

## 設備の状態監視用センサネットワークの可用性評価

信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

主任研究員 宮下 美貴

### 1. はじめに

鉄道沿線の様々な設備・環境の状態監視を行う、センサネットワークを用いた監視システムの研究開発が進められている。鉄道総研では、鉄道沿線の設備監視を行うための小型アドホック無線センサの研究開発を行ってきた。小型無線センサネットワークのメリットは、大がかりな配線工事を必要とせずセンシングが必要な箇所に簡易に取り付けできることにある。その中で、無線センサ機器に必要な電力供給は、基本的にバッテリー駆動または自然エネルギーを利用した手段が求められている。また、センサノードの設置箇所に関しては、センシング箇所によってはセンサ機器の保守や目視確認さえも厳しく、決定も難しい場合がある。他の電波やノイズ源から受ける干渉等の理由により、伝送が当初の想定通りにはいかない場合でも、一旦ノードを設置した後に、その設置箇所を頻繁に変更することは難しい。

一般的なアドホックセンサネットワークは、面的な広がりを持つ領域に対してセンサノードが設置される。それに対して、鉄道設備は線路に沿った線的な広がりの中に設置することになる。このような特徴から、ネットワーク構成に関しても条件が異なり、性能に対する評価結果やネットワーク運用手法も異なってくると考えられる。

こうした状況が想定される鉄道沿線の無線センサネットワークシステムの開発を行う上で、設置形態と設置後のバッテリー交換や故障対応といった運用を考慮したシステム提案は不可欠である。特に鉄道においては、定期検査や取換調整などの設備保守のタイミングが事前に決まっていることが多く、それにネットワーク保守の時期をリンクさせることも重要な検討要素である。

本研究では、沿線の保守現場への導入を想定した冗長経路を持つネットワークモデルを構築するとともに、このモデル上でネットワーク運用手法の違いによる可用性に及ぼす影響を比較し、どのように運用コストやネットワークの状態を左右するかを確かめるためのシミュレーションを行い、沿線のセンサネットワークに求められる性能（可用性）を評価する手法を構築した。

### 2. 鉄道保守現場における無線センサネットワークの可用性の考え方

鉄道沿線における状態監視システムのネットワーク運用手法を考えるにあたり、一定以上のネットワークの可用性を維持しつつ、監視する対象物の重要性等の条件に見合った運用コストを考慮することが必要である。そのために配置したセンサノードの故障およびバッテリー切れの状況を把握し、ネットワークの稼働率および交換作業のための労力を見積もることが重要となる。本研究では、可用性維持のために冗長経路を有し、かつ停止ノード数や冗長経路の実効本数に基づくネットワーク自己診断機能を持つネットワークを想定し、無線センサネットワークの可用性を評価することを目指す。今回、運用手法はセンサノードの交換タイミングにより決定することとし、可用性は交換にかかる運用コストとネットワークの稼働率から評価する。

### 3. 可用性評価のためのネットワークシミュレーション

#### 3. 1 ネットワークモデルの構築

鉄道沿線には見通しの良い河川、切り通し、駅舎（駅構内）、街中など、さまざまな環境および

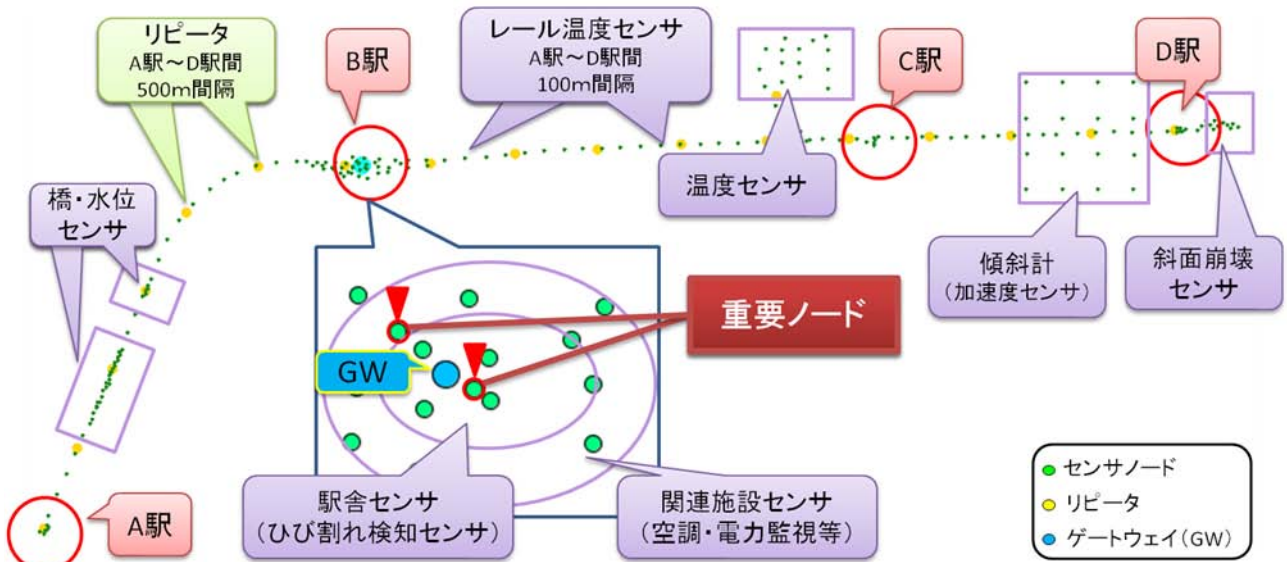


図1 鉄道沿線へのセンサノード設置を想定し構築したネットワークモデル

構造物が存在する。今回構築したネットワークモデルは、これら全体を監視するためのセンサノードを鉄道線路方向に展開・配置する、無線アドホックネットワークを想定した(図1)。

A駅からD駅の沿線(約8km)に、中継機能を持つセンサノードを194個、データ伝送効率・伝送距離を強化するためのリピータを500m間隔で最大24個、データ集約のためのゲートウェイ(GW)をB駅構内に置くと仮定する。

このセンサネットワークモデルにはノード密度の違いが存在する。高密度な領域の中に、GWが設置されているB駅周辺に重要ノードが存在する。重要ノードとは、図2の赤色で示した沿線ネットワークと駅構内ネットワークとの境界にあるセンサノードで、沿線ネットワークで取得されたデータが、リピータを通り、これを經由してGWに向かう。このノードは駅構内と沿線両方のネットワークとやり取りしなければならないので、GWへの伝送が集中することで負荷がかかる。また、リピータではなく普通のセンサノードであるため、バッテリー切れと故障が発生する可能性がある。そのため、このノードの死活状態がシミュレーションにも影響することとなる。

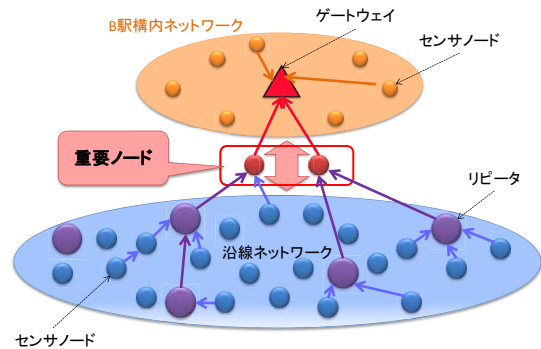


図2 モデル中の重要ノード

### 3. 2 シミュレーションのシナリオと条件

構築したネットワークモデルの可用性評価を目的としたシミュレーションを行うために、ネットワークが保証する経路数に基づいたノード交換手法のシナリオを整理した(表1)。ここではセンサノード故障およびバッテリー切れにより停止したノードを「停止ノード」とし、冗長経路をn本以上持つネットワークの「保証経路数」をn+1本とする。

表1 ノード交換タイミングによるシナリオ

ノードの交換手法	保証経路数1	保証経路数3
停止ノードの交換なし	停止ノードの交換なし	停止ノードの交換なし
停止ノードの即時交換	停止ノードの即時交換	
保証経路数の減少により交換		経路数2となるノード検出時に交換
		経路数1となるノード検出時に交換
停止ノード数により交換(停止ノード全交換)	10個以上停止で交換	10個以上停止で交換
	25個以上停止で交換	25個以上停止で交換
	40個以上停止で交換	40個以上停止で交換

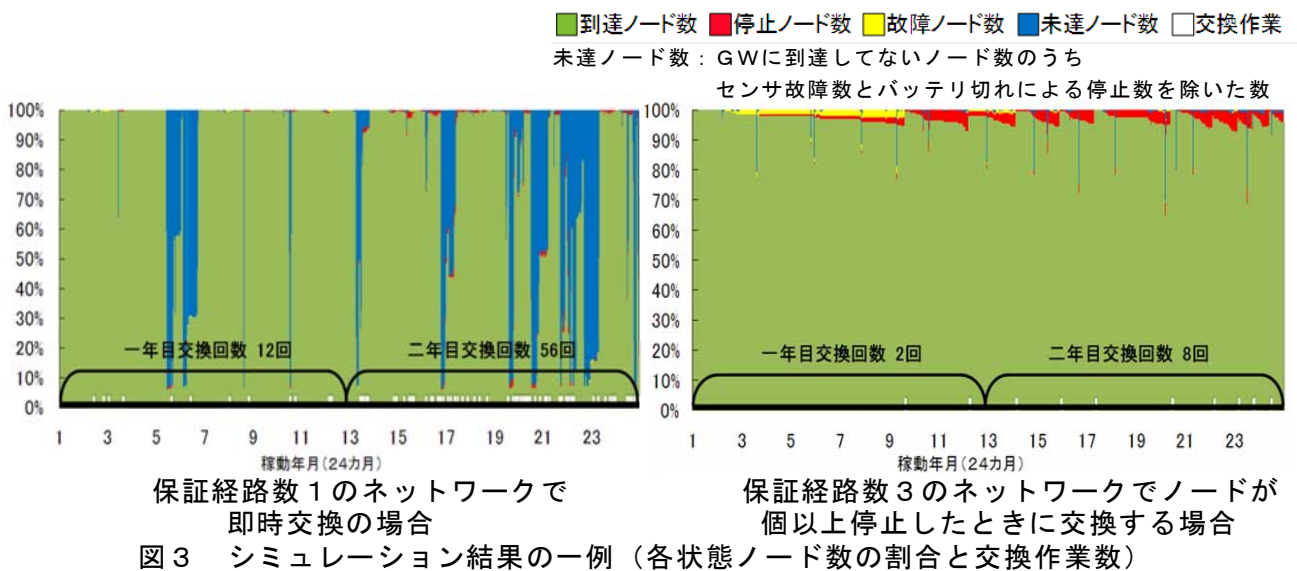
シミュレーションは、アドホックルーティングプロトコル WisReed<sup>®</sup>上で実施した。これは各ノードが隣接ノードとの通信品質・死活状態を監視し、冗長経路数を常時把握できるものである。設定条件等は以下の通りである。

- ・ 鉄道の設備検査において比較的長い定期検査周期である2年分を実時間5日で行った。
- ・ 半日に1回（シミュレーション実時間で5分に1回）、センサで取得したデータを送信する。
- ・ センサノードで取得したデータの送信方向はGWへの一方向とする。
- ・ センサノードはバッテリー駆動とする。
- ・ GW、リピータの電力は固定電源により、バッテリー切れ・故障はないとする。リピータは隣のリピータまで伝送可能とする。
- ・ その他のパラメータ（全シナリオ共通）として、①センサノードの故障率、②バッテリー切れのタイミング、③故障が起こるノードとタイミング、④保証経路数によるリピータ数、⑤停止ノードを発見してから交換作業を終了するまでの日数等がある。

### 3. 3 シミュレーションの結果と評価

図3にシミュレーションの結果の一部を示す。ここでは、到達率を [GWにデータが到達したノード数/全ノード数] により求める。

- ・ 図3(a)は、保証経路数1のネットワークでバッテリー切れおよびセンサノード故障により停止ノードが発生するたびに交換作業を行う場合の結果で、未達数が多くなる箇所が2年間の稼動中に分散している。これは重要ノードが停止し、その交換作業が終了するまでGWまでの経路が確立されないのが主な理由である。
- ・ 図3(b)は、保証経路数3のネットワークでノードが10個以上停止したときに交換する場合の結果で、2年目に交換回数が増加しているが、稼働率も安定しており、交換回数も少ない。



今回は、センサノードからGWまでの到達率に基づき、ネットワークの運用コストを試算した。運用コストは、故障等で停止したノードが発見された現場に行き交換作業を行うための人工と、交換するセンサノード価格の2つを要素として考える（図4）。交換のための人工は、区所から現場への移動時間、移動距離、およびノード取り替え時間等とする。また、センサノードの価格は、停止したノードのそのものの費用またはバッテリー費用とする。今回、1台あたりのセンサ取り替えコストを4万円、1回あたり保守作業員が一人で交換する費用を5万円、センサのバッテリー切

れに対する電池取り替え自体のコストは無視することとし、運用コストを [センサ取り替えコスト×故障数+交換人工×交換回数]により計算した。

各シナリオに対し表2のような結果が得られた。この中で、保証経路数3でノード停止数が10個以上となったら交換するシナリオが、交換回数が比較的少ないために運用コストを抑えられ、稼働率の面からも到達率90%以下となる日数が少ないことから、最も実運用に適していると考えられる。

このモデルでは鉄道沿線一様にセンサノードおよびリピータを配置したが、シミュレーションの結果判明した重要ノードへのリソースの重点投入（バッテリーの大容量化、二重系によるバックアップ体制等）が、ネットワークの可用性を高めるためには有効と考えられる。

今回のシミュレーション評価では、冗長経路数に基づきネットワーク監視を行う運用方法は、考慮したシナリオの中でもコストがかかる結果となった。また、停止ノードを正確に把握できる場合には、一定のノード数が停止した場合に交換する手法の方が有効であることが示唆された。

ネットワークの運用手法としてはコストが比較的大きくとも停止ノードに対して感度よく対応する必要がある場合には、経路数を監視する方法が有効であると考えられる。また、ある程度の稼働率が確保されればよい場合には、一定個数のノードが停止するまで待ち、故障ノードを一斉に交換する手法が、費用対効果の点で有効であると考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では、鉄道沿線への展開を想定した、複雑なプロトコルを持つアドホックネットワークに関し、多くの条件を考慮しつつその時々ネットワークの挙動を模擬できるシミュレーションにより、ネットワーク稼働状況を把握できることを確認した。

また、無線センサネットワークの可用性を、停止ノードおよび人工を考慮した運用コストと到達率に基づく稼働日数により評価することができた。今回与えた条件は一例ではあるが、シミュレーション結果を用いて可用性を判断する手法を構築することができた。

本モデルでは、冗長経路を有し停止ノード数や冗長経路本数を把握可能な自己診断機能を持つネットワークを想定したが、今後実運用に向け、停止ノード数や冗長経路数のような情報が把握できないようなネットワークに対してもこの手法をどう展開していくかについて検討していく。また、自己診断機能実現のために停止ノードを把握する仕組みについても併せて考えていきたい。

(参考文献)

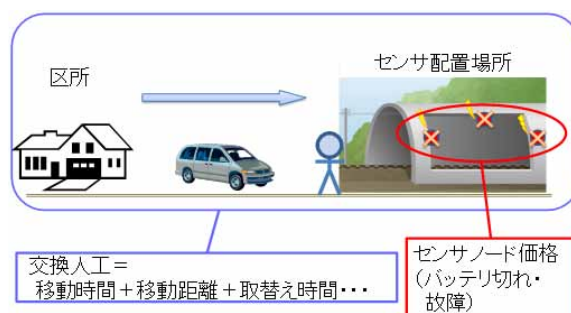


図4 運用コストの考え方

表2 シミュレーション結果によるシナリオの比較

保証経路数1						保証経路数3					
	交換回数 (回)	バッテリー切れ (個)	故障数 (個)	運用コスト計 (円)	到達率90%以下の日数 (日)		交換回数 (回)	バッテリー切れ (個)	故障数 (個)	運用コスト計 (円)	到達率90%以下の日数 (日)
交換無し	0	15	10		595	交換無し	0	38	10		444
即時交換	68	85	10	3,800,000	170						
						経路数2 検出	67	123	10	3,750,000	21
						経路数1 検出	60	119	10	3,400,000	18
10個以上停止で交換	5	47	10	650,000	371	10個以上停止で交換	10	104	10	900,000	18
25個以上停止で交換	1	15	10	450,000	576	25個以上停止で交換	3	68	10	550,000	111
40個以上停止で交換	0	15	10	0	594	40個以上停止で交換	2	71	10	500,000	315