている造成斜面や山間部の道路などの安全性を確認していく斜面モニタリングとして [IKS09][KFH⁺13][Ram14] といった実証プロジェクトが存在する。

これらの研究の共通観点として、従来は人手による観測や測量、主観的な点検に代替して、基本的にはセンシングによりどのような計測を行うことで、何のデータが劣化や災害予知の知見を得られるかといった実証が行われており、結果の集約としてのガイドラインは文献 [地す 12] といった便覧にまとめられている。

冒頭で述べたように、従来システムでは、大型の計測器、強力な通信装置そしてそれをドライブする大容量電源を実装することで実現可能であるが、本分野における次なる課題は、いかに低コストコンパクトなアーキテクチャで、いかに長期間所望のデータを収集し続けることが可能かを探求することとなっている。

これらの実践的な取り組みとして、斜面のモニタリングをテーマとして扱いセンサーネットワークのアーキテクチャや通信、デバイス技術に言及を行っている [池川 09][小泉 13][岩井 10] といった研究が行われているが汎用かつ実用レベルでの実現には至っていない。

4.3 実証実験内容

今回実証現場としてターゲットとする地点と目的を表4.1に示す。これらの観測ポイントは、植生や日照、通信環境など、それぞれ異なった環境条件にあり、提案するセンサーネットワークシステムのアーキテクチャの環境適合性の効果測定をさまざまな観点で検証するのにバリエーションに富んだ実証現場となっている。

4.3. 実証実験内容

表 4.1: 実証実験エリア一覧

	所在	環境	面積	ターゲット・試験内容
1	台湾苗栗縣	造成地	約 45000m ²	広範囲土壌水分測定による地盤安定度計測. 広域長期観測試験.
2	台湾新竹縣	切り通し斜面	約 300m ²	切土斜面の土壌水分, 傾斜測定による斜面監視. 小規模観測試験.
3	台湾尖石郷	石垣の上面にあるグラウンドのエッジ部分の安定度測定	約 1000m ²	土壌水分, 傾斜測定による老朽化石垣の安定度測定
4	長崎県佐世保市	山間部処理場	約 17000m ²	切土斜面+堆積産廃(瓦礫)+赤土抑え盛土の複合急斜面の安定度測定
5	北海道芦別市	国道沿い段急斜面	約 25000m ²	河川沿い段急斜面の排水機構測定(越冬長期連続観測実験)
6	静岡県沼津市	予備試験場(工場内緑地)	約 3000m ²	雑木林, アスファルト, 建造物複合エリア. 環境発電, 通信測定試験.
7	北京市朝陽区	予備試験場(公園緑地)	約 300ha	雑木林, 広域グラウンド, 通信測定試験.



図 4.1: エリア 1 : 台湾苗栗縣大規模造成地



図 4.2: エリア 2 : 台湾新竹縣幹線道路切り通し斜面

4.3. 実証実験内容



図 4.3: エリア 3 : 台湾尖石郷老朽化した石垣面



図 4.4: エリア 4 : 長崎県佐世保市処分場

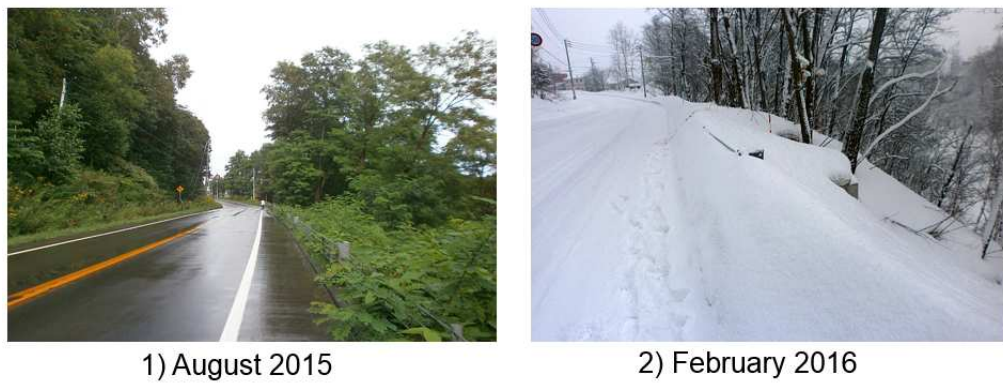


図 4.5: エリア 5 : 北海道芦別市国道沿い越冬環境

4.3. 実証実験内容



1) Fence, Asphalt, Slope



2) Slope, Tree, Grass

図 4.6: エリア 6 : 静岡県沼津市予備試験エリア



図 4.7: エリア 7 : 北京市朝陽区予備試験エリア

実験のプロセスは、現場ならびに土木工学の知見者のサジェスションに基づくセンサー設置間隔，測定時間間隔の要望を取り込みつつ，予備試験に基づく環境パラメータの取り込みと提案シミュレータによるアーキテクチャ探索による発電と通信品質のばらつきとノード設置の冗長性の関連を整理し，結果に基づいて設計したハードウェアならびにセンサーネットワークの設置を行い稼働させた。

実験の結果，図4.1 エリア1における造成面において，最大範囲にして最長の稼働実績として，200[mW]のソーラーパネルに3.2[Ah]のバッテリーを組み合わせ，約70ノードをランダムに展開し，10分毎のデータ取得を約1年間メンテナンスすることなく動作した確認を行っている。

また，同一のノードハードウェアを用い，図4.4 エリア4では最大傾斜40度，補修工事が実施される設置制約条件の下で約6カ月，図4.5 エリア5では，秋季に設置したシステムが最低気温摂氏-5度，最大積雪5mにも及ぶ環境下で越冬稼働し，融雪時における伏流浸透水の道路排水機構への影響のモニタリングに成功している。

4.4 センサーネットワークシステムアーキテクチャ設計

図 4.8 は本論文で提案を行うセンサーネットワークのアーキテクチャ探索および現場適用に至るまでのワークフローを示した図である。ワークフローの開始点は図中右上にある現場要求 (Requirement from civil engineering) である。今回の表 4.1 に示した実証エリアでは、基本的に地盤安定度を評価の狙いとしており、その要求は本論文冒頭で示した表 2.1 に沿って実施していくこととなる。

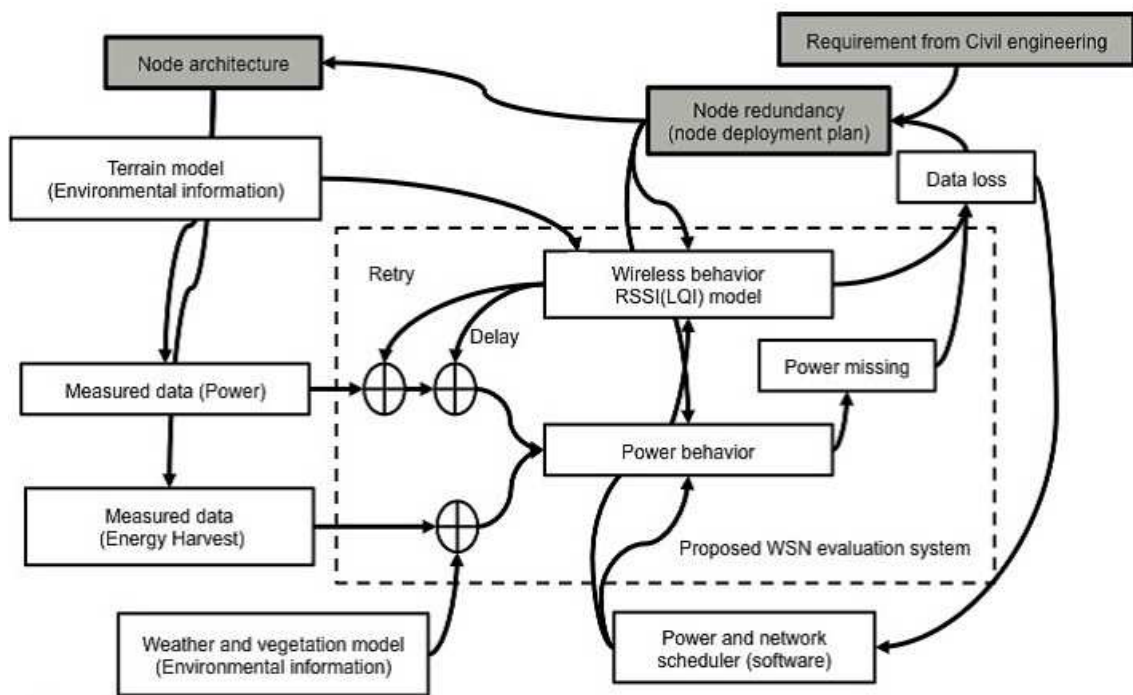


図 4.8: アーキテクチャ探索ワークフロー

最終的には、図中網掛けで示した、センサーノードのアーキテクチャおよび冗長性を加味した最終的な設置計画 (Node deployment plan) を生成することにある。

一方で、最初に掲げた目標である項目の1つに「コスト」を掲げており、センサーノードの筐体およびプリント基板は新たに開発するものの、新規のデバイスを開発することなく、すべて市販のモジュールの組み合わせで実装を行うものと

する。

ワークフローでは、まずは市販モジュールの組み合わせで実装したノードの基本ハードウェアを基準とし、ノードの基本電力測定といった基礎データを取得の後、屋外における通信状態や、天候や日照時間といった現場環境の調査 (Environmental information), 第2章で提案を行ったシミュレーションを行うことで、図中の Wireless behavior や Power behavior を調査および、これらの結果をもって第3章で提案を行ったスケジューラを評価する。

以上を繰り返し実施することで、センサーネットワークのアーキテクチャを探索し、最終目標である要求仕様を満たした実証を行う。

4.4.1 ノードハードウェアと基本電力特性

図4.9は実際に実証実験を行う際に用いたノードハードウェアのブロック図を示している。ノードは圧力センサー、3軸加速センサー、温度センサーを搭載し、CPUとIEEE802.15.4(Zigbee)の無線RFを搭載するSoCおよびバッテリーと環境発電素子としてソーラーパネルで構成される電源部で構成される一般的なWSNノードアーキテクチャとなっている。

4.4. センサーネットワークシステムアーキテクチャ設計

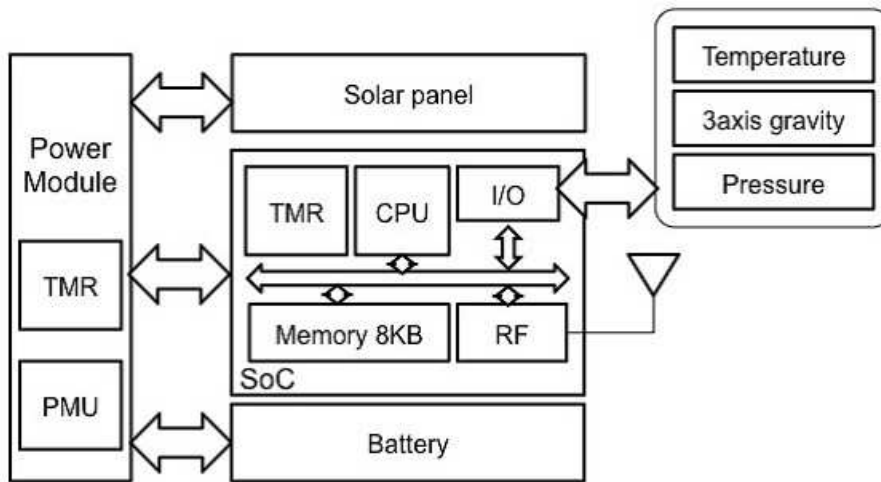


図 4.9: センサーノードブロック図

ブロック図ではバッテリーおよびソーラーパネルが接続されているが、ワークフローでは最終的なバッテリーサイズとソーラーパネルの仕様はアーキテクチャ探索の過程で決定していくものなので開発したセンサーノードは図 4.10 のようになっており、バッテリーやソーラーパネルの接続ポート、および消費電力やセンサーを接続するための接続ポートを備えた。



図 4.10: センサーノード

表(4.2)および、図4.11は図4.10の消費電力測定結果となっている。

表 4.2: 各遷移状態における消費電力

Role	ステート	遷移時間 [ms]	消費電力 [mW]
End device (data send)	Standing by (Sleep)		2.1(Leak)
	Pre-operation(sensing)	2.5	30.6(CPU and peripherals)
	Preparation for data send	$3.0 \cdot RT$ (repeat time)	98.6(R_x)
	Data transmission	1.0	126.4(T_x)
	Post-operation	1.5	30.6(CPU and peripherals)
Router(data relay)	(Standing by)	Depend on data sampling	(2.1)(Leak)
	Data receive(Window time)	Depend on window time: $\Delta T_{windowtime}$ 98.6(R_x)	
	Data transmission	$1.0 \cdot RT'$ (repeat time)	126.4(T_x)

4.4. センサーネットワークシステムアーキテクチャ設計

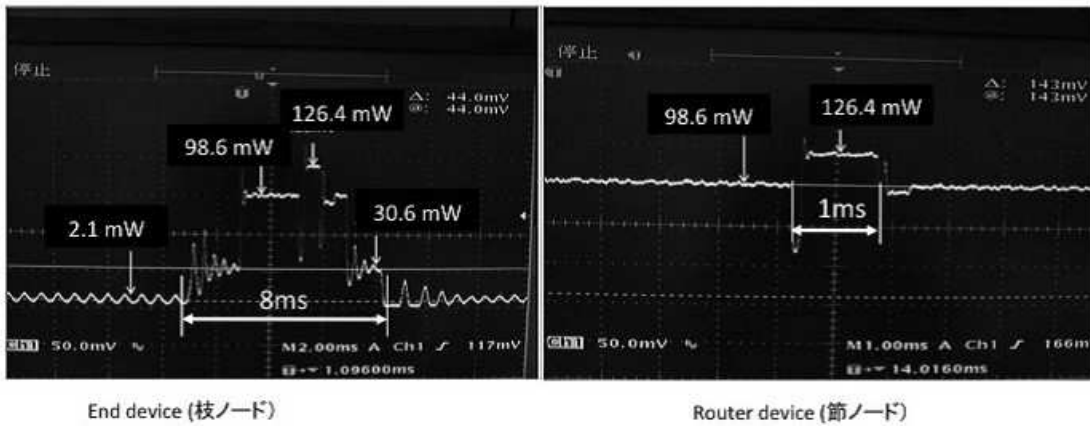


図 4.11: センサーノード消費電力波形（再掲）

表(4.2)での測定では，2つの役割モード（Router / End device）において，基本的な1ターンの動作の電力測定となっている。

第3章で提案を行った周期間欠動作のための sleep 時の待機時間 δt_n を含む受信待機期間を $\Delta T_{windowtime}$ ）として記載している．また，外乱によって発生するデータ再受送信については，それぞれ Router, End device の動作回数 (repeat time) を RT ， RT' と定義している．

4.4.2 屋外環境における通信特性

屋外環境に設置されたノードの通信に影響を及ぼす影響には以下のようなものがある．

- ノード距離，設置面からの輻射波による伝搬損失，
- 植生や設置面組成の違いによる特性変化
- 上記に伴ったリンク切れや再通信

実際にはあらゆる環境状態の組み合わせおよび、海外での実証現場での予備試験が実施できないため、シミュレーションに用いる外乱パラメタの調整を行うための基礎データの取得を目的とし、エリア4において表4.3に示した実験を実施した。

図4.12, 図4.13はその実験風景である。

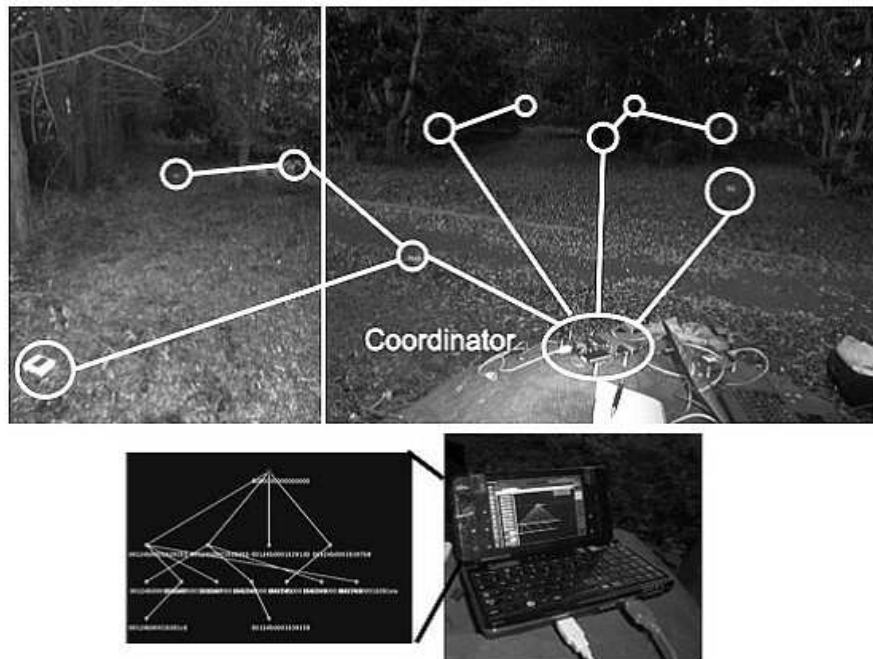


図 4.12: 屋外通信試験 (エリア5・雑木林)

4.4. センサーネットワークシステムアーキテクチャ設計

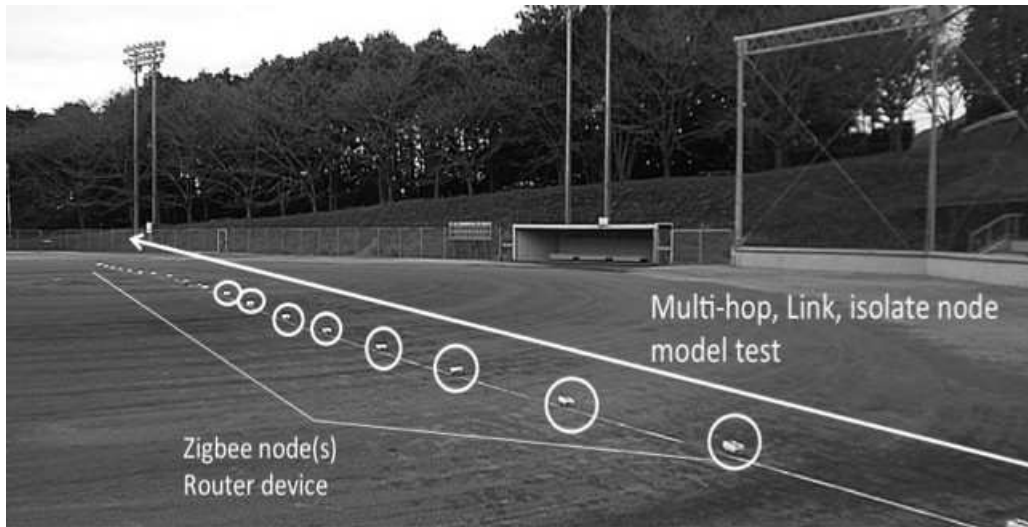


図 4.13: 屋外通信試験 (エリア 5・グラウンド)

表 4.3: 屋外通信試験仕様

評価環境	評価項目	パラメタ
雑草による影響	ノード周囲に生える雑草の影響	雑草高さ, アンテナ高さ, ノード距離との因果関係
樹木による影響	ノード周囲に生える樹木の影響	樹木とノードの位置関係とノード距離による因果関係
長距離伝播	長距離にノード配置した際 の特性測定	ノード間距離と通信品質, 再送回数 の関係

屋外へのノード設置において, 周辺環境の植生の影響を考察する必要がある. 図 4.14 は雑草の丈とアンテナ高さと通信品質の因果関係を調査する試験の概念図である. 短期のモニタリング実験であれば, 雑草の影響は静的なものにとらえることも可能であるが, 通年にわたる運用では雑草の伸による通信品質の影響は計り

知れない。

そこで、測定地域の植生情報に基づき、周囲にはえる雑草などが最盛期の状態で調査を行っている。通常アンテナはなるべく高所に設置することが望ましいが、今回の実証現場である図4.1のような造成地エリアではアンテナを設置可能な柱や樹木がなく、一方でアンテナ設置のためのポールなどを施工工事することは現実的ではない。このため、特別な器具を用いない場合、アンテナは限りなく地面に近接して設置することとなる。

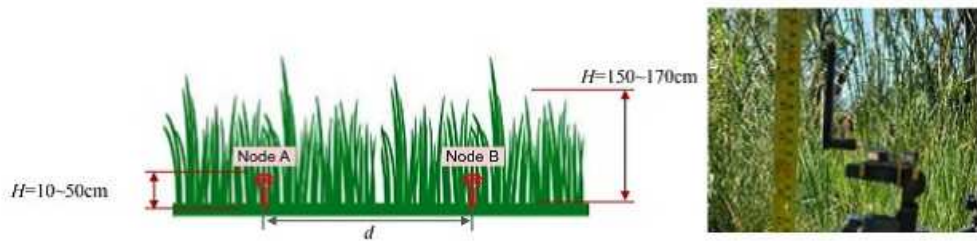


図 4.14: 通信における雑草の影響

本実験の結果を図4.15,図4.16に示す。PDRはPacket Deliver Ratioの略で、100[%]であれば全てのパケットを1回で伝播できたことになるが、100[%]以下の場合エラーとなって無線モジュールはデータ再送を行う。一般にはRSSIが-100[dBm]程度までであれば、通信が可能とされているため、-100[dBm]以上であれば複数回のデータ再送によりデータ伝播は完了する。

この再送回数についての考察は後述する。

4.4. センサーネットワークシステムアーキテクチャ設計

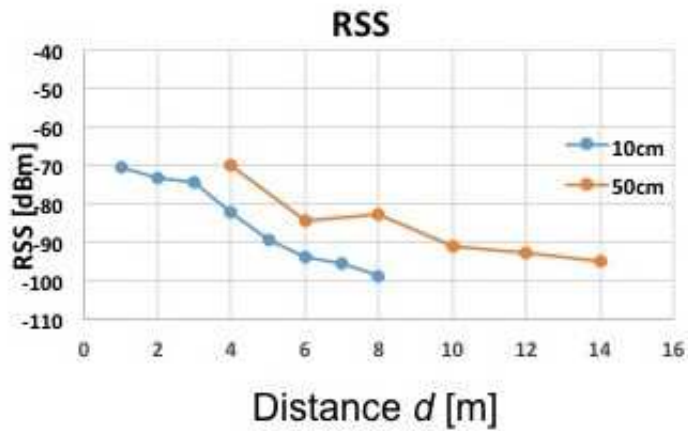


図 4.15: 雑草エリアにおける通信品質

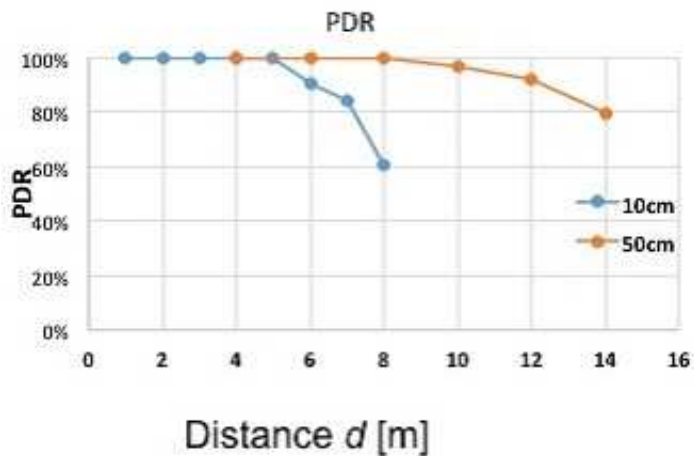


図 4.16: 雑草エリアにおけるデータ伝播特性

以上の結果から、雑草の多いエリアにノードを配置する場合、アンテナ高が 10[cm] 程度の場合繁茂期においては、5[m] ほどからエラーが頻発し、8[m] ほど離れた地点で電波到達できなくなり、2.1 の要望である 10~30[m] 間隔での測定を満たすためにはセンシングを行うノード以外に相当数の冗長なノードが必要となってくる。一方で、50[cm] 程度のアンテナ高が確保できれば 14[m] ほどまでは通信

が可能なことが判明した。

図 4.17 および図 4.18 は長距離伝播試験の結果である。

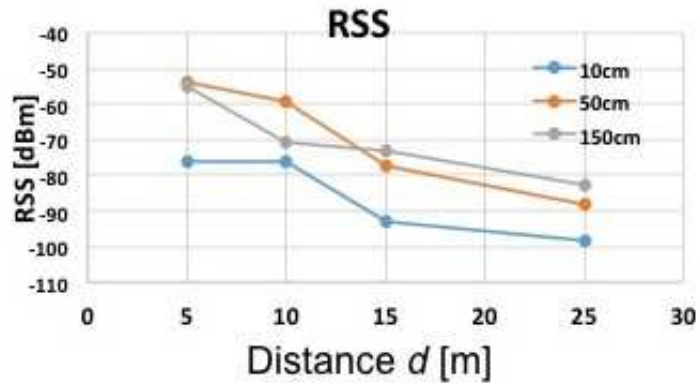


図 4.17: 長距離伝播における通信品質

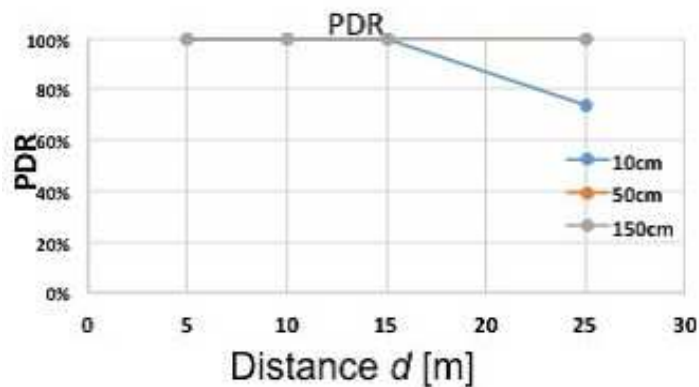


図 4.18: 長距離伝播におけるデータ伝播特性

このようなエリアは、図 4.1 エリアでの除草剤が撒かれて土壌が露出している範囲，あるいは図 4.3 エリア (実際には石垣上段のグラウンドのエッジ) のように周囲に障害物がないエリアでの通信品質およびデータ伝播特性となっている。この実験結果からは、前述の実験結果同様に、アンテナ高を現実的な高さに設定した

4.4. センサーネットワークシステムアーキテクチャ設計

場合、今回開発したノードの屋外環境における実効的な電波到達範囲を 25[m] までということが判明している。

ただし、要求仕様では測定間隔が最大 30[m] ほど離れているケースでは局所的に冗長なノードを配置すべき結果となっている。

図 4.19 は周囲に樹木が生えているようなエリアで、図 4.1 や図 4.2 の斜面に生えている木の影響を測定したものである。前述した雑草と異なり、樹木は水分を含むため電波障害の影響を否めないが一方で、樹木が生えているような箇所ではアンテナを比較的高所に設置することが可能となる。

この際、ノードのアンテナと樹木の位置関係の違いに着目し、それぞれ対面するケース、樹木により見通し上にならないケースを想定して実験を行っている。

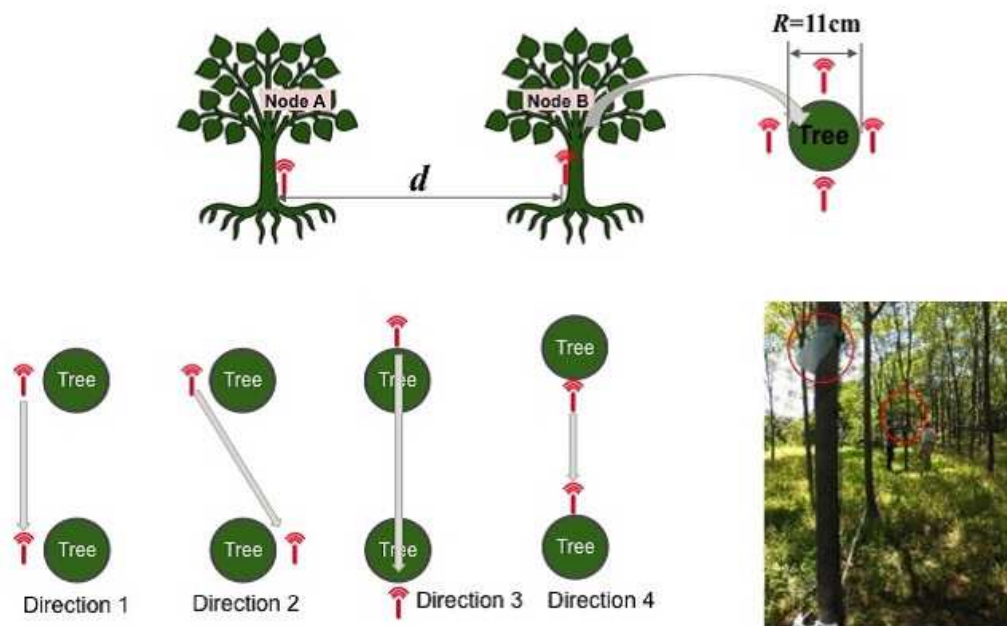


図 4.19: 通信における樹木の影響

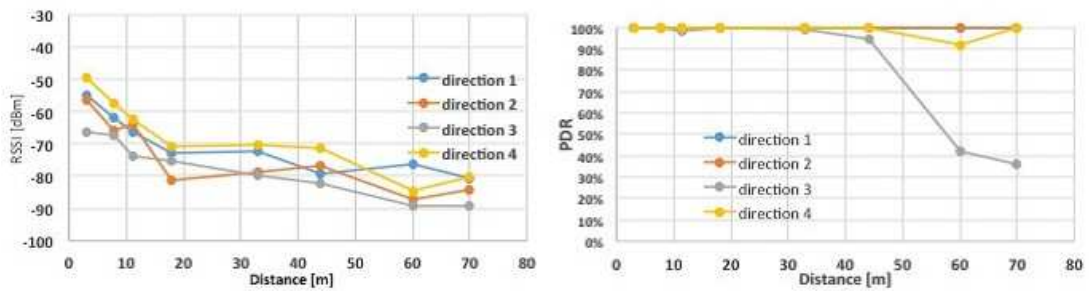


図 4.20: 樹木エリアにおけるデータ伝播特性

図 4.20 の結果から、電波到達距離はアンテナの高所設置により飛躍的に向上するが、アンテナが見通し上にないケースである Direction3 において、40[m] を超える距離から極端にデータ伝播率が劣化する結果を得られた。

また、図 4.21 は、PDR 値が 100[%] ではないものについて、RSSI から換算した LQI 値に基づいて、実際に測定したデータ再送信回数についてプロットしたものである。

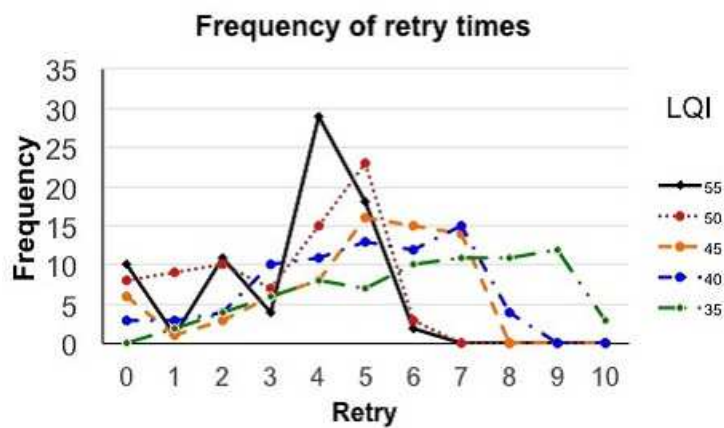


図 4.21: データ再送信頻度

4.4. センサーネットワークシステムアーキテクチャ設計

LQI 値が下がるにつれて、再送信回数は増加傾向にあるが、LQI 値の高低と再送信回数の直接の傾向は読み取れない。これは、距離や設置状態における通信品質の影響のほかノードが複数存在することによる輻輳の影響があるものと考えられる。

次に屋外設置環境でよく見受けられる段丘状斜面における電波特性について述べる。予備試験環境においては、段丘状斜面での電波特性測定を実施予定であったが、実際には前述した植生の影響や岩盤の組成の影響があるため、実地試験によるデータ収集ではなく 3D レイトレーシング¹ による実験を行い、シミュレーションへの入力値へとする手段をとっている。

図 4.22 は、典型的な段急斜面をモデリングし、パラメタとして、電波出力 (T_x) をパラメタとして電波伝搬試験を行った結果である。

このモデルでは、地盤組成、斜面角度、斜面長さ、平面長さがパラメタとして設定されており、初期値として乾燥土、30 度、10m、10m が与えられている。

¹EEM-RTM ツール。 http://www.e-em.co.jp/rtm/eem_rtm.htm

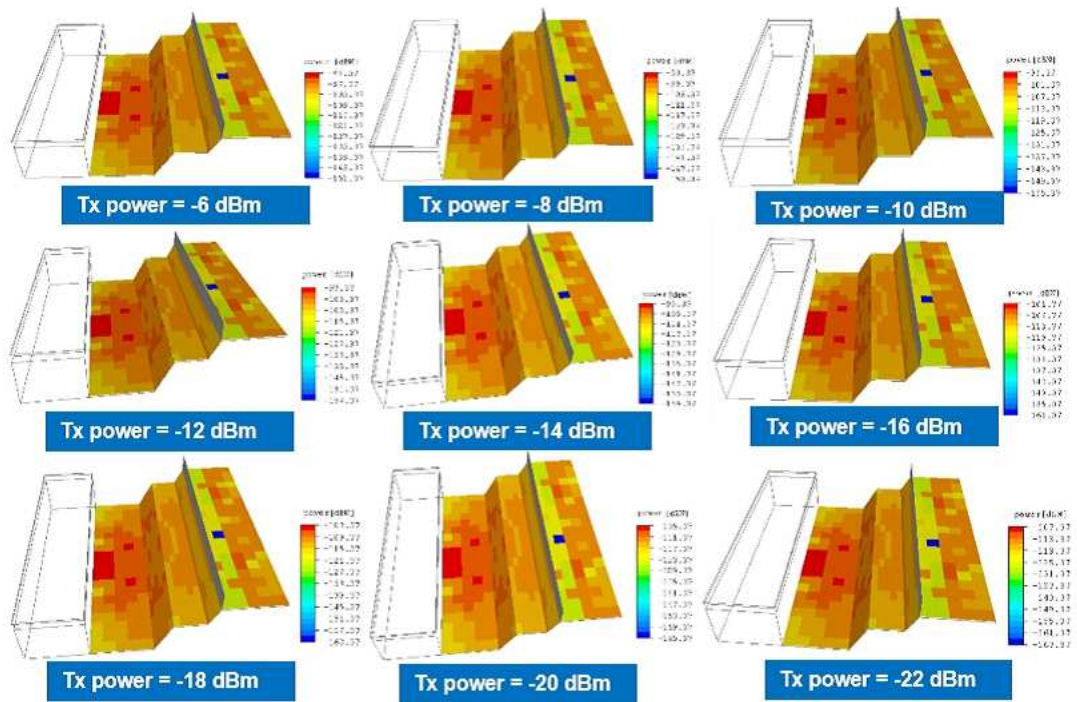


図 4.22: 段丘斜面状の通信品質

地盤組成のパラメタとしては、表 4.4 に示した各組成に対する電波に対する電導度を与えている。簡単には、組成に応じて電波の反射状態が変化することにより、電波の伝播特性が変化することを示しており、特に斜面設置の無線ノード間の通信特性の考察において非常に重要となってくる。

表 4.4: 地盤組成と電波電導度

	Relative permittivity(比誘電率)	Conductivity [S/m](伝導度)
Soil(dry)	3~7	0.0001~0.005
Soil(wet)	10~30	0.005~0.02
Concrete	3~7	0.01~0.1
Soil(dry)	8	0.01

4.4. センサーネットワークシステムアーキテクチャ設計

図 4.23 は、この段丘状斜面モデルの用例であり、この例では送信ポイント A からの電波強度 [dBm] を土の組成斜面で乾燥状態と湿潤状態での変化を表している。

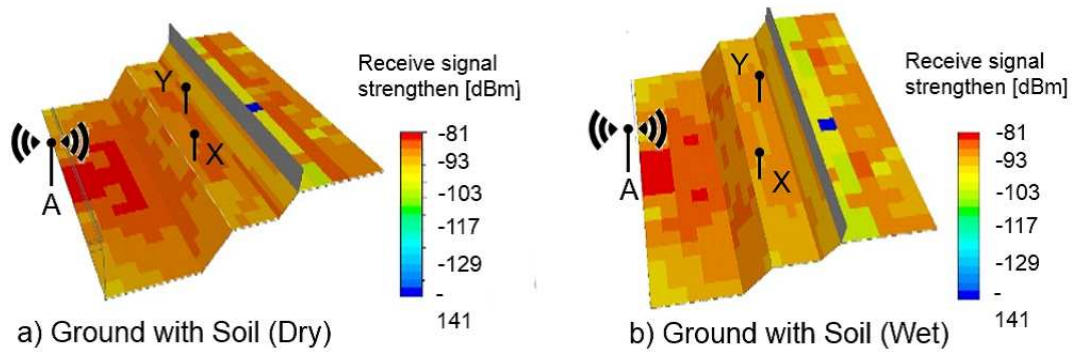


図 4.23: 段丘斜面状斜面モデルの用例

図の X,Y それぞれのポイントでは一見して大差はないようであるが、X のポジションでは -95 ~ -93 [dBm] Y のポジションでは、-93 ~ -81 [dBm] の値が得られている。一見 Y のポジションのほうが通信品質はやや良好に見えるが、土壌の乾湿状態により変化量の大きな Y のほうが不確定要素が増えることにより、より制御が困難なことがわかっている。

シミュレーションではこの結果をもとに通信品質による再送回数から導かれる乱数を発生させることにより、再送により影響を及ぼす電力消費の見積もりを行っていく。

以上の結果から、設置箇所における雑草や樹木といった植生の影響パターンを整理し、シミュレーションへのパラメタ入力としていく。

4.4.3 屋外環境における電力特性

今回の環境センサーネットワークにおけるソーラーパネルサイズの策定にあたり、発電効率の特性抽出は重要な課題となっている。しかし実環境では発電量は

天候や設置の周囲環境による日照状態の違いといった不確定な要素が多く，設計の探索は容易ではない。

そこで4.5の試験項目に従い，ソーラーパネルに対して日照条件を変化させて発電量について調査を行った。

表 4.5: 屋外電力試験仕様

評価環境	評価項目	パラメタ
自然環境	ノード周囲の植生の影響	パネル遮蔽物となる草木の状態による影の影響
	天候による影響	天候の影響
人工環境	常に日陰となる設置箇所	
バッテリー	バッテリーの放電特性	各環境における放電状態の影響

図4.24は，実際にエリア1屋外に設置したソーラーパネルの発電ログの一部（約1ヶ月間）である．一部実験箇所において夜間作業用の街灯が点灯した日の影響もうけているが，基本的には日照から日没にかけてサイクリックな発電状態を示している。

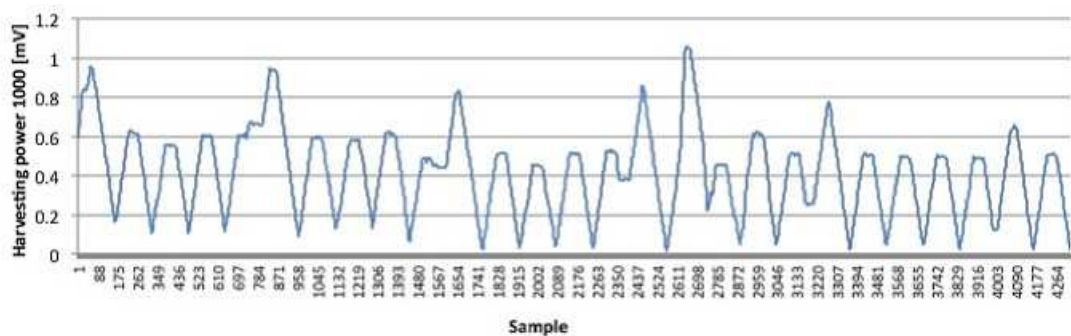


図 4.24: ソーラーパネルによる発電データ

4.4. センサーネットワークシステムアーキテクチャ設計

基本的にはこのグラフの時間積分値が総発電量となるのだが、第2章におけるお式(2.2)の評価を行う必要がある。

図4.25は今回実証実験を行った各エリアの日照時間の統計情報^{2,3}である。統計情報によると、日照時間の大小は各エリアでばらつきがあるが、亜熱帯気候に属する台湾北西部と亜寒帯機構に属する北海道との差分は大きくなく、最大で188[H]、最小で北海道で50[H]、台湾で70[H]となっているが年間平均では北海道で125[H]、台湾で117[H]と大差はない。一方で佐世保エリアは6月の梅雨時の日照時間低下以外は全般的に他のエリアに比べて高くなっている。

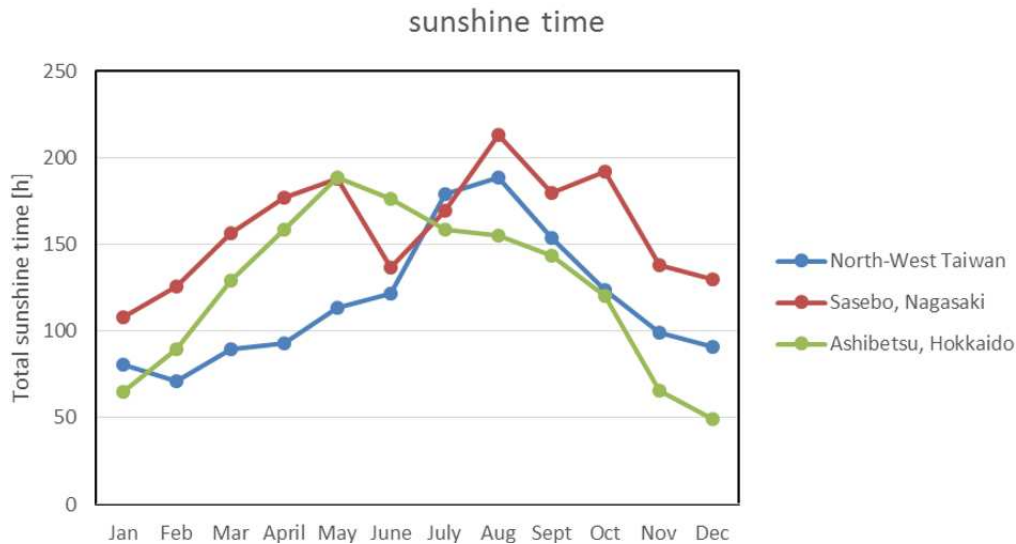


図 4.25: 実証エリアの日照時間統計

以上の統計情報から、必要なソーラーパネルのサイズを見積もるのだが、全体的に平均的な日照変化をしている台湾での日照パターンを基準に、統計上もっとも短くなる期間を基準としてパネルサイズの評価を行っていく。

図4.26は表4.5の設置条件の異なる10本のノードについて、エリア1において

²http://www.cwb.gov.tw/V7/climage/month/yMean/Taiwan_sunshine.htm

³<http://www.data.jma.go.jp/>

10[min] 毎の発電量測定を最も日照時間の短い1~2月の2ヶ月間測定した結果から、発電量の積算期間に対する発電量のばらつきを示したものである。

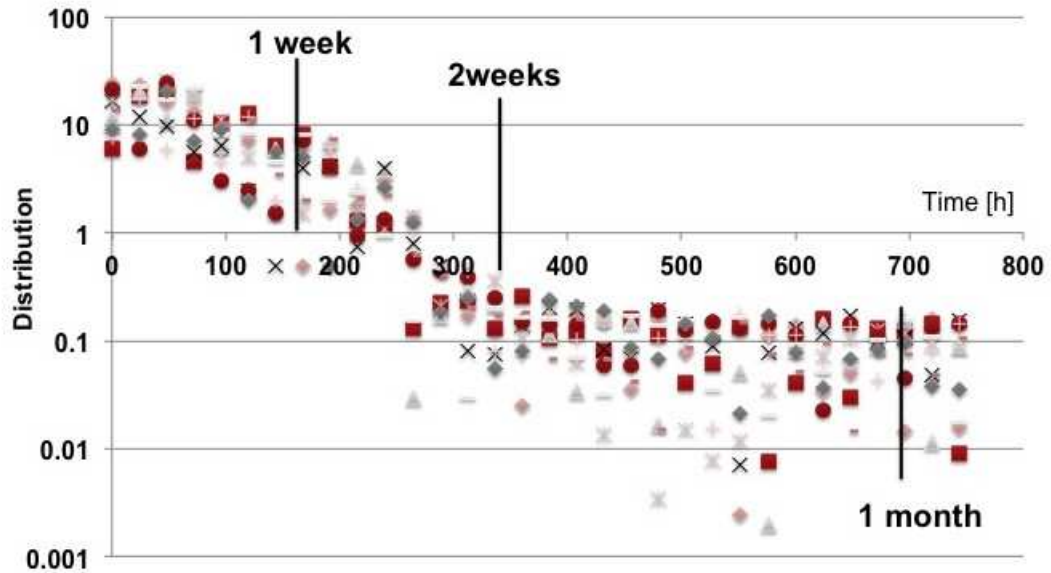


図 4.26: 発電量ばらつきの統計処理

このグラフにおける統計処理では以下のことを行っている。

- 各設置箇所における発電量データを連続した時間 $T(0 < T < 780[\text{hour}])$ で区切る
- 統計区間 T の発電量の標準偏差を求める
- T を横軸に、分散値を縦軸にプロットする
- T の統計処理を行う開始時点は任意とする

導出例としては、1週間(168[h])の発電積算量のばらつきを求める場合、全データの中から連続した168[h]をサンプリングして分散値を求める。このとき、デー

4.4. センサーネットワークシステムアーキテクチャ設計

々に偏りが生じないように、1週間分のデータを抽出するときには、全データから任意の1週間分のデータを切り出すこととなる。

例えば1週間の発電量で区切ると分散 σ の最大値は10、一方で1カ月では、0.2程度となる。

これはたまたま天候不良が続いた1週間と晴天の続いた1週間ではソーラーパネルによる発電量のばらつきが大きいですが、1カ月の積分値では天候の組み合わせは平準化し、分散 σ は小さくなるという経験則を定量化したものである。

また図4.27は発電状態について特徴的な3つの発電効率を示したものである。

たとえば、#1では日照状態もよく、晴天時には1日でソーラーパネル定格の35.2%の電力を発電し、草木の陰のノードや悪天候状態をしめした#2は24.9%、建造物の影など、常に日影に設置されたソーラーパネル#3は17.1%の発電期待値だったことを示す。

状態#1でも100%に近づかないのはほぼ発電不能な夜間も含むため、状態#3でも0%にならないのは常に日影でもまったくの暗闇にはならないためである。

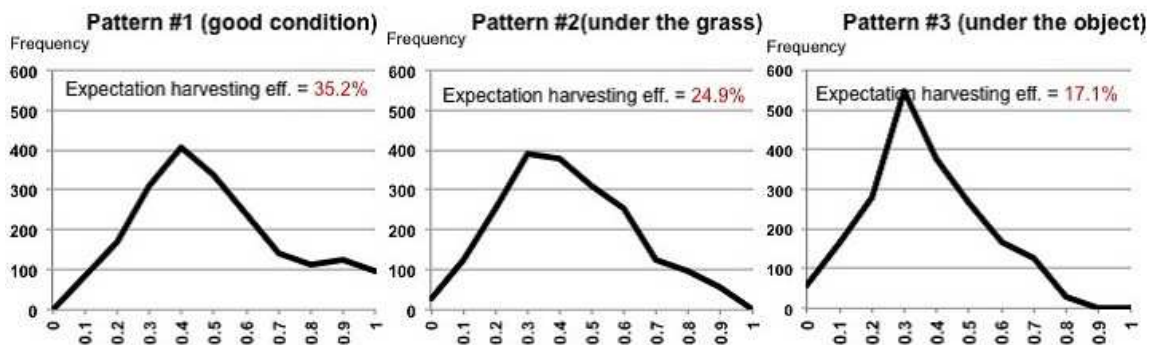


図 4.27: 発電パターン

各パターンの発電量（期待値）は表 4.6 のようになっている。

表 4.6: 各状態における環境発電期待値

状態	Condition	Expected ratio(E_r) [%] (peak = 100%)
#1	良好な発電環境	35.2
#2	草木の陰, あるいは悪天候	24.9
#3	固定物などの物陰	17.1

これらの分類は測定を行うエリアの地形や気象パターンの組み合わせ因子として活用する。

また、バッテリーの放電特性についての実験結果を図 4.28 に示す。

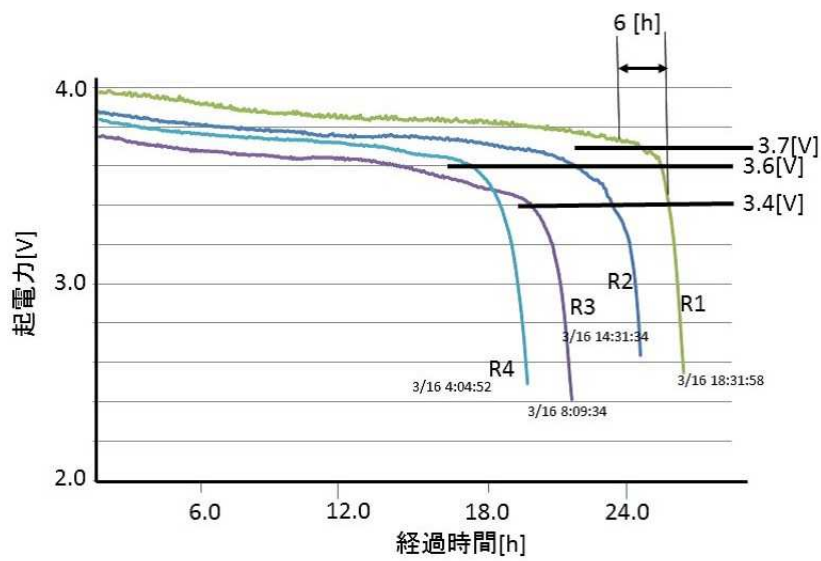


図 4.28: バッテリーの放電特性

図 4.28 では、バッテリー（市販の二次電池）に対して、満充電状態から最終的にどのような特性をもって残量が枯渇していくかを測定した結果となっている。実験ではバッテリーの起電力を測定する簡易的なセンサーネットワークを構築し、10

4.4. センサーネットワークシステムアーキテクチャ設計

分ごとに R1~R4 のデータを送信し続けるある種のセンサーネットワークシステムとなっており，当然ながらバッテリーの起電力がノードの動作所要電力に満たない場合は機能が停止し，データ送信が止まる仕組みとなっている。

ここで着目するのはいずれのノードにおいても，急激に電圧が降下を始めるポイントのばらつきが大きいことである．例えば，R1 では 3.7[V] から急激に電圧降下が発生するが，R3 は 3.4[V] から降下が起きている．R2,R4 は 3.6V となっている。

仮に電力枯渇状態の判定を定数でもってしまった場合，たとえば R1 のドロップ電圧 3.7[V] を用いた場合には，R3 は常に枯渇状態と判断されてしまう。

しかしながら，取得されたデータの共通点として起電力がドロップをはじめ，変曲点のパターンは共通しており，第 3 で提案を行った LQI/PS あるいは PS/LQI 法における，スケジューリング起動のトリガーとなる枯渇状態の閾値を策定するために用いる。

4.5 実運用シミュレーション

図4.8 ワークフローに基づいて、これまで述べてきた実験結果に基づく通信や電力に関する環境情報を入力としシミュレーションを行っていく。出力は通信や電力不良に起因するデータロス情報で、最終的には表2.1の要望を満たす最適なセンサーネットワークのアーキテクチャと冗長設計およびノードアーキテクチャの最後のモジュールであるバッテリーおよびソーラーパネルのサイズを探索していく。

長期観測する実証フィールドとして、図4.1の造成地(約300×150m)、および図4.2の道路切り通し斜面(30×10m)が与えられ、要望として5~30m間隔の測定密度で、10分毎の地下水分量および傾斜角を測定するという条件があげられた。

ノードが ΔT の周期で N 回サンプリング動作する間のソーラーパネルによる発電エネルギー J_H を式(4.1)(再掲)で与えている。

$$J_H = K_{Temperature} \times \sum_{n=1}^N \int_0^{\Delta T} h_n dt \quad (4.1)$$

期待値 p [%]で発電量が消費を上回ること、バッテリーが枯渇することなく、 N 回動作させる場合、これらの関係を数式化したものは式(4.2)(再掲)となり、 $1-p$ [%]が電力の観点からみたセンサーネットワーク全体の冗長度の指標となる。

$$P_{possibility} = \left[J_H - K_{Temperature} \times \sum_{n=1}^N \Delta E_n > 0 \right] \geq p \quad (4.2)$$

ここで、 N を求めるため図4.26から分散 σ による確率密度関数(4.3)に基づき、表4.6の発電期待値(= E_r)の結果からFig.13におけるバッテリー枯渇を発生させない確率、すなわち発電量が期待値を上回る確率を求めていく。

$$P(E_r \leq x \leq 1) = \int_{E_r}^1 \frac{\exp(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2})}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} dx \quad (4.3)$$

4.5. 実運用シミュレーション

表 4.7: 発電期待値の分散 σ に基づくバッテリーの生存期待確率

パターン (Exp. ratio)	分散値		
	$\sigma = 10$ (7 days)	$\sigma = 0.5$ (14 days)	$\sigma = 0.2$ (21 days)
Pattern #01(33.2[%])	58.1[%]	82.0[%]	92.6[%]
Pattern #02(24.9[%])	59.4[%]	85.6[%]	95.3[%]
Pattern #03(60.3[%])	60.3[%]	87.9[%]	96.8[%]

表 4.7 の結果は、たとえば 7 日間の積算発電量に着目した場合、日当たりのよい状態#01 の測定点では 58.1% の確率で期待の発電動作をし、逆に 41.9% の確率で電力枯渇を起こす可能性、日当たりの悪い状態#03 では 60.3% 期待 (39.7% 枯渇) があることを示している。

状態#03 では、もともと発電不良のため、さらに下回る確率は低いことがわかる。状態#01～#03 は設置したノードで固定的に決まるものではなく、天候によって#01 あるいは#03 になるため、実際のシミュレーションでは測定エリアの過去の天候の統計情報および日影を作ることとなる草木などの情報に従い、状態#01 から#03 を振り分けていくこととなる。

表 4.8, 表 4.9 は、シミュレーションの途中結果の参考として 7, 14, 21 日の期間すべてを Router として動作させたときに、表 4.2 から得られる基礎消費電力から、センサーネットワーク内での図 4.21 におけるデータ再送による遅延を考慮し $T_{windowtime}=30,60[s]$ の状態でバッテリー容量と、発電期待値を含んだソーラーパネル容量を求めたものである。

式 (4.4)(4.5) は発電積算期間を I_{Period} , ノード消費電力 ΔE , 発電期待値 E_r としたときに必要となるバッテリー容量を C_B , ソーラーパネル発電量を S としたときの関係式である。

$$C_B = E_r \times \Delta E \quad (4.4)$$

$$S = \frac{(C_B + \Delta E)}{E_r \times I_{Period}} \quad (4.5)$$

表 4.8: ex) $T_{windowtime}=30[s]$ のときのバッテリーおよびソーラーパネル設計

		7 days	14 days	21 days
バッテリーサイズ (3.7[V])		317.8 [mAh]	635.6 [mAh]	9543.5 [mAh]
Solar	Pattern #01(Exp. 35.2[%])	39.7 [mW]		
Panel	Pattern #02(Exp. 24.9[%])	56.2 [mW]		
	Pattern #03(Exp. 17.1[%])	81.8 [mW]		

表 4.9: ex) $T_{windowtime}=60[s]$ のときのバッテリーおよびソーラーパネル設計

		7 days	14 days	21 days
バッテリーサイズ (3.7[V])		544.9 [mAh]	1089.7 [mAh]	1634.6 [mAh]
Solar	Pattern #01(Exp. 35.2[%])	68.1 [mW]		
Panel	Pattern #02(Exp. 24.9[%])	96.4 [mW]		
	Pattern #03(Exp. 17.1[%])	140.4 [mW]		

以上から図 4.29 の概念図に従い第 2 のシミュレータによる解析で最終的にえられたセンサーネットワークアーキテクチャの探索結果を表 4.10 に示す。

4.5. 実運用シミュレーション

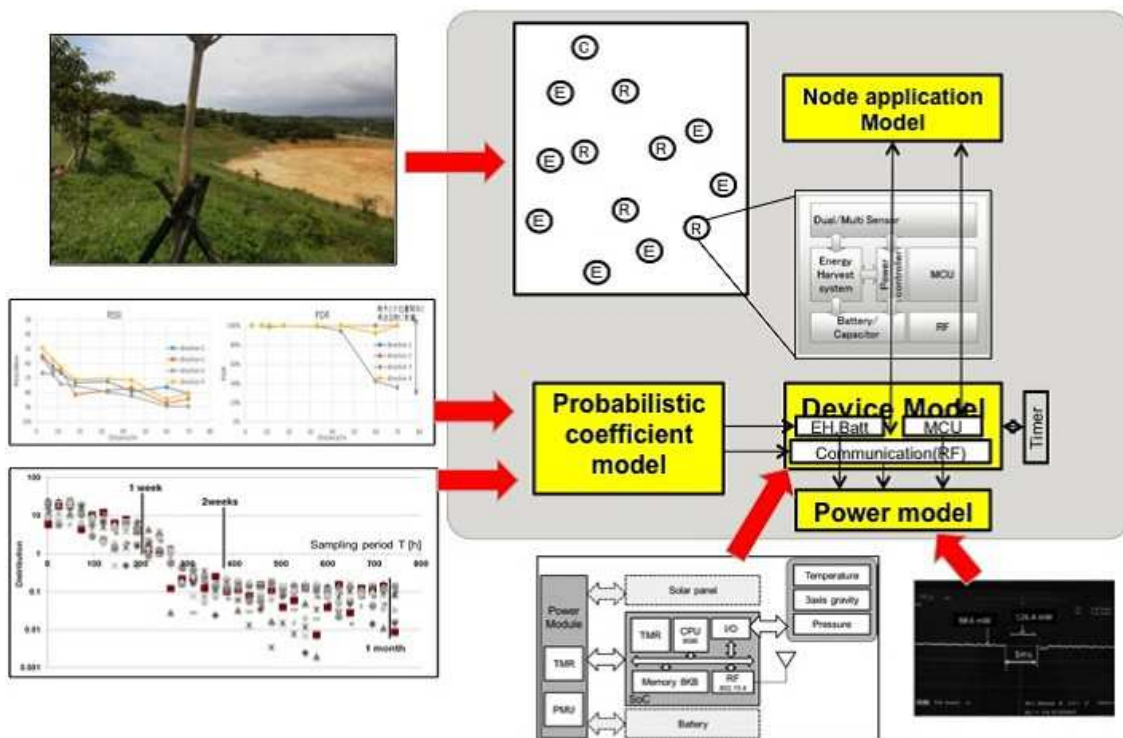


図 4.29: 適用現場パラメタとシミュレーション概念図

表 4.10: シミュレーションにより探索されたアーキテクチャ

	$N=1008(7\text{days})$	$N=2016(14\text{days})$	$N=3024(21\text{days})$
冗長度	49.3 [%]	19.6 [%]	6.2 [%]
造成地	90 [node]	72 [node]	64 [node]
切り通し斜面	15 [node]	14 [node]	11 [node]
バッテリーサイズ	1036 [mAh]	1141 [mAh]	2182 [mAh]
ソーラーパネル	186 [mWh]	191 [mWh]	213 [mWh]
総エネルギー量	93.2 [J]	81.9[J]	139.6 [J]
$T_{\text{windowtime}}$	38 [s]		

4.6 ソフトウェア・ハードウェア実装

本節では、各エリアでの実証実験について先立ち、実際に用いるソフトウェアおよびハードウェアについての実装仕様について述べる。

4.6.1 ソフトウェア実装

図 4.30 は実証実験を行うにあたり実装したソフトウェアの全体システムの構成図である。

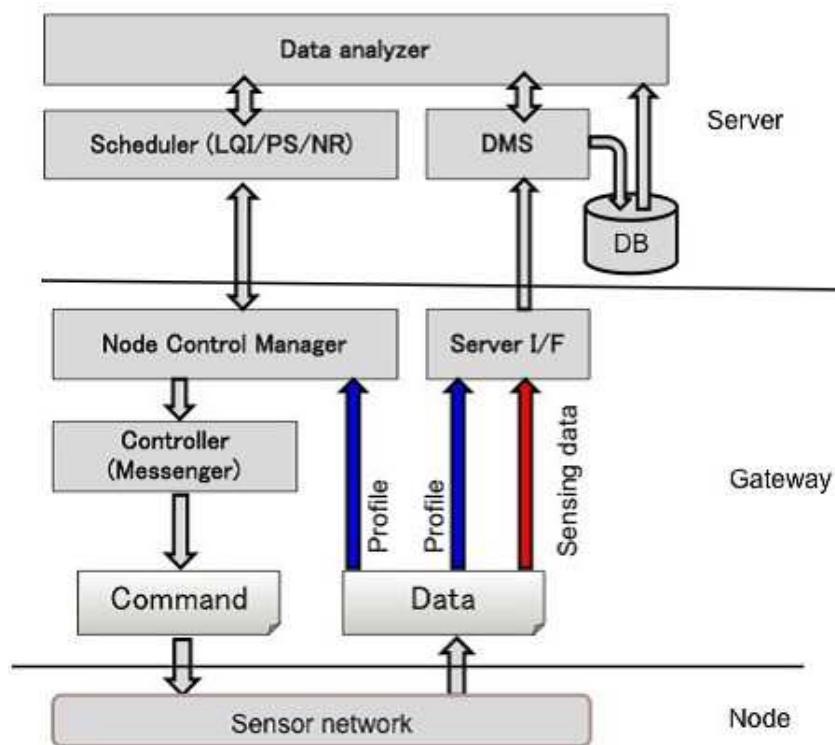


図 4.30: ソフトウェア全体構成

システムは全体で3つのパートで構成されており、表 4.11 に示したモジュールで構成されている。

4.6. ソフトウェア・ハードウェア実装

表 4.11: ソフトウェア構成

Server	Data analyzer	取得したデータを分析するフロントエンド。スケジューリングの結果のトポロジー構成なども GUI で表示され、ノード側の制御インターフェイスも持つ
	Scheduler	第 3 章で提案を行ったスケジューリングエンジン部。ノードからのプロファイルを入力とし、スケジューリング結果を出力とする。
	DMS	Data Manage Server. 第 2 章, 図 2.14 と同じモジュールでインターフェイスを同じくすることで、実センサーフィールドとシミュレータを共存可能にしている
Gateway	NCM	Node Control Manager. サーバで生成されたコマンドの中継およびノードから生成されたプロファイル情報をサーバへ中継する機能を持つ
	Controller	コマンドの Messenger で、NCM が生成したコマンドを接続するノードの無線モジュールのプロトコルに変換を行う
Node	Sensor Networks	実フィールドに展開されるセンサーネットワークで、センシングデータのほか、ノードの通信や電力情報などのプロファイルも送信する。

本論文における実証実験は国内での実験認可が難航したため、台湾において実施された。このためサーバ機能は協力機関である台湾工業技術研究院 (ITRI) 情報通信研究所キャンパス内に設置され、インターネット回線を通じ、現場設置されたゲートウェイおよびセンサーノードに接続される構成をとった。

本システムの特徴として、第3章で提案をおこなったスケジューラの判定エンジンを動作させるためにセンサーノードのプロファイル情報が必要となるため、プロファイル情報で取得する通信品質 LQI、バッテリー状態 PS(Power Status) および隣接ノード状態情報 (Neighbor Role) の情報もセンシングデータとともにセンサーノードからのパケットに乗せて集約を行った。

図 4.31 は実際に取得したセンシングデータとプロファイル情報を含んだログの一部である。

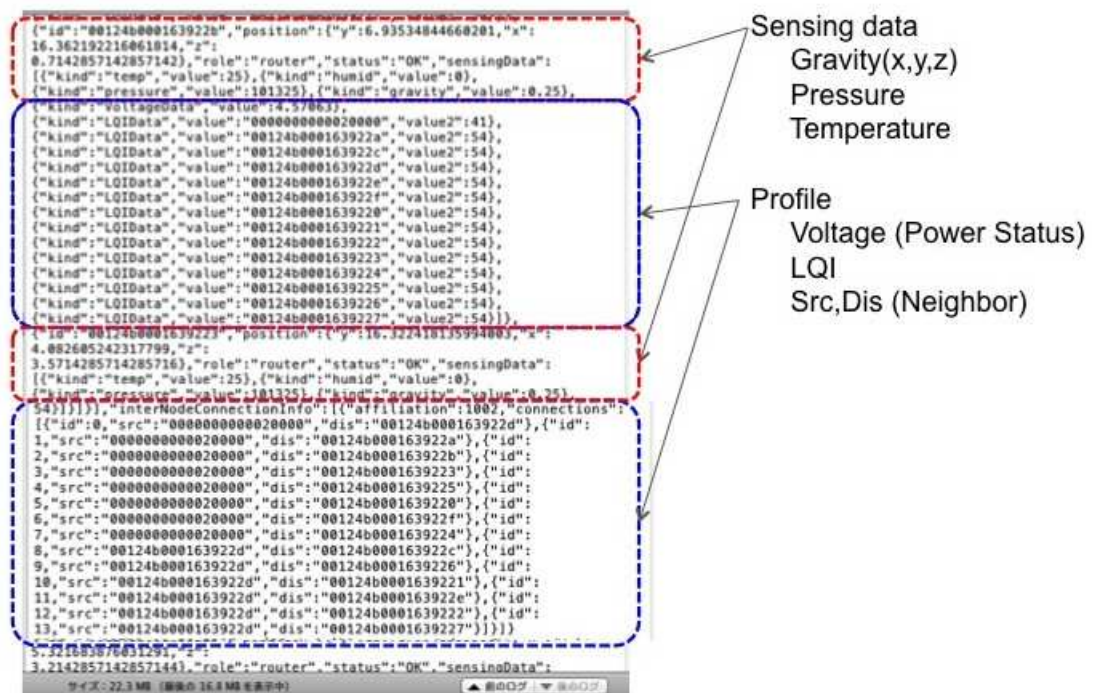


図 4.31: データおよびプロファイルパケットログ

4.6. ソフトウェア・ハードウェア実装

このデータは DMS 上で JSON 形式に展開して可読性を高めた状態のログである。センサーノードからは、1Byte の識別子と連続するデータ列のみで、実際には 20Byte ほどであるが、初期段階での試験運用の結果、多数のノードを高密度に設置した実験エリアではセンシングデータ (Gravity, Pressure, Temperature) に対し、プロファイル情報、特に隣接ノードにかかる通信品質 (LQI) と隣接ノード構成のデータが大半を占め、1 回の処理で 1 ノードあたり 200Byte をこえたため、最終的には常時取得するのはバッテリー状態である Voltage 情報のみとし、LQI や NR 情報についてはスケジューリングを行うときのみ収集するものとして通信パケット量を押しえ込むこととした。

最終的にはスケジューリングを行うためにプロファイル情報を収集することが通信量に対する外乱になる恐れがあったが、上記対策では通信品質によるデータ再送信の外乱に隠蔽されたため、特に考慮は行っていない。

4.6.2 ハードウェア実装

図 4.32 葉今回の実証実験を実施するために開発したセンサーノードである。センサーノードは 13cm 四方のケースにソーラーパネルとアンテナを装備し、チップおよびバッテリーは全てこのケースの中に収められ、最長 100cm の水圧パイプ (suction pipe) が接着されており、センサーはパイプの根元に装着されている。このステッキ型のセンサーを測定現場に 5~30m 間隔で設置した。

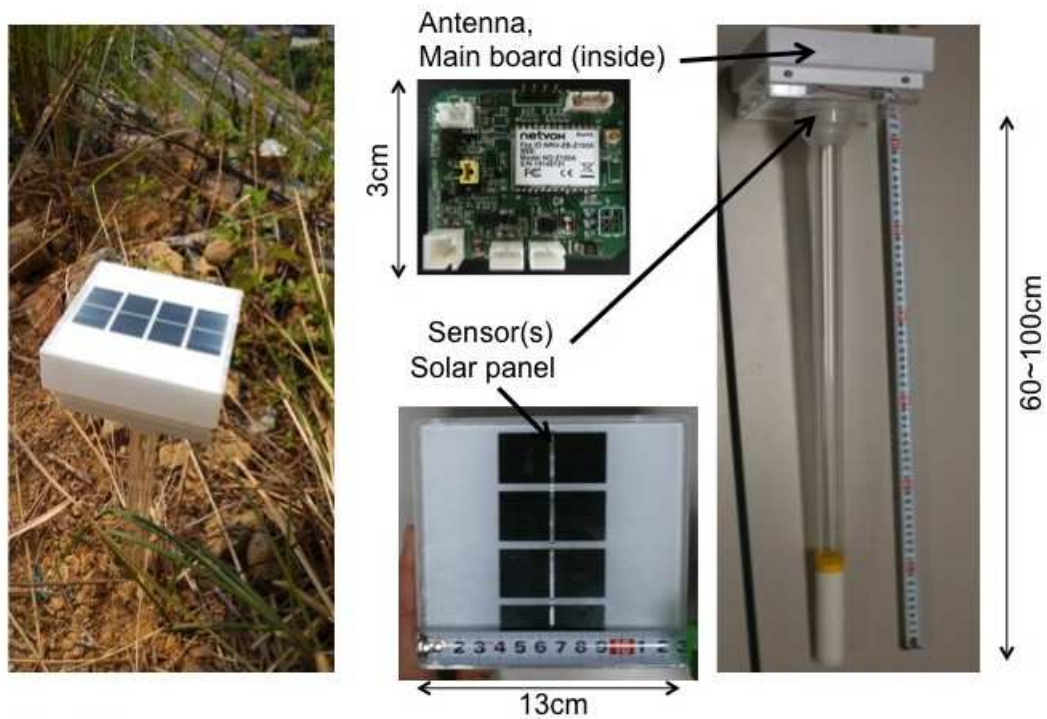


図 4.32: 開発したセンサーノード外観

このステッキ型のセンサー装置そのものは土木領域では古くから用いられるテンシオメーターと呼ばれる方式で、図 4.33 のようにパイプに空気層を残した状態で水を注入した状態で封印し、これを土中に埋設する。

パイプの先端はポーラスカップと呼ばれ、水分の出入りが可能なセラミック製で埋設した土壌が乾燥状態になるとパイプの水位が下がり、空気層に設置した圧力センサーの計測値は下がり、土壌が湿潤状態になると、パイプ水位が上がり圧力センサーの値があがる、負圧測定方式とも呼ばれる。

4.7. 現場実証実験と実験結果

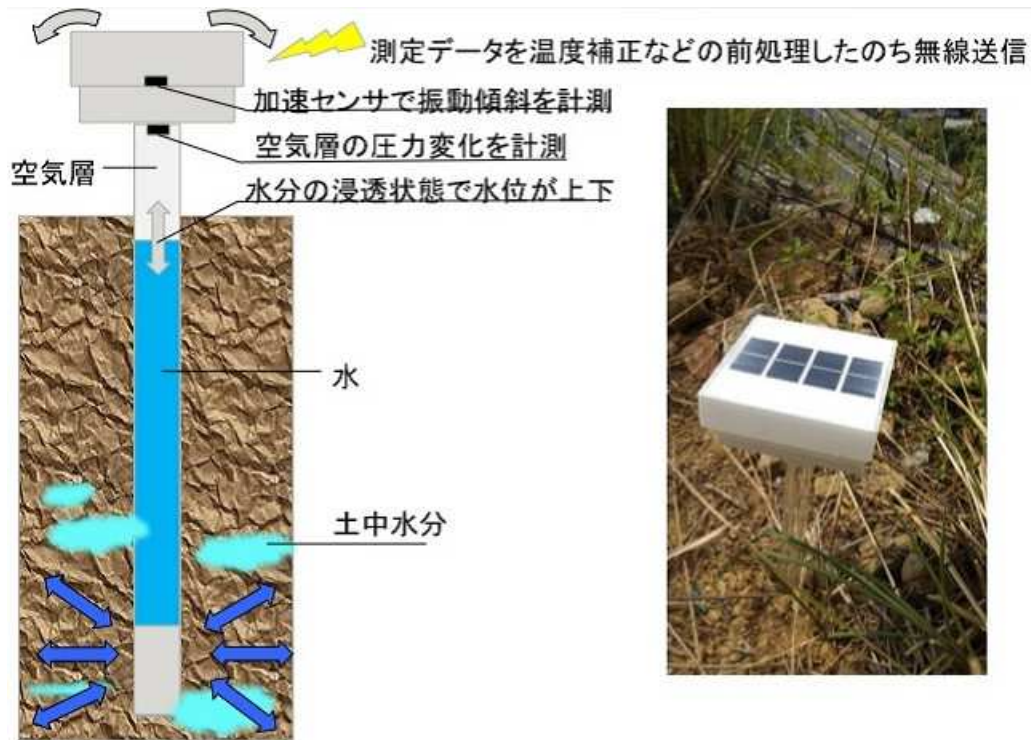


図 4.33: センシング構造

ノードのアーキテクチャ設計におけるソーラーパネルとバッテリーサイズは、表 4.10 において総エネルギー量が最小となる 14 日を 1 単位として動作する電力設計を行っている。

具体的には、実装したソーラーパネルは 200[mW](50 × 110mm)、バッテリー試算では 3.7[V] 1.2[Ah] が最適であるが、経年劣化を考慮して実際には 3.7[V]3.2[Ah] のものを選択している。

4.7 現場実証実験と実験結果

本節では、各エリアでの実証実験とその実験結果おとび考察について述べる。

4.7.1 台湾エリア実験

予備実験ならびに現場対応したシステムアーキテクチャ探索のシミュレーションは2013年12月～2014年4月まで実施，現場設置によるモニタリング実験は2013年5月から2014年4月まで台湾エリア1～3の各地で行われた[山下15]．

図4.34，図4.36はエリア1造成地およびエリア2の切り通し斜面に設置後の状態．図4.35は運用時の図2.14におけるGUI画面のエリア1のスクリーンショットとなっている．

なお，土地のプライバシー保護の都合上，現場の容易な特定に問題があるため，写真の一部に加工を施してある．

約1年間の運用の結果，シミュレーションの結果と同様に発電および消費のバランスを保ち，表3.6に示したとおり，収容率は100%を切るケースや，式(4.5)における発電量が消費量下回るケースもあったが，全体的には要求仕様のデータを満たす範囲で電池交換などのメンテナンスをすることなく，2015年4月現在モニタリングを続けている一方，約1年経過後のバッテリーの状態は実験開始時とほぼ変化がないことから，このシステムは装置的な寿命限界まで稼働し続けるものと想像できる．本論文における収容率とは，冗長ノードを含む全てのノードが設定した周期・期間でエラーなく動作したときのデータ数を100%とした場合の，実際に収集できたデータ数の比率である．

4.7. 現場実証実験と実験結果



図 4.34: 開発したセンサー設置状態 (エリア 1)

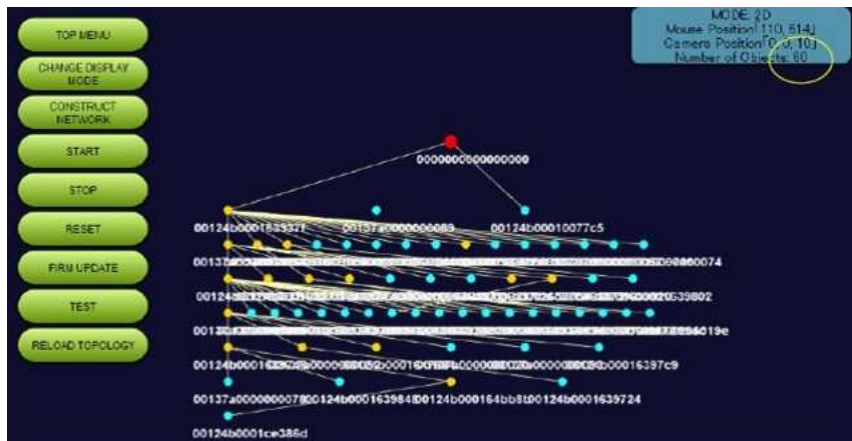


図 4.35: 運用中の GUI スクリーンショット (エリア 1)

本試験エリアでの実証では 60 ノードによる計測に対し、シミュレーションで得

られた 19.6%の冗長性すなわち 72 ノードによる運用が行われた。通信品質については、全ノード設置箇所は見通しが良く、低い雑草に覆われたエリアであるため安定しており、シミュレーション結果ではどのポイントでも PDR はほぼ 100%を示しており、理論的にはソーラーパネルによる発電期待値のエラーを冗長ノードでカバーするアーキテクチャとなっているが、実際にはデータ収容率の平均は 91%となっている。

実際には、試験展開エリアが学校敷地内であったこともあり、試験中ノードへのいたずらなどによる破損の問題が発生し、事前設計に考慮されていない外乱がデータ収容率へ影響を及ぼしたものと考えられている。



図 4.36: 開発したセンサー設置状態（エリア2）

参考までに ITRI キャンパス内に設置された監視センターのデータベースで実際に取得している地下水分圧データについて、エリア 1 における特徴的な 2 ノード

4.7. 現場実証実験と実験結果

の結果を図 4.37 に示す。

なお、本論文の趣旨ではセンサーネットワークをいかに最適に設計するかに主眼を置いている一方、実験データの特質として、協力者の私有地の環境データを採取している都合上、詳細の環境データについては制限付公開(部分公開)となっている点については了承いただきたい。

今回の実験で、傾斜データも併せ、通年で述べ 600 万個以上のデータの自動集約に成功している。

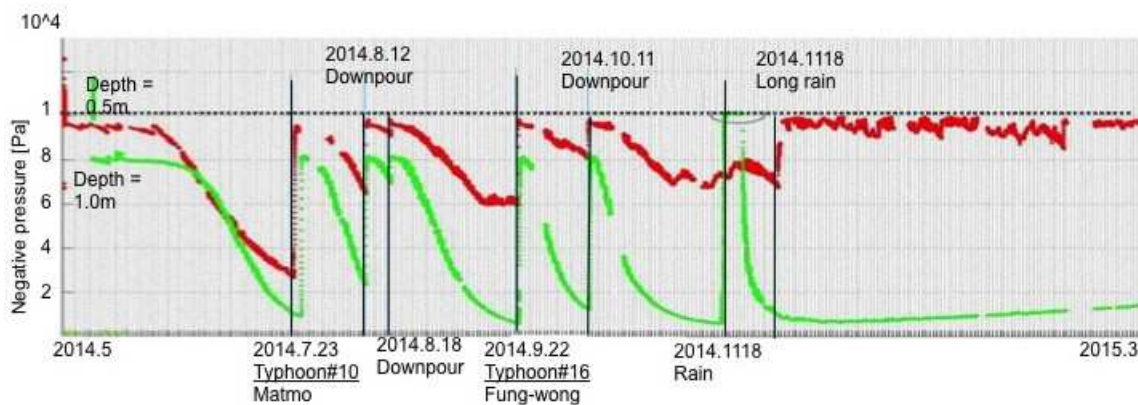


図 4.37: 観測データ (エリア 1・抜粋)

この観測データは、図 4.33 の圧力センサーによる水分量のデータで、測定地盤が乾燥状態にある場合には圧力は低く、湿潤状態にある場合には高い値を示すことで地下の水分量の状態を示している。

通常監視による概観検査では、晴天が続き地表面が乾燥状態にあっても、地盤自体が保水状態にあるかどうかは判断が困難なため、センサーにより水分がどのような時間で蒸発や浸透していくかを観測したデータである。

グラフは隣接する特徴的な 2 点の通年の観測結果で、測定深度 50cm および 100cm のものとなっている。計測期間中 2 回の台風 (2014 年 7 月 23 日台風 10 号, 2014 年 9 月 22 日台風 16 号) の影響のほか、8 月 12 日, 8 月 18 日および 10 月 11 日と

いった集中豪雨などによる水分量の変化を時系列でとらえることに成功している。

また、2014年11月18日以降、秋雨の影響後、深度0.5m観測点の水分量は高い値を保ち、100cm観測点は低い値を保っている。このデータは現在土木と地盤の専門家が分析を行っているが、深度100cmのデータは雨が降っても、毎回一番低い圧力状態まで復帰しているが、50cmのデータは雨がふる度に高い数値までしか戻らないことから、非常に長周期かつ断続的な雨の影響により帯水状態が高まっている可能性が読み取れるという。

4.7.2 九州エリア実験

エリア4である九州佐世保エリアでの実証実験は2015年10月から2017年2月現在まで段階的な改良を加えながら実施されている[YKL+16]。

この実証実験エリアでは、図4.38に示すように、東西に走る国道と河川の北側上流に位置するエリアで、国道沿い居住地区からおよそ1kmほど離れた位置に形成されている。

4.7. 現場実証実験と実験結果

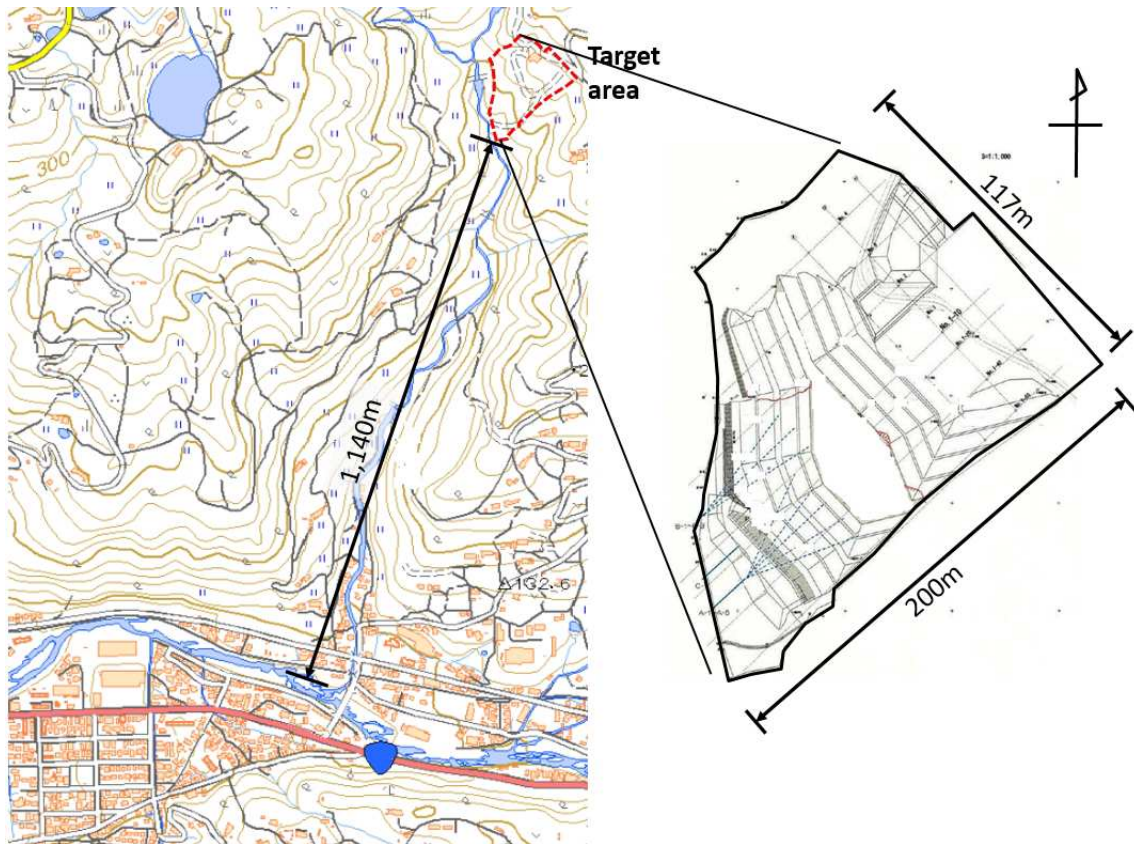


図 4.38: エリア 4 ロケーション

ここでは従来より主に瓦礫産業廃棄物を山間部の切土傾斜地に投機埋め立てする場所で、埋め立てに平行して流出を防ぐための赤土による盛土保全が断続的におこなわれてきたが、数年前の台風水害時において、堆積層のはらみだしが観測され居住区域の河川上流に位置するため、行政により観測対象となり、継続的な調査としてデータロガーによる観測が行われてきた。

地形としては、高低差およそ 50m、最大傾斜 40 度ほどにもなる階段状の斜面を形成しており、図 4.40 のように観測井に常設された間隙水圧計 P(Pore water pressure gauge)、湿潤土壌水分吸引計 T(Tension meter)、土壌水分計 S(Soil moisture meter) が稼働している。

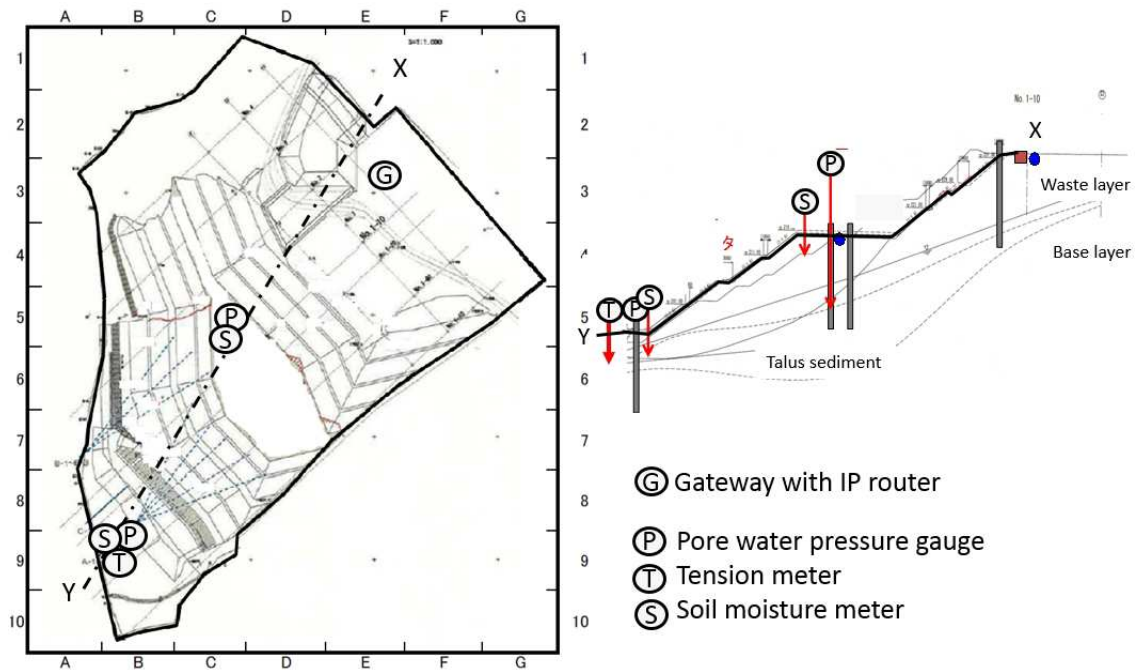


図 4.39: エリア 4 地形と既設センサー位置

この計測プロジェクトでは、このロガー式の既設センサーをネットワーク化し、自動でデータ収集しつづける仕組みを構築するものである。

しかしながら、このエリアでは、図 4.41)~3) のように行政による対策工事が並行して行われており、図 4.40 のように工事区域に沿うように機器設置制約があるため、設置計画においても中継ノードを設置する際にはこの制約に従った計画が必用となる。

4.7. 現場実証実験と実験結果

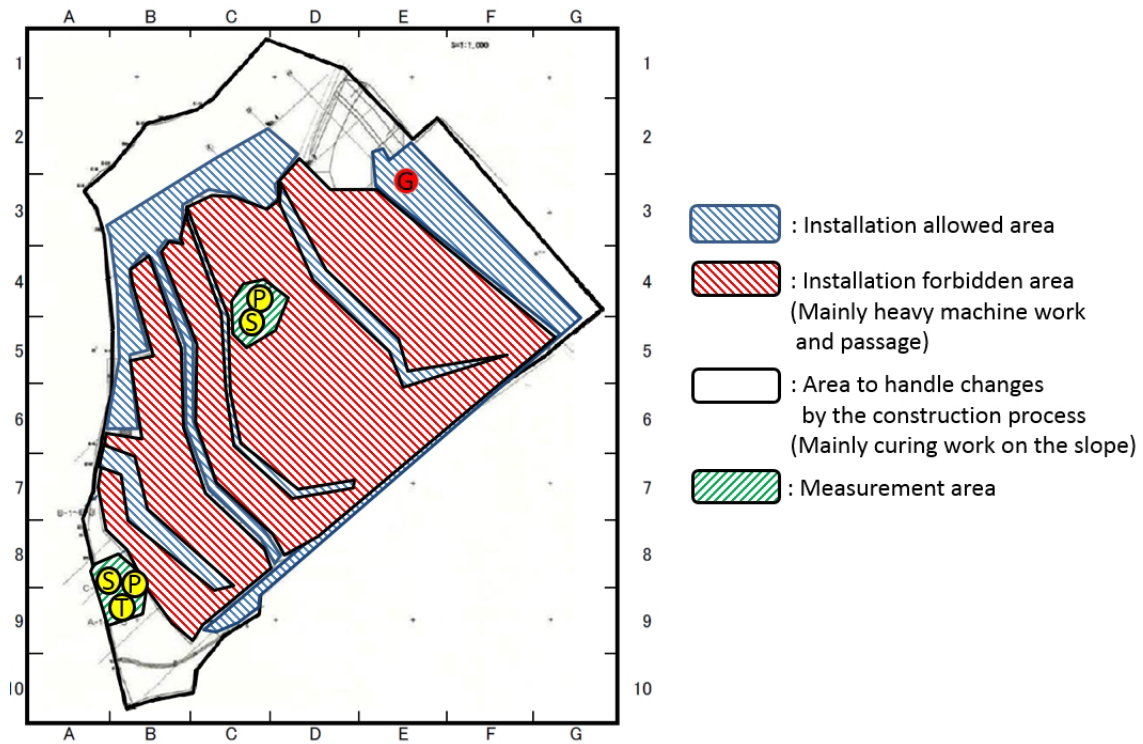


図 4.40: エリア 4 設置制約

このエリアにおけるシミュレーション結果では、図 4.41 に示すように既設センサーに対し、大量の中継ノードの候補ポイントが得られた。これは、工事個所を縦断する中継ルートのほか、エリアの外周を迂回するような中継ノードの設置を示唆するものであったが、迂回ルートに中継ノードを設置する場合、中継ポイントにおいて多数の冗長ノードが必要となってしまう。

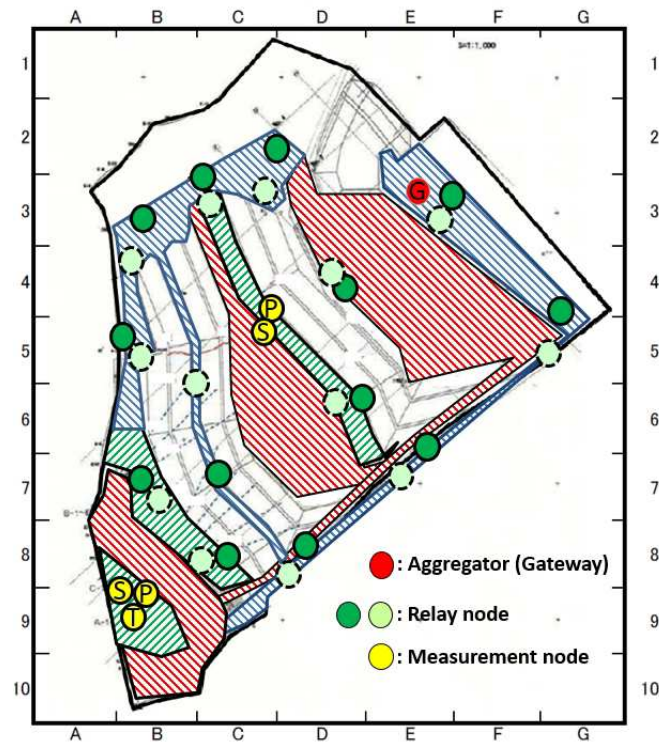


図 4.41: エリア 4 シミュレーション結果に基づく中継ノード位置

そこで、実際の設置においては、冗長度が最小となる工事箇所を横断するルートを選択した。このルートでは、既設センサー 5 箇所に対して、最小中継ノード数は最上段から中段 P,S までの 1 箇所、中段 P,S から最下段 P,S,T までの 2 箇所の合計 3 箇所 (計 8 ノード) であるが、これらの中継パスに冗長性をもたせ、図 4.42 に示す全部で 7 つの中継ノード (計 12 ノード) の設置、すなわち約 40% の冗長度をもって運用することとなった。

4.7. 現場実証実験と実験結果

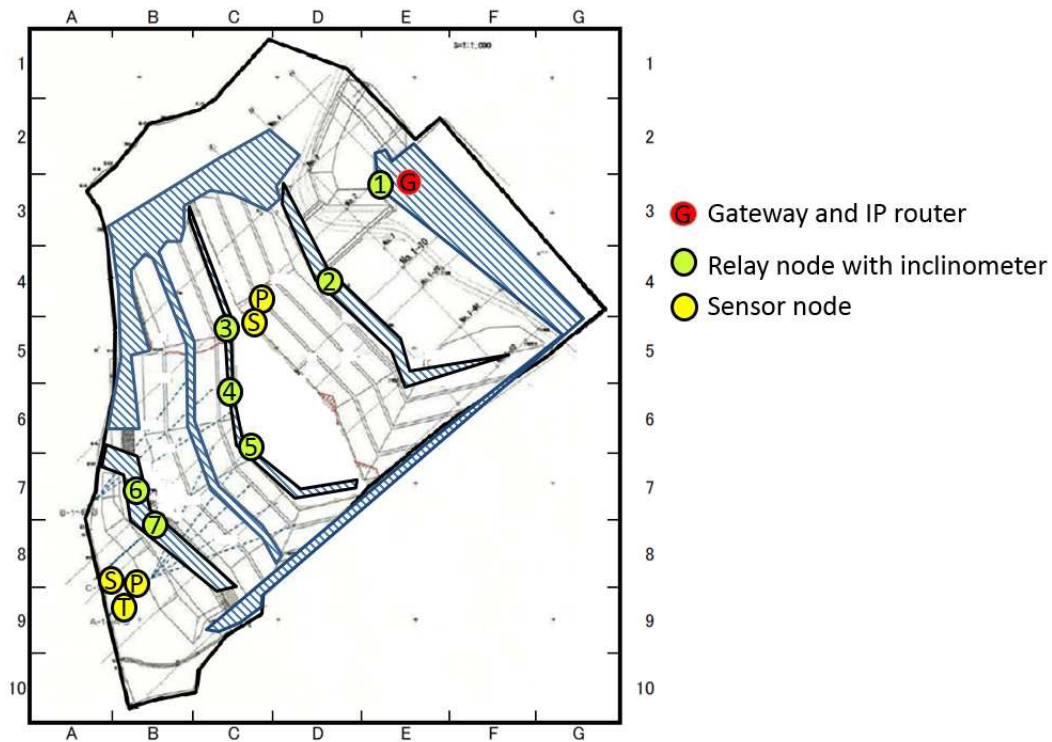


図 4.42: エリア 4 設置中継ノード (冗長度 40%)

ここで着目すべきは中段センサー P,S から最下段センサー P,S,T の間の中継ノード設計にあたり図 4.22 における段丘型地形のシミュレーションを実施したのだが、このエリアの実際の地形は図 4.43 にあるように、最大傾斜 40 度の崖面の地形で、センサーノード相互で直視位置にならない状態になっており、シミュレーション結果においても工事による設置制約に従ったノード距離では、PDR は 60%程度となくなってしまったためである。

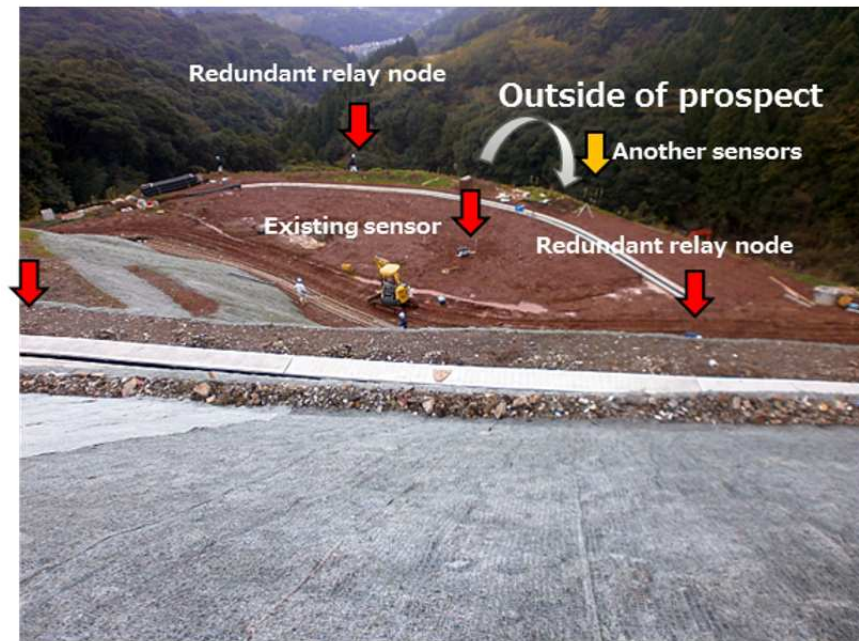


図 4.43: エリア 4 現場地形写真（最上段～中段）

前述した既設センサーをネットワーク化するため、エリア 1 でも用いた同一のハードウェアの外部入力へ接続する形で図 4.44 のように設置されている。

4.7. 現場実証実験と実験結果

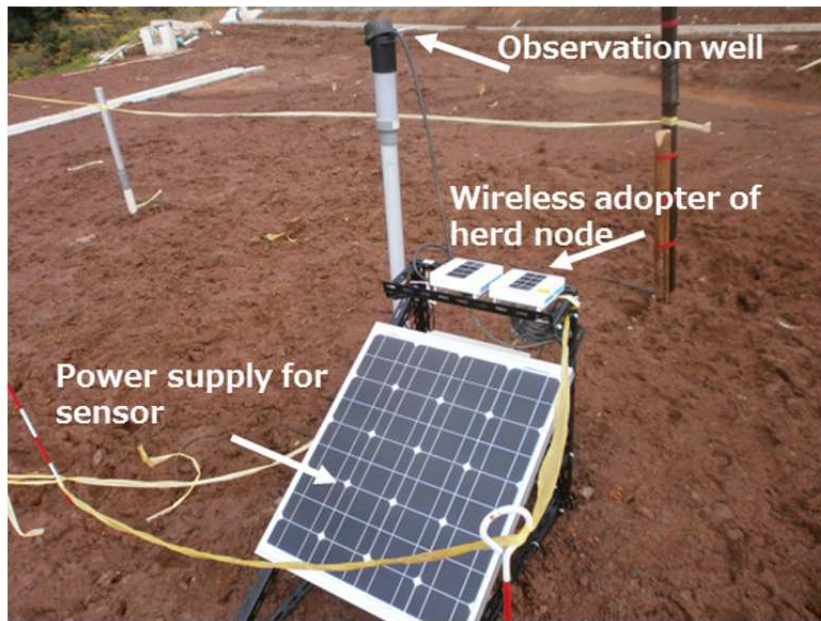


図 4.44: エリア 4 既設センサーの接続 (中段 P,S)

このエリアでのデータ収容率 (Data Collection Ratio) を図 4.45 に示す。現場の特殊性から、工事作業や既設センサーのメンテナンスが2~3 カ月単位で実施されており、表示しているデータは本論文執筆時の直近の2 か月でのデータ収容率を示している。

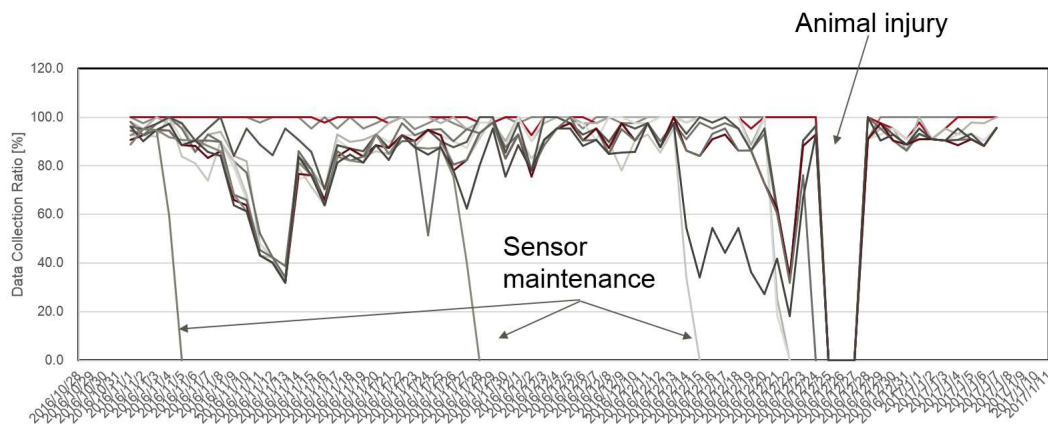


図 4.45: エリア 4 データ収容率

不定期のメンテナンスによりノードの入れ替え等が行われているが、全体を通してのデータ収容率は80%を越えており、事前設計に対する誤差は20%であった。

また図4.46は2016年12月27日頃に異常を検出しシステムを一時停止後ののときの写真である。土壤水分計(S)において発生したため、大量の水が出て何らかの災害が発生したかと考えられたが、天候は概ね良好な状態が続いており、12月29日に現場確認を行った結果、イノシシなどによりケーブルが食いちぎられたことによるショートであることが判明した。

4.7. 現場実証実験と実験結果



図 4.46: エリア 4 獣害 (Animal injury) によるシステムトラブル

その前段でもデータ収容率が低下している不安定な状態が発生しており，モデルにおいて考慮を行っていない獣害による動作環境外乱と考えている．

スケジューリングの稼働状況について，考察を行う．図 4.47 は実際の現場からのバッテリー電圧プロファイル情報をモニタリングしたデータから 2016 年 11 月 5 日から 2017 年 1 月 7 日を抜き出したものである．

凡例の 9280～9832 は，ノード ID を示しており，この 5 つのノードは，それぞれ図 4.42 の中継ノード 3～7 に対応している．

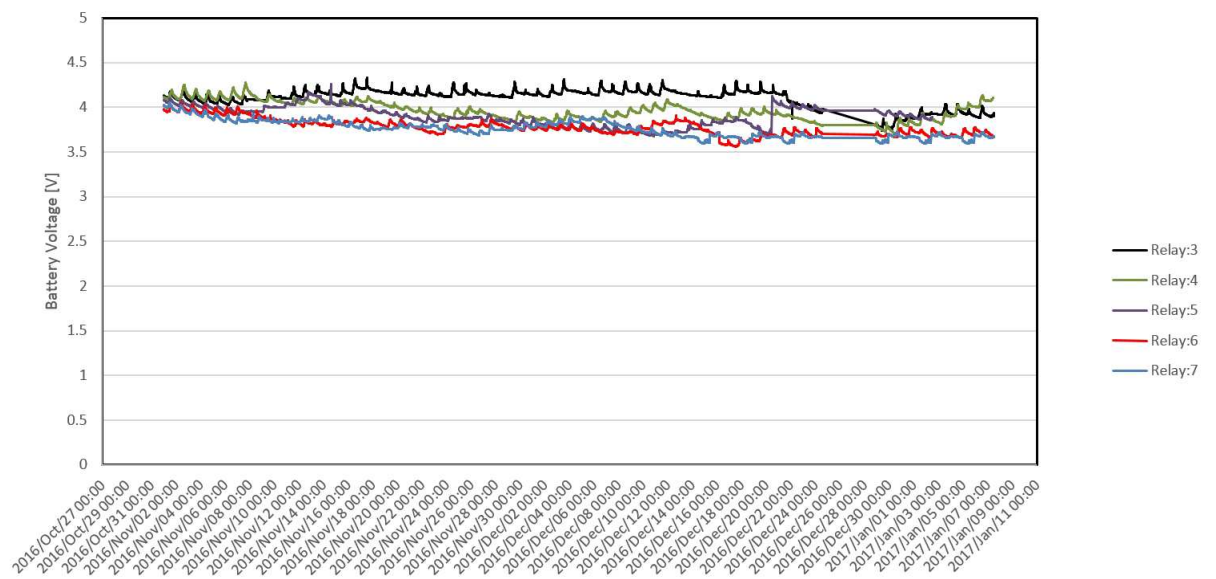


図 4.47: エリア 4 バッテリー電圧

バッテリー電圧は全般的に 4[V] 前後を推移しており全体としては安定しているが、中継ノード 6,7 に着目し、11 月 6 日～12 月 11 日の区間を切りだした電圧推移を図 4.48 に示す。

中継ノード 6,7 は配置図からもわかるように隣接しておかれ、日照条件は同一である一方、電圧は互いにクロスしながら推移していることが読み取れる。

4.7. 現場実証実験と実験結果

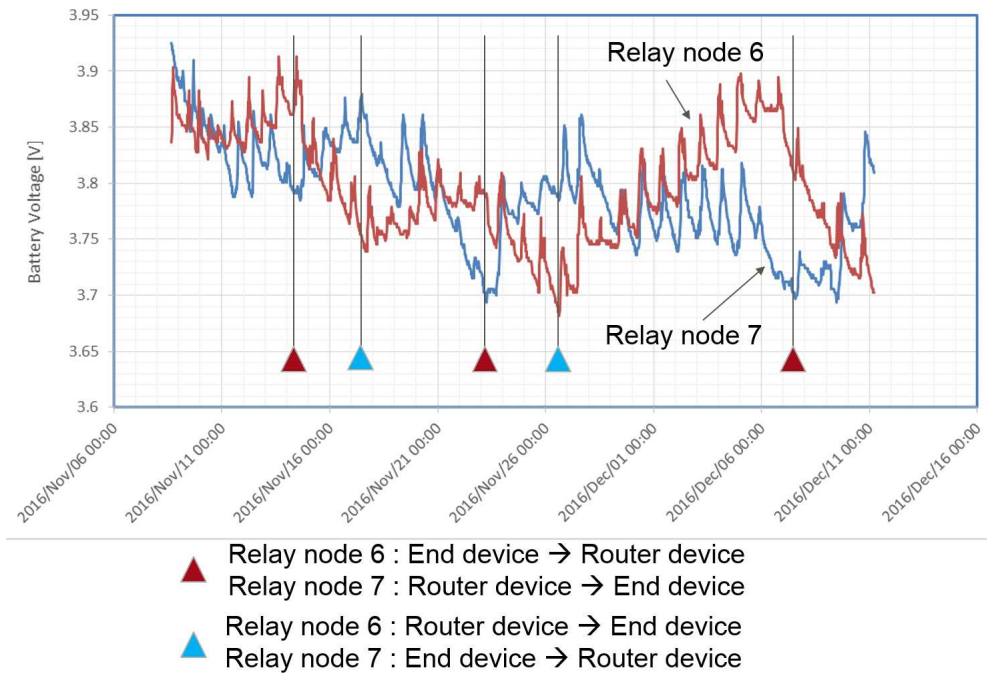


図 4.48: エリア 4 バッテリー電圧 (中継ノード 6,7)

このクロスしながら推移する傾向は、Role の違いによるもので、同一環境下においても Router device (中継を許可) のほうが End device (中継不許可) よりも消費電力が大きい傾向が直接グラフの傾向に現れている。

図中の補助線は、それぞれの電力状態から PS/LQI 法により枯渇状態の判定が行われ、電力モードの変更が行われたポイントを示している。

また、図 4.49 は同様に中継ノード 6,7 の 2016 年 4 月 3 日から 2016 年 4 月 17 日までの三軸加速計データを抜粋したものである。中継ノードに搭載される三軸加速計はあくまで補助的なデータを試験的に観測しているものである。

三軸加速計のデータによると、4 月 7 日に中継ノード 6 では全軸方向に力が加わり再び元のポジションに戻る傾向が、中継ノード 7 では x,y 軸における連続的なひっぱり力が働いて、実際には徐々に傾く傾向が読み取れる。

参考までに図中4月16日は熊本大震災が発生した日であり、観測現場でも震度4の強い揺れがあったことがデータからも読み取れる。

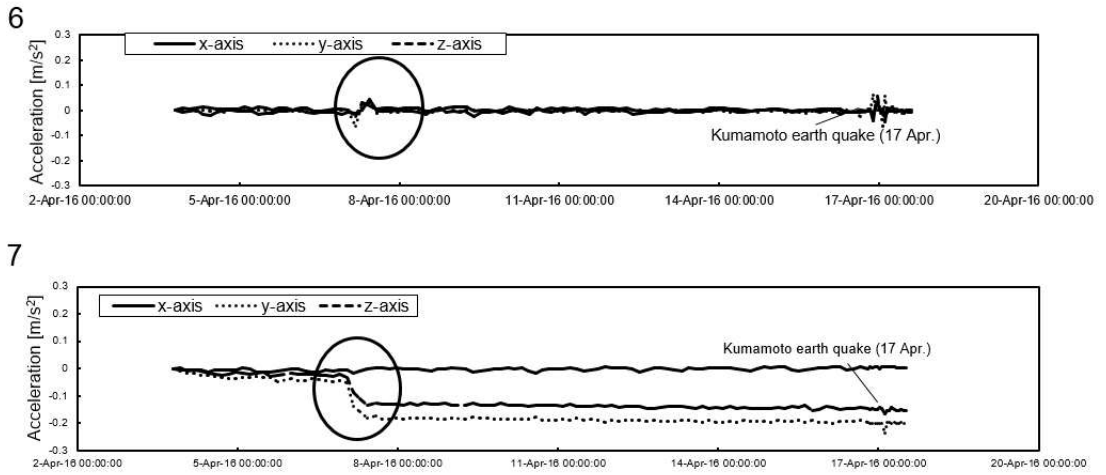


図 4.49: エリア 4 三軸加速計データ (中継ノード 6,7)

このとき、特に中継ノード 6,7 のポジションは現場でも崖面に位置するなど、現場立ち入りの都合上から実際に現場確認が行われたのは震災後であるが、図 4.50 のように図中 A のポイントで小規模な表層滑り（赤土の抑え盛土の流出）が現認された。



図 4.50: エリア 4 小規模表層崩壊の観測

4.7. 現場実証実験と実験結果

当初は地震により崩落したものと推察されていたが、のちに補助データとして読み飛ばされていた中継ノードの三軸加速データを照合することにより、震災前にもすでに崩落していた可能性があるということで調査がすすんでいる。

本小規模災害はすみやかに行政に報告された。本来であれば目視点検による日常監視でも困難なポイントでこのようなデータが取得されたことはアセットマネジメント [YKL⁺16] へのセンサーネットワークによる大きな貢献と考えられる。

また、偶然の要素もおおいが、冗長性を考慮することによりより多くの任意のポイントで様々なデータを取得できることから、ばらまき型の本アーキテクチャの有効性を示した一例となっている。

4.7.3 北海道エリア実験

エリア5である北海道芦別エリアでの実証実験は2015年10月から2016年4月まで実施された [YSL⁺16]。

この実証エリアは、河川沿いの段急斜面に位置する国道の保全状態を監視する目的で実証実験が行われた。この実証プロジェクトは国土交通省の2016年度のインフラモニタリングプロジェクトの一環として実施されている。

このプロジェクトの目的は、安価・高精度な測量技法の確立のほか、センサーネットワーク技術において、様々な環境下においても連続したデータを取得しつづけるかどうかポイントとなっている。

本実験エリアは、図4.51のように国道北側に面する山から泥炭状の法面が南側の河川へむかう攻撃斜面型の地形となっている。北海道のほぼ中央に位置することから、比較的乾燥した気候にあるが、冬季における気温は最低で摂氏-15度ほど、積雪量は最大で5m近くになるエリアである。



図 4.51: エリア 5 ロケーション

このようなエリアでは、一般にみられる排水溝や排水パイプなどが設置されているが、雨季における災害よりも、3~4月ころにかけての融雪時に発生する大量の融雪水による被害が問題となっている。

具体的には、融雪時に溶け出した水が地盤に染み込んだ後、通常であれば排水機構により河川などへ放出されるが、排水機構の容量を超えた状態でふたたび氷点下になるようなケースでは、排水機構の破損や、それに伴うアスファルトのめくれあがりによるひび割れなどが発生することにより、道路安全管理・保全の最大の課題となっている。

特にこのようなエリアでは市街地と異なり、継続的な除雪の頻度も少なく、広範囲に及び、かつ排水パイプは地下に埋設されていることから、掘り起こしての点検は煩雑であり、外観検査による排水機構の健全度を評価する必要があった。

しかしながら、積雪や低温の影響もあり、大掛かりなセンシングあるいは有線給電による設備は雪圧による倒壊や断線などの問題、精密機器やバッテリーでは低

4.7. 現場実証実験と実験結果

温障害による問題もあり、現実的にはセンサーネットワークによるデータ自動収集は現実的には不可能とされてきた。

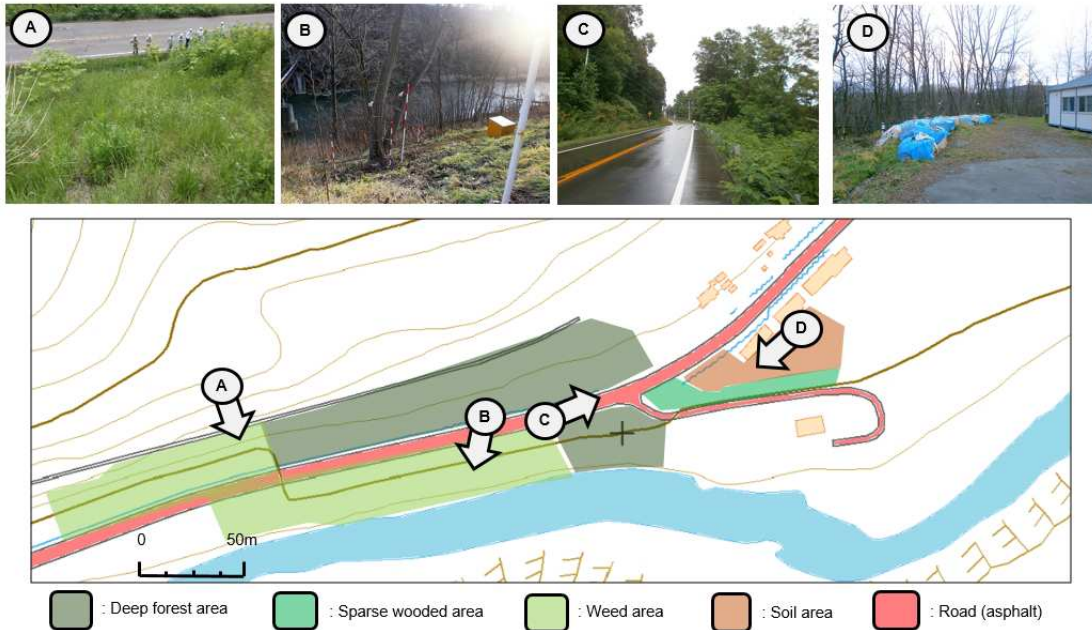


図 4.52: エリア 5 設置制約

図 4.52 は、エリア 5 における設置制約である。現場は主に 5 つのリージョンに分類され、以下のように分類されている。

- A: 低木，低い雑草の上り斜面
- B: 低木，低い雑草の下り斜面
- C: 密度の高い雑木林
- D: 密度の低い雑木林

基本的には斜面モニタリングでありながら、このような地形では道路沿線への平面的な設置がおこなわれている。

また本実験では、データ集約のためのゲートウェイとセンターサーバーへのデータ送信のためのIPルータは特別な寒冷地仕様で準備していないこともあり、現場に隣接する建設会社の事務所内に設置した都合上、A～Dへと連続的にホップ接続しながらデータ集約する、比較的長距離のマルチホップ伝送のアーキテクチャを探索することとなった。

現場の事前調査およびシミュレーションによって得られた中継ノードの位置を図4.53に示す。

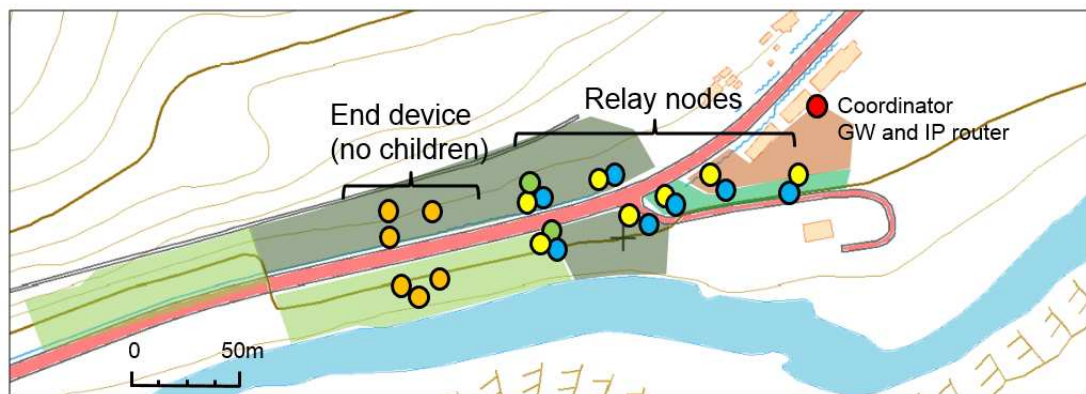


図 4.53: エリア5シミュレーション結果に基づく中継ノード位置

設置計画では図中 End device で記載した末端のセンシングポイント6点のほか、必要最小限の中継ノード数は3ノードとなっていたが、植生やバッテリー活性に影響をおよぼす氷点下となる期間を加味した結果冗長ノードとして13ノード（合計22ノード）構成となる冗長度69%のシステムとなった。

低温障害に対する取り組みの適用は2015年12月に実施されているが、同年10月に仮設置した状態でのフィードバックが行われ、実際の連続測定期間は2015年12月から2016年4月までとなっている。

4.7. 現場実証実験と実験結果



図 4.54: エリア 5 中継ノード間の通信品質

図 4.54 はこの際に実際に無線品質を計測した結果となっている。基本的な中継パスは事前シミュレーション通り PDR 50%以上をキープしているが、いくつかの中継箇所において 50%を切るケースがでてきている。

PDR 50%以上であれば、すくなくとも 2 回に 1 回以上の通信が成立できるが、特に南側の河川沿いについてはいずれのパスにおいても PDR 50%以下であり越冬時のデータ収集不能が予測された。

このため、図中中継ノード 7,8 のポジションにあらたな中継ノードを設置し、最終的な図 4.53 の結果を得ている。

実際の中継ノードのスケジューリングイメージは図 4.55 のような動作を期待しており、Active, Sleep のそれぞれのグループ（クラスタ）のほか、センシングノードの直前ではバックアップクラスタが設置されている。

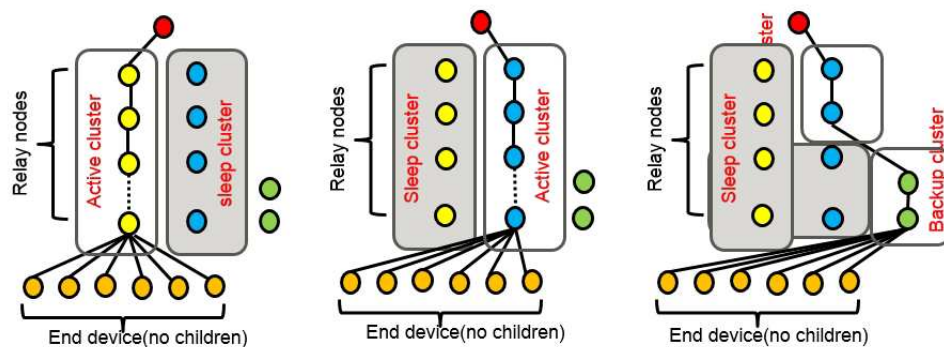


図 4.55: エリア 5 中継ノードスケジューリングイメージ

また、2015年12月の設置の際、機器のインストールにおいて図4.56のような対策も行っている。この設置方法は、バッテリーおよびノードデバイス本体をケースごと地下10~20cmほどに埋めるものである。地下10~20cm程度の深さでは外気温が大きく摂氏0度を下回っても、安定して0~-2度程度の環境となるためである。

また、ソーラーパネルとアンテナの設置も日射方向に合わせるのではなく、附着した雪が滑り落ちやすいように角度が調整できる仕組みで道路沿線の並木に設置することとした。

このようなアンテナ設置は、図4.20のモデルを活用している。しかしながら、このような埋設設置では、一旦積雪が始まってしまった後は、メンテナンスのための掘り起こしはほぼ不可能な状態になってしまい、春季までノードの状態を確認する手段がなくなるという欠点がある。

4.7. 現場実証実験と実験結果

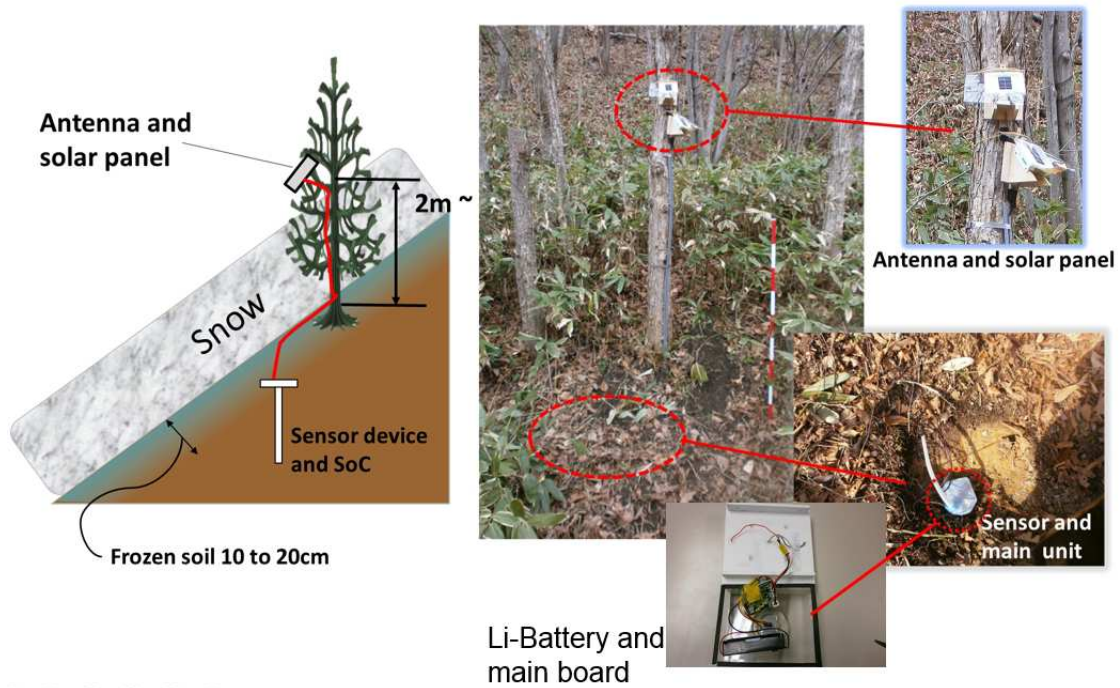


図 4.56: エリア 5 越冬向けノード設置

また、図 4.57 はエリア 5 の中継ノードのデータ収容率のうち、融雪が始まった 2016 年 3 月～4 月のデータを示している。全体的に 60% 以上のデータ収容率をキープしているが、バックアップクラスタに属するノードの入れ替わりや、アクティブ・スリープのクラスタが入れ替わりが読み取れる。

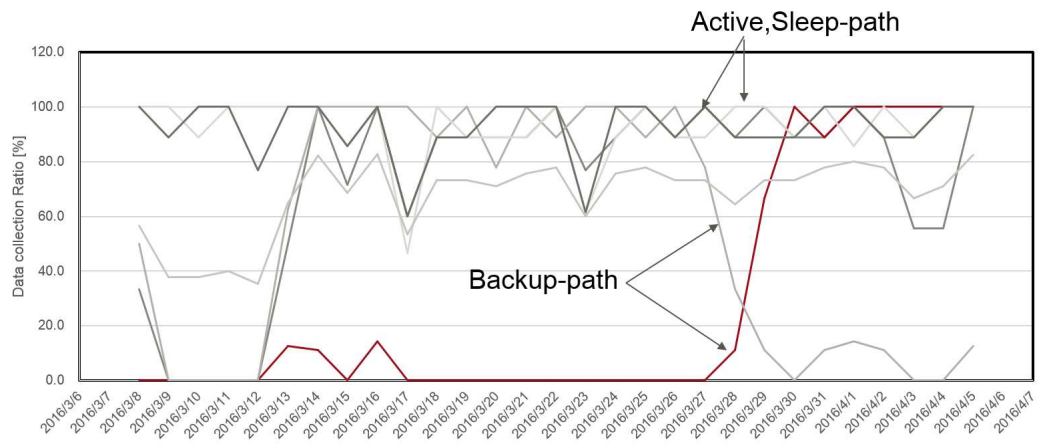


図 4.57: エリア 5 データ収容率

図 4.58 は実際に計測されたデータで、2016 年 3 月～4 月までの融雪時の状態を抜粋したものである。結論としては、12 月に設置したノードは気温の低下に伴い最長で 6 時間のスリープを行っていたが、提案したスケジューリング手法により融雪がはじまった 3 月より連続したデータの取得に成功している。

4.7. 現場実証実験と実験結果

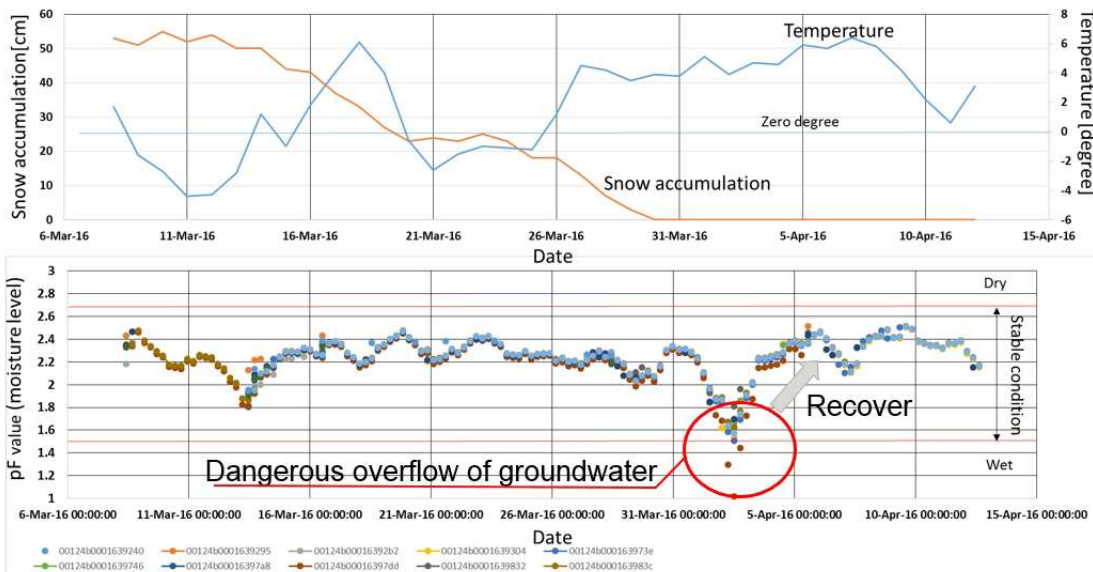


図 4.58: エリア 5 計測データ

図中上のグラフは気象庁報告に基づく積雪量と外気温，図中下のグラフが実際のセンサーから取得された地下水圧から換算した pF 値 [福本 13] である。

pF 値は，十分に水を含んでいる土の場合，値が低く，乾燥してくると高くなる傾向がある．一般には，湿潤状態の危険レンジは $pF = 1.5$ 以下とされている．3 月期において外気温は氷点下を上下しながら融雪は連続的にすすんでいるが，3 月 26 日以降，外気温が 0 度を上回った以降，融雪が活性化していることがわかる．一方で， pF 値が最低値を観測したのは 2016 年 4 月 3 日であり，このエリアにおいては平均気温が上昇して 1 週間程度たってから伏流水のピークを迎えたことが判明した．

また，計測の結果から，この水分量はピーク状態を継続することなく，継続した融雪は続くものの， pF 値は回復していることから，この地点での排水機構については十分に機能していることが定量観測により判明した．また，全体を通してのデータ収容率は 70%となっている．

4.7.4 実証実験結果と考察

表4.12に予備実験を除くエリア1(台湾) エリア4(佐世保) エリア5(北海道) の結果をまとめる。

表では、測定ノードとしてのセンサ数、そのセンサーを相互接続させるための最小中継ノード数、現場環境に合わせて算出された冗長ノード数をまとめたもので、期待データ量とは、測定ノード数と必用最小中継ノードの測定期間中のデータ数を表し、総データ量は、実際に取得されたデータ量となっている。

表 4.12: 実証実験結果まとめ

	エリア1	エリア4	エリア5
特徴	広域基礎実験	地形	植生・温度
センサ数	60	5	6
最小中継ノード数	0	3	3
冗長ノード数	12	4	13
冗長率 [%]	19	35	69
期待データ個数	3153600	103680	2016
取得データ個数	3500496	81369	2570
データ収容率 [%]	109.11	79.87	127.5
設計誤差 [%]	9.11	-20.13	27.5
期間	2014.4～2015.4	最新連続監視時データ 2016.10～2017.1	2015.12～2016.4

なお、表中のデータ個数とは、1周期で1つのノードが返送するデータセットを指し、ノードID、バッテリープロファイル、通信プロファイル、三軸加速計、温度計、圧力計のデータがパッキングされており、ヘッダなども含めて1データあ

4.7. 現場実証実験と実験結果

たりおよそ 100[Byte] ほどのサイズとなっている。

期待データ個数とは、センサー数と最小中継ノード数に運用期間を乗じたもので取得データ数とは冗長ノードを含めた実際に収集したデータの個数である。エリア 1（台湾）では、109%データが（誤差 9%）エリア 4（佐世保）では期待データ量に対して 80%のデータ（誤差 20%）エリア 5（北海道）では 128%のデータ（誤差 28%）という結果が得られた。

なお、エリア 4 では実際には 1 年以上の稼働が続いているが、工事や既設センサーの改版に伴い何度かシステムリセットを行っているため本論文執筆中の直近 3 カ月のデータとなっている。

エリア 4 では、行政が設置した計測センサーの停止期間なども含むため、厳密にはデータ量の評価としてデータ集計は厳密ではないが、前述したように、このエリアでは外乱として獣害のようなアクシデントを考慮しておらず、ノードの破損などがデータ収容率低下、およびモデルとの誤差に影響しているものと考えられる。

また、必要最小限ノードと冗長ノードは、現場設置後においては区別をしないため、どのノードが稼働・停止してもシステムとしては問題ない状態となっている。

誤差の評価について、3つのエリアでは -20%~+28%の開きがあるが、より外乱が大きい環境においてもエリア 4 を除き 30%程度のプラス誤差で収まっている。これはモデリングの際に通信外乱や発電外乱をワースト方向へ計上しているためであると考えられる。一方で、このようなアプリケーションでは 100%の収容率よりもよりシンプルで低コストなシステムが求められており、実際には、市販汎用の無線チップと小型の電源装置で、従来の屋外型センサーネットワークの単体ノードのコストよりも十分に小さいものとなっているため、プロジェクト全体としては成功と判断している。

4.8 第4章のまとめ

本章では、環境モニタリングのためのセンサーネットワークシステムの評価環境として、無線通信や発電効率といった環境に起因外乱を考慮したシミュレーションの提案を行った。

予備試験およびシミュレーションの結果、200[mW]のソーラーパネルと3.2[Ah]のバッテリーを搭載し、現場には19.6[%]の冗長なノードを設置する結果を得ている。

この結果に基づき実際のノードを開発し、実証現場に設置を行った。結果、運用開始から約1年が経過し、設計想定通りのビヘイビアで稼働を続けている。また、実装上のバッテリーサイズは文献[小泉13]で実装された7.6[Ah]の半分以下の3.2[Ah]でありながら、バッテリー交換などのメンテナンスを行うことなく、センサーノードの冗長配置設計により要求仕様となるデータ量を確保しながら動作を続けている。

また、様々な環境に基いた実践的な実験も実施しており、同一のノードハードウェアにもかかわらず、台湾エリアから北海道といった気候や環境、現場制約などが大きく異なるエリアでも、本システムの有効性が確認されている。

本論文では得られたデータによる地質分野の考察は行わないが、実際にはこのようにして得られたデータを活用して、災害に対する未然の対策を施す計画などに活用されていく予定である。

第5章

結論

5.1 本研究により得られた成果

本論文では近年注目をあびている IoT システムにおけるセンサーネットワークのアーキテクチャのシステム設計と実装評価を行った。センサーネットワークシステムは、環境、交通、医療などさまざまな分野での適用が期待されているが、本論文では特に環境分野であるインフラモニタリングシステムをアプリケーション例題としてアーキテクチャ探索を行った。

このようなアプリケーションでは、数多くのセンサーノードを対象エリアにばらまくことで、さまざまな環境データを集約することが目的となっているが、設置環境の制約からくる電力や通信の課題を解決することが必須条件となっている。

これは、環境にばらまかれた大量のセンサーノードは、基本的にはワイヤレス・ケーブルレスで配置される性質上、ノード間は無線通信を行うことで協調動作し、個々のノードは単に低電力制御を行うのではなく、ノードで独立した電力環境を構築するためには環境発電と電力消費のバランスを保たなければならない。

しかしながら、造成地や斜面、建造物といった屋外のオブジェクトをモニタリングする際に発生する通信障害や発電のばらつきの影響を無視することはできない。これらの課題は、物量をかけ、必要十分以上のバッテリーや環境発電素子を搭載することにより解決することもあるが、全国各地で近年多発している異常気象などによる自然災害や、高度成長期に構築されたインフラの老朽化問題を未然に対策するためには、低コストで多様な環境に適用可能なセンサーネットワークアーキテクチャの探索と設計技術の確立と早期の実用化が必須の状態にあるといえる。

以下に、本研究により得られた成果を統括する。

- (1) 環境やインフラモニタリングにおけるセンサーネットワークの要件定義と課題を整理し、センサーネットワークシステムのアーキテクチャ探索のためのシミュレーションシステムの提案と実装を行った。この提案シミュレーショ

5.2. 今後の課題

ンシステムでは、環境に由来する通信や電力の外乱を取り込み、センサー間の通信のビヘイビア、個々のセンサーの発電と消費のビヘイビアを仮想空間で表現し、シミュレーション実装では適切な抽象化を行うことで従来用いられている NS2 シミュレータによる同様のシミュレーションよりも 1000 ノード規模で約 100 倍の速度で分析可能にしたことで、より現実的な時間で大規模なセンサーネットワーク全体の挙動を解析できるようになった。

- (2) センサーネットワークを 1 つの分散計算機とみため、通信品質 (LQI) や電力状態 (PS) をパラメタとした、ノードの運用制御のためのスケジューリング方式の提案を行った。LQI/PS 法、PS/LQI 法、NRC 法および、間欠動作のためのノーマリーオフスケジューリング方法を提案し、従来の通信モジュールに組み込まれたトポロジスケジューリングでは約 4 ヶ月程度で破綻していたものを、理論上半永久的に動作する仕組みの提案を行った。
- (3) 予備実験に基づいた環境の外乱挙動の実験結果を用い、前述したシミュレーションによる実運用に即したアーキテクチャの探索と、実際のセンサーノードの開発およびセンサーネットワークの設置運用を行った。探索結果であるアーキテクチャでは、IEEE802.15.4(Zigbee) 無線モジュールを用い、200[mW] のソーラーパネル、3.2[Ah] のバッテリーといった、汎用かつ低コストなモジュールの組み合わせでも、19.6[%] の冗長なノードをばらまき、前述したスケジューリング制御 (PS/LQI 法) を行うことで要望の測定データ量の範囲では、1 年間電池交換などのメンテナンスをすることなく環境モニタリングの実験に成功した。

5.2 今後の課題

本研究に関する今後の課題を以下にまとめる。

- (1) 本論文でアーキテクチャ探索および実証適用を行った環境は、斜面の地盤安定に関するモニタリングといった非常に限られた環境下での検証を行ったに過ぎない。さらなる適用範囲を広げるためにはより多様なアプリケーションの特性を体系化し、解決策の研究開発が必要であると考える。
- (2) また、設置環境に伴った外乱影響に対し、基本的な冗長設計が有効であることが検証されたが、期待データ量に対してより小さな誤差でデータ収集可能になるような設計評価手法の研究が必要と考えられる。
- (3) 本技術のすみやかな実用化が進み、環境やインフラの抱える課題を解決する基盤理論、技術となることを願う。

参考文献

- [Aka74] H. Akaike, “A New Look at the Statistical Model Identification”, Proc. of *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-19, No.6, pp. 716–723, 1974.
- [ASMS⁺12] B. Anas, K. Song Min, G. Shuo, H. Tian, and T. Yoshito, “Link Correlation Aware Opportunistic Routing”, Proc. of *IEEE INFOCOM '12 Mini-Conference*, 2012.
- [BS03] E.S. Biagioni and G. Sasaki, “Wireless Sensor Placement for Reliable and Efficient Data Collection”, Proc. of *the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 10,6–9, 2003.
- [CK03] C.Y. Chong and S.P. Kumar, “Sensor Networks Evolution, Opportunities and Challenges”, Proc. of *IEEE Vol. 91*, pp. 1247–1256, 2003.
- [CRD00] I. Chalermek, G. Ramesh, and E. Debrah, “Directed diffusion : A scalable and robust communication paradigm for sensor networks”, Proc. of *MobiCom '00 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 56–67, 2000.

参考文献

- [CWJ⁺11] P. Corke, T. Wark, R. Jurdak, W. Hu, P. Valencia, and D. Moore, “Environmental Wireless Sensor Networks”, Proc. of *IEEE Vol.98*, pp. 1903–1917, 2011.
- [Doh00] L. Doherty, “Algorithms for Position and Data Recovery in Wireless Sensor Networks”, Proc. of *Diss. Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California ad Barklay*, 2000.
- [dSB15] S. de Souza, R.H. Savazzi and L.B. Becker, “Network Design and Planning of Wireless Embedded Systems for Industrial Automation”, Proc. of *Design Automation for Embedded Systems, 19(4)*, pp. 367–388, 2015.
- [DW06] F. Dai and J. Wu, “On Constructing k-connected k-dominating Set in Wireless Ad-hoc and Sensor Networks”, *Journal of Parallel and Distributed Computing, 66(7)*, pp. 947–958, 2006.
- [GL03] K. Gao, Y. Wu and F. Li, “Analysis on the Redundancy of Wireless Sensor Networks”, Proc. of *the 2nd ACM international conference on Wireless sensor networks and applications*, pp. 108–114, 2003.
- [Haz12] K. Haze, “Modeling Home Appliance Power Consumption by Interval-based Switching Kalman Filters”, Proc. of *IEICE Technical Report, Vol.112, No.31*, pp. 39–44, 2012.
- [IISS10] M. Imai, M. Iwai, R. Shibasaki, and K. Ssezaki, “A Design of slope failure detection system Using wireless sensor networks”, Proc. of *Asian Association on Remote Sensing*, 2010.

- [IKS09] Y. Ikegawa, H. Kobayakawa, and M. Sawada, “Monitoring of an Active Slope by Wireless Sensor Network”, Proc. of *JSCE the 38th RM symposium*, 38-0049, pp. 40–44, 2009.
- [IMP14] R. Istomin, T. Marfievici, A.L. Murphy, and G.P. Picco, “Trident: In-field Connectivity Assessment for Wireless Sensor Networks”, Proc. of *the 6th Extreme Conference on Communication and Computing (ExtremeCom)*, 2014.
- [JCC07] J. Jia, J. Chen, and G. Chang, “Optimal Coverage Scheme based on Genetic Algorithm in Wireless Sensor Networks”, Proc. of *Control and Decision*, Vol.22 No.11, pp. 1289–1292, 2007.
- [KFH⁺13] K. Koizumi, Y. Fujita, K. Hirata, K. Oda, and S. Kamide, “Experimental Research toward Practical Use of Wireless Sensor Network for Slope Disaster Monitoring”, Proc. of *JSCE journal Vol.69, No.1*, pp. 46–57, 2013.
- [KKP00] J. Kahn, R.H. Katz, and K. Pister, “Emerging Challenges Mobile Networking for Smart Dust”, Proc. of *J.Comm Networks*, pp. 188–196, 2000.
- [LAX⁺16] H. Li, C. Ao, Y. Xu, J. Tian, and K. Yamashita, “A Deployment Algorithm for Multi-hop Wireless Networks”, Proc. of *6th ACM Symposium on Design and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications (DIVANet’16)*, pp. 99–105, 2016.
- [LC05] F. Lin and P.L. Chiu, “A near-optimal Sensor Placement Algorithm to Achieve Complete Coverage-discrimination in Sensor Networks”, Proc. of *IEEE Communications Letters*, 9(1), pp. 43–45, 2005.

参考文献

- [LSS07] H. Liu, L. Selavo, and J. Stankovic, “Seedtv: Deployment-time Validation for Wireless Sensor Networks”, Proc. of *ACM the 4th Workshop on Embedded Networked Sensors*, pp. 23–27, 2007.
- [MCP⁺02] A. Mainwaring, D. Culler, J. Polastre, R. Szewczyk, and J. Anderson, “Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring”, Proc. of *the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, pp. 88–97, 2002.
- [MDS10] M.K. Marina, S.R. Das, and A.P. Subramanian, “A Topology Control Approach for Utilizing Multiple Channels in Multi-radio Wireless Mesh Networks”, Proc. of *Computer networks*, 54(2), pp. 241–256, 2010.
- [Ohb15] K. Ohba, “A Method of Recovering Environment Data Using Polynomial Regression for Large-scale Wireless Sensor Networks”, Proc. of *IEICE Technical Report, ASN2015-72*, pp. 121–126, 2015.
- [Ohb16] K. Ohba, “Environmental Data Recovery Using Polynomial Regression for Large-scale Wireless Sensor Networks”, Proc. of *the 5th International Conference on Sensor Networks (SENSORNETS’16), No.11*, pp. 161–168, 2016.
- [OYK⁺16] K. Ohba, Y. Yoneda, K. Kurihara, T. Suganuma, H. Ito, N. Ishihara, K. Gotoh, K. Yamashita, and K. Masu, “Polynomial Regression Techniques for Environmental Data Recovery in Wireless Sensor Networks”, Proc. of *Sensors and Transducers, Vol.199, Issue 4*, pp. 1–9, 2016.

- [Ram14] M.V. Ramesh, “Design, Development, and Deployment of a Wireless Sensor Network for Detection of Landslides”, Proc. of *Ad Hoc Networks*, 13, pp. 2–18, 2014.
- [SA92] D. Stauffer and A. Aharony, Proc. of “*Introduction to percolation theory*”, Taylor and Francis, 1992.
- [Siv04] F. Sivrikaya, “Time Synchronization in Sensor Networks: a survey”, Proc. of *IEEE Network*, Vol.18, No.14, pp. 45–50, 2004.
- [SKJ⁺08] K. Srinivasan, M. A. Kazandjieva, M. Jain, E. Kim, and P. Levis, “Swat: Enabling Wireless Network Measurements”, Proc. of *the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems*, pp. 395–396, 2008.
- [SMA⁺14] L. Sanchez, L. Munoz, J. Antonio, Galache, P. Sotres, J. R.Santana, G. Veronica, R. Rajiv, G. Alex, K. Srdjan, T. Evangelos, and P. Dennis, “SmartSantander IoT experimentation over a smart city testbed”, Proc. of *Computer Networks Volume 61*, pp. 217–238, 2014.
- [SMS11] E.M. Shakshuki, H. Malik, and T.R. Sheltami, “A Comparative Study on Simulation vs. Real Time Deployment in Wireless Sensor Networks”, *Journal of Systems and Software*, 84(1), pp. 45–54, 2011.
- [SPMC04] R. Szewczyk, J. Polastre, A. Mainwaring, and D. Culler, “Lessons from a Sensor Network Expedition”, *Journal of Springer, Wireless Sensor Networks*, pp. 307–322, 2004.
- [SSMM11] O. Saukh, R. Sauter, J. Meyer, and P.J.. Marron, “Motefinder: A Deployment Tool for Sensor Networks”, Proc. of *the workshop on Real-world wireless sensor networks*, pp. 44–45, 2011.

参考文献

- [WALJ⁺06] G. Werner-Allen, K. Lorincz, J. Johnson, J. Lees, and M. Welsh, “Fidelity and Yield in a Volcano Monitoring Sensor Network”, Proc. of *the 7th symposium on Operating systems design and implementation*, pp. 381–396, 2006.
- [WC06] C.H. Wu and G. Chang, “A Delaunay Triangulation based Method for Wireless Sensor Network Deployment”, Proc. of *the 12th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS’06)*, 2006.
- [Wit84] A.P. Witkin, “Scale-Space Filtering: A New Approach to Multi-Scale Description”, Proc. of *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing., Vol. 9*, pp. 150–153, 1984.
- [WLC07] C.H. Wu, K.C. Lee, and Y.C. Chung, “A Delaunay Triangulation Based Method for Wireless Sensor Network Deployment”, Proc. of *Computer Communications, 30(14)*, pp. 2744–2752, 2007.
- [YA08] M. Younis and K. Akkaya, “Strategies and Techniques for Node Placement in Wireless Sensor Networks”, Proc. of *A survey. Ad-Hoc Networks, 6(4)*, pp. 621–655, 2008.
- [Yam10] K. Yamashita, “-Possibility of ESL- : a software centric system design for multicore SoC in the upstream phase”, Proc. of *IEEE Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC 2010)*, pp. 805–808, 2010.
- [YHY09] L. Yue, J. Huang, and Y. Yang, “Application of FBG sensors in strengthening and maintenance monitoring of old bridges”, Proc. of *20th International Conference on Optical Fiber Sensors, 2009*.

- [YKL⁺16] K. Yamashita, K.. Kurihara, H. Li, C. Ao, Y. Xu, J. Tian, K. Kimura, and H. Kasahara, “Sensor Network System for the Infrastructure Asse Management”, Proc. of *3rd International Conference on Universal Village (UV2016)*, 2016.
- [Yon14] Y. Yoneda, “A Study on Data Reliability Evaluation Index of Wireless Sensor Networks for Environmental Monitoring”, Proc. of *the 41st SICE Symposium on Intelligent Systems*, 2014.
- [YSL⁺16] K. Yamashita, T. Suzuki, H. Li, C. Ao, Y. Xu, J. Tian, K. Kimura, and H. Kasahara, “Architecture Design for the Environmental Monitoring System over the Winter Season”, Proc. of *14th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access (MOBIWAC'16)*, pp. 27–34, 2016.
- [ZC03] T. Zou and L. Chakrabarty, “Sensor Deployment and Target Localization Based on Virtual Forces”, Proc. of *IEEE INFOCOM, volume 2*, pp. 1293–1303, 2003.
- [ZXJ03] S.S. Zhang, K. Xu, and T.R. Jow, “The Low Temperature Performance of Li-ion Batteries”, *Journal of Power Sources 115.1*, pp. 137–140, 2003.
- [伊藤 10] 伊藤昌毅, “センサネットワーク技術を活用した環境モニタリングの実現”, 電気学会次世代産業システム研究会 IIS-10-070, pp. 23–28, 2010.
- [関根 03] 関根理敏, 瀬崎薫, “センサネットワークにおける属性データの階層的集約法”, 電子情報通信学会技術研究報告. ネットワークシステム 103(310), pp. 27–32, 2003.

参考文献

- [岩井 10] 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, pp. 1–7, 2010.
- [古山 14] 古山祐樹, 見神広紀, 木村啓二, 笠原博徳, “小ポイント FFT のマルチコア上での自動並列化手法”, 情報処理学会研究報告. 計算機アーキテクチャ研究会報告 2014-ARC-209(3), p. x, 2014.
- [戸辺 11] 戸辺義人, “都市レベルセンシングネットワーク: OSOITE プロジェクトの経験と今後”, 電子情報通信学会技術研究報告.USN, ユビキタス・センサネットワーク 111(54), pp. 19–22, 2011.
- [高田 05] 高田潤一, “電波伝搬の基礎理論”, *Proc. of Microwave Workshops and Exhibition 2005*, 2005.
- [山下 14] 山下浩一郎, 鈴木貴久, 栗原康志, 大友俊也, 木村啓二, 笠原博徳, “大規模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”, マルチメディア、分散協調とモバイルシンポジウム 2014, pp. 1368–1377, 2014.
- [山下 15] 山下浩一郎, “環境系センサーネットワークシミュレータの実装と評価”, 電気学会論文誌 E, *IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines*, Vol133 No.10, pp. 387–392, 2015.
- [首藤 05] 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.

- [小泉 13] 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.
- [松崎 12] 松崎正明, “フィールド無線の信頼性と安定性”, 横河技報 Vol.55 No.2, 2012.
- [地す 12] 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.
- [池川 09] 池川洋二郎, 小早川博亮, 澤田昌孝, “無線センサネットワークを用いた活動斜面の傾斜量のモニタリング”, 土木学会第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム, 2009.
- [長井 03] 長井望, 三田彰, 矢向高弘, 佐藤忠信, “構造ヘルスマニタリング用ワイヤレス検査に関する研究”, 日本地震工学会論文集 第 3 巻, 第 4 号, 2003.
- [田辺 11] 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.
- [福本 13] 福本昌人, “ハンディマノメータを用いた土壌水分張力の測定方法”, 農村工学研究, 2013.
- [米田 14] 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.

参考文献

- [野間 14] 野間口大, 栗山裕, 藤田喜久雄, “シナリオとマルチエージェントシミュレーションによる超システムの設計方法論—モジュール交換型社会共有エネルギーシステム設計による試み—”, 日本設計工学会誌 2014 年第 7 号, pp. 358–368, 2014.

謝辞

本研究は、著者が早稲田大学大学院博士課程在学中ならびに株式会社富士通研究所において実施されたものである。

本研究を進めるにあたり、終始あたたかいご指導を賜りました笠原博徳教授に心から感謝の意を表します。また、本論文をまとめるにあたり、有益なご助言とご指導をいただきました木村啓二教授、戸川望教授に深く感謝致します。

本研究の実施にあたり、株式会社富士通研究所との共同研究という形態で、ハードウェアの開発ならびに実証現場の手配と設置ならびに測定、各種助言でご協力を頂いた台湾工業技術研究院 (ITRI) 情報通信研究所 (ICL) のメンバーである呉誠文博士 (ICL 所長、現台湾清華大学教授)、陳芳祝博士 (ICL 技術部長)、黄清錦氏、蔡易行氏、防災システムについて助言を頂いた台湾国立交通大学 Disaster Prevention and Water Environment Research Center 黄安斌教授をはじめとした台湾チーム、長崎エリアでの実証実験にあたり協力いただいた長崎大学インフラ長寿命化センターならびに未来工学センターの松田浩教授、奥松俊博准教授、杉本知史助教 (土木構造分野)、石塚洋一准教授 (電気電子分野)、藤本孝文准教授 (アンテナ工学)、藤島友之准教授 (高電圧) の各教員陣、岩崎昌平技術職員、富士通研究所にて共同研究プロジェクトを進めるにあたり支援を頂いた鈴木貴久氏、栗原康志氏、山内宏真氏、大友俊也氏 (現 Fixstars) 富士通九州ネットテック寺西佑太氏、富士通ソフトウェアテクノロジーズ洲澤拓美氏、平柳幸彦氏、および富士通研究開発中心 (中国) の田軍氏、李紅春氏、奥氏に感謝します。

最後に、著者が富士通株式会社に入社以来、公私にわたり面倒をみていただいた高村守幸氏（OSCAR TECHNOLOGY CORP., 元 富士通研究所顧問）、台湾エリアでの実証実験にご助力いただいた海老原信義氏（日台交流協会、元富士通メディアデバイス取締役）に感謝するとともに、今日までの著者の研究生活をいろいろな側面で支えていただいたすべての人々に感謝します。

著者研究業績

著者研究業績

種類別	題名	発表掲載誌名	発表年月	著者名
論文	○ 環境系センサーネットワークシミュレータの実装と評価	電気学会論文誌E(センサ・マイクロマシン部門), Vol.135 No.10 pp.387-392	2015年10月	<u>山下 浩一郎</u>
	○ Sensor Network System for the Infrastructure Asset Management	The 3rd International Conference on Universal Village (UV2016)	2016年10月	<u>K.Yamashita</u> K.Kurihara H.Li C.Ao Y.Xu J.Tian K.Kimura H.Kasahara
	○ Architecture Design for the Environmental Monitoring System over the Winter Season	The 14th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access (MOBI-WAC2016), pp.27-34	2016年11月	<u>K.Yamashita</u> T.Suzuki H.Li C.Ao Y.Xu J.Tian K.Kimura H.Kasahara
	Polynomial Regression Techniques for Environmental Data Recovery in Wireless Sensor Networks	Proc. of Sensors and Transducers, Vol.199, no.4, pp. 1-9	2016年4月	K.Ohba Y.Yoneda K.Kurihara T.Suganuma H.Ito N.Ishihara K.Gotoh <u>K.Yamashita</u> K.Masu
講演 (査読付き シンポジウム)	Software Design Methodology based on Energy Consumption Model Considering Relationship between Software and Hardware	Proc. of 17th Workshop on Synthesis And System Integration of Mixed Information technologies (SASIMI2012) pp.425-430	2012年3月	K.Kurihara H.Yamauchi T.Otomo T.Suzuki Y.Teranishi <u>K.Yamashita</u>

著者研究業績

種別	題名	発表掲載誌名	発表年月	著者名
	Effective Distributed Parallel Scheduling Methodology for Mobile Cloud Computing	Proc. of 17th Workshop on Synthesis And System Integration of Mixed Information technologies (SASIMI2012) pp.516-521	2012年3月	H.Yamauchi K.Kurihara T.Otomo T.Suzuki Y.Teranishi <u>K.Yamashita</u>
	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	情報処理学会「マルチメディア,分散,協調とモバイル (DICOMO2014) シンポジウム」 pp.1368-1377	2014年7月	山下 浩一郎 鈴木 貴久 栗原 康志 大友 俊也 木村 啓二 笠原博徳
	Environmental data recovery using polynomial regression for large scale wireless sensor networks	Proc of 5th International Conference on Sensor Networks (SENSORNETS 2016), Scitepress, no.11, pp.161-168	2016年2月	K.Ohba Y.Yoneda K.Kurihara T.Suganuma H.Ito N.Ishihara K.Kotoh <u>K.Yamashita</u> K.Masu
	A Deployment Algorithm for Multi-hop Wireless Networks	The 6th ACM Symposium on Design and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications (DIVANet2016), pp.96-105	2016年11月	H.Li C.Ao Y.Xu J.Tian <u>K.Yamashita</u>

著者研究業績

種類別	題名	発表掲載誌名	発表年月	著者名
講演 (研究会)	冗長性を許容したハード・ソフト協調の最適設計と検証	電子情報通信学会技術報告書 ICD, 集積回路 111(352) pp.137-142	2011年12月	寺西 佑太 大友 俊也 栗原 康志 山内 宏真 鈴木 貴久 山下 浩一郎
	メモリの冗長化とパワーゲーティングによる高信頼・低消費電力・高性能実装の提案	情報処理学会研究会 2012-ARC-199(14),1-9	2012年3月	大友 俊也 栗原 康志 寺西 佑太 山内 宏真 鈴木 貴久 山下 浩一郎
	M2Mを用いた大規模データ収集システムの構築に関する研究	情報処理学会研究会 2013-ARC-207(28),1-7	2013年12月	林貴哉 枝松ちさと 村林竜司 胥徳文 山下 浩一郎 天笠俊之 牧野昭二 高橋伸
	大規模センサネットワークのアーキテクチャ探索環境の実装と評価	情報処理学会研究会 2014-ARC-212(19),1-7	2014年9月	栗原 康志 鈴木 貴久 山下 浩一郎
ポスター	Architecture Design for the Environmental Monitoring System over the Winter Season	Poster at The 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM2016)	2016年11月	<u>K.Yamashita</u> T.Suzuki H.Li C.Ao Y.Xu J.Tian K.Kimura H.Kasahara

著者研究業績

種別	題名	発表掲載誌名	発表年月	著者名
講演 (招待講演)	-Possibility of ESL- A Software Centric System Design for Multi-core SoC in the Upstream Phase	Proc. of 15th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC2010) pp.805-808	2010年1月	<u>K.Yamashita</u>
	A Principle Simulator for Architecture Design of Distributed Multi Node Sensor System	13th International Forum on Embedded MPSoC and Multicore (MPSoC2013)	2013年7月	<u>K.Yamashita</u>
	Evaluation of Architecture Search Simulator for Wide-range Grid Wireless Sensor Network	14th International Forum on Embedded MPSoC and Multicore (MPSoC2014)	2014年7月	<u>K.Yamashita</u>
	Control System for Large-Scale Sensor Network	15th International Forum on MPSoC for Software-defined Hardware (MPSoC2015)	2015年7月	<u>K.Yamashita</u>
	Scheduling Methodology for Wireless Sensor Network System over the Winter Season	16th International Forum on MPSoC for Software-defined Hardware (MPSoC2016)	2016年7月	<u>K.Yamashita</u>
	Autonomous and Large Scale Sensor Network Technology to Contribute to a Safer, more Secure Society	Smart City Summit and Expo Taipei	2014年2月	<u>K.Yamashita</u>
	膨大な数で構成される自動型のセンサーネットワークにおけるIoTの課題	CSAJ コンピュータソフトウェア協会ワークショップ	2014年2月	<u>山下 浩一郎</u>

著者研究業績

種類別	題名	発表掲載誌名	発表年月	著者名
特許	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	情報処理学会 DA シンポジウム 2014 DA シンポジウム 2014 論文集 pp.177-182	2014 年 8 月	<u>山下 浩一郎</u>
	環境系センサーネットワークの実現手法	電気学会大 31 回 センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム 「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム論文集 電気学会センサ・マイクロマシン部門 31 pp.1-6	2014 年 10 月	<u>山下 浩一郎</u>
	環境モニタリングのための分野横断的 WSN システムアーキテクチャ設計と実証	電気学会電子・情報・システム部門大会	2015 年 8 月	<u>山下 浩一郎</u> <u>鈴木 貴久</u> <u>栗原 康志</u>
	情報処理システム、情報処理装置及び情報処理手法	特開 2012-84945(公開)		<u>山下 浩一郎</u> <u>山内 宏真</u> <u>栗原 康志</u> <u>鈴木 貴久</u>
	設計支援プログラム、設計支援装置、およびシミュレーションモデル	特開 2010-97493(公開)		<u>山下 浩一郎</u> <u>桑原 純吾</u>
	設計支援プログラム、設計支援装置、および設計支援方法	特開 2010-39678(公開)		<u>山下 浩一郎</u> <u>桑原 純吾</u>
	設計支援プログラム、設計支援装置、および設計支援方法	特開 2010-39677(公開)		<u>山下 浩一郎</u>
	同期方法、マルチコアプロセスシステム、および同期システム	WO2012/124078(国際公開)		<u>山下 浩一郎</u> <u>山内 宏真</u> <u>栗原 康志</u> <u>鈴木 貴久</u>
	並列処理制御プログラム、情報処理装置、および並列処理制御手法	WO2012/023175(国際公開)		<u>山下 浩一郎</u> <u>山内 宏真</u> <u>栗原 康志</u> <u>鈴木 貴久</u>
	ほか 23 件出願中			