

# 鉄道環境における Wi-SUN センサーネットワークの活用

野末 道子\* 岩澤 永照\* 流王 智子\*  
川村 智輝\* 川崎 邦弘\*\* 岩城 詞也\*

## Application of Wi-SUN Sensor Network for Railway Monitoring

Michiko NOZUE Nagateru IWASAWA Satoko RYUO  
Tomoki KAWAMURA Kunihiro KAWASAKI Nariya IWAKI

In this study, we developed a condition monitoring system for railway structures using Wi-SUN technology and applied it to the railway ground structures. The Wi-SUN prototype sensor has a mode transition function of adaptively changing the frequency of measurement and transmission based on the data acquired by itself. As a result of the evaluation of its application to a railway commercial line for about 1 year on, the Wi-SUN wireless sensors which had been installed according to its radio propagation reliability achieved an arrival rate of 98% on average. It is confirmed that the possibility of applying the Wi-SUN to railway environment is high.

キーワード：Wi-SUN, 省電力センサー, 鉄道設備, 状態監視システム, センサーネットワーク

### 1. はじめに

膨大な鉄道設備の維持管理を行う上で、省力化、高精度化の視点から状態監視システムの開発への注目が高まっている。特に近年、技術の進歩が著しい ICT, IoT 技術を活用し、無線式センサーを各種設備に取り付けることにより状態を連続的に監視するシステムが多く開発されている。それらのシステムから収集されたデータを集約し、ビッグデータとして活用する中で、新たな知見を導出する試みもある。鉄道総研においても、災害時等に迅速な復旧や適切な判断を行うため、鉄道設備の状態の定常的な監視や、危険予知に関する研究開発を進めてきた。

筆者らは、従来から様々な無線技術を活用した状態監視向けセンサーネットワークの開発に携わってきた。しかしこれらは、沿線の膨大な鉄道設備に取り付けられたセンサーデータを収集できるネットワーク基盤として確立したものではなく、統一的な技術開発が求められていた。そこで、このネットワーク基盤への適用が期待される無線通信規格である Wi-SUN を利用して無線センサーを試作し、鉄道環境への仮設、データの収集、評価試験を実施した。本稿ではこの Wi-SUN を活用した状態監視システムの可能性を検証する中で、特に営業線沿線線路監視に適用した事例について報告する。

なお、本研究開発成果は国立研究開発法人情報通信研究機構（以下、NICT）の委託研究テーマ「ソーシャル・ビッグデータ利活用・基盤技術の研究開発」において得られたものであり、三菱電機株式会社、学校法人早稲田

\* 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

\*\* 信号・情報技術研究部

大学、株式会社アイ・エス・ビーとの産学共同で開発を進めてきた。以下の報告では鉄道総研及び上記の各機関が開発、検討した内容も含まれている。

### 2. 無線センサーネットワークによる状態監視システムの課題

鉄道設備において、主に定期検査や定周期交換による「時間計画保全」が行われている。こうした定期検査では、半年から2年に一回程度の周期で検査を実施した際の設備の状態を把握することはできるが、段階的な劣化傾向や、季節変動傾向などをきめ細かく把握することが難しい。そのため、設備の機能不全リスクを考慮した上で、保守、修繕をどのタイミングで行うのが費用対効果の面で最良であるかを決定することが難しいという課題があった。そこで、常時モニタリング技術を活用してより細かい時系列状態データを取得し、定期検査の間を補完することで、設備の不具合に起因するリスクを適切に低減しつつ、過剰保守を回避して効果的な設備保全計画の策定を可能とすることが期待されている。

状態監視保全は、中長期的には保全コストの削減につながるだけでなく、よりリアルタイムに近い設備状態を把握することにより、緊急措置を要する状態変化の迅速な検知が可能となる、という安全管理上の効果も期待される。その一方で、システムの導入に対する初期費用、バッテリー交換や機器の取替等のメンテナンスに伴う費用の投資が効果に見合うものであるか、経営的な判断が要求される。そのため、導入コストやシステムのメンテナンス費用の低減化施策が普及の鍵になっていると言える。

表1 Wi-SUN と他の無線通信規格の比較

		429MHz 帯	920MHz 帯 (日本国内 Wi-SUN 規格で使用)	2.45GHz 帯 (Wi-Fi, ZigBee で使用)
無線 諸元	帯域幅 (1ch あたり)	8.5kHz	200kHz ※一部 100kHz	22MHz (IEEE802.11b) / 2MHz (ZigBee)
	チャンネル数	30	38 (20mW 時) / 77 (1mW 時)	14 (IEEE802.11b) / 16 (ZigBee)
	最大送信電力	10mW	20mW	10mW
	最大到達距離	1.5km 程度	1km 程度	100m 程度
	最大通信速度	4.8kbps	500kbps	22Mbps (IEEE802.11b) 50kbps (ZigBee)
電波 特徴	回り込みのしやすさ	○	○	△
	干渉	少	少	多
データ 伝送 特徴	マルチホップ伝送	やや困難	可能	可能
	IP ネットワーク親和性	△	◎	◎

### 3. 無線通信規格 Wi-SUN

Wi-SUN (Wireless Smart Utility Network) は、NICT が中心となって開発した 920MHz 帯を利用する無線通信規格である。Wi-SUN は、電力やガスなどのスマートメーター分野への展開を目的として開発が進められ、一般家庭への普及が促進されていることでも注目されている。こうした背景から、ネットワークベンダーの参入が進み、無線センサーモジュールなどのハードウェアの市場規模も拡大している。

Wi-SUN と他の無線センサーネットワークで利用される無線規格の代表的な仕様とその特徴を表 1 に示す。日本国内で Wi-SUN が使用する 920MHz 帯は、2012 年に新たに ISM バンド (Industrial, Scientific and Medical Band) として産業・科学・医療分野向けに割り当てられた。送信出力を 20mW 以下とし、所定の条件を満たしていれば、これまで主に無線センサーネットワークで使用されてきた 429MHz 帯や 2.45GHz 帯と同様、免許不要で使用できる周波数帯域である。

鉄道環境へ導入した際に大きなメリットとなる Wi-SUN の特徴として、バッテリーで数年以上の寿命を実現する省電力性が挙げられる。鉄道環境においては電源を確保できない場所にセンサーが設置されることが多い。そのためバッテリーを有するセンサーや中継装置でマルチホップ伝送を行うことができれば、1つのネットワークで広いエリアをカバーできるようになり、線状に長く広がる鉄道現場におけるネットワーク設計が容易になることが期待される。920MHz 帯は、429MHz 帯と比較すると 1ch あたりの帯域幅が広く、伝送速度が速いため、大規模マルチホップ伝送にはより有利である。さらに、2.45GHz 帯と比較すると到達距離が長く、電波が回り込みやすいことから電波到達性が高いと言える。この性質により、電化柱や器具箱などの電波伝搬に影響する

障害物が多いため見通しが確保しづらい鉄道現場の状態監視においても、安定した通信の確保が期待できる。

Wi-SUN のデータを集約する上でのメリットとして、ZigBee 物理層で採用されている IEEE 802.15.4 を拡張した IEEE 802.15.4g を採用していることが挙げられる。IPv6 のパケットを伝送することが可能であるため Wi-Fi などの回線網を経由してクラウド環境等にデータを集約するのに適している。通信モジュールの普及やアプリケーション開発事業者の増加により、様々な分野の状態監視システムへの導入が期待されている。

### 4. 鉄道営業線斜面における実証実験

Wi-SUN によるセンサーネットワークの適用対象を詳細に検討した結果、近年、ゲリラ豪雨による斜面災害など、特にモニタリングの要求が高まっている鉄道沿線斜面状態監視を本研究における検討対象に選定した。鉄道では、沿線に多くの盛土や切土等の土構造物が存在する。これらの土構造物では、その土地固有の植生状況があることや、足場をかけて上ることが容易でない等、近接での目視検査の実施が困難な場所が数多くある状況である。

以下、実踏調査による現地の分析、センサーの選定、センサーの要件について述べる。

#### 4.1 監視センサーの選定と設置に関わる要件

対象とした実証試験斜面は盛土区間と切土区間が連続的につながる緩やかなカーブ区間である。斜面自体は低雑木と雑草に覆われている。また鉄道用地外地である周辺には高い樹木があり、それぞれの場所毎に異なるが、斜面が日陰となる時間帯が存在している。

このような区間や植生、現地の斜面の測量を含め地質等の情報にもとづき、実際の監視に必要なセンサーの種

表2 選定したセンサー

センサー種類	目的	設置場所
傾斜センサー	斜面状態把握	要監視場所
土壌水分センサー	斜面状態把握	連続する構造物毎
温湿度, 雨量, 風速風向計	環境条件把握	対象エリア毎
カメラ	斜面状態把握	監視エリア毎

類及び設置箇所を決定した。この結果を表2に示す。

センサーの設置については地盤防災の専門家の意見も踏まえて場所の選定を進めた結果、線路方向に2箇所の計測箇所を抽出した。さらに高さ方向の計測位置決定の妥当性を検証するためのデータ取得を目的として、同じ計測箇所の上下の位置での計測を実施した。

また盛土区間については、現場の設備管理者の要望も受けてセンサーの設置場所を決定した。

#### 4.2 監視状態に応じたモード遷移機構の開発

鉄道総研ではこれまで、常時状態監視向けと異常時向けの、二つの目的に応じた状態監視システムの開発に取り組んできた<sup>1)</sup>。

常時状態監視向けのシステム開発の事例としては、鉄道構造物の維持管理向けのものがある。構造物の健全度に影響する計測項目を長期的に監視し、適切な時期に代替や補修計画を立てることに資することで設備のライフサイクルコストの低減を目的としている。

通常、この常時状態監視向けシステムで取得するデータは、その状態変化が緩やかである。計測頻度も1時間～1日に一回程度でも十分な要件を満たしていることが多く、対象設備と同等の寿命の実現は困難としても、状態監視システムとしての長い運用寿命が求められる。また状態監視システムは対象設備の保守コスト以上の費用がかかるものを開発、設置することは現実的ではないことから、MEMSセンサー等の安価な機構かつ、バッテリー等を使用した設置コストの低いシステムへの要求が高い。これらの要求を満たすよう、汎用の無線センサーネットワークを利用したデータ収集システムの開発が進められてきた。

一方、地震や落石、橋脚の洗掘や車両衝突など、予測が困難で突発性の高い事象に対して緊急を要する判断が必要な異常時対応の状態監視システムがある<sup>2)</sup>。この目的の場合には、常時のデータ計測、高頻度のデータ伝送、現在の状況を監視者がリアルタイムに取得できる機能等が求められる。このため、基本的には伝送容量も大きくなり、リアルタイム伝送を実現するために固定電源を確保するとともに、高いデータ要求レベルに応じた信頼性の高い有線系のシステム導入の方が適していると想定さ

れる。

しかし、実際の導入の場面においては、常時状態監視目的として開発したシステムに対しても、異常時向けの高頻度なデータ計測や上流側からのリアルタイムのデータ取得対応が期待されることが多く、異常時向けの対応ができないシステムに対して鉄道事業者の導入意欲を喚起することが難しかった。

Wi-SUN自体は他の無線モジュールに比較して低消費電力化が実現されているが、その特徴を前提としても連続的な高頻度測定を実施した場合には、Wi-SUNセンサーの消費電力が大きくなるという課題がある。これに対して鉄道沿線斜面においては、容易に現地にアクセスすることができず、電源の確保も難しい場所が多いため、バッテリー駆動のセンサーを前提とし、バッテリーの交換頻度自体も減らした省電力運用が要求される。そこで、Wi-SUNセンサーの取得する測定値に応じ、計測頻度と無線送信周期を制御する機構を開発した(図1)。

これにより、センサーの測定値が閾値を超えた場合、自律的に計測頻度を切り替え、低消費電力と計測精度の両立を実現するシステムとした。

また、センサーが単体で判断してモード遷移する機構の他、図2に示すように、外部からの制御も可能な判定機構を開発した。この機構によって、設置した箇所の特徴からセンサーが常態的に高頻度モードとなるような場合、高頻度モードへの遷移を抑制することができる。一方で、あるセンサー、もしくはセンサー群が閾値を超える変化を示した場合、近隣のセンサーの計測頻度も上げ

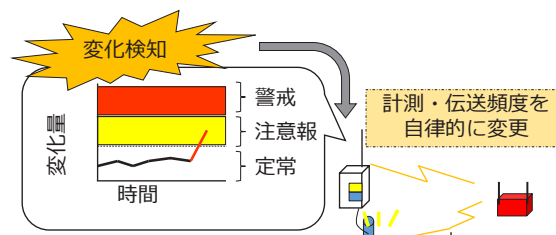


図1 自身の計測データに基づくモード遷移

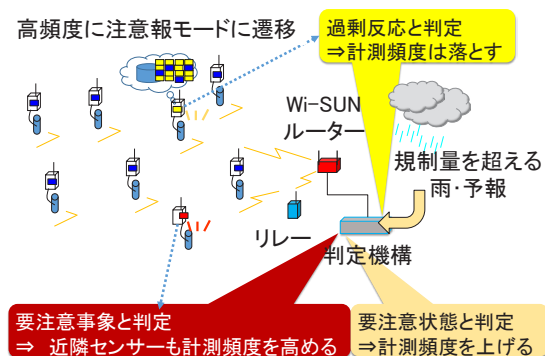


図2 外部制御に基づくモード遷移

特集：信号通信技術

て全体の動きを把握する機能をネットワーク、アプリケーション、センサー機器それぞれに組み込む設計とした。

4.3 Wi-SUN 傾斜センサーの開発

前節で設計したモード遷移機構を組み込んだ、Wi-SUN 傾斜センサーの開発を三菱電機株式会社が実施した。モード遷移条件とそれぞれのモードにおける計測、伝送頻度について表3に示す。ただし、モード遷移条件については、センサーの個体毎の感度や現地の日内変動を元に調整等を行う必要があり、ここで示した傾斜角の閾値は、斜面崩落検知の一般条件として確立しているものではない。なお、土壌水分センサーについてはモード遷移機構を組み込みまず、1時間に1回の計測とした。

表4には、開発したWi-SUN 傾斜センサーのハードウェア及びネットワーク仕様を示す。電源は充電可能な外部バッテリーを用い、鉄道環境における長期間稼働を想定して太陽光パネルによる充電機能を実装した。

また、現地の気象条件を計測するために気象計測装置をWi-SUN ルーターの設置箇所に設置するとともに、斜面の状態を目視で確認できるようにするためのWebカメラを設置した。

4.4 ネットワーク設計

本研究で開発したWi-SUN 状態監視システムを西武鉄道沿線に設置した。このネットワークの全体構成を図3に、センサー等の設置状況写真と設置概要図を図4に示す。

ネットワークはモード遷移機構を持つWi-SUN 傾斜センサー5台、Wi-SUN 土壌水分センサー2台、中継装置3台、Wi-SUN ルーター、Web カメラ、気象観測用センサー各1台から構成されている。実証実験区間は緩やかにカーブをしており、Wi-SUN ルーターと傾斜 A、傾斜 B、土壌 A のセンサーを除き、直接の見通しが無いことから、1ホップでは到達の難しいセンサーも存在する。これらに対しては、3台設置した中継装置を介してWi-SUN ルーターまでホップさせるネットワークを設計した。

Wi-SUN 傾斜センサー、及び土壌水分センサーが取得したデータはWi-SUN センサーネットワークを経由してWi-SUN ルーターに集約される。Wi-SUN ルーターは集

表4 Wi-SUN 傾斜センサー仕様

項目	内容	
ハードウェア仕様	センサー	2軸MEMS傾斜計、温度計
	電源仕様	外部充電電池（太陽光パネル併用）もしくは乾電池
	大きさ（センサー部及びバッテリー部を除く）	無線部及び計測CPU部筐体 10cm×10cm×15cm アンテナ部 15cm
	計測データ等ロギング	SDカード搭載
ネットワーク仕様	周波数	920MHz band
	プロトコル	RPL方式 経路制御アルゴリズムは「OF0」 ※RFC6552 Objective Function Zero for the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks(RPL) 準拠
	変調方式	2値GFSK
	データレート	100kbps
	伝送電力	20mW
	受信感度	-103dBm（100kbps, BER<0.1%）
	周波数偏差	±20ppm以下
	I/Fプロトコル	6LoWPAN, IPv6, ICMPv6, RPL, UDP

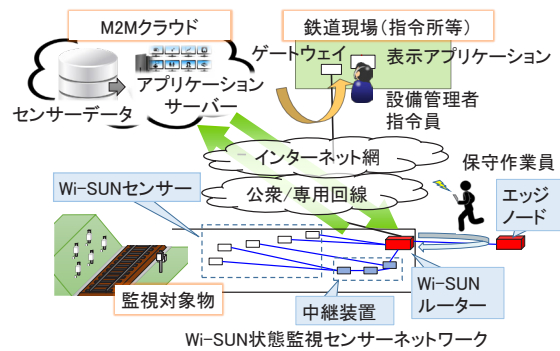


図3 Wi-SUN 状態監視センサーネットワーク全体構成（文献3を一部修正）

約したセンサーデータを公衆回線もしくは専用回線を用いてM2M（Machine to Machine）クラウドに伝送する。M2Mクラウドに蓄積されたセンサーデータは、アプリケーションサーバ上の実証実験用表示アプリケーション

表3 Wi-SUN 傾斜センサーの計測・伝送頻度

モード	モード遷移条件 (傾斜角速度変化量の初期閾値)	計測頻度	伝送頻度	備考
定常	0.01°未満	1回/1時間	1回/1日	24回分の計測値を2分割で送信
注意報	0.01°以上0.1°未満	1回/10分	1回/30分	3回分の計測値をまとめて送信
警報	0.1°以上	1回/5分	1回/5分	

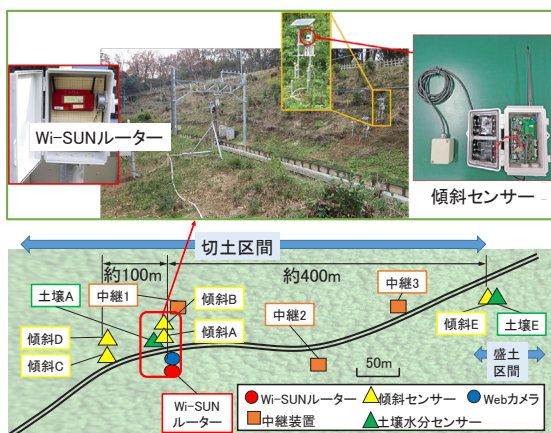


図4 設置状況写真と設置概要図

を用いて表示することが可能である。開発した表示画面例を図5に示す。

図3に示したように、ルーターに接続したエッジノードでは、集約したセンサーデータを元に各センサーの状態把握を行い、その判定処理結果に基づいて、Wi-SUNセンサーのモード遷移指示をルーター経由で行う<sup>4)</sup>。

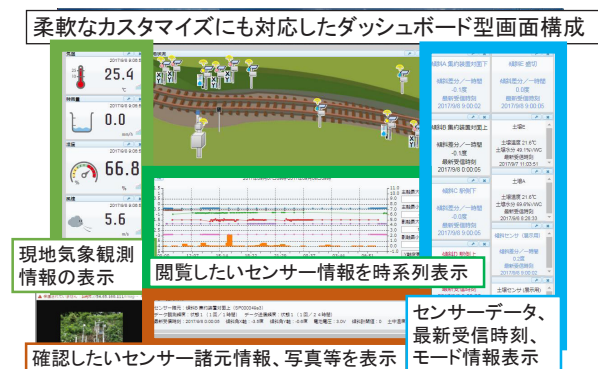


図5 センサーデータの表示アプリケーション

## 5. 実証実験結果

### 5.1 データ到達率の評価

Wi-SUN ルーター、Web カメラ、気象観測装置を計測斜面の対面に設置し、その対向斜面に傾斜センサーを2台、土壌水分センサーを1台設置した。この3台のセンサーについては約11ヶ月、その他のセンサー、ならびに中継装置については約6ヶ月の試験を実施した。傾斜センサーの伝送試験結果を図6に示す。

傾斜センサー A, B 及び土壌水分センサーについては実験期間中には電波の伝搬環境に大きな影響を及ぼす事象は発生せず、傾斜センサー A, B について、M2M クラウドまでの到達ロスは無かった。

一方、傾斜センサー C, D 及びマルチホップ伝送を行う E についてはデータロスや機器の不具合、故障が発

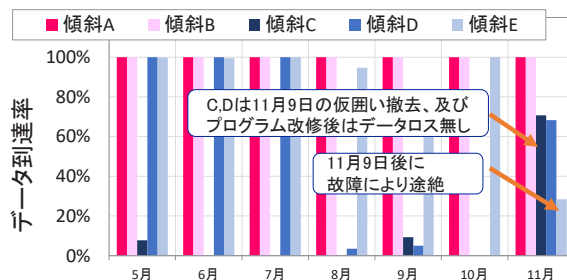


図6 Wi-SUN 傾斜センサーのデータ到達率

生した。データロスの要因としては、現地の電波伝搬環境の変化が要因として挙げられる。まず実証実験期間中に、ネットワークの設計時には存在していなかった工事用仮囲い（金属製高さ2m）がWi-SUN ルーターと傾斜C, D の間に設置される事象が発生した。また、現地の伝送における影響の因果関係を直接的に示すことはできなかったが、草木の繁茂の影響も存在したと考えられる<sup>3)</sup>。なお、2017年11月上旬以降はこの仮囲いが取り外され、以後3週間の期間についてデータロスは無くなった。以上の結果、システムの故障による期間を除き全体の平均到達率は98%となった。

### 5.2 モード遷移機構の評価

傾斜センサーではモード遷移機構の動作検証も実施している。ここでは、Wi-SUN 傾斜センサーの二軸のうち一軸のみについて2017年7月17日から3日間のデータを例として図7に示す。

横軸はデータの計測時刻、縦軸はセンサーの傾斜角速度を示しており、定常モード（白）、注意報モード（黄）、警報モード（赤）を表している。取得したデータを詳細分析した結果、設定した閾値で注意報、警報モードに適切に遷移し、本研究で提案したモード遷移機構が正常に動作していることが確認できた。なお、ここで取得し表示しているデータは、モード遷移機構の動作検証を目的として閾値を低く設定したため、非常に微細な変動でモード遷移を強制的に発生させている。そのため実験斜面が実際に警報の発報を必要とする状態になったことを示しているものではない。

本実証試験で設置したセンサーにより取得したデータ

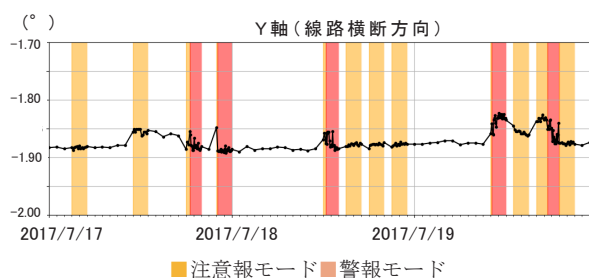


図7 データ計測状況とモード遷移

特集：信号通信技術

を分析した結果、設置場所によって日内変動等の動きの差が大きく、一律の閾値設定が難しいことが知見として得られた。実際の導入場面においては、現地における導入試験期間を設けて学習用のデータを取得し、そのデータから閾値を導出する等の、閾値設定の手順や仕組みの構築が必要である。これらの仕組みの検討については、今後の研究課題としていきたい。

5.3 導入ガイドの開発

一連の実証試験を元に、場所の決定や監視方法の決定、計測項目やその頻度の決定等にいたる導入のフローを「鉄道環境への Wi-SUN 無線センサーネットワーク導入ガイド」としてまとめた。この導入ガイドの構成を図8に示す。

本ガイドを活用して、Wi-SUN 無線センサーネットワークの鉄道土木構造物の状態監視への適用を検討する鉄道事業者に対し、ネットワークの設計支援を実施していきたいと考えている。

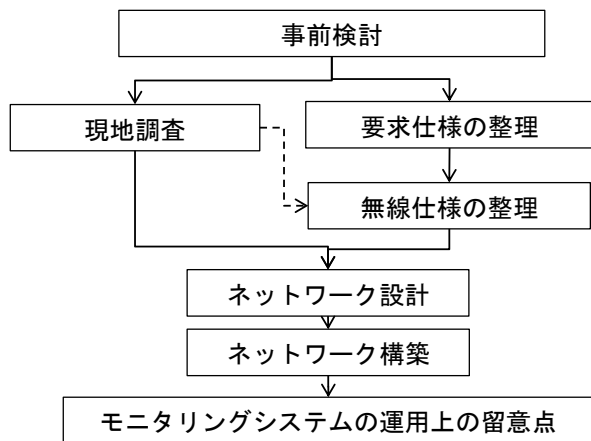


図8 鉄道環境への Wi-SUN 無線センサーネットワーク導入ガイドのフロー

6. おわりに

鉄道の営業線斜面において Wi-SUN センサーネットワークの実証実験を実施した。約 500m の区間のうち、中継装置を介さないセンサーにおいては、列車の通過影響、架線の影響などが想定される条件においても、Wi-SUN が伝送媒体として十分な性能を発揮することを確認した。なお、Wi-SUN ルーターまで約 400m の区間のマルチホップ伝送や障害物が存在する場所におけるセンサー設置については、通信プロトコルの見直しの他、更

なる実証的な検討が求められている。

斜面への導入前に実施した要求分析の結果では、これらの沿線斜面については変化が見られない限り、データ伝送の要求頻度は高くはない。一方で、ゲリラ豪雨などの事象が発生した場合など、より高頻度に状態を監視したい状況も存在する。そこで常時状態ではなるべく低頻度の計測により、バッテリーの寿命化をはかるとともに、何らかの変化が発生した時、もしくは豪雨事象など、高頻度データが求められる場合に、その時々状況に応じた頻度での測定、伝送が可能な機構を設計し、この機構を組み込んだセンサーを開発した。ここで検証を実施した状態遷移機構については、今後の状態監視システムの考え方において有望であるという鉄道事業者の意見も多く聞かれており、今後の導入の展開を進めていきたいと考えている。

本検証試験で得られた実フィールドでの知見を元に、鉄道環境への Wi-SUN センサーの導入ガイドをまとめた。このガイドも活用しつつ、今後の鉄道事業者による Wi-SUN センサーネットワークの導入に際し設計支援を実施していく予定である。

謝 辞

本研究の実施にあたり、現地試験にご協力いただきました西武鉄道(株)の関係の皆様へ深く感謝いたします。また本研究成果は、国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)の委託研究「ソーシャル・ビッグデータ利活用・基盤技術の研究開発」により得られたものです。

文 献

- 1) 小島芳之, 野末道子: 鉄道構造物の維持管理における IT の活用, 土木技術, Vol.71, No.5, pp.14-19, 2016
- 2) 野末道子, 中村一城他: 鉄道設備モニタリングへの Wi-SUN 技術の適用について; 鉄道の土木構造物を対象として, 信学技報, Vol. 117, No. 352, RCS2017-257, pp.41-46, 2017
- 3) 岩城詞也, 流王智子他: 鉄道沿線斜面における無線センサーネットワークの構築, 第 24 回 鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2017), 2017
- 4) 小川啓吾, 坂牛和里他: 高品質・低負荷・省電力なフィールド監視システム, 信学技報, Vol. 117, No. 329, CS2017-73, pp. 79-84, 2017