

設備の状態監視用センサネットワークの可用性評価

宮下 美貴* 羽田 明生*
野末 道子* 土屋 隆司**

Availability Evaluation of Sensor Networks for the Railway Facilities Condition Monitoring

Miki MIYASHITA Akio HADA
Michiko NOZUE Ryuji TSUCHIYA

Some researches have been progressed on monitoring systems applying sensor network to observe the conditions of various facilities or surroundings. This paper reports on the result of the simulation to evaluate the sensor networks. This network is assumed to apply many wireless sensor nodes to surroundings near the railroad such as bridges, station buildings, side slopes and so on. We also consider the way of allocation of sensor nodes, the frequency of exchange for broken or battery-dead sensor nodes, and whether the network has the self-diagnosis function or not.

キーワード：可用性評価，状態監視，センサネットワーク，ネットワーク自己診断

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ため、センサネットワークを用いたモニタリングシステムの研究開発が進められている。鉄道総研では、鉄道沿線の設備モニタリング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。

一方で、無線伝送やセンサ機器に必要な固定電源からの電力供給は必ずしも容易ではなく、基本的に各ノードに対しては、バッテリーあるいは太陽光等の自然エネルギーを利用して個々の電源供給手段を装備することが求められている。また、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難しい場合がありえるなど、無線ノードの設置箇所の決定も難しい問題である。さらに、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。

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、設置形態とその後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等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、それに時期を連動させた形でのネットワーク保守も重要な検討要素である。

本稿では、鉄道沿線のセンサネットワークに求められる可用性を評価するため、沿線実環境を想定した、冗長経路を持つネットワークモデルを構築した。このモデル上で、ネットワーク運用戦略が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、シミュレーションを行った。

2. 関連研究及び本研究の位置づけ

センサネットワークに関する研究は非常に多く、これまでに様々な提案が行われてきた。これらセンサネットワークに関する既存研究は、対象とする問題の構造により幾つかのグループに分けることができる。例えば、センサデータ品質やセンシング箇所の被覆率等に関する条件を満たすセンサ配置を求める問題はcoverage problem^{1, 2)}、ネットワークの連結性を保証しつつ各ノードの送信出力水準を決定する問題はtopology control problem^{3, 4)}、ネットワークの連結性や消費電力等を考慮して伝送経路を決定する問題はpower aware routing problem^{5, 6)}と呼ばれている。しかし、これら既存研究の多くはネットワークの設計手法に関する提案であり、ノード故障、冗長経路確保等実運用上において要求される要件を考慮した、センサネットワークの長期運用戦略を決定するものではない。これに対して、本研究ではネットワーク設計に加え、これら実運用に要求される要件を考慮したセンサネットワーク運用戦略を決定する方法を示している。

* 輸送情報技術研究部 設備システム研究室

** 輸送情報技術研究部

特集：輸送情報技術

鉄道現場で活用されるセンサネットワークでは、長期間に渡る経年劣化等の状態監視を目的に導入されることが想定される。よって、ノード故障によるデータ損失、バッテリー交換タイミング、ネットワーク頑健性、通信スケジューリング等の長期運用に要求される様々な実際的な要件を考慮して、センサネットワークの長期運用戦略を決定することが求められる。このような戦略を決定する問題では、多くの要因が複雑に関係しているため、モデル構築の困難性や計算量の増大等の理由により最適化手法によるアプローチよりも、多くの条件を同時に考慮して実際のネットワーク挙動を模擬できるシミュレータを活用したアプローチの方が効果的である。そこで、本研究ではシミュレーションを利用して複数シナリオの性能評価を行い、この評価結果からセンサネットワークの効率的な長期運用戦略を決定する方法について考察する。

3. 無線センサネットワーク可用性評価の考え方

モニタリングシステムのネットワーク運用戦略を考えるにあたり、一定以上のネットワークの可用性を維持しながら、モニタリング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、ネットワーク稼動状況および交換作業のための労力を見積もることが重要である。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網を想定し、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、ネットワーク運用戦略はセンサノード交換のタイミングにより決定することとした。

運用戦略の例として、ノードそのものの故障やバッテリー切れにより停止したノードの交換タイミングを、停止数により決定する戦略がある。また、いくつかの冗長な

経路を設置したネットワークにおいて、ノード停止等による経路数の減少を経路途絶の予兆としてとらえ、その予兆情報をもとにセンサノードの交換タイミングを決定する戦略が考えられる。冗長経路数が多いモデルの場合には、経路上のトラブルがあった場合に迂回経路が用意されることからデータ到着の保証率は高くなるものの、ノード数が多くなることから交換対象となる無線ノードは多くなる。一方、冗長経路数が少ないモデルで経路上のトラブルが生じた場合には、データが即座に不達となる可能性が高くなる。

無線伝送ネットワークでは、伝送経路が固定的に決まった網（スタティック網）と、伝送経路が状況に応じて変化する網（アドホック網）がある。スタティック網であれば、あらかじめ網の構造が分かっていることから各ノード間のデータロス率等をもとにネットワークの挙動を静的に予測可能である。一方、アドホックネットワークでは網の構造が動的に変化するため、実運用における動作を分析するためにはシミュレーションによる検討が有効である。

そこで、ネットワーク運用戦略の違いが、ネットワークの可用性、運用コストに及ぼす影響を比較評価し、運用手法の妥当性を検討することとした。そのために、鉄道現場におけるセンサネットワーク保守を想定した幾つかのシナリオを用意し、シミュレーションを実施した。

4. ネットワークモデルの構築

鉄道沿線には河川、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、これら全体をモニタリング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 駅の沿線に、中継機能を持つセンサノード

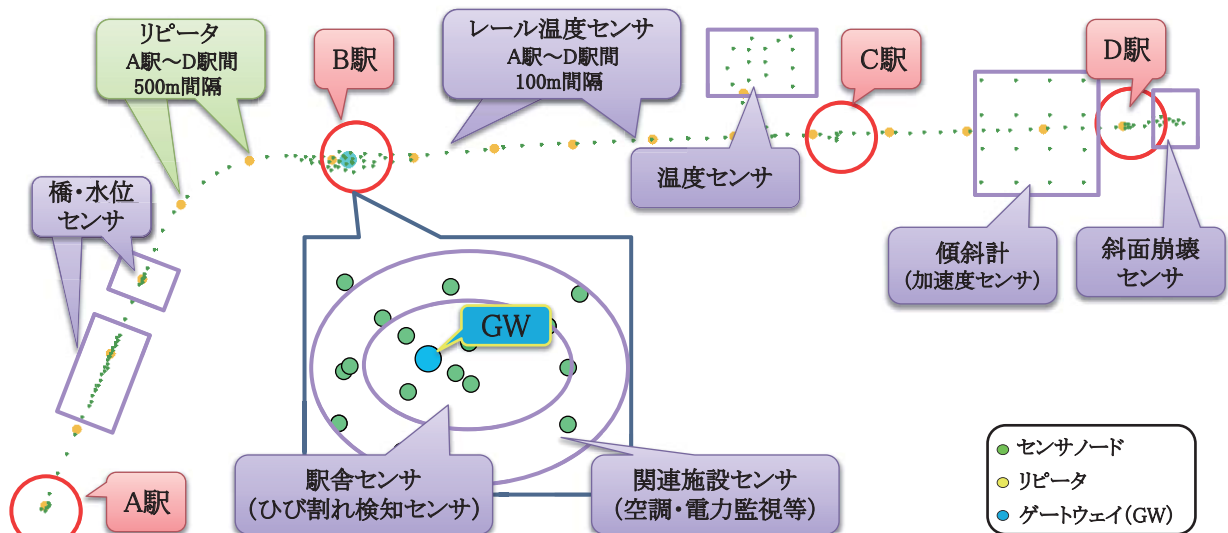


図1 鉄道沿線への設置を想定し構築したネットワークモデル

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（条件により変更）、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。センサの種類としては以下のものを考慮した。

- ・ 沿線全域にレール温度センサ（100m間隔）[109個]
- ・ A駅とB駅間の河川に橋・水位センサ（20m間隔）[橋センサ：23個、水位センサ：2個]
- ・ B駅周辺の駅ビル等に関連施設モニタリングセンサ（空調・電力監視等）[7個]
- ・ 各駅舎（駅構内）にひび割れ検知センサ等[20個]
- ・ C駅近くに温度（環境測定）センサ[9個]
- ・ C駅とD駅間に傾斜計（加速度センサ）[8個]
- ・ D駅近くに斜面崩壊センサ[16個]

このセンサネットワークモデルにはノード密度が高い領域と低い領域が存在する。前者の中に、GWが設置されているB駅周辺のような重要ノードが存在する（図2）。センサによって取得されたデータはリピータを通り、駅構内ネットワークとの境界にある赤色のセンサノード（重要ノード）を経由してGWに向かう。この赤色のノードはリピータではなく、普通のセンサノードであるので、バッテリー切れと故障が発生する可能性がある。さらに、両方のネットワークとやり取りをすることができるので、GWへの伝送が集中し負荷がかかるノードとなり、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。

5. ネットワークシミュレーション

5.1 シミュレーションのシナリオ

構築したネットワークモデルに対し、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戦略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」

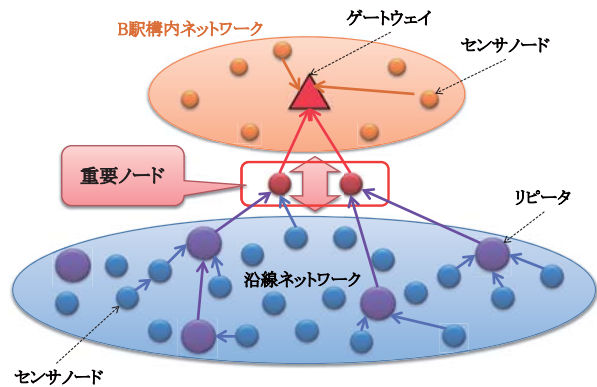


図2 ネットワークモデル中の重要ノード

はn+1本である（図3）。保証経路数1と保証経路数3のネットワークモデルについて、以下のようなシミュレーションを行った。

- ・ 停止ノードが発生しても交換しない（定期交換時まで運用継続）。
- ・ 停止ノードが発生したらその都度即時交換する（保証経路数1の場合のみ）。
- ・ ノードが停止したことによる保証経路数の変化を検出し交換する（保証経路数3の場合のみ）。
- ・ 停止ノードが一定数を超えたら、停止しているノードを全部交換する。

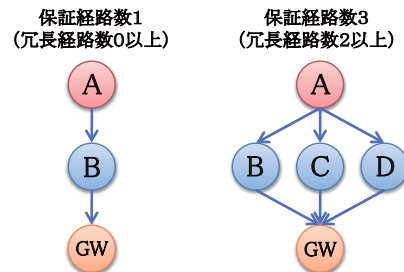


図3 ノード配置と保証経路数

5.2 シミュレーションの条件

今回のシミュレーションは、鉄道の設備検査において比較的長い定期検査の周期である2年分を実時間5日で

表1 実施シミュレーションのシナリオ

ノード交換戦略	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 (①)	停止ノードの交換なし (②)
停止ノードの即時交換	停止ノードの即時交換 (③)	
保証経路数の減少により交換		経路数2となるノードを検出時に交換 (④) (保証経路数が2になったとき)
		経路数1となるノードを検出時に交換 (保証経路数が1になったとき)
停止ノード数により交換	10個以上のノード停止で交換	10個以上のノード停止で交換 (⑤)
	25個以上のノード停止で交換	25個以上のノード停止で交換
	40個以上のノード停止で交換	40個以上のノード停止で交換

特集：輸送情報技術

行った。設定条件は以下の通りである。

- ・ 半日に1回（シミュレーションの実時間で5分に1回）、センサで取得したデータを送信するものとする。
- ・ センサノードで取得したデータの送信方向はGWへの一方方向とする。
- ・ センサノードはバッテリー駆動を前提とする。バッテリー切れは、フル充電の状態から185±4.5千回パケットを送受信したタイミングで起こるものとする。
- ・ センサノードの故障率は5%とし、故障が起こるノードとそのタイミングはランダムに決定する。ただし、故障率と発生タイミングは全てのシナリオにおいて同じである。また、故障ノードは正確に検出できるものとする（実運用における故障ノード検出手法については別途検討が必要である）。
- ・ GW、リピータの電力は固定電源により供給され、バッテリー切れはないものとする。また、故障が起こらない耐久性を持つものとする。リピータは隣のリピータまでデータを伝送することができ、保証経路数1の場合は18個、保証経路数3の場合は冗長経路数確保のため24個置くものと仮定する。
- ・ 停止ノードを発見してから交換作業を終了するまで6日間かかるものとする。

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 WisReed⁷⁾ 上で実施した。このプロトコルは、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することができるものである。これにより、経路途絶の予兆を検出可能で、安定した経路に切り替えることができる。

また、電波伝搬モデルは一般住宅地のモデルである。

5.3 シミュレーション結果

シミュレーションの結果例を図4～図8に示す。なお到達率は、下記により求める（図中の緑色部分）。

到達率=GWにデータが到達したノード数/全ノード数

保証経路数1の網で停止ノードが発生しても交換作業なしでそのまま放置する場合（図4）、5ヶ月半を過ぎた頃から到達率が10%を下回った。また、バッテリー切れによる停止数は19ヶ月を過ぎた頃から増加している。

保証経路数3の網でも同様に交換作業なしの場合、10ヶ月半を過ぎた頃に到達率が10%以下に落ちる（図5）。保証経路数1の場合に比べ、冗長経路数が多いことから到達数が保たれている期間が2倍近くに伸びている。また、シミュレーションの分析により、未達ノード数増加後に経路探索のためのパケットが増えることで、バッテリー消費量が増えるノードが発生し、停止ノードが増加することを確認できた。

図6は、保証経路数1の網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シナリオの結果である。未達数が多くなる箇所

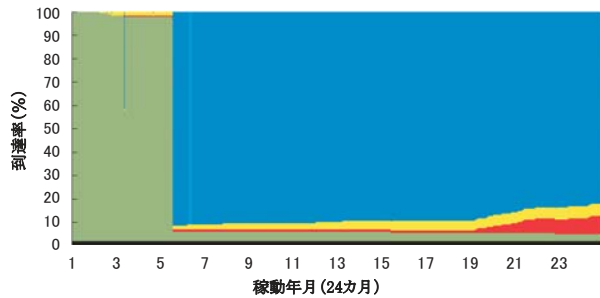


図4 保証経路数1の網で交換作業なしの場合
(表1の①)

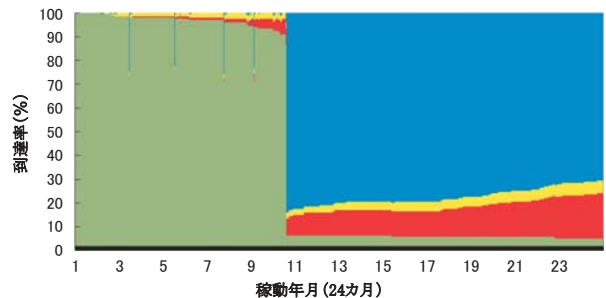


図5 保証経路数3の網で交換作業なしの場合
(表1の②)

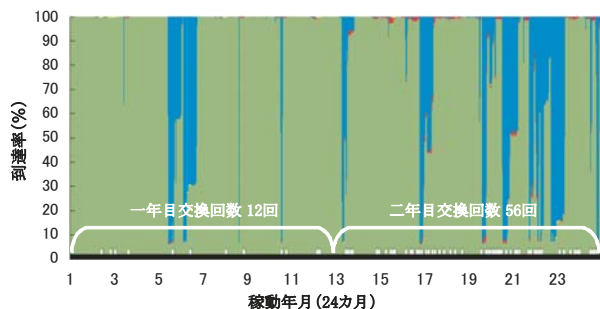


図6 保証経路数1の網で即時交換の場合
(表1の③)

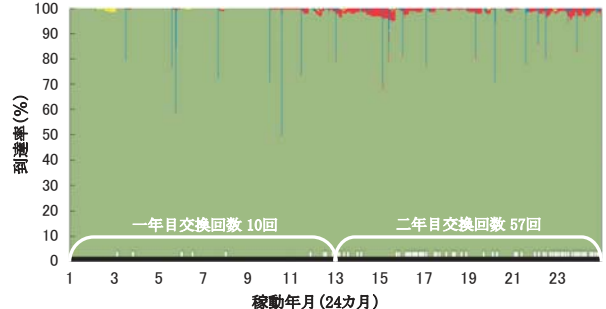


図7 保証経路数3の網で経路数2検出時に交換する場合
(表1の④)

■到達ノード数 ■停止ノード数 ■故障ノード数 ■未達ノード数 □交換作業
未達ノード数:GWに到達していないノード数のうち、センサ故障数とバッテリー切れによる停止数を除いた数

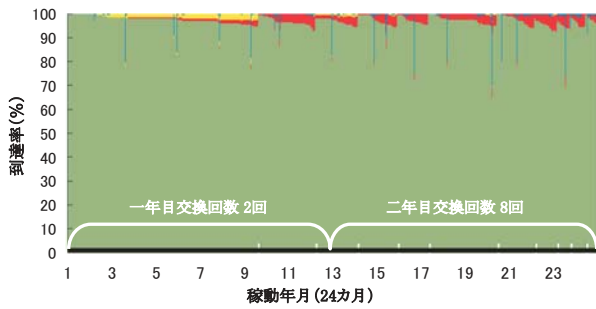


図8 保証経路数3の網でノードが10個以上停止したときに交換する場合(表1の⑤)

が2年間の稼動中に分散して見られる。詳細な分析をした結果、重要ノードが停止しその交換作業が終了するまで、GWまでの経路が未確立なためであることが確認できた。

保証経路数3の網でノード停止により経路数2のノードを検出したときに交換作業を行うシナリオの場合(図7)、いったんデータが未達状態になっても速やかに回復するノードが2年間の間に分散して表れる。これは冗長経路数がすぐに回復することで、経路探索もスムーズに行われ、到達率に大きな影響を与えないためと考えられる。また2年目は1年目より交換作業回数が増えているが、分析により経年によるバッテリー切れ増加のためであることを確認した。

図8は、保証経路数3の網でノードが10個以上停止したときに交換するシナリオの結果であり、2年目に交換回数が増加しているが、稼動率も安定しており、交換回数も前の例に比べて少ない。

5.4 評価方法と考察

5.4.1 コスト試算方法

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。

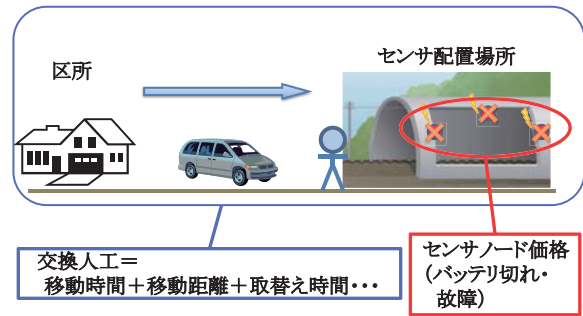


図9 運用コストの考え方

運用コストについては、図9に示すように、様々なセンサが配置されている中で、バッテリー切れやセンサノード故障等で停止したノードが発見された現場に、交換に行くことを考える。まず、区所から現場への移動時間、移動距離、およびセンサノード取り替え時間を交換のための人工とする。加えて、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をセンサノード価格とする。これら2つを運用コストの要素と考える。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ここでは無視できるものとし、

$$\text{交換コスト計} = \text{センサ取り替えコスト} \times \text{故障数} + \text{交換人工} \times \text{交換回数}$$

により交換にかかるコストを計算した。

5.4.2 考察

各シナリオに対して表2のような結果が得られた。まず、表2の保証経路数1で停止したノードが発見された場合、即時交換するシナリオと保証経路数3で10個以上停止した場合に交換するシナリオ(①と④)を比較すると、交換回数が①が④の約7倍となっており、交換コスト計にそれが大きく出ている。また到達率を見ても90%以下となる日数が約10倍となっている。

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	交換回数(回)	バッテリー切れ(個)	故障数(個)	交換コスト計(円)	到達率90%以下の日数(日)	保証経路数3	交換回数(回)	バッテリー切れ(個)	故障数(個)	交換コスト計(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 ^①	68	85	10	3,800,000	170	②						
						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	
③						10個以上停止で交換	④	10	104	10	900,000	18
10個以上停止で交換	5	47	10	650,000	371	25個以上停止で交換	⑤	3	68	10	550,000	111
25個以上停止で交換	1	15	10	450,000	576	40個以上停止で交換		2	71	10	500,000	315
40個以上停止で交換	0	0	0	0	594							

特集：輸送情報技術

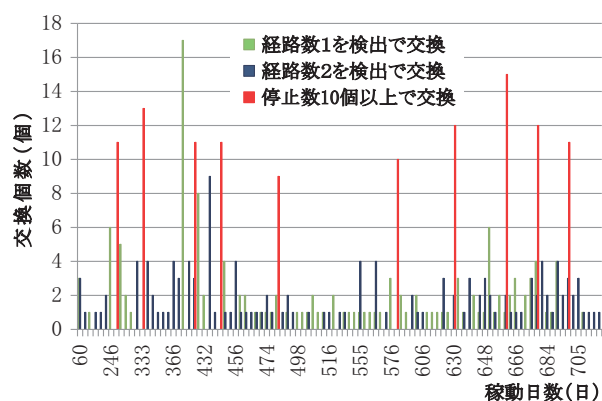


図10 保証経路数減で交換の場合との交換状況の比較

保証経路数1で一定以上の個数が停止したら交換するシナリオ⑥を④と比較すると交換回数は⑥の方が10個以上停止で交換の場合約半分、25個以上停止で交換の場合約10分の1となっているが、到達率が90%以下となる日数がシミュレーション期間中の半分以上で、④の20倍以上となっており、実運用を考えると厳しいと思われる結果である。

保証経路数3の場合において冗長経路数が減少し経路数が2および1が検出された場合に交換するシナリオ③を④と比較すると、到達率はほぼ同等とみなすことができるが、交換回数は④の6倍以上となっており、交換コストに影響している。また、図10に示すように③の場合にはノード停止数10個以内の交換が多く、10個まとめた交換が効率的であると考えられる。

保証経路数3の場合において一定以上の個数が停止したら交換するシナリオ③を④と比べると、交換回数は④に比べ少なく抑えられているが、⑥の場合と同様に稼働率が落ちる。しかし、⑥の場合に比べ、保証経路数が多い分、到達率が90%以下になる割合は低くなっている。

これらの比較から、今回の事例では、保証経路数3でノード停止数が10個以上になったら交換するシナリオが最も実運用に適していると考えられる。

6. まとめ

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おいて、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、ネットワークの稼働状況を把握できることを確認した。

今回のシミュレーションによる評価では、冗長経路数によりネットワーク監視を行う運用方法は、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戦略の方が有効であるということが示唆された。

ネットワークの運用戦略としては、コストが比較的大

きくなくて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できればよい場合には、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戦略が、費用対効果の点で有利であると考えられる。

今回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(固定電源での電力供給、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。

今後は、モニタリングの目的に応じたセンシング頻度や信頼性要求レベルの違いを考慮したケーススタディを行い、より実情に即した運用戦略に関して比較を行いたいと考えている。

謝辞

本シミュレーションを実施するにあたり、多大なるご協力をいただいた富士通株式会社の山口智子、由良正和両氏に感謝の意を表する。

文献

- 1) Y. Türkoğullari, N. Aras, İ. K. Altinel, C. Ersoy, "A column generation based heuristic for sensor placement activity scheduling and data routing in wireless sensor networks", *European Journal of Operational Research*, Vol.207, pp.1014-1026, 2010.
- 2) İ.K. Altinel, N. Aras, E. Güney, E. Ersoy, "Binary integer programming formulations and heuristics for differentiated coverage in heterogeneous sensor networks", *Computer Networks*, Vol.52, pp.2419-2431, 2008.
- 3) A. K. Das, R.J. Marks, M. El-Sharkawi, P. Arabshahi, "A. Gray, r-Shrink: a heuristic for improving minimum power broadcast trees in wireless networks", in: *Proceedings of the IEEE Conference on Global Telecommunications*, Vol.1, pp.523-527, 2003.
- 4) A. Konstantinidis, K. Yang, H. Chen, Q. Zhang, "Energy-aware topology control for wireless sensor networks using memetic algorithms", *Computer Communications*, Vol.30, pp.2753-2764, 2007.
- 5) F. Wang, D. Wang, J. Liu, "Traffic-aware relay node deployment for data collection in wireless sensor networks", in: *Proceedings of the IEEE Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communication and Networks*, pp.1-9, 2009.
- 6) H. Üster, H. Lin, "Integrated topology control and routing in wireless sensor networks for prolonged network lifetime", *Ad Hoc Networks*, Vol.9, pp.835-851, 2011.
- 7) <http://jp.fujitsu.com/solutions/wisreed/>