

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信  
情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# 地上設備の 信頼性向上に向けて

地上設備は、鉄道の運行に必須な要素の1つであり、安全で安定な輸送を維持するためにはこれら設備に故障や障害が発生しないよう信頼性を高めることが必要不可欠です。設備の信頼性向上のためには、壊れにくい構成部品や施工方法、部品が壊れても設備の機能を維持できるような設計手法や故障した場合の影響を評価する手法、故障の発生を予見し事前に対処を行う手法などが必要になります。



**関 清隆**  
Kiyotaka Seki  
信号・情報技術研究部  
主管研究員  
【専門分野】 鉄道通信、  
ネットワーク技術

## はじめに

鉄道は、構造物、軌道、電車線、信号通信などの多数の地上設備の上に成り立っているシステムです。そのため、安全で安定な輸送を維持するためには地上設備の信頼性向上が不可欠です。国土交通省の公表する「鉄軌道輸送の安全にかかわる情報（平成23年度）」では、鉄道施設の故障などによる輸送障害（列車の運休、旅客列車の30分以上の遅延など）は367件発生しており、全輸送障害件数（5,278件）のうちの約7%となっています。この件数を減らせば、その分安定輸送に寄与することになります。

## 信頼性とは

信頼性とは、「アイテムが与えられた条件で規定の期間中、要求された機能を果たすことができる性質」と定義されています（JIS-Z8115）。「アイテム」とは、部品レベルから装置やシステム全体まで、考えている対象を指します。鉄道の地上設備として考える対象としてはハードウェアだけでなく、近年ではコンピューターのソフトウェアや通信システムなどを含むこともありま

す。高い信頼性を保ち、機能を果たし続けるためには、「壊れない」、「壊れそうになったら分かる」などが必要です。また、コンピューターシステムや通信ネットワークでは外部からの攻撃やノイズなどの外乱によって停止・誤動作などをしてもいけません。さらに、1つの装置が壊れても他の装置がその機能を代行できるようにシステムを構成することも必要になるでしょう。

信頼性を数値化して表現する尺度としては、信頼度（与えられた期間に与えられた条件下で機能を発揮できる確率）、故障率、平均寿命、MTBF（Mean Time Between Failure：故障の修理が完了してから次の故障が発生するまでの平均時間間隔）、MTTF（Mean Time To Failure：故障の発生から次の故障の発生までの平均時間間隔）などがあります。

## 信頼性向上を図る意義

近年、RAMSという考え方が注目されています<sup>1)</sup>。RAMSとはReliability（信頼性）、Availability（アベイラビリティ）、Maintainability（保全性）、Safety（安全性）の頭文字を並べたも

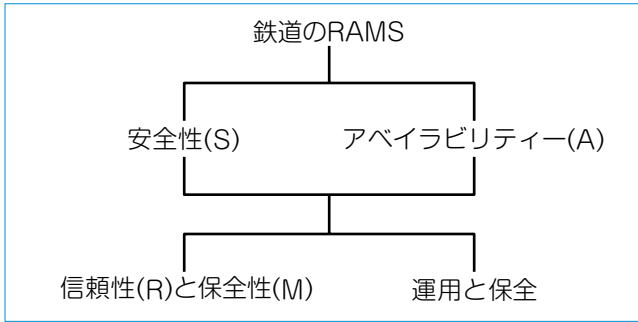


図1 RAMSの指標の関係

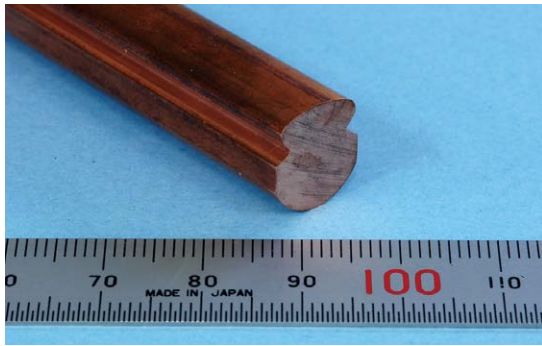


図2 開発したトロリー線

| 損傷            | 原因   |
|---------------|--|
| 引張降伏損傷        | 部品に負荷する応力が材料の降伏応力を超えると永久変形して寸法のずれ、あるいは破損する。        |
| せん断荷重による損傷    | 過大なねじれとせん断荷重により永久変形して破損する。                         |
| 脆性破損による損傷     | 表面亀裂や傷から変形を伴わずに、突然破壊する。                            |
| 曲げ破損による損傷     | 部材の片側に引張荷重、その反対側に圧縮荷重が生じるような荷重が複合的に生じて破損する。        |
| 疲労損傷          | 部材が降伏応力以下の荷重をくりかえし受けた際に亀裂が発生および進展して破損する。           |
| 摩耗損傷          | 部材の接触移動する面が摩擦を受け、摩擦熱および摩擦力で破損する。                   |
| 応力集中に伴う損傷     | 不均一な形状の筒所に不均一な応力分布が発生して構造物に作用する応力が急増し、応力の急増部で破断する。 |
| 材料中の初期きずによる損傷 | 材料の製造時や溶接時に発生する介在物や溶接欠陥が原因となって損傷する。                |

のです。アベイラビリティとは、「アイテムが与えられた時点または期間中に、要求機能を実行できる能力」のことであり、稼働率などによって表されます。IEC（国際電気標準会議）が発行したRAMSの国際規格（IEC62278）では、システムの構想から廃棄までのライフサイクル全般において、この4つの指標と経済性を照らし合わせて、システムを総合的にバランスよく維持するための活動について規定しています。鉄道分野におけるRAMSの指標間の関係を図1に示します。信頼性や保全性は、安全性やアベイラビリティの構成要素と位置付けられ、信頼性や保全性を向上させることが安全性やアベイラビリティの向上につながります。

すなわち、信頼性を向上させることで、危険な状態に陥る確率を小さくできるほか、人間の取り扱いミスなどによる事故の発生確率も小さくできるため、信頼性の向上は安全性の向上につながります。また、信頼性が向上すれば鉄道システムとして正しく動作する確率も上がります。したがって、信頼

性の向上は、アベイラビリティすなわち鉄道の安定輸送の向上のために不可欠な要因です。

以下では、信頼性向上に向けた鉄道総研の取り組みを紹介します。

### 故障に至る要因を把握・解明するための研究

設備の信頼性向上を図るには、まず設備の故障がどのような要因でどの程度発生するかを的確に把握することが必要です。

その一手法として、現場で発生した故障のデータを分析して故障率を求め、それを解析することによって故障モードを明らかにする研究を行っています<sup>2)</sup>。故障モードとは、折損、摩耗、断線など、故障をもたらす不具合事象の様式を分類したもののことです。これまでに、車両で使われている機器を対象として研究を行い損傷メカニズムを解明していますが(表1)、この手法を地上の構造物や信号設備などに適用することで地上設備の信頼性の向上につながっていくことが期待できます。

### 信頼性の高い設備を構築するための研究

実際に設備の信頼性を向上させるためには、部品などの構成要素や施工技術の高信頼化を図ることが必要です。

たとえば、トロリー線にはパンタグラフ通過のたびに曲げひずみが発生し、このひずみが大きいと金属疲労が問題となることがあります。そこで、トロリー線の断面形状を変えて耐疲労特性を向上させる研究を行っています<sup>3)</sup>。開発したトロリー線(図2)を用いてパンタグラフ走行試験を行った結果、ひずみ量が低減することを確認しました。

施工技術の高信頼化を図る手法については、レール溶接など現場での施工の信頼性向上を図る研究を本号の「テルミット溶接部の信頼性向上を目指して」で紹介しています。

また、設備には時に外部からの過大な力や電磁ノイズなどの外乱が加わることもあります。そのような場合にも正しく機能を継続できるように、対策を検討しておく必要があります。たとえば、列車の在線検知に広く使われる軌

道回路について、車両を動かす電流に含まれるノイズに強い駅中間用の軌道回路を開発しました<sup>4)</sup>。この方式は、軌道回路に流す電流をデジタル変調することで、列車在線時にノイズが加わった場合にも誤って非在線と判定することがないようにしており、現地試験などで安定的に動作することを確認しています。

一方、個々の構成部品などの信頼性を高めても、故障の発生を0にすることはできません。そのため、故障がどのように機能の障害に影響するかを評価し、故障の影響ができるだけ少なくなるような構成を検討するとともに、コストも勘案した上で適切な信頼性向上対策をとる必要があります。

設備の信頼性や安全性を向上させる設計手法としては、FTA (Fault Tree Analysis) やFMEA (Failure Mode and Effect Analysis) などがあります。FTAは、システムの障害に至る原因を抽出・特定する手法です。FMEAは、機器の故障モードが及ぼす影響を特定するための手法です。これらの手法は、信号システムの設計時などに使われています。

設備の信頼性向上は、前に述べたように鉄道システムとしての安全性やアベイラビリティの向上につながります。この両者を総合的に考慮する手法の一例としては、鉄道信号システムを対象とした、リスク評価に基づく改善対象装置の選定手法に関する研究があります<sup>5)</sup>。リスクとは、危害の発生する確率と、その危害の過酷さ/ひどさの組合せとして定義されるものです。この手法ではまず、個々の連動装置、信号機などの信号設備の障害発生頻度を統計データから求め、人的損失、物的損失、営業損失からなる損失をそれに乗じてリスクを算出します。リスクの大きな装置を改善対象装置の候補とします。これにより、効果的な信頼

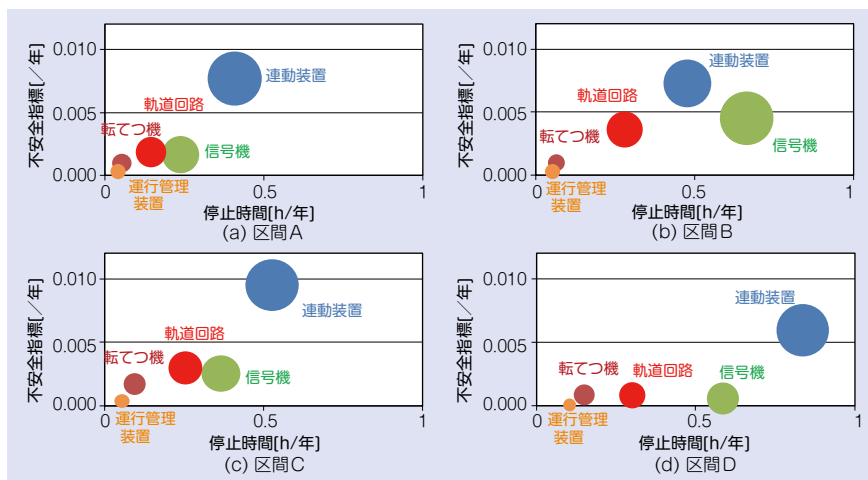


図3 信号設備のリスク評価の例

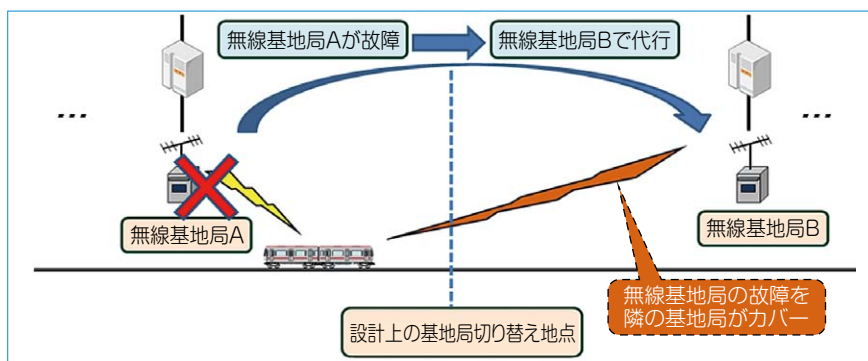


図4 無線通信シミュレーターで評価する故障の例

性向上対策を選定することができます。列車の運行本数や信号設備の数などが異なる4つの区間A～Dに対して、この手法を試行した結果を図3に示します。円の面積が、装置のリスクの大きさを表しています。また、横軸はアベイラビリティの指標である1年間当たりの運行停止時間、縦軸は安全性の指標である不安全指標です。どの区間においても、連動装置のリスクが大きいため、改善対象装置の候補と考えることができます。しかし、区間Bでは信号機の数が多くそのリスクも大きくなっているため、信号機も改善対象の候補に挙げることが考えられます。

高い信頼性を維持する設備を構成するためには、設備の構成要素に故障が発生した場合に設備そのものの停止などに至るかどうかを設計段階から評価し、そのようなことがないように機器構成を検討しなければなりません。このような評価手法の一例として、無線通信システムの設計にシミュレーショ

ン技術を適用して故障の影響評価を行う研究を紹介します<sup>6)</sup>。無線を使った列車制御システムでは、地上～列車間で制御に必要な情報を無線通信により伝送します。地上の無線基地局が故障した場合でも列車運行が継続できるようにするには、故障した基地局がカバーしていた通信エリアをほかの基地局が担当できるように、基地局の配置を決定する必要があります。この配置を効率的に定められるように、鉄道総研では無線通信のシミュレーターを開発しました。このシミュレーターを使えば、基地局が故障した場合や外来ノイズなどによって通信の伝送品質が低下した場合などに列車運行に支障が発生するかどうかを事前に評価することができます(図4)。

## センシング・監視評価に関する研究

部品などの構成要素が故障する前に交換や修理を行えば、設備の信頼性を

表2 開発した主な監視システム

| 対象設備 | 使用場面   | 監視目的                     | 使用センサー・監視方法            |
|------|--------|--------------------------|------------------------|
| 高架橋  | 異常時    | 高架橋柱の損傷度の把握              | ピークセンサー                |
| 鋼橋   | 常時     | 鋼桁の疲労亀裂の有無および進展の把握       | 導電塗料                   |
| 基礎   | 常時・異常時 | 基礎構造物の健全度診断              | パッシブ式損傷検知センサー          |
| トンネル | 常時・異常時 | トンネル覆工のクラック監視            | $\pi$ ゲージセンサー          |
| 駅舎   | 常時     | 建築部材の損傷度の把握              | ひずみセンサー, 加速度センサー       |
| 橋梁   | 異常時    | 河川増水時における橋梁基礎の健全度評価      | 速度センサー, 水位計            |
| 軌道   | 常時・異常時 | 伸縮継ぎ目のストローク変化およびレール温度の監視 | 全天候型変位センサーおよび熱電対(温度測定) |

の疲労き裂を目視によらずに検知するシステムを詳しく紹介します。

一方、蓄積したモニタリングデータを設備の診断に活用する技術の研究も進めており、転てつ機を対象としたデータの解析を行っています<sup>8)</sup>。

### おわりに

今後、ユビキタスセンサーネットワーク、ビッグデータ解析、IoT (Internet of Things) などの新しい情報通信技術を活用して、これまでとは違った考え方や手法で設備の信頼性の向上を目指すことが可能になってくると考えられます。

鉄道でもこれらの技術を取り入れて、さらなる信頼度の向上に努めていく必要があると考えます。[RRR]

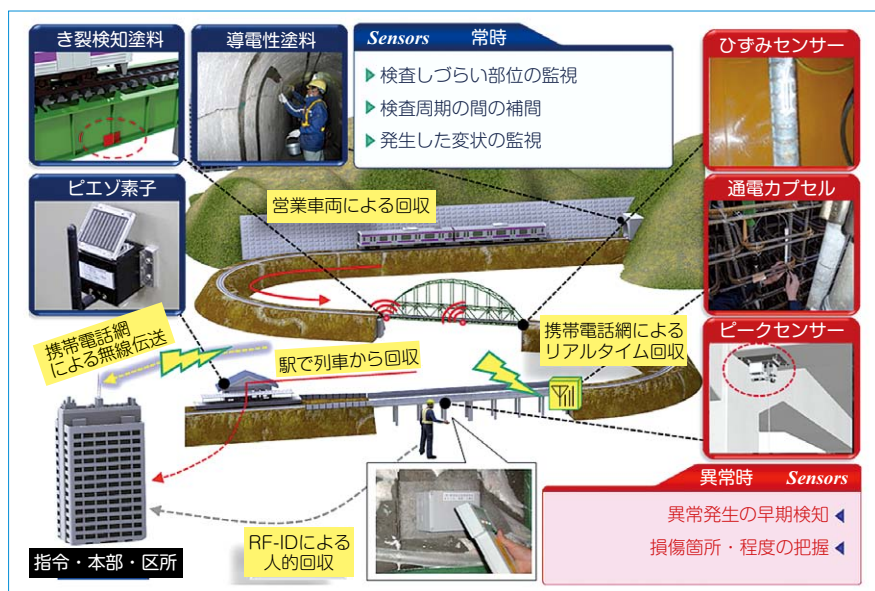


図5 センサーとデータ伝送手段の構成例

高めることができます。また、故障の発生箇所を正しく特定することができれば速やかな修復が可能となり、アベイラビリティの向上につながります。このためには、装置の現状や動作状態を正確に測定する技術、それを集約して解析する技術などが必要になります。このような技術は、保守性の向上にも寄与します。

設備の状態を推定するためには、監視目的に応じた適切なセンサーを用いて物理量を測定し、それを管理箇所まで伝送する必要があります。これまでに、線区の重要度、監視目的などに応じて適切なモニタリングシステムを構

築できるよう、主に構造物を対象としてさまざまなセンサーやデータ伝送手段を開発してきました<sup>7)</sup>。表2に、開発した主な監視システムを示します。データの伝送手段としては、携帯電話などのリアルタイムを重視した方式や、列車がセンサー付近を走行中に近距離無線でデータを受信し、駅などの地上通信ネットワークが整備された地点でデータ蓄積サーバーに向けて伝送を行う運用コスト削減を重視した方式などを開発し、要求条件に応じて適切な手段が使えるようにしています(図5)。本号では、「導電性塗料を用いて鋼構造物のき裂を検知する」で、鋼構造物

### 文献

- 1) 平栗：RAMS指標に基づいた鉄道信号システムの構成法，鉄道総研報告，Vol.23，No.1，pp.11-16，2009.1
- 2) 森，辻村：信頼性を確保するために故障モードを探る，RRR，Vol.68，No.7，pp.26-29，2011.7
- 3) 菅原，山下，白木，光用：断面形状変更によるトロリ線疲労強度の向上，鉄道総研報告，Vol.26，No.6，pp.41-46，2012.6
- 4) 福田，寺田，北野，遠山：耐ノイズ性を向上した中間軌道回路の開発，鉄道総研報告，Vol.25，No.5，pp.17-22，2011.5
- 5) 岩田，渡辺：リスクに基づく鉄道信号システムの改善効果の評価法，鉄道総研報告，Vol.24，No.3，pp.35-40，2010.3
- 6) 菅原，川崎，中村，祇園：無線式列車制御システム用通信ネットワーク性能シミュレータの開発，鉄道総研報告，Vol.26，No.7，pp.35-40，2012.7
- 7) 野末，土屋，篠田，渡辺，佐藤：鉄道構造物の常時・異常時モニタリングシステムの開発，鉄道総研報告，Vol.24，No.10，pp.41-46，2010.10
- 8) 五十嵐：保守作業低減を目的とした転てつ機モニタリングデータの活用方法，鉄道総研月例発表会講演要旨，2012.3