

# 鉄道総研報告

## ▶ 特集：信号通信分野における設計・メンテナンス技術 ◀

第36巻 第8号

2022年8月

### 展望解説

- 信号通信分野における研究開発の動向  
..... 新井英樹, 福田光芳 (1)

### 特集論文

- 信号保安装置に適用可能な画像処理システムの構成手法および安全確認手法  
..... 祇園昭宏, 市川武, 向嶋宏記, 長峯望, 福田光芳, 板垣朋範 (5)
- 継電連動装置の結線図自動作成における回路規模最小化手法  
..... 関根俊 (11)
- 汎用端末を用いた保安用途向け接点入出力システムの構成手法  
..... 祇園昭宏, 福田光芳, 中澤幸弘 (17)
- 第5世代移動通信システムの鉄道運行業務への適用可能性検証  
..... 中村一城, 北野隆康, 川崎邦弘, 近江泰志, 藤嶋堅三郎, 市川駿 (23)
- 電気転てつ機モニタ用の転換負荷推定手法の開発  
..... 潮見俊輔, 高崎建, 往古直之, 椿健太郎 (31)
- 使用環境センシングによる信号用電子機器の寿命予測手法  
..... 藤田浩由, 椿健太郎, 高崎建, 往古直之 (37)
- ハンディカメラによる列車前方映像を用いた信号設備の管理支援システムの開発  
..... 向嶋宏記, 長峯望 (45)
- 分野をまたがる鉄道メンテナンスデータの統合分析プラットフォームの開発  
..... 流王智子, 河村裕介, 羽田明生, 栗田いずみ (51)



# 信号通信分野における研究開発の動向

新井 英樹\* 福田 光芳\*\*

## Trend on Research and Development Activities Related to Railway Signalling and Telecommunication Systems

Hideki ARAI Mitsuyoshi FUKUDA

Railway Technical Research Institute (RTRI) partially revised its organization to aim at railway system innovation with digital technology on April 1, 2022. In order to accelerate R&D for a digital railway innovation, two divisions, Signalling and Operation Systems Technology Div. and Information and Communication Technology Div. were newly established. This paper introduces the trend on R&D activities related to signalling and telecommunication systems.

キーワード：デジタル技術, RESEARCH 2025, 自律型列車運行, デジタルメンテナンス

### 1. はじめに

鉄道総研では、新型コロナウイルス感染症拡大の影響により、鉄道事業を取り巻く環境が大きく変化する中で、自然災害に対する強靱化を始めとする安全性の向上に加え、デジタル技術による鉄道システムの革新や2050年カーボンニュートラルの実現が喫緊の課題となっていることなどを踏まえ、研究開発成果のより効率的かつ迅速な創出や効率的な事業運営のため、2022年4月1日付けで組織改正を行った<sup>1)</sup>。

上記のデジタル技術による鉄道システムの革新に関する研究開発を加速させるために、旧信号・情報技術研究部を廃止し、列車運行の自動化や自律化等に資する研究開発の中核となる信号技術研究部と、分野横断的にデジタル技術の活用を促進し、鉄道システムの無人化、省人化、省力化等に資する研究開発の中核となる情報通信技術研究部が新設された(図1)。

信号技術研究部は、信号システム、列車制御システム、運転システムの3研究室から構成され、信号保安システム、無線式列車制御システム、自動運転などに関する研究開発、及びそれらシステムの構築支援や安全性評価、そして輸送計画、省エネ運転を含む運転曲線、運転整理などに関する研究開発や技術支援を通じて、鉄道の安全性、信頼性、利便性、そして省エネルギー化の向上に貢献する。また、これまで蓄積してきた鉄道の運行・安全制御に関する固有技術に、ICT、セキュリティ技術を融合させ、鉄道運行の省人化・無人化・省設備化に資する成果の早期提供を目指す。

情報通信技術研究部は、情報解析、画像解析、通信ネットワークの3研究室から構成され、鉄道各分野のデータ解析、分野共通の解析技術や解析基盤、カメラ・LiDAR



図1 信号技術研究部と情報通信技術研究部

など各種センサを用いたシステム構築に関する研究開発により、メンテナンスだけでなく鉄道運行に関わる各業務の省人化・無人化・省力化の実現に取り組む。また、5G・Beyond 5Gなどの鉄道環境下での特性把握や評価方法の確立、最新の無線技術を含む汎用通信回線の鉄道運行業務へ適用方法の研究開発を通じて、省設備化や利

\* 信号技術研究部長

\*\* 情報通信技術研究部長

便性向上に貢献する。さらに、営業・輸送サービス評価に関する研究開発により、鉄道事業の運営や施策の意思決定に活用可能な成果を提供する。

また、2020年度～2024年度の5ヵ年の鉄道総研の基本計画である RESEARCH 2025 で進めている鉄道の将来に向けた研究開発では（図2）、特に「列車運行の自律化」と「デジタルメンテナンスによる省力化」において、それぞれ信号技術研究部と情報通信技術研究部において、重点的に研究開発を推進している。

本稿では、上記の鉄道の将来に向けた研究開発の取り組みと、信号通信分野において、重点的に取り組んでいる研究開発について述べる。

## 2. 鉄道の将来に向けた研究開発の取り組み

### 2.1 列車運行の自律化

自律型列車運行システムとは、線路内・沿線の状態、旅客流動、防災・メンテナンス・電力に関するデジタル

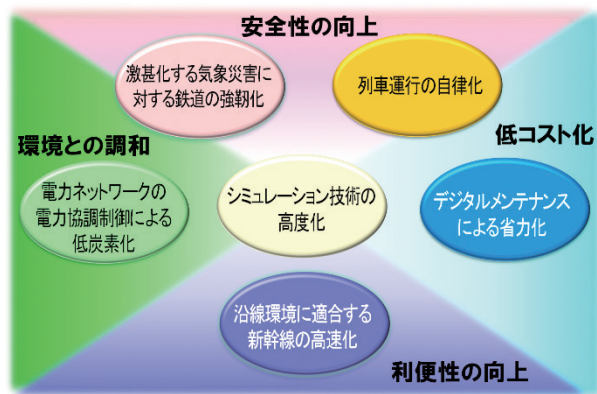


図2 RESEARCH 2025 鉄道の将来に向けた研究開発

情報に基づいて、列車が沿線設備を制御しながら自律的に、安全かつ柔軟に運行できるシステムを言う。本システムを構築するための主要な技術として、以下の5つの開発に取り組んでいる<sup>2)</sup>（図3）。

- ①画像・レーダーによる線路内・沿線の異常検知
- ②線路内・沿線の状態や車両の状態に関する情報を統合して列車運行の可否を判断するアルゴリズム
- ③列車からの無線による自律的な地上設備の制御
- ④遅延波及防止・早期遅延回復，省エネ等のための広域での運行管理アルゴリズム
- ⑤サイバーセキュリティも考慮したリアルタイム列車間通信

これらの技術を確立することにより、一般線区における低コストな自動運転システムや少ない地上設備で高度な自動運転を実現することができ、鉄道運行の省人化・無人化・省設備化が期待できる。

ここでは、上記②の技術として、鉄道ダイナミックマップを活用したリスク判断手法を紹介する。自律的な列車運行では、各列車にて運行判断に必要となる各種情報の集約・共有とリスク判断や運行再開判断の自動化を行う必要がある。車上でリスク判断や運行再開判断を行うための情報基盤として、鉄道ダイナミックマップの開発を行っている。鉄道ダイナミックマップは、基盤となる地図や線路図に、各種の異常検知システムで検知した情報がマッピングされ、階層構造的に管理される。各列車が、鉄道ダイナミックマップにおける自列車の走行経路上にある異常を自列車の現在位置を基に探索する（図4）。これにより、走行時の危険回避、運行再開判断の自動化の実現を目指す。また、鉄道ダイナミックマップは、将来の自律的な列車運行以外でも、現行の指令員の判断支援ツールとしても活用できると考えている。

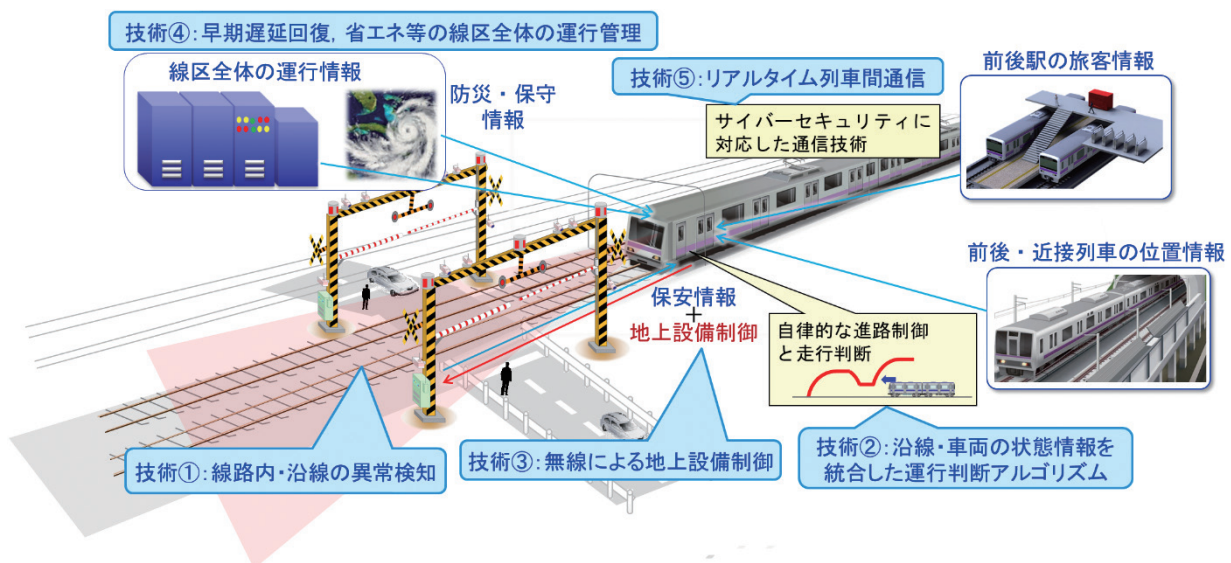


図3 列車運行の自律化



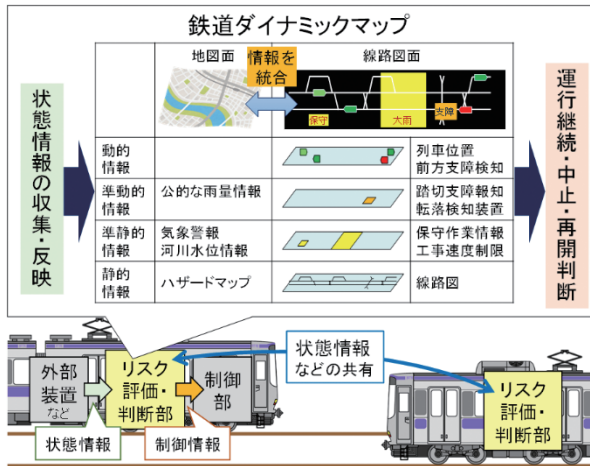


図4 鉄道ダイナミックマップを活用したリスク・運行再開判断の自動化

## 2.2 デジタルメンテナンスによる省力化

平常時では車上からの設備監視により、変状の進行を推定し、それに基づく検査・診断により補修・修繕計画の策定を行う。一方、異常時では、設備の異常を早期に検知し、被害拡大の防止、発生箇所の同定、要因推定等の復旧支援を行う。このような鉄道設備のメンテナンスをデジタルメンテナンスと呼んでいる<sup>3)</sup>。デジタルメンテナンスによって省力化を推し進めるため、以下の5つの開発に取り組んでいる(図5)。

- ①車上計測による軌道・構造物の異常検知技術
- ②車上計測による電車線設備の異常検知技術
- ③電力機器のネットワーク監視による異常検知技術
- ④インテリジェント分岐器による制御・状態監視技術

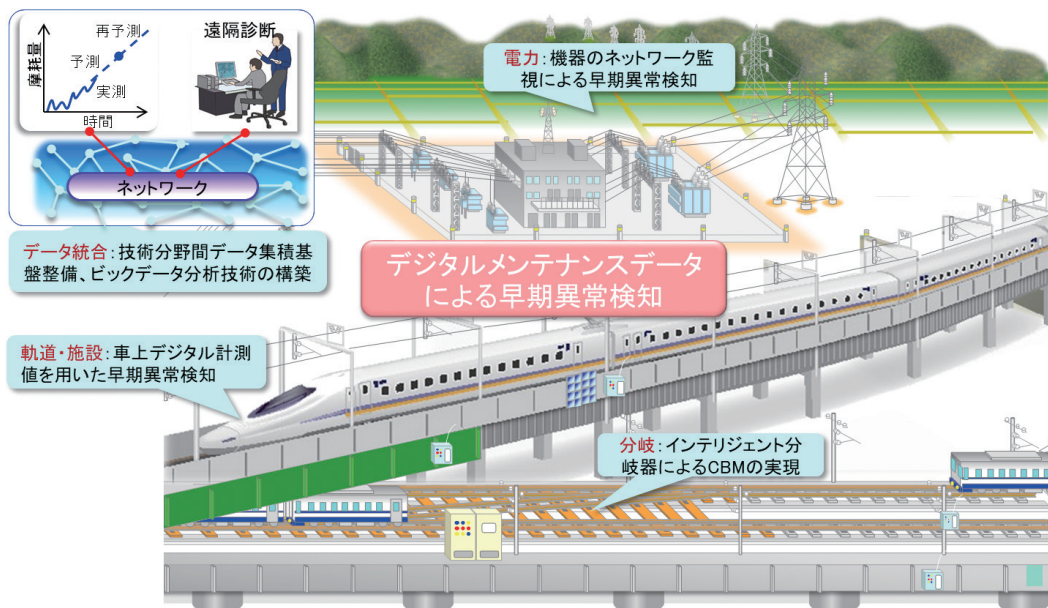


図5 デジタルメンテナンスによる省力化

## ⑤共通のデータプラットフォームによるメンテナンスデータの一元管理

「車上計測」、「ネットワーク」、「予測・判断の自動化」をキーテクノロジーとして、研究開発を進め、省人化、無人化、省力化に寄与することを目指す。

ここでは、上記⑤の概念を紹介する。各分野の設備のメンテナンスデータを共有するためには、メンテナンスデータを統一したデータ形式や位置表現で一元管理する必要がある。これを目的として、「統合分析プラットフォーム」<sup>4)</sup>の研究開発を進めている。このプラットフォームでは、各分野のデータサーバに蓄積されている対象データの写しを元のデータ形式・位置表現で蓄積するミラーサーバと、統一のデータ形式・位置表現で蓄積する統一形式データサーバ、データ形式・位置表現を変換する機能を有する装置等で構成される(図6)。一般ユーザは、Webサーバと呼ぶインタフェース装置を介してアプリケーションサーバにデータ解析等の処理を要求する。これにより、誤った操作によるデータ改変・削除を防ぐとともに、ユーザ端末の性能によらずに、高性能なアプリケーションサーバ上で、様々なツールを利用してデータ解析を行うことができる。

## 3. 重点的に取り組んでいる研究開発

### 3.1 鉄道固有技術とICTの融合による低コスト化

これまで蓄積してきた鉄道の運行・安全制御に関する固有技術に、デジタル技術を活用、融合することにより、装置の低廉化やメンテナンスの省力化を図り、鉄道運行の低コスト化を狙った研究開発にも取り組んでいる。

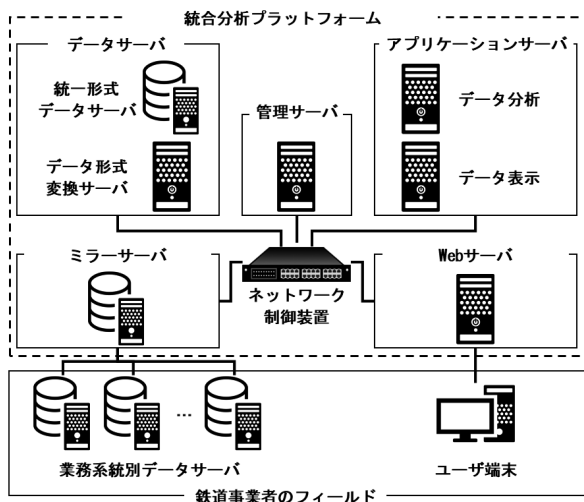


図6 統合分析プラットフォームの構成

本巻に掲載されているが、汎用のカメラや画像処理ユニットには考慮されていない鉄道固有の安全性技術であるフェイルセーフ機能を付加する手法や、汎用の安価なコンピュータボードを鉄道信号システムに適用する際の安全性確保手法<sup>5)</sup>、そしてメンテナンスの省力化としてCBM（Condition Based Maintenance）を実現するための使用環境センシングによる信号用電子機器の寿命予測手法<sup>6)</sup>などの研究開発にも重点的に取り組んでいる。

### 3.2 カメラ等を用いた実用システムの開発

先述のデジタルメンテナンスによる省力化など、データ解析を主眼とした研究開発のほか、カメラやLiDARなどのセンサを用いて、監視・検査等を行うための実用システムの研究開発にも取り組んでいる。

列車前方カメラの画像を用いて特殊信号発光機の明滅を検知するシステム<sup>7)</sup>、車両側面カメラを用いて人物の接近状況をリアルタイムに運転士に通知するシステム<sup>8)</sup>、本巻に掲載されているハンディカメラによる列車前方映像を用いた信号設備の管理支援システム等の開発を行っている。また、研究段階ではあるが、カメラとLiDARのセンサフュージョンにより列車前方支障物を検知する手法<sup>9)</sup>にも取り組んでいる。これらの開発を通じて、省人化・無人化・省力化がすすめられた際の安全性確保に貢献することを目指す。

### 3.3 新しい無線通信技術の鉄道運行業務への適用

信号技術研究部、情報通信技術研究部が連携した取り組みとして、5Gなどの新しい汎用無線通信技術を鉄道運行業務へ適用するための検討を行っている。ここでは、無線式列車制御システムを対象とした研究開発について紹介する。

無線式列車制御システムは、軌道回路などの地上設備

を削減できるものの、制御情報を伝搬する伝送装置が必要となることや、車上装置の機能が増加することなど、線区条件によってはシステム全体として必ずしも設備減とはならない。そこで、さらなる設備削減を目的として、汎用無線通信技術を適用するための導入手順やセキュリティ確保に関する研究を実施している<sup>10)</sup>。

## 4. おわりに

新型コロナウイルス感染症拡大の影響により、鉄道事業は大変厳しい状況に置かれているが、デジタル技術を積極的に活用し、業務の無人化、省人化、省力化など鉄道の生産性向上に資する研究開発成果を早期に鉄道事業者へ提供することで鉄道の持続的発展に寄与したいと考えている。デジタル技術による鉄道システムの革新のためには、鉄道事業者や大学・研究機関、関連企業との連携が必要不可欠であり、これまで同様のご支援、ご助言をお願いする。

## 文献

- 1) 鉄道総研 News Release 「組織改正について」: [https://www.rtri.or.jp/press/vln4b3000000fem-att/220401\\_0001.pdf](https://www.rtri.or.jp/press/vln4b3000000fem-att/220401_0001.pdf) (参照日: 2022年4月1日)
- 2) 川崎邦弘: 信号通信分野におけるICT活用に関する研究開発の経緯と展望, 鉄道総研報告, Vol.34, No.7, pp.1-4, 2020
- 3) 神田政幸: デジタルメンテナンスによる省力化, 第32回鉄道総研講演会, 2020
- 4) 河村裕介, 流王智子, 羽田明生: メンテナンス用統合プラットフォームの提案, 鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 2021
- 5) 祇園昭宏: 汎用コンピュータを用いたフェイルセーフ装置の構成手法, JREA, 第64巻, 第8号, 2021
- 6) 藤田浩由, 往古直之: CBMへの適用を目指した信号用電子機器の寿命予測に関する検討, 電気学会交通・電気鉄道研究会, 2021
- 7) 向嶋宏記, 長峯望, 野村拓也, 市川武: 列車前方カメラを用いた特殊信号発光機の明滅検知手法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.7, 2020
- 8) 合田航, 長峯望, 向嶋宏記: 車両側面カメラを用いた安全確認手法, 鉄道総研報告, Vol.35, No.10, 2021
- 9) 影山椋, 長峯望, 向嶋宏記: カメラとLiDARセンサを統合した列車前方支障物検知手法, 鉄道総研報告, Vol.35, No.10, 2021
- 10) 北野隆康, 祇園昭宏: 無線式列車制御システムへの汎用通信技術の適用手法, 鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 2021

# 信号保安装置に適用可能な画像処理システムの構成手法および安全確認手法

祇園 昭宏\* 市川 武\*\* 向嶋 宏記\*\*  
 長峯 望\*\* 福田 光芳\*\*\* 板垣 朋範#

Configuration and Safety Confirmation Method of Image Processing System Applicable to Signalling Devices

Akihiro GION Takeshi ICHIKAWA Hiroki MUKOJIMA  
 Nozomi NAGAMINE Mitsuyoshi FUKUDA Tomonori ITAGAKI

In recent years, image processing has been applied to the visual inspection of rolling stock and railroad tracks. It is also expected to be applied to abnormality detection applications at level crossings and platforms, however safety assurance is an issue for signal security applications. In this paper, we report on a method for composing an image processing system using general-purpose processing equipment that can be applied to signal security equipment and a safety confirmation method.

キーワード：カメラ，画像処理，安全性技術，異常検知

## 1. はじめに

近年、画像処理の分野においては、画像センサの高画質化と処理装置の高性能化、低価格化が進んだことにより、高度な画像処理アルゴリズムが比較的廉価で利用可能となり、様々な分野で活用が進んでいる。鉄道においても、車両や軌道の外観検査<sup>1)</sup>への活用が進められている。異常検知用途についても、踏切障害事故とホーム事故が運転事故の半数以上を占めることから、その対応手段として期待されているが、保安用途への適用では安全性の確保が課題となる。そこで、信号保安装置に適用可能な画像式線路内異常検知装置の開発を進めてきた。本稿では、画像処理システムの構成手法と安全確認手法について報告する。

## 2. 画像処理システムの概要と課題

### 2.1 画像処理システムの概要

一般に、「画像処理システム」は、カメラなどの画像センサで撮像した画像データを、画像処理装置で処理し、画像データより対象物の変化や特徴量を抽出して、記録や判定などを行うシステムを指すが、本稿では、画像処理装置の判定に基づき制御出力を行う制御装置を含めて画像処理システムと定義する。図1に本稿で扱うシステム

の構成を示す。

### 2.2 信号保安装置への適用における課題

信号保安装置は、装置の故障や異常に対して安全側へ遷移するフェイルセーフの考え方を基本としており、電子連動装置などの信号保安装置では、演算にフェイルセーフ装置（FS装置）を用いることで装置故障に対する安全性を確保している。異常検知用途の適用例である光電式の踏切障害物検知装置<sup>2)</sup>は、図2のように、発光部と受光部、処理部より構成されており、発光部の発光パターン（照査パルス）通りに受光部が受光できていることを処理部が照査する、フィードバック診断を実施している。発光部および受光部の故障、濃霧等によるレベル低下などの事象に対し、支障物による遮蔽と同様に診断不一致として検知することで安全を確保している。

画像処理システムは、従来の信号保安装置と比較して

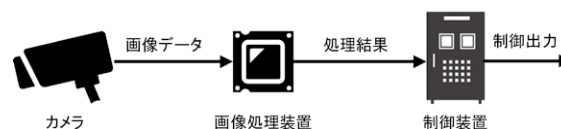


図1 画像処理システムの構成

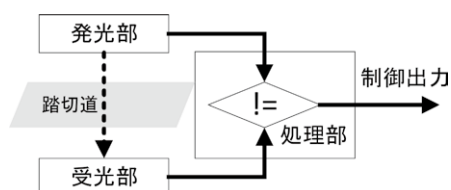


図2 光電式踏切障害物検知装置の構成

\* 情報通信技術研究部 通信ネットワーク研究室  
 \*\* 情報通信技術研究部 画像解析研究室  
 \*\*\* 情報通信技術研究部  
 # 株式会社京三製作所



センシング、画像処理の構成が異なる。センシングについては、受光部に相当するカメラのみとなり、クロズドループを構成できない事が課題となる。また、画像処理の構成についても、既存のFS装置の処理部（FS-CPU）では演算性能の不足により画像処理が困難となるため、汎用処理装置での画像処理に対する故障検知の考え方の確立が課題となる。

### 3. 画像処理システムの安全分析

線路内の異常検知を目的とする画像処理システムについて安全分析を行った。ここで対象とするシステムは、図1に示した構成の画像処理の内容を線路内の異常検知とし、制御出力を異常検知出力としたものである。具体的な前提条件を定めてシステムを定義し、リスクを抽出した後一般化するというアプローチにより分析を行った。

#### 3.1 システムの前提条件と安全性解析

##### 3.1.1 前提条件

システムの構成要素に関する各要素の前提条件について述べる。

##### (1) カメラ

遠赤外線カメラ（Vision Sensing 社製：VIM-640）を対象とし、内部構造を図3と仮定する。

##### (2) 画像処理部

高性能な汎用処理装置（Intel 社製：Core i7 6600U）を用いて毎秒10フレーム（100ms）の画像処理を行う。

##### (3) 制御部

FS装置を用いてカメラや画像処理部の故障監視と制御出力の安全を確保する。

##### (4) 伝送路

カメラと画像処理部の伝送路は、イーサネットとし、撮像した映像の伝送とカメラの制御を行うためのプロトコルであるGigE Visionを用いる。画像処理部と制御部は、FS装置のインターフェースとする。

##### (5) その他

アルゴリズムの検知性能は安全分析とは別に検討するものとし、アルゴリズム上の欠陥、環境条件等起因した危険側未検知は本検討では除外する。

#### 3.1.2 FTA/FMEA

前節で述べた画像処理システムに対して、前記のアプローチによりFTAとFMEAによる分析を行った。FTAの抜粋を図4に、図1および図3の構成要素に対するFMEAの結果の一部を表1に示す。画像処理システム

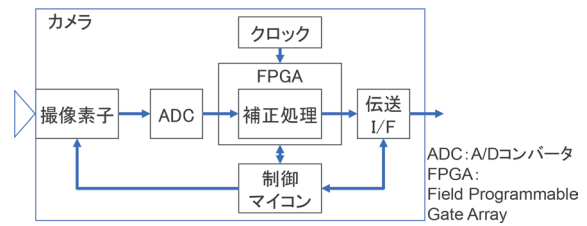


図3 遠赤外線カメラの内部構成

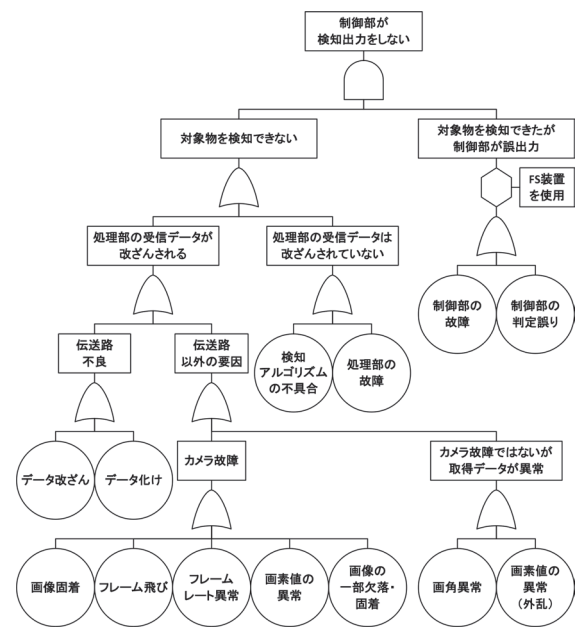


図4 画像処理システムのFTA（抜粋）

表1 カメラシステムのFMEA例（一部抜粋）

装置・要素	機能ブロック	故障モード	影響	概要	
カメラ	撮像素子	撮像素子焼け	①画素値の異常	ホワイトアウトやコントラスト低下など	
	ADC	出力固定故障	②画像固着	画像データが毎フレーム同一データとなる	
	FPGA	クロック生成	クロック停止	②画像固着	画像データが毎フレーム同一データとなる
			クロック変動	③フレーム飛び	撮像された画像データの時間間隔が空く
		補正処理	補正処理誤り	①画素値の異常 ⑤画像の一部欠落・固着	ホワイトアウトやコントラスト低下など 画像データの一部が欠落または毎フレーム同一
	伝送路		ノイズ誘導	⑥データ改ざん	画像データが破損する
ケーブル断			⑦データ欠落	画像データ単位で伝送において欠落する	
画像処理	画像処理	画像処理異常	⑧検知結果誤り	検知処理を誤る	



の不安全事象を「線路内の異常に対して異常検知出力をしないこと」と定め、「制御部が検知出力をしない」をトップ事象とした。

### 3.2 抽出した事象の整理

FTA/FMEA で抽出した事象の整理を行った。

#### 3.2.1 カメラ

カメラ内部の故障および環境要因により、①画素値の異常、②画像固着、③フレーム飛び、④フレームレート異常、⑤画像の一部欠落・固着の事象が想定される。既存の障害物検知装置のようなフィードバック診断はカメラには適用困難であり、複数のカメラの比較も画角差により直接照合ができない。このため、カメラは単一構成とした場合に、他装置でカメラの故障を検知する手法が必要となる。

#### 3.2.2 画像処理部

画像処理の汎用処理装置の故障またはアルゴリズム上の問題による⑧検知結果誤りの事象が想定される。既存の信号保安装置のFS装置においても、汎用の処理装置を二重化して同期処理の結果を比較照合する構成があるが、画像処理部は非同期で動作し、確率統計を用いることによる画素値更新の揺らぎが存在し、検知判定が同一とならない。このため、画像処理への適用に当たってはA系とB系の非同期動作に対応した照手法が必要となる。

#### 3.2.3 制御部

FS装置を用いるため、制御部自体で発生する危険事象はないと整理できるが、カメラと画像処理部の異常を検知する方法が網羅的かつ妥当であるとともに、FS装置で実行可能であることが求められる。

#### 3.2.4 伝送路

伝送路においては⑥データ改ざん、⑦データ欠落の事象が想定される。イーサネットではCRC32による検定がなされるが、検定の健全性を制御部が把握できないことが課題となる。

## 4. 構成手法の提案

本章では、安全性解析で抽出した事象と課題に対応する画像処理システムの構成手法を提案する。

### 4.1 システム構成

提案する画像処理システムは、単一のカメラと、二重化された汎用処理装置による画像処理部、FS装置による制御部で構成し、制御出力およびカメラおよび画像制御部の健全性診断に基づく安全制御を制御部が行う。

### 4.2 安全確認手法

画像処理システムの安全確認手法として、画像データへの診断データの格納と照査、テストパターンによる診断、ダイジェストデータの比較機能を定める。

#### 4.2.1 画像データへの診断データの格納

診断データとして、図5に示すようにフレームカウント、クロックカウント、画像CRCを画像データに埋め込む。イーサネットのビット誤り率 $10^{-10}$ 、画像データ長 $640 \times 480 \times 16 = 4915200\text{bit}$ より、誤りが複数個以上含まれる確率は $1.21 \times 10^{-7}$ となる。また、 $n$ 回連続してCRCが一致する1時間あたりの確率はCRCのビット長 $m$ に対して、 $2^{-m \times n} \times 3600[\text{s}] \times 10[\text{fps}] = 2250 \times 2^{-m \times n}[\text{h}]$ となる。これより、伝送上の見逃し誤りと固着の誤認の確率を考慮し、画像CRCのビット長 $m=16$ 、画像の固着を判定するまでの回数 $n=3$ とした。

##### (1) 画像CRC

$N(0,0)$  から  $N(636,479)$  までを対象としたCRC16の値をカメラのFPGAで計算し、付与する。図6に示すように、画像処理部で再計算し、格納値と再計算値の一致を制御部で照査する。

##### (2) フレームカウント・クロックカウント

カメラの内部で計数する、フレーム通番をフレームカウント、フレーム前後の間隔をクロックカウントとして格納する。図7に示すように、画像処理部でフレームカウントを追加付与し、制御部のFS-CPUでデータ欠落を考慮した照査をおこなう。

#### 4.2.2 テストパターン

カメラおよび画像処理部のCRC計算の健全性を診断するため、テスト用画像データをテストパターンとしてカメラ内に用意し、定周期あるいは制御部からの要求の都度、画像データとして挿入する。画像処理部は画像データと同様にCRCを再計算し、制御部はテストパターンのCRCの正解データとそれらを照査する。

#### 4.2.3 ダイジェストデータ

非同期動作する画像処理部の健全性診断の方法として、処理結果のダイジェストデータ同士のハミング距離を評価する。まず図8(a)に示すように画像処理により画素単位の検知あり/なしの二値化した検知結果に対し

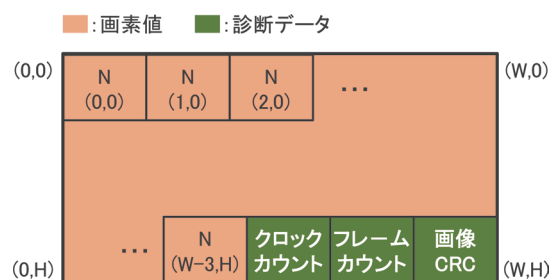


図5 画像データへの診断データの格納

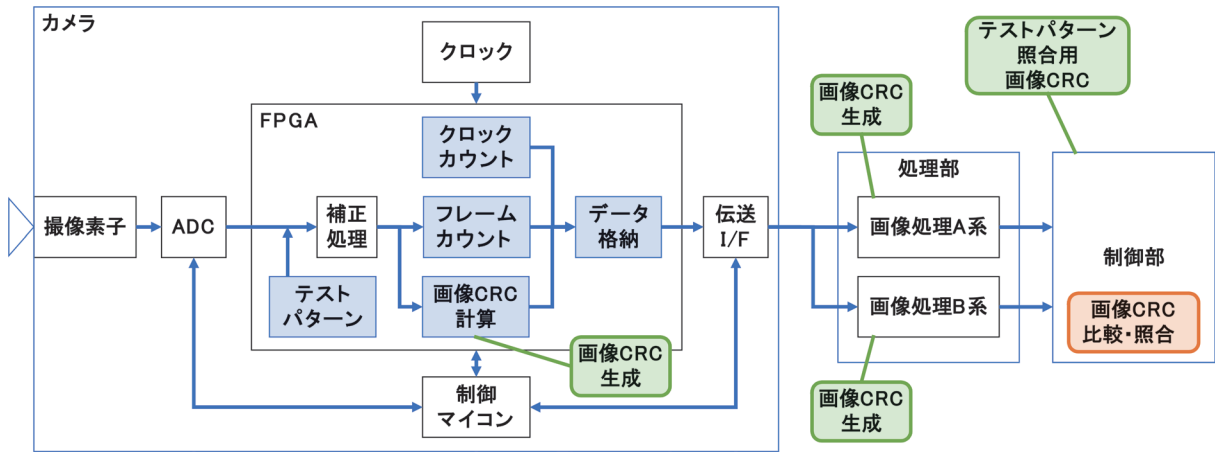


図6 画像処理システムの構成と画像CRCによる検定処理の関係

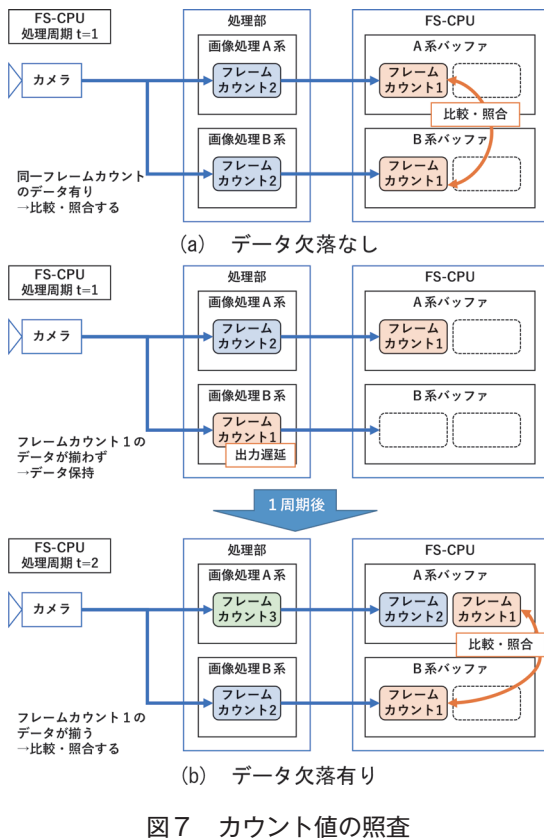


図7 カウント値の照査

てブロックサイズKで検知結果を分割し、各ブロック内の検知の有無を計算することでダイジェスト化し、次に図8(b)に示すようにラスタスキャン順でシリアル化する。そして、図8(c)に示すようにA/B系のデータでハミング距離を計算し、予め定めたしきい値以下であることをもって両系が健全と判定する。

#### 4.3 安全確保の考え方

抽出したカメラシステムの故障モードと診断手法の対応を表2に示す。各項目の概要を以下に述べる。

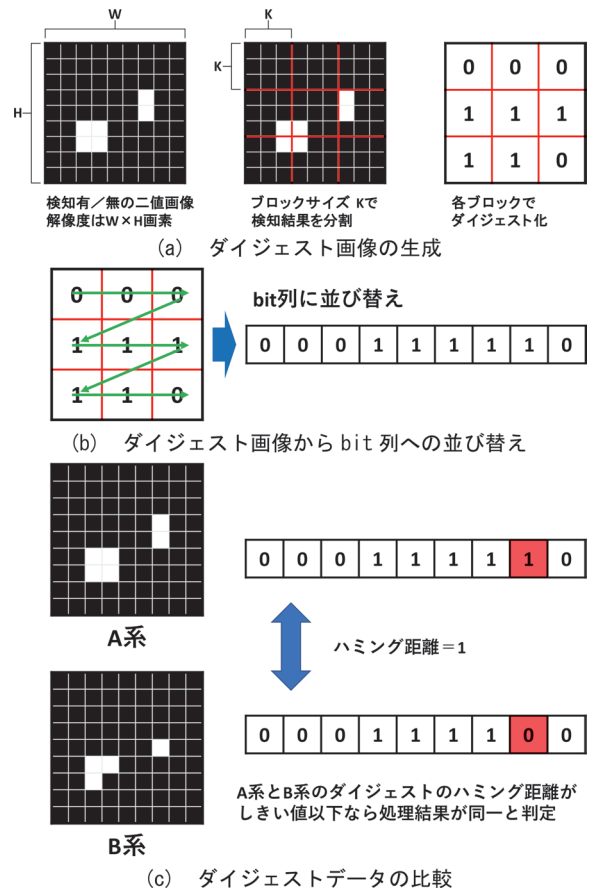


図8 ダイジェストデータの生成と照合

#### 4.3.1 画素値の異常

画素値の異常については、画像処理部の画像処理アルゴリズムにおいて、ホワイトレベル、コントラストなどの画像品質を計算し異常を検出する、画像処理部の故障については制御部のFS-CPUにおいて画像処理部A系とB系の出力を比較照合することにより検知する。画像処理部による画素値の異常検出、および異常検出の系間不一致を制御部で検知することで、安全を確保できる。

表2 カメラシステムの故障モードと診断手法の対応

影響	診断手法
①画素値の異常	画像処理の比較
②画像固着	画像 CRC
③フレーム飛び	フレームカウント
④フレームレート異常	クロックカウント
⑤画像の欠落・固着	画像 CRC, テストパターン
⑥データ改ざん	画像 CRC
⑦データ欠落	フレームカウント
⑧検知結果誤り	ダイジェストデータ

#### 4.3.2 画像固着

画像固着については、診断データのうちの画像 CRC の変動を制御部の FS-CPU が監視し、値が不変となることを検知することで判定できる。通常、静止物を撮像した場合でもイメージセンサに発生するランダムノイズ<sup>3)4)</sup>により画素単位で画素値に微小な揺らぎが発生する。このため、画像 CRC は毎フレーム変化することが期待される。異なる画像の CRC が同一となる事象についても、3回連続する確率は  $1.27 \times 10^{-10}$  [h] と十分に低く、また毎秒 10 フレーム取得することから判定条件を 3 フレームとすることの検知遅延への影響も小さい。

#### 4.3.3 フレーム飛び

フレーム飛びについては、診断データのうちフレームカウントの増加量を制御部の FS-CPU で監視することで判定できる。

#### 4.3.4 フレームレート異常

フレームレート異常は、診断データのうちクロックカウントの値と画像処理部が付与する周期カウンタ値を制御部の FS-CPU で監視することで判定できる。フレームレート異常は、前後のフレーム間隔が 100ms を逸脱する事象となることから、図 7 に示したようにカメラと画像処理部それぞれの計時を照査することで、フレームレートと計時機能の両方の健全性を監視できる。

#### 4.3.5 画像の一部欠落・固着

画像の一部欠落・固着は、カメラの補正処理を行う領域の故障を想定しており、カメラによる自己診断の健全性を保証できないことから、制御部の FS-CPU が外部診断を行う方法として、テストパターンと画像 CRC を用いる。テストパターンはカメラの補正処理に挿入され、カメラ、画像処理部がそれぞれ画像 CRC を計算する。画像の一部欠落・固着が生じた場合は、テストパターンが破壊されるため、正解データと異なる画像 CRC が付与され、制御部は正解データと比較できることから、これを検知できる。

#### 4.3.6 データ改ざん

データ改ざんは、診断情報のうちの画像 CRC について、カメラの付与した画像 CRC と画像処理部の A/B 系

がそれぞれ付与する画像 CRC が一致することを制御部の FS-CPU が監視することで検知する。定期的にテストパターンを挿入することで、カメラ、画像処理部それぞれの画像 CRC 生成機能の健全性を併せて監視する。

#### 4.3.7 データ欠落

データ欠落は、フレーム飛びと同様の事象であるが、ここでは A/B 系で受信状態が不一致となる事象を言う。データ欠落により系間の処理状態の乖離が生じてアベイラビリティを損なうことが考えられるが、FS-CPU は、画像処理部各系の出力を 2 周期保持する構成としており、その中から同じフレームカウントのデータを探して、比較・照合することでデータ欠落に対するアベイラビリティを確保する。

#### 4.3.8 検知結果誤り

検知結果誤りは、画像処理部の故障により異常を検知しない事象であり、画像処理部 A/B 系の生成するダイジェストデータのハミング距離を制御部の FS-CPU が検定することで誤りを判定できる。検知結果としての異常の有無を比較するだけでは潜在的な故障を検出できないが、処理データをダイジェスト化することにより各系への入力と学習がおよそ同等であることを監視することが可能となり、潜在故障を検出できる。

### 4.4 提案手法の主な利点

提案する画像処理システムの構成および安全確認手法の利点は 2 つある。一つは既存の FS 装置を安全確保の手段として適用できることである。画像処理は演算量が多く、膨大な情報を取り扱うことから、FS 装置への組み込みは困難であったが、処理と照合を切り離して FS 装置の役割を汎用のセンサおよび処理装置の故障監視と保安制御に特化することで適用が可能となった。監視の方法についても、汎用装置の出力の一致や正解データとの比較、またはハミング距離の計算などであり、データサイズを CRC やダイジェストデータに圧縮することで、FS-CPU での比較・照合に対応可能としている。

もう一つの利点は、非同期かつ内部状態の異なる処理の比較照合ができる点である。画像処理アルゴリズムにおいて確率統計を用いることによる揺らぎや、伝送状態の差により画像処理部が厳密に同一とならない処理でも照合可能となる。この手法は、より高度な画像処理アルゴリズムに適用可能であるほか、三重系以上の冗長化により異常系の検出と切り離しが可能となることから、アベイラビリティの向上が見込まれる。

## 5. 装置試作と検証試験

提案した対策手法を適用した踏切異常検知装置を試作し、安全技術の評価試験を行った。踏切異常検知装置の



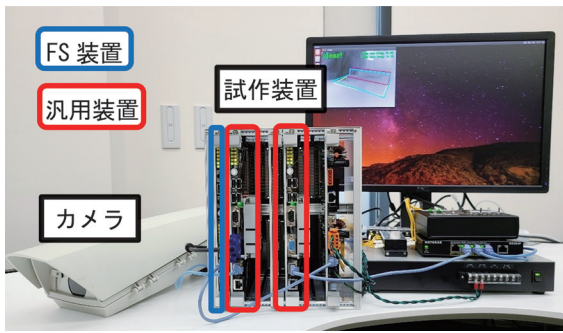


図9 試作したシステムの装置構成

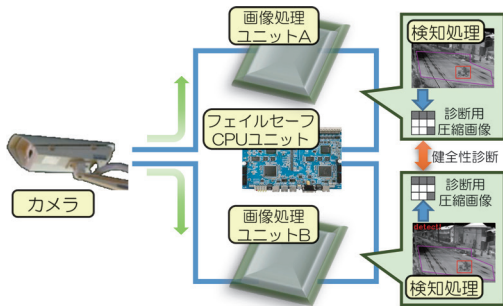


図10 試作したシステムのデータフロー

表3 試験項目および試験方法と試験結果

試験項目	試験方法	結果
(1) 画像CRC	画像処理部でCRC値を改変	良
(2) クロックカウンタ値	片系異常となるカウンタ値設定	良
	両系異常となるカウンタ値設定	良
(3) テストパターン	テストパターンのCRCを改変	良
	通常画像に遷移しない	良
	テストパターンを出力しない	良
(4) ダイジェスト	ハンク距離の乖離を検知	良
	カメラ故障の交番停止	良
(5) 交番信号	画像処理結果の交番停止	良
	イーサケーブルを抜く	良
(6) その他	片系を動作停止する	良

構成を図9に、データフローを図10に示す。

汎用装置による画像処理と、FS装置による診断と制御を組み合わせることにより、100msec周期での画像処理を診断できることを確認した。また、故障診断機能について、抽出した故障モードを試作した装置に発生させ

た場合にフェイルセーフな制御部で異常や故障を検知し、安全側に制御できることを確認する工場内試験を実施した。試験項目と試験方法、試験結果を表3に示す。試験項目(1)～(6)のそれぞれについて、意図した通りに異常検知・安全側固定できたことから、各ユニットの故障や異常に対して安全上問題ないことを確認できた。

## 6. まとめ

カメラを用いた画像認識システムを高い安全性が要求される分野に導入するために、システムを一般化した機能ブロックとして定義し、安全性解析によりシステムの危険側事象を抽出するとともに、課題の整理をおこなった。抽出した危険側事象と課題への対策手法として、画像データへの診断データの付与と照査、テストパターンによる画像CRCの健全性確認、ダイジェストデータによる画像処理の健全性確認を提案するとともに、カメラを用いた踏切異常検知装置について検証用のシステムを試作して人工故障試験を実施し、安全上問題ないことを確認した。

カメラを用いた画像認識システムを信号保安用途に適用するための構成手法を確立できたことから、今後は、鉄道の信号保安分野におけるカメラを用いた画像処理システムの活用のため、試作したシステムの構成手法、診断手法を基に、線路内の異常監視を行うシステムの実用化に向けた検討をおこなう。

## 文献

- 1) 穴見徹広：スマートメンテナンスの取り組み状況について、JR EAST Technical Review, No.62, pp.5-10, 2019
- 2) 鈴木勇：踏切障害物検知装置の各種、鉄道と電気技術, Vol.2, No.9, pp.23-28, 1991
- 3) 北村純一、勝間裕章、西村敏博：CMOSイメージセンサにおける局所輝度分散に基づいたフォトンショットノイズの低減、電気学会論文誌C 電子情報システム部門誌, Vol.129, No.6, pp.1147-1155, 2009
- 4) 西田泰章、小池純朗、大竹浩、吉川重夫：CCD型撮像素子のノイズと低雑音信号読出し法、テレビジョン学会誌, Vol.39, No.12, pp.1176-1181, 1985



# 継電連動装置の結線図自動作成における回路規模最小化手法

関根 俊\*

Circuit Scale Minimization Method for Automatic Wiring Diagram Creation of Relay Interlocking Devices

Satoshi SEKINE

In automatic generation of wiring diagrams for relay interlocking devices, we have developed a method for minimizing circuit size and a method for minimizing circuit modifications during station modifications. To minimize the circuit size, the equivalent circuit of Boolean algebra is applied to reduce the number of contacts. Then, the wiring diagrams are structured hierarchically so that the equivalent circuit can be applied at each level to deal with complex circuits. Regarding the minimization of circuit changes, we created a circuit in which the contacts before and after the construction were mixed by associating the circuits before and after the construction. Using the created circuit, we made it possible to minimize the changes by the newly devised equivalent circuit before and after the construction.

キーワード：連動装置，リレー，結線図，連動図表，ブール代数

## 1. はじめに

連動装置は、列車在線，進路設定，転てつ器開通方向など，制御の状態が2値により処理されるため，リレー制御に適している。現物のリレーによって連動論理を構築する継電連動装置は，規模が大きくなると設置スペースを要しコストが嵩むデメリットがある。このため，CPUを用いた電子連動装置が実用化されており，実用化当初は，リレー論理によらずに駅固有条件を定数データで与える手法がとられていたが，リレー論理のメリットが再認識され，論理式で処理する仕組みが広く実用化されている。連動論理の作成は容易ではないため，電子連動装置では論理式を結線図という図形式への変換を可能とし，連動表からの自動作成も実現されている<sup>1)</sup>。

ところで，規模の大きくない駅では現物リレーによる設置スペースのデメリットはなく，リレー論理のメリットが再認識されたことから，継電連動装置も再評価された。継電連動装置のリレー論理は，リレーを現物で設置することから施工コストの低減が要となっており，回路

規模を最小化するため論理式と等価とならずに，回路網の形状となる。電子連動装置と比較して，回路設計に熟練を要するため，継電連動装置の結線図自動作成の要望が高まり，研究を行ってきた<sup>2)~5)</sup>。本稿では，回路規模の最小化手法について，論理演算法則適用によるリレー接点数削減方法を中心に述べる。

## 2. 連動結線図自動作成手法の概要

連動結線図をコンピュータによって自動作成するフローを図1に示す。連動結線図は，連動装置の仕様を定めた連動図表に基づいて作成する。連動図表から連動結線図への変換方法は，標準結線図に記述されており，システム化に当たって，回路種別ごとに一般化を行い(図2)，連動図表との関連を明確化した(図3)。対象とする連動図表を標準結線図との関係から回路網を自動構築し，CAD図面に自動レイアウトして出力する。

回路規模を最小化するには，回路方式の選択，リレーの共有，及びリレー接点削減の3通りがある。連動装置

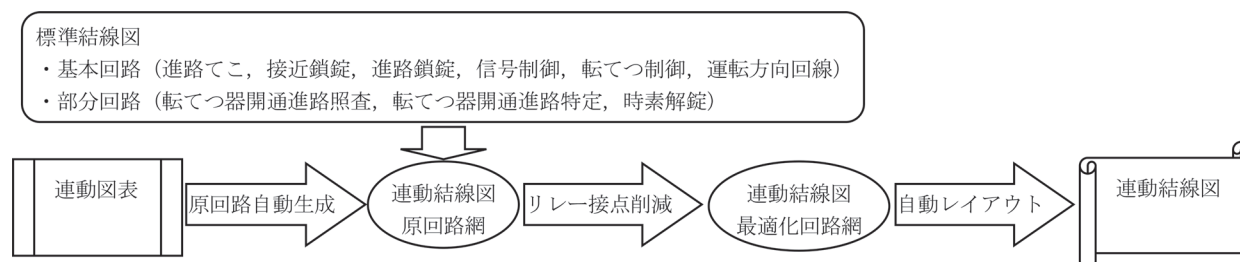


図1 連動結線図自動作成フロー

\* 信号技術研究部 列車制御システム研究室

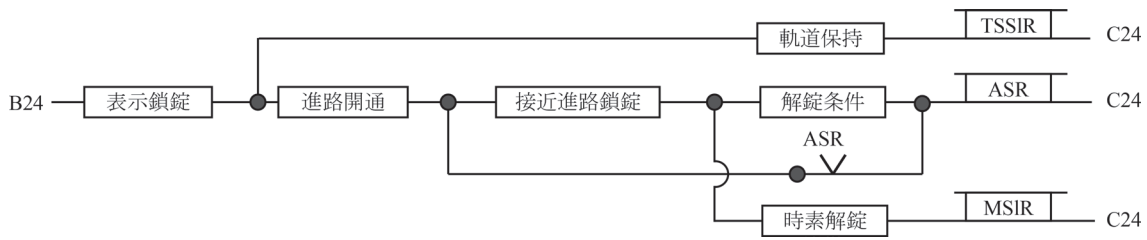


図2 接近鎖錠リレー回路の一般化例

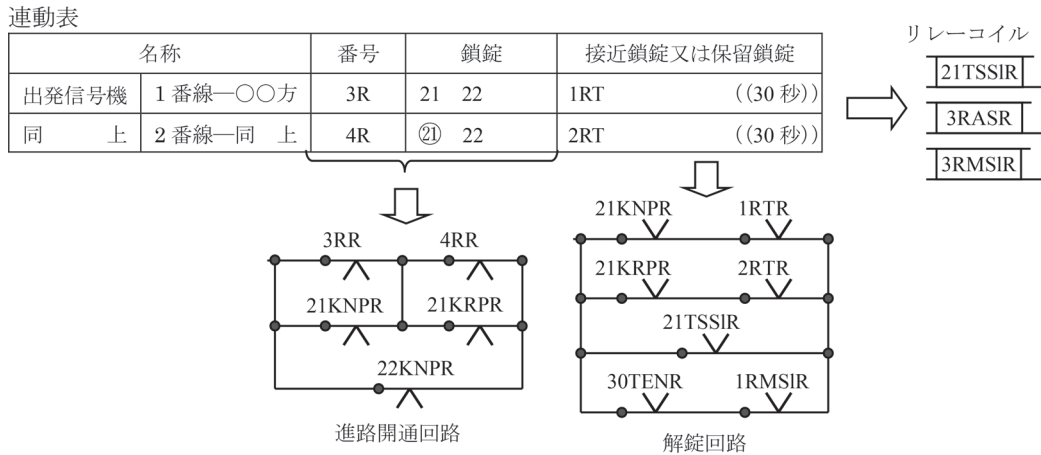


図3 連動図表と結線図の対応関係事例

の回路方式は、進路選別式<sup>5)</sup>と進路てこ式があり、規模の大きさで優劣が決定される。リレーの共有は、本来別々に設けるリレーを同時に設定されない条件で、1つにまとめる。例えば、図3において、3Rと4Rの接近鎖錠リレーはそれぞれに設けるが、同時に進路設定されることがないので1つに統合できる。リレー接点の削減については、論理演算法則を用いて接点数の少ない方に適用することにより行われる。最初の2つは連動装置の機能に依存するもので、標準結線図の適用の範囲内となり、3つ目は回路形状に依存するものとなる。そこで、標準結線図により「原回路網」を作成し、これに対して論理演算法則を補元則、冪等則、吸収則、分配則の順に接点数の少ない方向に適用して「最適化回路網」を作成する2段構成とした。

### 3. 回路規模最小化手法

回路規模の縮小は、以下に示す論理演算法則を要素の少ない方向に適用することで実現する。

#### ①冪等則

$$A \text{ and } A = A \quad A \text{ or } A = A$$

#### ②補元則

$$A \text{ and } \bar{A} = 0 \quad A \text{ or } \bar{A} = 1$$

#### ③吸収則

$$A \text{ and } (A \text{ or } B) = A \quad A \text{ or } (A \text{ and } B) = A$$

#### ④分配則

$$A \text{ and } (B \text{ or } C) = (A \text{ and } B) \text{ or } (A \text{ and } C)$$

$$A \text{ or } (B \text{ and } C) = (A \text{ or } B) \text{ and } (A \text{ or } C)$$

しかしながら、回路が複雑になると適用が困難となる場合がある。例えば、 $A \text{ and } (B \text{ or } C) \text{ and } A$  という回路においては、左端と右端のAは冪等則により統合され、 $A \text{ and } (B \text{ or } C)$  となる。これは、括弧内(B or C)を一つの要素として置き換えることにより、冪等則を適用している。論理式のみで表現できる場合は、この括弧の位置を特定することにより、論理演算法則を適用していくことができるが、回路図として表現されている場合は、回路構造を読み取る必要がある。以下にその手法を述べる。

### 3.1 要素回路単接点化法

構造のある回路において、論理演算法則を効率的に適用するために、図4に示すように分岐点間の単純構成の直列要素回路や並列要素回路を単接点に置き換え、この単接点を通常の接点と同様に単純構成の回路の一要素として扱い、さらに単接点化することで回路を階層構造化する手法を考案した。これにより、それぞれの階層で論理演算法則による接点削減を行うことができる。具体的な手法を図5に示す。上段の回路において、最内包の並列要素回路C or Dを単接点とすることにより、B接点との直列要素回路B and (C or D)が現れる。この直列回路を単接点とすることにより、E接点との並列要素回路

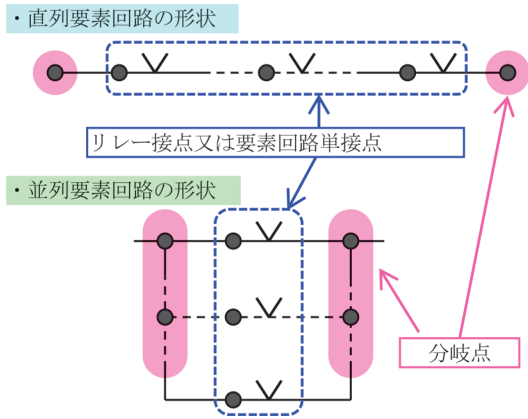


図4 要素回路の形状

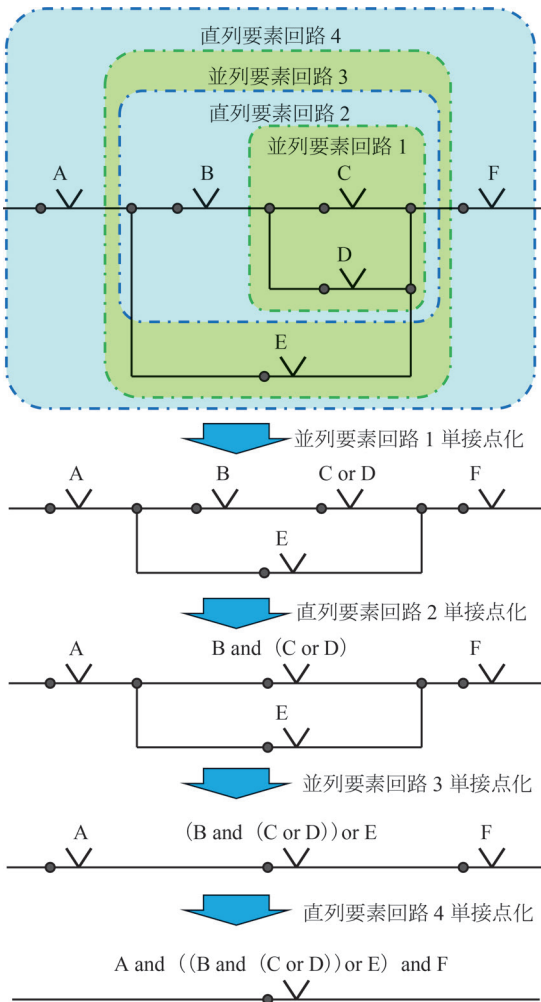


図5 要素回路による単接点化手法

(B and (C or D)) or E が現れる。これを繰り返すことにより、回路の階層構造が構築できる。

### 3.2 論理演算法則の拡張定理による接点数削減法

論理演算法則として定義されていないが、定理として定めておくことで効率的に接点数を削減する方法を説明する。

#### 3.2.1 補元吸収則

図6の回路において、左側は吸収則に似た形状をしているが、共通接点が not となっているところが異なる。分配則を適用すると、右側の形状となり接点数が削減できる。この定理を「補元吸収則」と呼ぶことにする。

この定理による適用事例を図7に示す。信号機1Rは、過走防護として転てつ器21を、着点对向進路として入換標識31Lを鎖錠する。信号制御リレー回路において、21KNPR接点は転てつ器の開通を照査し、21TLRSR or 21KRPRは着点对向進路が開通していないことを照査する。21KRPR接点は、対向とならない進路を除外する進路が存在する場合に挿入するものであるが、21が過走防護により定位に鎖錠されるのであれば必要ない条件である。補元吸収則を適用して、21KNPRと21KRPR間の否定関係から、21KRPRを削除することができるため、挿入の有無を判断する必要がなくなる。なお、過走防護がなければ、21KNPRは挿入されないため、21TLRSR or 21KRPRはそのまま残る。

#### 3.2.2 補元吸収則逆適用

回路規模を最小化するには、論理演算法則を接点数が少なくなる方向に適用するのが基本であるが、一旦接点の多い方向に適用することによって、より多く削減できる場合がある。図8の左側の回路は、論理演算法則では直

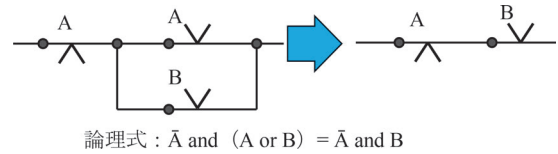


図6 補元吸収則

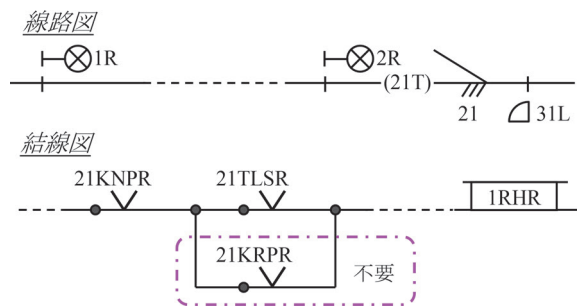


図7 補元吸収則適用事例

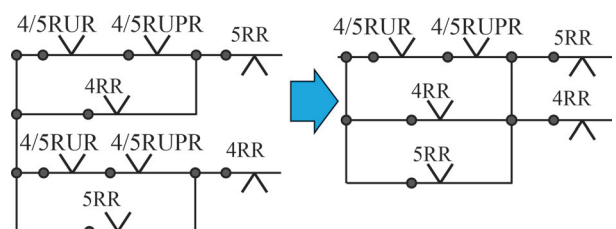


図8 補元吸収則逆適用事例

接的には接点数を削減できない。ところが、補元吸収則を逆適用することにより、右側の回路のように接点数を削減できる。以下に2つの事例を紹介する。

①事例1

図8は、てこリレー回路における現示時素不正動作回路の共有化事例である。変換手順を論理式で簡略的に示すと以下ようになる。

$$\begin{aligned} & (A \text{ or } B) \text{ and } \bar{C} \text{ or } ((A \text{ or } C) \text{ and } \bar{B}) \\ = & ((A \text{ or } B \text{ or } C) \text{ and } \bar{C}) \text{ or } ((A \text{ or } C \text{ or } B) \text{ and } \bar{B}) \\ = & (A \text{ or } B \text{ or } C) \text{ and } (\bar{C} \text{ or } \bar{B}) \end{aligned}$$

1行目のA or BにC, A or CにBを、補元吸収則を適用してorで挿入すると、2行目のようにA or B or Cが共通となる。これに、分配則を逆適用することで3行目のようにAが1つ、図8の例では2接点削減される。

②事例2

信号制御リレー回路の車両接触限界支障軌道回路においては、以下の論理変換により共有化できる場合がある。

$$\begin{aligned} & ((A \text{ or } B) \text{ and } C) \text{ or } (\bar{A} \text{ and } B \text{ and } D) \\ = & ((A \text{ or } B) \text{ and } C) \text{ or } (\bar{A} \text{ and } (A \text{ or } B) \text{ and } D) \\ = & (A \text{ or } B) \text{ and } (C \text{ or } (\bar{A} \text{ and } D)) \end{aligned}$$

1行目の $\bar{A}$  and Bに補元吸収則を適用して、BにAをorで挿入すると、2行目のようにA or Bが共通となる。これに、分配則を逆適用することで3行目のようにBが1つ削減される。

#### 4. 工事前後混在結線図自動作成

これまで、回路としての接点数の削減方法を説明してきたが、実際の設計においては駅構内改良による工事前後の結線図を作成する場面が多い。工事前後の結線図作成においては、改修の工数を削減するために、接点数を削減する以上に、回路の変更点を最小化することを重視し

ている。そこで、工事前後の変更点を最小化した工事前後結線図を自動作成する手法を開発した。図9に、自動作成のためのフロー図を示す。

##### 4.1 工事前結線図読み取り手法

CAD図面で作図された結線図の接続関係の自動読み取りは、結線図の自動論理検証を実現するために既に開発済みである<sup>6)</sup>。しかし、論理検証のみであるので、回路の探索に必要なリレー接点シンボルとその接続関係のみを読み込むものであり、回路形状は駅ごとに異なるため、単純な接続関係だけでは回路内の各リレー接点の意味を読み取ることはできない。そこで、回路を構造化することにより実現した。以下にその手順を示す。

(1) 直列回路の読み取り

CAD図面から結節点又は電源間の直列回路を読み取る。

(2) 分岐点の作成

結節点から分岐点を作成する。1つの分岐点から複数に分岐している場合は、図面上分岐点ごとに結節点を作図するが、回路ネットワークとしては、1分岐とするので、直接接続されている結節点を集約する。

(3) 要素回路の作成

左右の分岐点が共通な直列回路を並列要素回路とし、その構成要素を直列要素回路とする。これを並列要素回路が作成できなくなるまで繰り返す。

(4) 最上位直列要素回路の作成

並列要素回路の構成要素にできない直列回路を、最上位の直列要素回路とする。

##### 4.2 工事前後リレーの対応付け

リレー名称は、工事前後で異なる場合があるため、工事前後混在図表<sup>6)</sup>を仲介して自動的に対応付ける。工事前後混在図表は、改修状態を表した線路図CAD図面を有

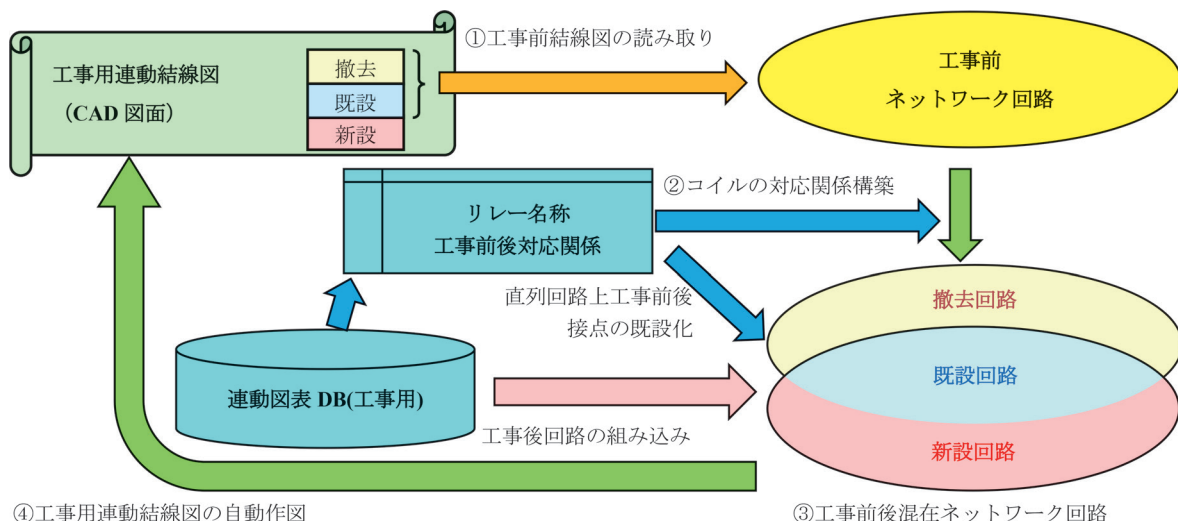


図9 工事前後混在結線図自動作成フロー図



しており、線路上設備の工事前後名称が対応付けられている。線路上設備とリレー名称との関連は定められており、結線図 CAD 図面から読み取った工事前リレーを工事前連動図表の信号機と対応付けることができる。工事後のリレー名称は、工事後連動図表から自動作成されるので、明確に関連付けられる。これにより、線路上設備の工事前後の対応関係からリレー名称の工事前後対応関係が構築できる。

### 4.3 工事前後混在回路作成手法

工事用結線図は、工事前後が混在した形状で作図される。そこで、コンピュータ内に工事前後を混在させた回路ネットワーク（工事前後混在回路）を作成し、そのネットワーク内でリレー接点の工事前後対応付けを行うことにより、最終的な工事用結線図を作成する。

#### 4.3.1 工事前後混在回路の初期作成

4.1 節で説明した工事前結線図の回路構造化による最上位の単接点化回路の形状から、各単接点の意味を把握することができるため、4.2 節で説明したリレーコイルの工事前後対応関係に基づき、工事後に自動作成される回路ブロックを対応する工事前単接点化回路に隣接して挿入することにより工事前後混在回路を作成する。

#### 4.3.2 工事前後等価回路による工事前後接点对应付け

工事前後混在回路の初期状態では、全ての接点が工事前後の対応付けがなされていない。これらの接点をできるだけ多く対応付けることにより変更点を最小化していく。工事前後の対応付けに当たって、工事前後接点と既設接点との間の等価回路を図 10 のように定め、これを適用することにより行う。なお、図に定める記号において、+は工事後、-は工事前を示し、等価回路において+-を入れ替え可能とする。結線図の接点の描画色は、赤が工事後のみ、黄色が工事前のみ、黒が工事前後とも存在とする。

#### ①基本則

工事前後で対応付けられたリレーの新設接点と撤去接点とが直列又は並列に関わらず直接接続されている場合、それらを統合して既設接点とする。また、リレーの工事前後対応関係によらずに、新設接点と撤去接点の直列回路と並列回路は等価、すなわち and と or は交換可能となる。このことから、次に示す分配則と混合則の and と or は交換可能となる。

#### ②分配則

一般的な分配則とは若干異なり、工事前後反対接点に対して分配する場合は、少なくとも 1 接点のみ配置されればよい。

#### ③混合則

工事前並列回路と工事後並列回路の直列接続は、工事前後接点を直列接続して並列回路とすることができる。これは、分配則の and 分配から導き出せる。また、工事前直列回路と工事後直列回路の並列接続は、工事前後接点による並列回路として直列接続することができる。これは、分配則の or 分配から導き出せる。

### 4.4 工事用結線図作図手法

前節までの作成される工事前後混在回路は、コンピュータ上で表現されるネットワーク構造となっており、これを CAD 図面上に作図する必要がある。CAD 図面に作図する際の回路の単位は、結節点間の直列回路としており、4.1 節で述べた CAD 図面からの読み取り手順を逆に実行することで作図できる。ただし、工事用図面の場合、工事前後が混在した 1 つのネットワーク回路が構築できており、接点の改修状態（既設、新設、撤去）は設定したが、回路線の改修状態は指定していない。回路線の改修状態は、局所的には接点と同一状態となるが、異なる改修状態の接点が混在する場合、その境界で

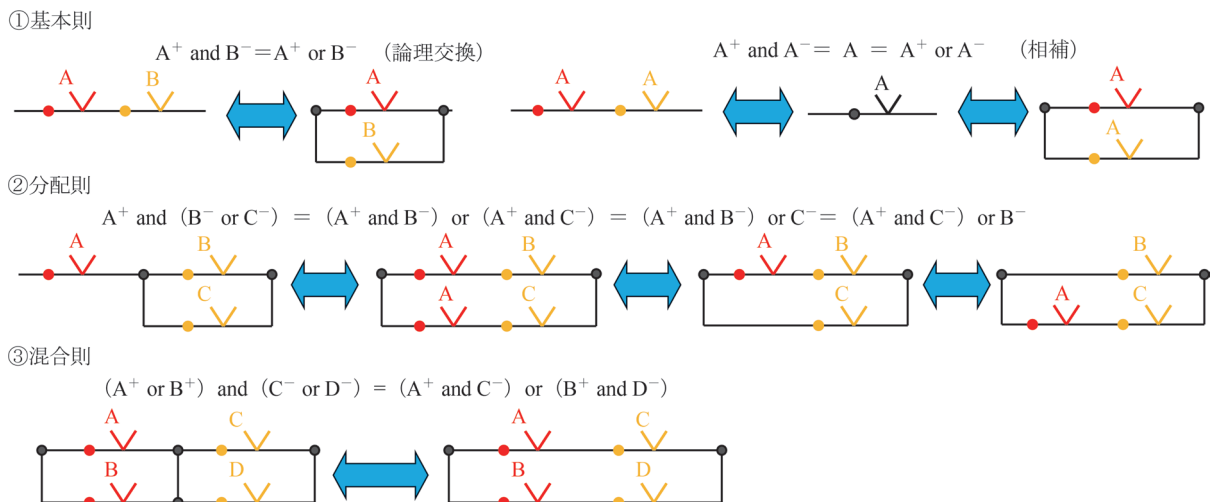


図 10 工事前後 2 状態混在等価回路

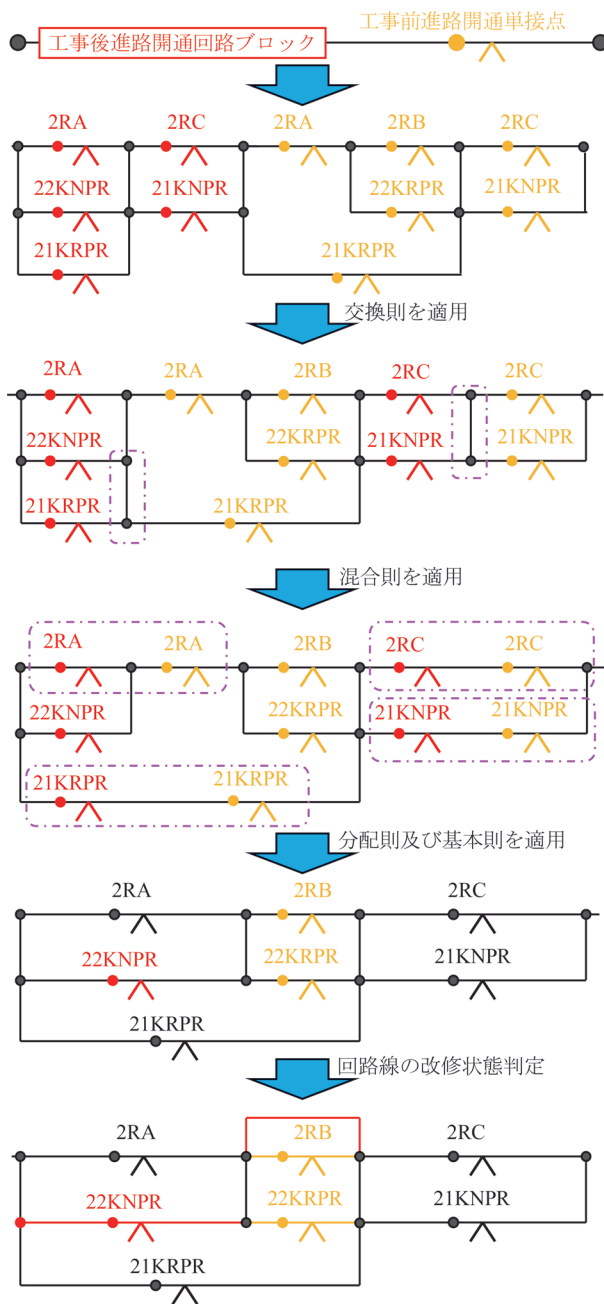


図 11 進路開通回路の等価回路による変更点最小化例

処理が必要となり、接点を短絡するための渡り線を作図する必要がある。作図方法は、要素直列回路全体が既設、すなわち工事前後両方の接点が存在する場合、新設接点に対して撤去渡り線を、撤去接点に対して新設渡り線を作図することが基本となる。要素直列回路の構成要素が要素並列回路の場合は、その要素並列回路自体が撤去又は新設であれば全体に渡り線を作図する。

#### 4.5 接近鎖錠リレー回路への適用例

接近鎖錠リレー回路における適用例を紹介する。工事前結線図を CAD 図面から読み取り、単接点化を進めていくと、最終的に図 2 の接近鎖錠リレー回路の一般化形

状が現れる。工事後に自動作成される回路ブロックに対応する工事前単接点に直列に挿入することにより工事前後混在回路の初期状態が作成できる。図 11 は、接近鎖錠リレー回路の一部を構成する進路開通回路の工事後自動作成回路ブロックと工事前単接点の直列回路を示す。工事後回路ブロックと工事前単接点化を展開すると 2 段目の回路となる。一般的な論理演算法則の交換則を適用して工事前後に対応する接点が隣接するように並べ替えると 3 段目の回路となる。2RA<sup>+</sup> or 22KNPR<sup>+</sup> と 2RB<sup>-</sup> or 22KRPR<sup>-</sup> を単接点として扱って混合則を適用することにより、4 段目の回路となる。2RA<sup>-</sup> に対して分配則を適用した後、2RA、21KRPR、2RC、21KNPR に対して基本則が適用可能となり、5 段目の回路として変更点最小化が完了する。

6 段目は、回路線の作図例である。22KNPR<sup>+</sup> は新設であり、この接点を含む直列回路が他にないため、接点上の回路線の新設線とする。2RB<sup>-</sup> or 22KRPR<sup>-</sup> は撤去であり、これを含む直列回路に既設の 2RA or 22KNPR<sup>+</sup> があるから、接点上の回路線を撤去するとともに、新設の渡り線を作図する。

## 5. おわりに

連動装置の設計支援システムに対する研究開発として、これまでに連動図表作成支援機能、連動検査チェック表自動作成機能、連動結線図自動作成機能、さらには踏切制御装置や ATS-P 制御装置との相互支援機能と総合的に取り組んできた。本報告は、連動結線図自動作成機能において、精度向上としての回路規模最小化と、拡張機能としての工事用図面対応を行った。これにより、研究課題としての取り組みは終了し、今後はシステムの実用化を推進していく。

## 文 献

- 1) 荒伸幸, 島添敏之: 連動表から結線データへの変換手順のデータベース化, 第 8 回鉄道電気技術研究会発表論文集, pp.173-177, 1998
- 2) 関根俊: 連動図表から結線図を自動生成するシステムの開発, 鉄道総研報告, Vol.25, No.5, pp.29-34, 2011
- 3) 関根俊: 連動結線図自動作成の効率化手法, 第 53 回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 2016
- 4) 関根俊: 継電連動装置の結線図自動作成と自動検証, 鉄道総研報告, Vol.33, No.7, pp.41-46, 2019
- 5) 関根俊: 進路選別式連動結線図自動作成ツールの開発, 第 55 回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 2018
- 6) 関根俊: 工事用連動図表作成システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.20, No.10, pp.11-16, 2006

# 汎用端末を用いた保安用途向け接点入出力システムの構成手法

祇園 昭宏\* 福田 光芳\*\* 中澤 幸弘\*\*\*

Configuration Method of Relay Input-Output System for a Safety-related Application Using General Purpose Devices

Akihiro GION Mitsuyoshi FUKUDA Yukihiro NAKAZAWA

In recent years, inexpensive single-board computers with input/output functions and arithmetic functions, such as Raspberry Pi, have been used for various purposes. Condition monitoring and remote control can be mentioned as one of its uses. However, it is very important to ensure safety when applying single-board computers, for example, to safety related equipment. This paper introduces a safety assurance method using pseudo-random numbers and encryption technology to configure a relay-based input/output system with a general-purpose device.

キーワード：汎用端末，信号保安，遠隔監視，フェイルセーフ

## 1. はじめに

近年，Raspberry Pi に代表される入出力機能や演算機能を備えた安価なボードコンピュータが入手可能になったことや Wi-Fi などの普及により，汎用端末と安価な通信手段を組み合わせたシステムが様々な用途で提案されている。その用途の一つとして状態監視・遠隔制御が挙げられるが，保安に関わる用途への適用では安全性を確保することが重要である。また，汎用端末や公衆無線の利用においては，サイバーセキュリティの観点でも安全性を確保することが求められる。本稿では，保安用途への汎用モバイル端末の適用手法<sup>1)</sup>を発展させて，汎用端末により接点入出力システムを構成するための，疑似乱数と暗号化技術を用いた安全性確保手法について報告する。

## 2. 保安に関わる用途における入出力の課題

### 2.1 検討システムの構成

保安用途の入出力装置として，電子連動装置の現場装置との入出力装置である電子端末<sup>2)3)</sup>が挙げられる。電子連動装置の装置構成を図1に示す。電子端末は，連動論理部からの指示により現場装置を制御するとともに，現場装置の状態を取得して連動論理部に表示（通知）する。ここでは，電子端末を Arduino や Raspberry Pi などのボードコンピュータ（汎用端末）に，連動論理部と電子端末間の伝送を汎用の伝送装置と公衆無線にそれぞれ置き換えたシステムについて検討を行った。

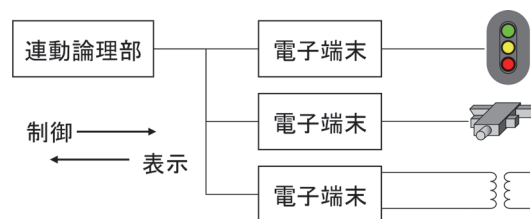


図1 電子連動装置の構成

### 2.2 電子端末の安全要件

電子端末の安全要件は，対象となる現場装置の危険な状態を安全と誤認しないこと，制御出力の安全性を確保することの2点であり，①入出力の故障対策，②健全性確認手法，③故障時の安全側固定の3つの原則によって実現している。電子端末の安全確保の考え方について以下に示す。また，各要件への対応を表1に示す。

#### 2.2.1 入力

入力については，一般に信号用リレーの落下状態が安全側状態，扛上状態が危険側状態となるため，入力回路の故障によりリレー状態を扛上状態と誤認するリスクが十分に低いことを安全確保の方針としている。

入力回路の例を図2(a)に示す。リレー状態の入力においては扛上状態の誤認が不安全事象となる。ここでは，フォトカプラが短絡故障した場合に扛上状態の誤認が想定されることから，照査パルス信号でゲートを制御することによりフォトカプラの状態を周期的に変化させて短絡故障を検知することで入力回路の健全性を診断する。具体的には，入力が照査パルスに対応して変化する場合を扛上状態として採用し，不一致の場合は安全側状態と認識する。また，一つのリレーについてN/Rの2接点を監視する冗長化を行う。

#### 2.2.2 出力

出力については，一般に出力リレーの動作が危険側状

\* 情報通信技術研究部 通信ネットワーク研究室  
 \*\* 情報通信技術研究部  
 \*\*\* 旧信号・情報技術研究部 列車制御研究室（現 東海旅客鉄道株式会社）

態、落下が安全側状態となるため、出力リレーの制御において出力回路の故障により不正動作となるリスクが十分に低いことを安全確保の方針としている。

出力回路の例を図2(b)に示す。出力リレーの制御は、フェイルセーフドライバを介して行う。フェイルセーフドライバは、制御ユニットより規定の交番信号が入力された場合に出力する回路であり、さらにリレー出力のフィードバック入力を照査（フィードバック診断）し、異常を検知した場合に交番信号の停止と半導体リレー（Solid State Relay: SSR）の制御により出力リレーを落下させ、安全側固定する構成としている。

### 2.2.3 伝送

連動論理部と電子端末間でフェイルセーフ通信を行う。通信手順は、連動論理部からのポーリングに電子端末が応答することによる。フェイルセーフ装置である論理部と電子端末が、それぞれ電文の伝送誤りと伝送途絶の検出、異常検出時の安全側制御を行う。伝送誤りの情報は破棄し、伝送途絶時に連動論理部は状態認識を落下

側、電子端末は出力を行わないことで安全を確保する。連動論理部と電子端末間の伝送路は信頼できるネットワークを前提とし、自営の有線伝送路を用いる。

### 2.2.4 処理

照査パルス診断、フィードバック診断などの電子端末に割り当てられた処理について、系間照合を行い、不一致となる場合は動作を停止する。交番信号を停止するため出力も安全側となる。また、動作停止時は伝送途絶となるため、連動論理部が入力を安全側状態で認識する。入力、出力、伝送についても同様に系間照合を行い、安全を確保する。

### 2.3 汎用端末適用の課題

ボードコンピュータは処理、入出力、伝送の機能を持つ点では、電子端末と同様である。入出力の故障対策として、照査パルス診断やフィードバック診断を適用した場合も、処理部が非フェイルセーフであるため対策の健全性を保証できない。また、故障時に入出力を安全側に固定する仕組みを装置単体では有しておらず、入力回路の故障、出力回路の故障により不安全事象に至る可能性がある。

セキュリティの観点では、図3の階層モデルで示すように、汎用端末、伝送装置、公衆回線のうち信頼できる箇所は汎用端末のユーザーアプリケーション部分のみであり、それ以外の箇所において、なりすましや改ざん、途絶などのサイバー攻撃が想定される。

汎用端末の適用にあたっては、これらのリスクについてコストメリットを損なわずに解決することが課題となる。また、システムの保守や更新が、汎用端末の短い製品寿命に制約されないことも求められる。

表1 入出力の安全要件

	入力	出力
故障対策	照査パルス診断、N/R監視	交番信号とフィードバック診断
故障対策の健全性	フェイルセーフ処理部が故障診断することで健全性確保	
安全固定	異常時は落下と認識	強制的に落下状態とする

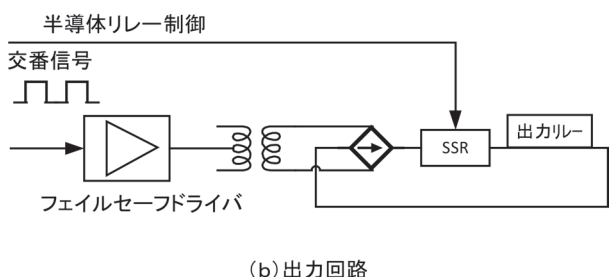
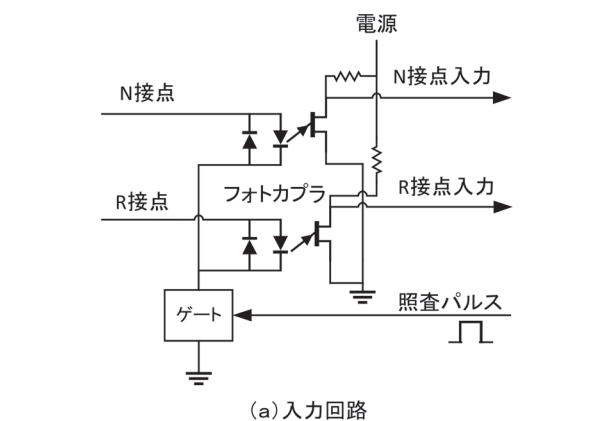


図2 電子端末の入出力

### 3. 汎用端末を適用するための安全要件

#### 3.1 安全要件の拡張

入出力に関する不安全事象である、入力情報の危険側誤認と危険側の誤出力について、汎用端末では電子端末のような装置単位での安全確保が困難である。そこで、汎用端末を用いたシステムで安全を確保するよう、安全要件の拡張を行った。

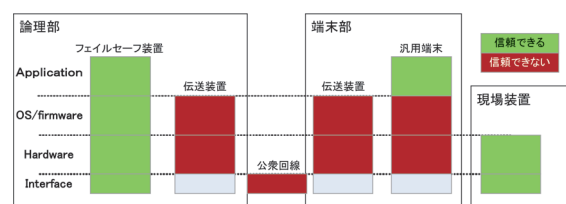


図3 検討システムの階層モデル



### 3.1.1 入力要件

入力情報について、危険側の情報を定義する。装置の入力と処理、伝送の誤りを検出する方法を定義し、危険側の見逃し誤りのリスクを定量化し、許容できる確率以下となることを示すことを要件とした。

### 3.1.2 出力要件

出力情報について、危険側情報を定義する。装置の単一故障が発生しても危険側出力が出力されない構成、または誤りを検知して安全側に固定する方法を具備し、危険側の誤出力のリスクを定量化し、許容できる確率以下となることを示すことを要件とした。

### 3.1.3 電子端末の要件への対応

電子端末の拡張した安全要件への対応を表2に示す。拡張した安全要件のもとでも既存の電子端末は要件を満たしている。なお、電子端末では、故障により出力リレーが誤動作してもフィードバックにより検知して、出力リレーの動作前に安全側固定することで、システムとしては誤出力させない構成となっている。これは、機能安全に関する国際規格 IEC 62425 における監視によるフェイルセーフティに相当する。具体的な要件として、入力情報について危険側の情報を定義すること、装置の入力と処理、および伝送の誤りを検出する方法を定義し、危険側の見逃し誤りのリスクを定量化し、許容できる確率以下となることを示すこととした。

## 3.2 セキュリティ要件

セキュリティ確保の基本方針をシステムの信頼できる箇所を明確化するとともに、信頼できない箇所におけるサイバー攻撃を信頼できる箇所において検証することと定めた。セキュリティの要件として、計算量的安全性などで定量化するとともに検証機能の健全性を確保することを定めた。

## 4. 汎用端末による入出力システムの構成手法

安全とセキュリティの課題を解決し、コストやシステム保守の要求に対応するため、フェイルセーフ装置に検

証を、汎用端末に処理を割り当てる構成手法を開発した。

### 4.1 フィードバック診断手法

フィードバック診断の手法として、信号用リレーの入出力に用いる汎用端末を出力端末と応答端末の二台構成として、応答端末の出力を監視することにより、リレー状態の危険側誤認と危険側誤出力を防ぐ。この場合、汎用端末にハードウェアの改造は必要なく、機能レベルの互換性を持たせることで置換えが可能であることからコストやシステム保守の要求に対応する。

#### 4.1.1 入力

図4に示すように、①中央装置は監視指示として乱数生成情報を出力端末である端末#1に送る。②端末#1は乱数生成情報に基づく乱数を生成して、応答端末である端末#2にリレーR<sub>0</sub>を介して伝送する。③端末#2は乱数を取得して中央装置に応答する。中央装置は、応答された乱数の照合を行い、リレー状態を認識する。

#### 4.1.2 出力

図5に示すように、出力リレーR<sub>0</sub>を2台の端末(端末#1, 端末#2)が独立して制御する2つのリレー(端末#1で制御するR<sub>A</sub>, 端末#2で制御するR<sub>B</sub>)のAND条件で動作するように構成する。端末#1からの出力R<sub>A</sub>を端末#2でフィードバック診断した後に、端末#2からの出力R<sub>B</sub>を制御する二段階制御とすることにより、端末故障が発生した場合の不正な出力を防ぐ。

## 4.2 セキュリティ手法の適用

セキュリティ上の脅威としては、電文の改ざんや装置のなりすまし、DoS攻撃(Denial-of-service attack)など

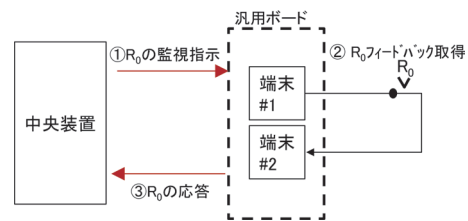


図4 入力制御

表2 電子端末の拡張した安全要件への対応

	安全要件	電子端末での対応
入力	危険側となる情報の定義	扛上接点の誤認
	故障の識別と安全側固定	照査パルス診断をフェイルセーフ処理部が実施、故障時は落下側と認識
	見逃し誤りが許容値以下	フェイルセーフ処理部の両系同時故障の確率が低いことによる
出力	危険側となる情報の定義	出力リレーの不正動作
	単一故障に対する対策	フェイルセーフドライバによる制御
	誤りの識別	フィードバック診断をフェイルセーフ処理部が実施、故障時はリレーを強制落下
	見逃し誤りが許容値以下	フェイルセーフ処理部の両系同時故障の確率が低いことによる

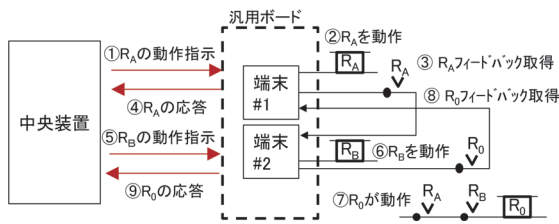


図5 出力制御

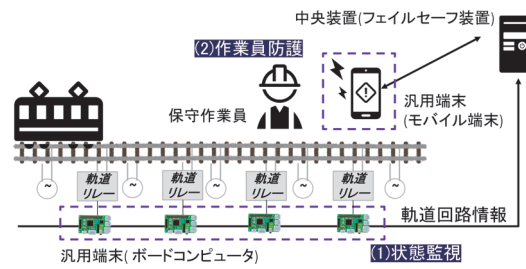


図7 軌道回路監視システムの構成

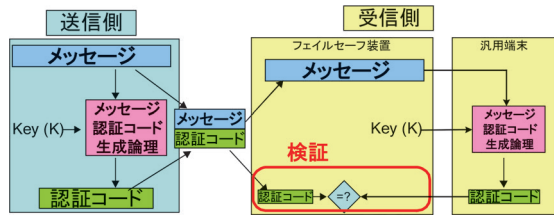


図6 認証コードの検証フロー

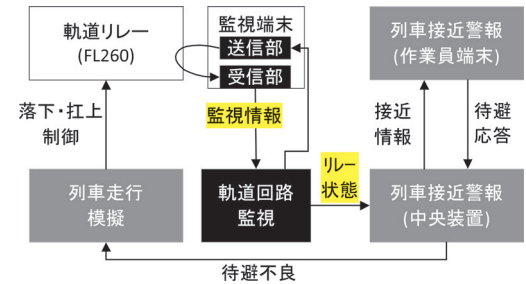


図8 試作システムの構成

のサイバー攻撃が想定される。端末を介した入出力において、危険側となりうるサイバー攻撃は、端末へのなりすましと改ざんであることから、電子署名による端末の真正性 (Authenticity) の検証、メッセージ認証コードによる完全性 (Integrity) の検証を行う。セキュリティ要件への対応として、米国国立標準技術研究所 (NIST) のセキュリティ基準に関するガイドライン<sup>4)</sup>にて、2031年以降も利用可能な方式とされる HMAC-SHA256 を適用する。検証機能の健全性は、図6に示すように汎用端末とフェイルセーフ装置で暗号処理と検証を分離することで確保する。暗号技術の陳腐化に際してもフェイルセーフ装置の役割は汎用端末のフロントエンドと認証コードのマッチング検証であるため改修は必要なく、汎用端末に適用する暗号処理の高度化により対応可能である。

## 5. 軌道回路監視システムの試作

### 5.1 システムの概要

信号用リレーの遠隔監視を保安用途へ適用する例として、中間軌道回路の状態監視システムを検討した。中間軌道回路の状態を列車接近警報システムに活用することで作業の安全性向上が期待されるが、軌道リレーは広範囲に点在するため、電子端末による構成は導入コストが大きく困難である。そこで、図7に示すように、軌道回路の監視に汎用端末を、汎用端末と中央装置の伝送に公衆無線を用いて監視システムを構成する。

### 5.2 試作したシステムの構成

試作システムは、列車走行を模擬して列車の在線位置に応じたリレー制御を行う列車走行模擬装置と、4.1.1節の入力制御の構成により軌道リレーの状態を監視する軌道回路監視装置より構成する。システムの構成を図8

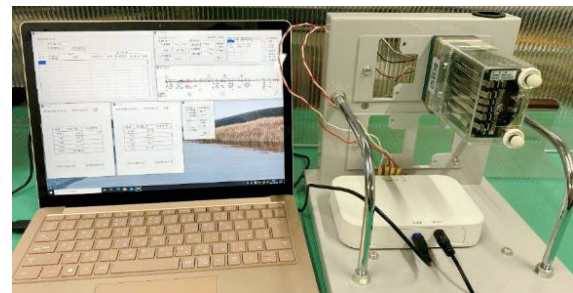


図9 列車走行模擬装置と軌道回路監視装置

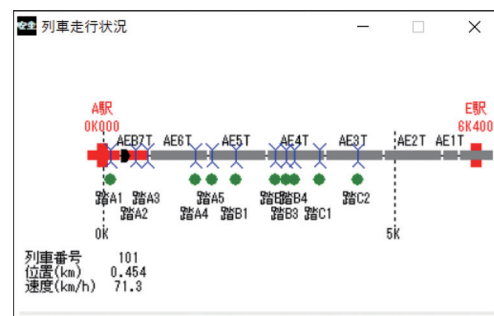


図10 列車走行模擬装置の画面例

に、試作した装置を図9に、列車走行模擬装置の画面を図10にそれぞれ示す。また、試作システムの安全要件への対応を表3に、軌道リレー監視に用いたボードコンピュータ、ESP32<sup>5)</sup>の諸元を表4に示す。

軌道回路システムにより得られたリレー状態情報の保安用途への活用として、汎用モバイル端末の保安用途適用の検討<sup>6)</sup>で試作したフィードバック型列車接近警報の列車位置情報としての利用について検証を行った。

表3 試作システムの安全要件への対応

	安全要件	試作システムでの対応
入力	危険側となる情報の定義	扛上接点の誤認
	故障の識別と安全側固定	汎用装置が応答する乱数の照査。照査不一致、途絶を落下と認識
	見逃し誤りが許容値以下	フェイルセーフ処理部の故障、乱数の偶発一致確率が低い (乱数長 32bit : $2.3 \times 10^{-10}$ , 64bit : $5.4 \times 10^{-20}$ )
出力	危険側となる情報の定義	出力リレーの不正動作
	単一故障に対する対策	二段階制御
	誤りの識別	フェイルセーフ処理部による診断。故障時は出力制御を停止
	見逃し誤りが許容値以下	フェイルセーフ処理部の故障、乱数の偶発一致確率が低い
セキュリティ	計算量的安全性	HMAC-SHA256 のセキュリティ強度により確保
	検証機能の健全性	フェイルセーフ処理部が検証することにより確保

表4 ESP32 の性能諸元

機能	諸元	
処理	CPU	Xtensa LX6 240MHz (600DMIPS)
	RAM	520KB (SRAM)
	ROM	4MB
IO	入力	Digital 21 接点 (共用)
	出力	
伝送	SPI 4, I2S 2, I2C 2, UART 3 802.11b/g/n, Bluetooth	

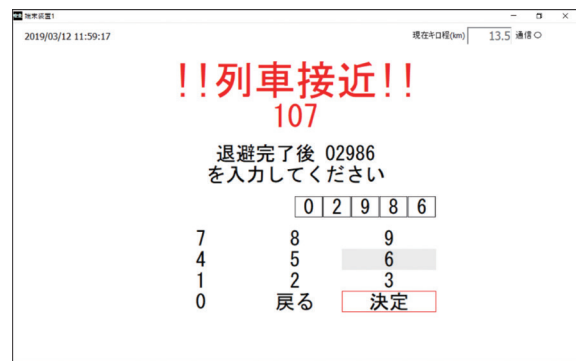


図12 作業員端末の画面表示 (接近時)

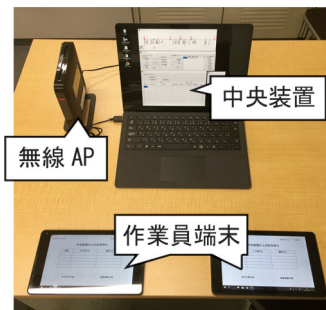


図11 列車接近警報システムの装置構成

試作システムは、列車接近警報の条件となる軌道回路を模擬するとともに、列車接近警報システムの中央装置にリレー状態を通知する設定とした。列車接近警報システムは、試作システムにおける軌道回路の落下により中央装置より作業員端末に警報を指示し、作業員端末からの待避完了を取得出来ない場合に中央装置が列車走行模擬装置に対して待避不良を通知する構成とした。列車接近警報システムの構成を図11に、作業員端末の画面を図12に示す。

### 5.3 機能検証結果

軌道回路監視装置について、装置故障とサイバー攻撃を想定した機能検証を実施した。検証項目と結果を表5に示す。検証の結果、入力、処理、出力、伝送、セキュ

リティのすべての試験項目について安全が確保できることを確認した。本機能検証の結果より、保安システムの入出力用途に汎用端末と公衆無線を適用できる見通しを得た。

## 6. まとめ

汎用端末と公衆無線を用いた入出力監視システムを保安に関わる用途へ適用するための検討として、電子連動装置の入出力装置である電子端末の安全要件の抽出とセキュリティ要件の整理を行った。そして、安全とセキュリティの課題、およびコストと保守や更新の要求に対応するシステム構成手法として、処理と検証の分離によるフィードバック診断とセキュリティ診断手法を開発し、中間軌道回路の監視用途に提案手法を適用したシステムを試作した。

試作システムを用いた機能検証により、装置故障、伝送異常、サイバー攻撃に対して安全を確保できること、また、安全要件とセキュリティ要件を満たすことを確認できたことから、汎用端末と公衆無線を、保安システムへの情報取り込みに適用できる見通しを得た。

今後は、軌道回路監視以外の用途への活用について構成手法と検証手法をとりまとめるほか、フェイルセーフ

表5 機能試験項目と結果

機能	故障モード	結果
入力機能	応答端末の入力誤り	フェイルセーフ部で乱数の不一致を判定
	応答端末の入力停止	無検知状態となり落下側と認識
処理機能	出力端末の乱数誤り	フェイルセーフ部で乱数の不一致を判定
	応答端末の署名誤り	フェイルセーフ部で改ざんとして検出
出力機能	出力端末の誤出力	フェイルセーフ部で乱数の不一致を判定
	出力端末の出力停止	無検知状態となり、落下側と認識
伝送機能	乱数生成情報誤り	検定符号により出力端末が誤りを検知 (見逃し誤りの場合も乱数の不一致を判定可能)
	応答端末の電文誤り	検定符号によりフェイルセーフ部が誤りを検知
	伝送途絶	乱数が更新されない、応答端末の停止として状態を落下側と認識
	伝送遅延	伝送遅延 途絶判定により落下側と認識
セキュリティ	再送攻撃	通番と乱数変更により異常電文として検知、破棄
	暗号鍵の不一致	署名の検定誤りにより異常電文として検知、破棄
	DoS 攻撃	途絶と同様に落下側と認識

処理部によらない照合の健全性確保について検討を行う予定である。

## 文献

- 1) 祇園昭宏, 岩田浩司: 安全関連系端末の安全要件および適用事例についての検討, 第27回春季信頼性シンポジウム発表報文集, 6-2, pp.127-130, 2019
- 2) 川口剛, 酒巻正男: 電子連動装置 (5) 電子端末, 鉄道と電気技術, Vol.4, No.12, pp.57-62, 1993
- 3) 関貫造: 電子連動装置 (7) 電子端末 K 形, 鉄道と電気技術, Vol.5, No.2, pp.65-69, 1994
- 4) National Institute of Standards and Technology : Recommendation for Key Management: Part 1 - General, SP 800-57 Part 1 Rev. 5, 2020.
- 5) ESP32 マイコンドキュメント: <https://www.espressif.com/en/support/documents/technical-documents> (参照日: 2022年3月20日)
- 6) 祇園昭宏, 岩田浩司: 高い安全性を要する用途への汎用モバイル端末の適用, 鉄道総研報告, Vol.33, No.7, pp.35-40, 2019



## 第 5 世代移動通信システムの鉄道運行業務への適用可能性検証

中村 一城\* 北野 隆康\*\* 川崎 邦弘\*\*\*  
 近江 泰志# 藤嶋 堅三郎# 市川 駿#

## Verification of the Applicability of Fifth Generation Mobile Communication Systems to Railway Operations

Kazuki NAKAMURA Takayasu KITANO Kunihiro KAWASAKI  
 Taishi OOMI Kenzaburo FUJISHIMA Shun ICHIKAWA

The 5th generation mobile communication system(5G), serviced by mobile network operators(MNO), is expected to dramatically improve the three characteristics of “enhanced Mobile Broadband(eMBB),” “Ultra-Reliable and Low Latency Communications(URLLC),” and “massive Machine Type Communication(mMTC),” compared to conventional mobile communication systems. The introduction of 5G services in railways is expected to lead to the introduction of new applications that could not be realized with conventional ground-to-train communication systems. Therefore, this paper reports the outlines of our ongoing research on the introduction of public 5G services provided by MNOs to railway operations and the results obtained so far.

キーワード：5G, 公衆網, 鉄道運行業務, ローカル 5G, FRMCS

## 1. はじめに

鉄道では、走行する列車と地上間の連絡手段である列車無線や近年導入が広がりつつある無線式列車制御システムなど、移動通信システムが欠かせないものとなっている。現在、鉄道の運行業務で使われている移動通信システムの多くは、鉄道事業者が自社で設計、構築、管理を行う自営網で構築されている。そのような中、2020年から通信事業者が段階的にサービス提供を始めた第5世代移動通信システム（5G）では、最終形において無線通信の性能が従来に比べて大きく向上する見込みとなっており、より多くの情報をリアルタイムで伝送できるなどの特徴を生かして、現行のアプリケーションの機能向上や新たなアプリケーションの導入が期待されている。また、現在自営網で構築されている移動通信システムに、通信事業者が提供する公衆5Gサービスを活用することができれば、設備の導入やメンテナンスに要する人的リソース、設備コスト等の削減が期待できる。その上、自営網と公衆網のハイブリッド構成や複数の通信事業者のサービスを利用するなど、複数の無線通信サービスを利用することにより、回線の冗長性が高まり、列車運行のオペラビリティ向上が期待される。

しかし、通信事業者が提供する一般のユーザと伝送路

を共有する公衆サービスを今後も導入線区の拡大が見込まれる無線式列車制御や将来の導入が期待される自動運転など、列車のさらなる安全・安定運行を実現するためのアプリケーションに活用する方法は現時点で確立されていない。そこで筆者らは、鉄道事業者が公衆5Gサービスを鉄道運行業務へ適用する手法の確立に向け、未知の部分が多い鉄道環境における5Gの伝送速度や遅延などの伝送品質を評価するとともに、具体的なアプリケーションを想定した検証に取り組んでいる<sup>1)2)</sup>。

本稿では、5Gの概要と国内外における鉄道での活用に向けた取組みを紹介したのち、筆者らが実施した伝送品質評価の結果について報告する。

## 2. 5Gの概要と国内におけるサービス展開

## 2.1 5Gの概要

通信事業者がサービスを提供する移動通信システムは、1979年に開始された自動車電話サービスを起源として、約10年ごとに新たな仕様に基づくサービスが提供されてきた。現在では、ディスプレイを備えたスマートフォンやタブレットに代表されるように、映像やテキストなどの情報伝送も重要なサービスとなっている。

特に5Gが目ざされているのは、伝送する情報の対象が、従来の「人からアクセスされる情報の伝送」から、「人・モノが利用できる情報の伝送」へと移り、あらゆるモノをネットワークにつなぐことを基本的なコンセプトとしていることである。そのため、移動通信システムが世代更新のたびに機能向上の中心としてきた「超高速・

\* 情報通信技術研究部 通信ネットワーク研究室

\*\* 信号技術研究部 列車制御システム研究室

\*\*\* 旧 信号・情報技術研究部

# 株式会社日立製作所

大容量」の特徴に、「超低遅延・高信頼」「多数同時接続」の2つの特徴が加わっている<sup>3)</sup>。例えば、超高速の特徴に関しては、現在使用されている第3.9世代移動体通信システム（LTE）に比べて、約100倍以上となる20Gbpsのデータ通信の実現が予定されている。また、超低遅延・高信頼の特徴に関しては、遅延時間がLTEに比べて約1/10の1ms程度となる見込みである。さらに、多数同時接続においては、LTEでは数台であった同時接続台数が100万台/km<sup>2</sup>となり、身の回りのあらゆるものがネットワークに接続されることが想定されている。なお、これらの3つの特徴は、全てを同時に満足できるのではなく、そのいずれかに特化すると、他の2つの特徴は制約されることに留意が必要である。

国内では、5G サービス用として3.7GHz帯、4.5GHz帯、28GHz帯の周波数が割り当てられている。これらの周波数帯は、3.7GHz帯および4.5GHz帯をまとめてSub 6（サブシックス）、28GHz帯をミリ波と呼んで区別している（一般的にはミリ波は波長がmmオーダーとなる30GHz以上の周波数の電波をさすが、5Gの展開においては28GHz帯をミリ波と呼んでいる）。Sub 6とミリ波では、電波の伝搬特性や使用できる帯域幅などが異なるため、提供されるサービスエリアや性能が異なることに留意が必要である。

また、通信事業者による全国向け5Gサービスとは別に、地域の企業や自治体等が自らの建物や敷地内でスポット的に柔軟にネットワークを構築して利用する新しい仕組みとして、「ローカル5G」も制度化されている<sup>4)</sup>。ローカル5Gに使用する周波数は、全国向けネットワークと同じ周波数帯（4.5GHz帯、28GHz帯）となっており、全国サービス用のハードウェアを共通で利用可能である。

## 2.2 国内における5Gのサービス展開

日本国内では、2020年春から通信事業者による5Gの商用サービスが開始されており、通信事業者による違いはあるが、従来の4G/LTE向けの周波数の転用も行いながらサービスエリアの拡大が進んでいる。最も展開が早い通信事業者では、2022年3月現在で人口カバー率（500m四方のエリアの中で50%以上の場所で通信可

能なエリアの割合）が90%以上となっている。また、JR・私鉄を含む主要路線のホーム、駅構内および駅間を走行中の電車内での5Gエリア化を目指すなど、鉄道をターゲットとしたサービス展開も行われている。さらに、総務省が発表しているデジタル田園都市国家インフラ整備計画<sup>5)</sup>では、2023年度末に人口カバー率（500m四方エリアのうち5G通信ができるエリアの人口を総人口で除した割合）を95%、2025年度末には97%とする計画を掲げている。

## 3. 鉄道での5G活用に向けた研究開発動向

### 3.1 鉄道での5G活用が期待される場面

鉄道環境において5Gの活用が期待される場面としては、表1のようなものが考えられる。超高速・大容量通信の特徴を生かしたアプリケーションとしては、車上に設置した防犯カメラや車両の状態情報データ、車上センシングデータなどの情報の地上へのリアルタイム伝送や、地上から車上への旅客向けの高画質映像コンテンツの提供などが期待される。さらに、従来は、アプリケーションごとに別々に専用の無線通信システムを使用していたが、複数のアプリケーションを1つの無線通信システムで共用することで、無線設備の削減が期待される（図1）。

超低遅延通信については、無線による列車制御や自動運転における列車運行間隔のさらなる高密度化、超高速・大容量通信の特徴による高精度画像の伝送と組み合わせでの保守用車の遠隔操作などへの活用が期待される。

多数同時接続では、今後鉄道環境において多数の設置が見込まれる各種センサデータの同時収集や、多数の旅客に向けた情報提供などへの活用が期待される。

さらに、仮想的に前述した3つの特徴のいずれかに回線の性能を特化させたサービスの提供、または、専用回線と同等の帯域を保障したサービスの提供が可能な、ネットワークスライシング技術にも注目が集まっている。なお、ネットワークスライシングは技術としては確立しているが、通信事業者がどのような形でユーザにその機能を用いたサービスを提供するかについては現時点で未知であり、ユーザである鉄道事業者のニーズと通信

表1 5Gの特徴と鉄道での活用が期待される場面

5Gの特徴	仕様	鉄道での活用が期待される場面
超高速・大容量 (enhanced Mobile Broadband: eMBB)	最高伝送速度 20Gbps	・車上-地上間の高画質画像伝送（業務用、旅客サービス用）
高信頼・超低遅延 (Ultra-Reliable and Low Latency Communications: URLLC)	遅延時間 1ms程度	・列車制御（自動運転） ・保守用車遠隔制御
多数同時接続 (massive Machine Type Communication: mMTC)	接続機器数 100万台/km <sup>2</sup>	・沿線環境監視 ・設備監視

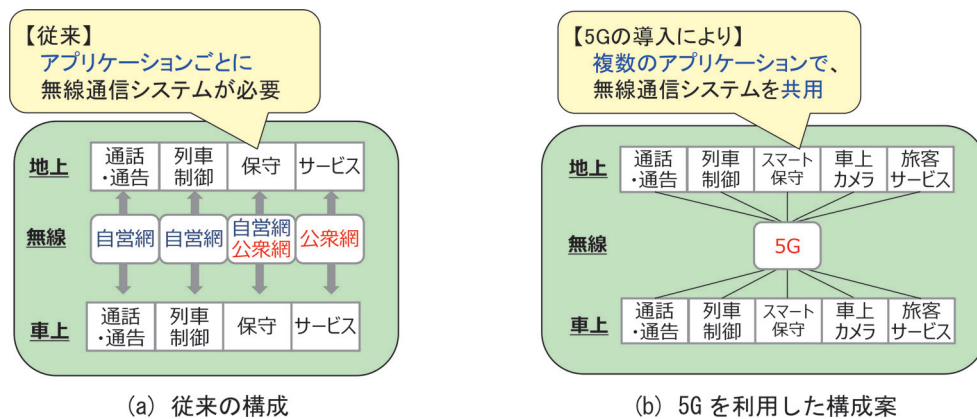


図1 地上-車上間通信における無線システムの構成イメージ

事業者における事業展開の方針にもよるため、今後の動向を注視していく必要がある。

### 3.2 鉄道環境における研究開発動向

#### 3.2.1 国内における動向

鉄道における5Gの活用に向けては、各鉄道事業者において通信事業者などと連携した実証実験が行われている<sup>6~11)</sup>。実証実験の多くは、「超高速・大容量通信」の特徴を使い、移動中の高画質の動画伝送を対象とした評価を行っている。これらの実証実験では、Sub 6とミリ波のそれぞれの周波数帯において、高速走行する新幹線車内と沿線に仮設された地上局との間で、4Kや8K画質の映像の伝送に成功したことが報告されている。これらの実験等により、車内の防犯カメラ映像や将来の自動運転で重要な役割を果たすと考えられる前方監視カメラの映像を、高画質で地上に伝送できる可能性が示されたものと考えられる。

また、2018年度から2019年度には、(一社)日本鉄道電気技術協会を事務局として、鉄道事業者、通信事業者、有識者らを委員とする「5Gの活用に向けた検討会」(主査：三瓶政一 大阪大学教授)が組織され、従来鉄道事業者が自社で構築・管理する自営網で運用してきた列車無線などの保安通信設備や、無線式列車制御システムにおける無線システムなどの信号保安設備に5Gを活用することを目指した検討が行われた。特に、鉄道事業者と通信事業者と一緒に鉄道の無線通信システムの将来について議論したことで、通信事業者が提供する移動通信サービスを導入する際に、鉄道事業者と通信事業者が調整すべき事項などが整理され、「鉄道に活用しても差し支えない」との提言がまとめられた<sup>12)</sup>。この提言は、5Gの鉄道への活用に向けた大きな前進であった。

#### 3.2.2 海外における動向

海外、特に欧州では、第2世代の携帯電話システムの技術をベースに、鉄道専用機能を付加した移動通信システム GSM-R (Global System for Mobile communications -

Railway) による列車無線システムが標準化されており、国境を越えて相互直通運転する路線を中心に多くの国で使用されている。しかし、導入からすでに20年以上が経過しており、2030年を目途にサービスが停止される予定となっている。そこで、国際鉄道連合(UIC)のFRMCS (Future Railway Mobile Communication System) プロジェクトにおいて、5G含む複数の通信システムをシームレスに活用する新たな対列車通信システムの検討が行われている。このプロジェクトでは、欧州電気通信標準化機構(ETSI)や移動通信システムの標準化を行っている3GPP (3rd Generation Partnership Project) と連携し、鉄道特有の機能を5Gの仕様に反映するための活動も行っている。

FRMCSにおいては、図1に示すような5Gだけを使用するのではなく、複数の無線通信システムを組み合わせることで、所望の無伝送品質を満足させるためのシステム構成が検討されている(図2)<sup>13)14)</sup>。さらに、FRMCSでは、シナリオごとに求められる遅延および信頼性の性能要求がまとめられており(表2)、3GPPの技術報告書(Technical Report: TR)としても発行されている<sup>15)</sup>。これらのシナリオと要求品質は、日本での5Gの適用に向けた検討においても参考になるものと考えている。さらに欧州では、2020年末からFRMCSの各種仕様の実証を行う5GRailプロジェクトを開始して、実現に向けた取り組みが進められている<sup>16)</sup>。

なお欧州では、5Gの適用を見据えて従来のGSM-R

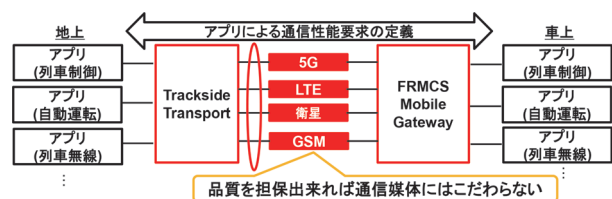


図2 FRMCSにおける次世代通信システムの構成案 (Copyright(C) 2022 IEICE)<sup>14)</sup>



表2 3GPP TR（技術報告書）で定義されている FRMCS の主なシナリオと要求品質の例<sup>15)</sup>

シナリオ	エンド-エンド間の遅延	ネットワーク層でのパケット到達率	最高速度	ユーザ体感データレート	3GPP TRの要求品質から想定される具体的なアプリケーションの例
運行業務用音声通話	≤100ms	99.9%	≤500km/h	100kbps-300kbps	列車無線
監視目的の重大な映像の伝送	≤100ms	99.9%	≤500km/h	10Mbps	車内監視
列車の安全に直結する非常に重大な映像の伝送	≤100ms	99.9%	≤500km/h	10Mbps-20Mbps	列車前方監視 遠隔制御システム
	≤10ms	99.9%	≤40km/h	10Mbps-30Mbps	
列車の状態情報など、一般的なデータの伝送	≤500ms	99.9%	≤500km/h	1Mbps-10Mbps	列車状態モニタ 設備状態監視
列車の運行管理に関する重大なデータの伝送	≤500ms	99.9999%	≤500km/h	10kbps-500kbps	運行管理システム
高度な運行制御や完全自動運転などに用いる非常に重大なデータの伝送	≤100ms	99.9999%	≤500km/h	100kbps-1Mbps	列車制御システム 自動運転システム
	≤10ms	99.9999%	≤40km/h	100kbps-1Mbps	

※表中の値は、鉄道用の通信網を利用することを想定して設定された目標値

で使用されていた周波数帯を拡張するとともに、1,900MHz帯を新たに鉄道専用として割り当てることが決定した。

このように、FRMCSは、欧州での導入を主たるターゲットとしたプロジェクトではあるが、UICにおけるプロジェクトであること、中国やオーストラリアなどのアジア・太平洋地域においてもFRMCSを基にした次世代鉄道移動通信システムの検討を行うという動きがあることから、我が国への波及効果についても引き続き動向を注視し、必要に応じて日本からの提案を行うことも視野に入れて研究開発を進める予定である。

#### 4. 鉄道運行業務への5G活用に向けた伝送品質評価

前章で述べたように、鉄道における5Gの性能評価については、既に一部の鉄道事業者と通信事業者が連携し、超高速・大容量通信の特徴を用いて旅客サービス等を意識した画像伝送等の実証実験が行われ、その有効性が示されている。一方で、無線式列車制御や将来の自動運転など、列車のさらなる安全・安定運行を実現するために必要な5Gの性能評価は、現時点で十分に行われていない。そこで、筆者らは、5Gを列車の安全・安定運行に関わる情報の伝送に適用することを目指した検討を行うこととした。検討にあたっては、一般ユーザの影響を切り離れた5Gの真の実力値を把握する必要がある、また、様々な伝送環境や条件を自由に設定した検証を行う事が望まれる。そこで最初のステップとして、システムの動作や検証条件を任意に設定した評価を実施できるよう、ローカル5Gシステムを鉄道総研国立研究所の構内に構築し、5Gの性能や適用可能性について検討を行うこととした。

#### 4.1 鉄道総研所内ローカル5Gシステムの概要

鉄道総研所内試験線沿線に構築したローカル5Gシステムは、ノンスタンドアローン（NSA）方式で構成しており、データの伝送には28GHz帯の5Gを使用しているが、基地局と端末での制御信号のやり取りのためのネットワーク（アンカー）には、2.5GHz帯の自営BWA（自営LTE）システムを使用している。

ローカル5Gのシステムは、その利用が自己の土地内に限定されていることから、システムの構築に際しては、サービスエリアを鉄道総研国立研究所内に限定しつつ、所内試験線を走行する列車との間で通信が可能となるよう2つのアンテナを設置し、それぞれの位置や種類、向きなどを決定した（図3）。

#### 4.2 評価方法

評価にあたっては、図2で示したFRMCSで検討されているネットワーク構成を参考に、Trackside Transport（地上側）、FRMCS Mobile Gateway（車上）に該当する高信頼通信プラットフォーム<sup>17)</sup>を含む品質評価システムを構築した（図4）。高信頼通信プラットフォームは、車上側、地上側（サーバ側）のそれぞれにおいて、アプリケーションと通信システムの間で、送信時にはアプリケーションが求める通信品質に合わせて優先度を制



図3 ローカル5Gの設置状況



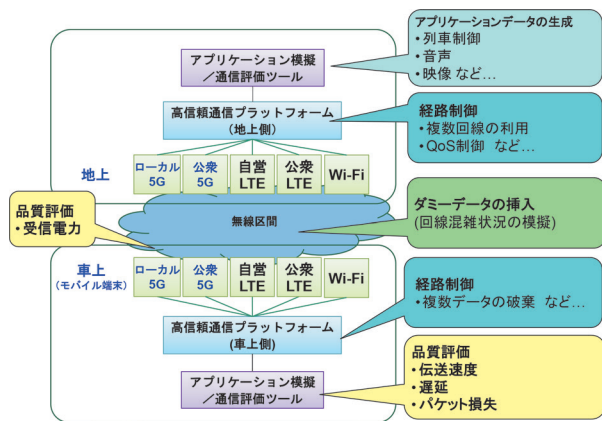


図4 品質評価システムの構成  
 (地上→車上伝送品質評価の例：車上→地上も同様)  
 (Copyright(C) 2022 IEICE)<sup>14)</sup>

御するとともに、複数の通信システムが利用可能な場合には、それらを利用することで所望の伝送品質を満足できるようにデータの伝送を制御する。また、受信時には、複数の通信システムを経由して届いたデータの中から必要なデータのみを抽出し、適切にアプリケーションに渡す動作を行うものである。

また、品質評価システムでは、送信側の「アプリ模擬/通信評価ツール」にて、アプリケーションを想定した模擬パケットを生成し、受信側の「アプリ模擬/通信評価ツール」に届いたパケットにより、その伝送品質を評価する。主な評価項目は、データの伝送速度、伝送遅延時間、パケット損失率とした。なお、同時に無線部分における受信電力も記録した。さらに評価においては、想定するアプリケーションとして、模擬したデータのみを単独で伝送した場合だけでなく、ダミー負荷をかけることで他のユーザと回線を共有している状況を想定した伝送品質の評価も行った。

### 4.3 評価結果

#### 4.3.1 ローカル5Gの性能確認

最初に、構築したローカル5Gと自営LTE単体の性能確認を行った。走行する列車上で地上→車上の伝送速度と地上→車上→地上の往復の遅延時間（ラウンドトリップタイム：RTT）を測定した結果を図5、6に示す。その結果、図5に示すように基地局に近い位置であれば、1台の端末のみで基地局を占有した場合には、概ね仕様に近い伝送速度（仕様値：530Mbps）が得られることを確認した。また、ハンドオーバー（ローカル5G：330-360m付近、自営LTE：260-290m前付近）で、スループットの低下が見られている。また、図6より、ハンドオーバーが行われるまでの範囲では、ローカル5GのRTTが自営LTEに比べて約1/3となり、さらにその変動も

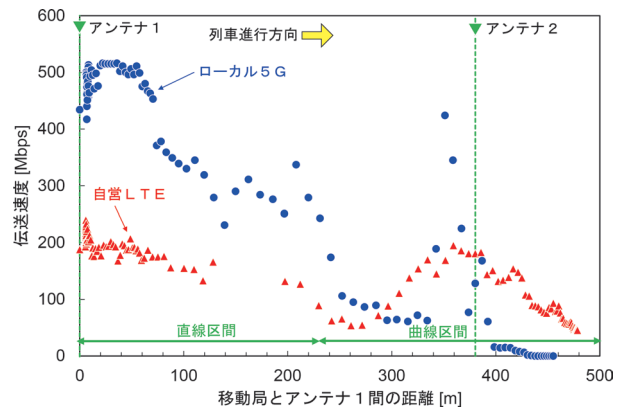


図5 下りスループットの測定結果  
 (Copyright(C) 2022 IEICE)<sup>14)</sup>

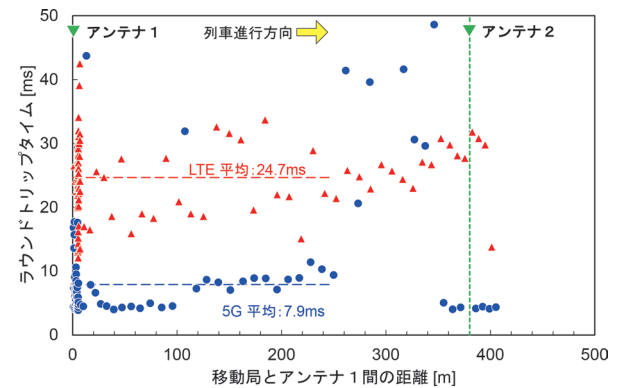


図6 RTTの測定例 (Copyright(C) 2022 IEICE)<sup>14)</sup>

表3 評価を実施した想定アプリケーション

#	アプリケーション	パケットサイズ (Bytes)	送信間隔 (ms)	想定伝送速度 (kbps)	所望伝送品質 (PLR)
1	列車制御	256	200	10.24	$<10^{-6}$
2	列車無線 (音声)	256	20	102.4	$<10^{-3}$
3	映像	1,232	1	9,856.0	$<10^{-3}$

小さい結果であったが、ローカル5Gのハンドオーバー時には、RTTが40ms以上となっていた。これは、基地局からの受信信号電力の低下とNSA方式のためにハンドオーバーで時間を要するなどの複合要因によるものと想定される。なお、ローカル5Gのみでデータ伝送を行った際のハンドオーバーによるスループット低下については、高信頼通信プラットフォームを用いて、ローカル5Gと自営LTEで同時にデータを伝送することで、その低下を抑えて安定した通信が実現できることが確認されている<sup>17)</sup>。

#### 4.3.2 アプリケーションを想定した伝送品質の評価

本項では、ローカル5Gを用いて鉄道アプリケーションを想定した伝送品質の評価を行った結果を報告す

る。今回の試験において評価の対象としたアプリケーションは、列車制御、列車無線（音声）、画像伝送とし、それぞれを想定したデータを模擬的に生成して、ローカル 5G により伝送することで実施した。想定したアプリケーションと作成した模擬パケットのサイズ、伝送周期、所望伝送品質を表 3 に示す。試験は、安定して基地局からの信号が得られる地点に端末を固定して行い、公衆網における回線混雑時を想定して、回線に意図的に負荷（地上→車上：500Mbps、車上→地上：100Mbps）をかけた試験も実施した。

その結果、列車制御を想定した試験では、回線の混雑時においても所望の伝送品質（パケット損失率：PLR が  $10^{-6}$  未満）でデータの伝送ができることを確認した。一方で、列車無線を想定した試験では、ローカル 5G 単独ではパケット損失が所望の伝送品質を満足できなかった。そこで、品質改善に有効と考えられる方法の一つである、高信頼通信プラットフォーム<sup>17)</sup> を利用したローカル 5G と自営 LTE の同時使用による評価を実施した。その結果、伝送品質が改善し、所望の伝送品質（PLR が  $10^{-3}$  未満）を満足できることを確認した。これらの結果より、列車制御や列車無線などのアプリケーションについては、高信頼通信プラットフォームを利用して、複数の無線システムを利用することで、公衆の 5G サービスを使用した場合でも所望の伝送品質を満足できる可能性があることが分かった。なお、画像の伝送については、所望伝送品質を満足できなかったが、高信頼通信プラットフォームを用いてローカル 5G と自営 LTE を同時に使用することにより、パケット損失が減少することが確認されており、今後 SA 方式の展開や複数の周波数を束ねたキャリアアグリケーションなどによるシステムの伝送品質の向上により、所望伝送品質の達成が期待される。

#### 4.3.3 無線部分の優先制御による伝送品質評価

本項では、無線部分での優先制御機能の効果を検証した結果を報告する<sup>16)18)</sup>。通常、基地局装置においては、

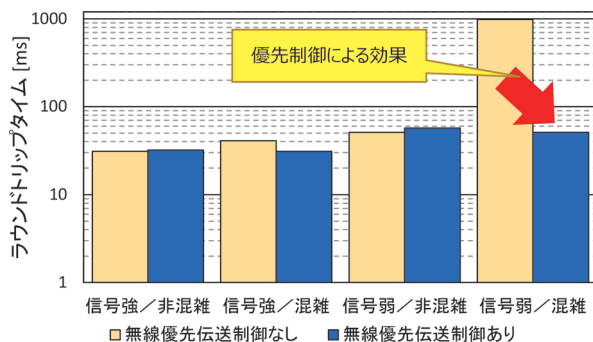


図7 無線区間における優先制御の効果（自営 LTE の例）<sup>18)</sup>

QoS Class Identifier (QCI) と呼ばれる値の変更により、無線区間でのパケット優先制御が可能となっている。今回使用したローカル 5G の基地局装置では当該機能が実装されていなかったため、自営 LTE の基地局装置においてその機能の検証を行った。検証は基地局からの信号が高い（強い）エリアと低い（弱い）エリアで静止した状態で行った。また、それぞれのエリアにおいて、模擬パケットの送信により回線の混雑を模擬した状態と混雑していない状況での検証を行った。検証に用いた指標は改善混雑による遅延の影響を見るため RTT とした。試験結果を図 7 に示す。図 7 より、回線が混雑していない状況では、信号の強弱に関係なく優先制御の効果は見られないが、回線が混雑している状況では、優先制御の効果が見られた。特に受信信号が弱く、回線が混雑している状況においてその効果が大きく、本試験環境においては、RTT が 1/10 以下に低減される結果が得られた。今回の結果は、LTE において行ったが、当該機能は 5G においても実装される見込みとなっている。そのため、今後通信事業者において当該優先制御サービスが提供されることで、その程度は未知ではあるが伝送遅延の低減効果はあるものと考えられ、鉄道運行业務への活用も大いに期待できる。

## 5. まとめ

本報告では、5G の概要と国内外における動向を紹介するとともに、公衆 5G サービスの鉄道運行业務への適用可能性を検証するための最初のステップとして、ローカル 5G システムを用いた検証試験を行い、その結果について述べた。そして、技術的には鉄道運行业務へ適用できる可能性が高いことを示した。

今後は、Sub 6、SA 方式、公衆網の 5G サービスを利用した検証など、適用可能性評価の深度化、ローカル 5G の鉄道環境での活用方法などの検討を進めるとともに、鉄道事業者が 5G を適用する際の手順等をまとめたガイドラインの作成を進める予定である。

## 文献

- 1) 中村一城, 北野隆康, 川崎邦弘, 近江泰志, 藤嶋堅三郎, 奥村太一: 鉄道における 5G の活用に向けた検討, 第 58 回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 802, 2021
- 2) 中村一城: 鉄道における 5G の活用に関する研究開発の動向, JERA, Vol.64, No.8, pp.8-11, 2021
- 3) 総務省: 令和 2 年度情報通信白書, 2020
- 4) 総務省: ローカル 5G 導入に関するガイドライン, 2022
- 5) 総務省: デジタル田園都市国家インフラ整備計画, 2022
- 6) KDDI ニュースリリース: 世界で初めて「5G」を用いた走行

- 列車での 8K/4K 映像伝送, 連続ハンドオーバー実験に成功, <https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2017/12/01/2812.html>, 2017.12.1 (参照日: 2022 年 7 月 3 日)
- 7) NTT ドコモニュースリリース: 5G を用いた SL 大樹への超高精細ライブ映像伝送に成功, [https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/topics/2018/topics\\_181128\\_01.pdf](https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/topics/2018/topics_181128_01.pdf), 2018.11.28 (参照日: 2022 年 7 月 3 日)
- 8) NEC プレスリリース: NEC, NTT コミュニケーションズ・NTT ドコモ・東武鉄道による 5G を用いた列車への高精細映像伝送実験に貢献, [https://jpn.nec.com/press/201902/20190205\\_01.html](https://jpn.nec.com/press/201902/20190205_01.html), 2019.2.5 (参照日: 2022 年 7 月 3 日)
- 9) JR 西日本ニュースリリース: 第 5 世代移動通信システム (5G) 実証実験, [https://www.westjr.co.jp/press/article/2019/04/page\\_14132.html](https://www.westjr.co.jp/press/article/2019/04/page_14132.html), 2019.4.11 (参照日: 2022 年 7 月 3 日)
- 10) JR 東海ニュースリリース: 東海道新幹線における 5G 無線通信実験について, [https://jr-central.co.jp/news/release/\\_pdf/000040020.pdf](https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000040020.pdf), 2019.9.30 (参照日: 2022 年 7 月 3 日)
- 11) JR 東日本ニュースリリース: 時速 360km で走行する ALFA-X で 5G 通信に成功, [https://www.jreast.co.jp/press/2020/20210128\\_ho01.pdf](https://www.jreast.co.jp/press/2020/20210128_ho01.pdf), 2021.1.28 (参照日: 2022 年 7 月 3 日)
- 12) 児玉利光, 太田正毅, 羽田野裕史, 北村知: 5G の鉄道活用にに向けた検討, JERA, Vol.63, No.7, pp.40-44, 2020
- 13) ETSI: Rail Telecommunications (RT); Future Rail Mobile Communication System (FRMCS); Study on system architecture, ETSI TR 103 459 V1.2.1, 2020.
- 14) 中村一城, 北野隆康, 小川祥吾, 竹内恵一, 流王智子, 川崎邦弘 “鉄道運行業務への公衆 5G 活用に向けたローカル 5G を用いた基礎検討,” 信学技報, vol.122, no.6, RCS2022-95, pp.128-133, 2022
- 15) 3GPP: Mobile Communication System for Railways, 3GPP TS 22.289, V17.0.0, 2019.
- 16) 5GRail プロジェクトホームページ: <https://5grail.eu/>, (参照日: 2022 年 7 月 3 日)
- 17) 石野正典, 鈴木拓, 五十嵐悠一, 近江泰志, 藤嶋堅三郎, 中村一城, 北野隆康, “鉄道向け公衆網活用高信頼通信プラットフォームの検討,” 信学技報, vol.122, no.6, RCS2022-1, pp.1-6, 2022
- 18) K.Nakamura, T.Kitano, S.Ogawa, K.Takeuchi, K.Kawasaki, T.Ohmi, K.Fujishima, T.Kunifuji, K.Bekki, “Study of applicability of 5G technology to train control systems,” 13th World Congress Railway Research(WCRR 2022), IP 19 - 1, 2022.





# 電気転てつ機モニタ用の転換負荷推定手法の開発

潮見 俊輔\* 高崎 建\* 往古 直之\*\* 椿 健太郎\*

Estimation Method of Switching Load of Turnout for Point Machine Monitoring System

Shunsuke SHIOMI Ken TAKASAKI Naoyuki OKO Kentaro TSUBAKI

A monitoring system of state of point machine is to estimate switching load of a turnout using motor current and voltage to prevent a switch malfunction of a turnout. In conventional estimation methods, the relationship between load estimation results and measured values of motor voltage and current has been pre-defined. Therefore, if installation conditions of point machine differ from those at the time of design, there will be an error in the estimated value. In order to reduce this error, we have developed a method to precisely estimate the switching load using the same measurement items as conventional methods. We also proposed a method to estimate a switching load even under severe conditions, such as when a clutch slips before a malfunction.

キーワード：電気転てつ機，転換負荷，転てつ機モニタ，クラッチ，転換不能

## 1. はじめに

電気転てつ機は、トングレール等の分岐器の可動部を動作させる機能（転換）と、その位置を保持する機能（鎖錠）などの機能を備える信号保安装置である。電気転てつ機を安定して稼働させるためには、電気転てつ機の転換のための出力（転換力）に対して分岐器の負荷（転換負荷）が小さい状態で用いる必要がある。そのため、電気転てつ機の定期検査では、転換時のモータ電流、クラッチすべり時の電流、および手回しハンドルの回転トルク等の測定が行われている。また、状態監視装置（以下、転てつ機モニタ）を設置して、モータの電流や電圧を測定し、これらから転換負荷の変化や推定値を得る方法<sup>1)</sup>も開発、実用化されている。

転てつ機モニタにおける転換負荷やトルクの推定法の一つとして、モータ電流や電圧に対応する転換負荷やトルクの推定値を記録したテーブルを作成し、計測した電圧、電流からテーブルの該当値を参照する手法がある。この手法は、テーブルを定義する際に前提とした運転状態においては推定値を少ない計算量で得られるため有用である。しかし、前提とは異なる運転状態、例えば高い転換負荷が作用して電気転てつ機内のクラッチ（保護機構）が作動し、転換不能に至るような過酷な運転状態においては、この手法で得られる推定値が実際の負荷と異なる場合があることが確認されている。このように実際の転換負荷と転てつ機モニタの推定値の差異が大きい状態は、転換状態の良否判断や転換不能に対する処置にも

影響する。したがって、転てつ機モニタを設備保守に活用する観点から、過酷な運転状態においても実測値と大きく乖離しない転換負荷の推定値を得られることが望まれる。

本稿では、転てつ機モニタにおける転換負荷推定の課題を示した上で、従来の転てつ機モニタと同一の計測項目を用いてモータのトルクと転換負荷を推定する手法とその効果について述べる。また、高い転換負荷が作用した際に入出力軸間でトルクや回転速度の差が生じるクラッチについて、モータ電流、電圧とクラッチ出力側の回転速度から、クラッチの出力軸のトルクを推定する手法とその効果について述べる。さらに、提案する転換負荷の推定手法を転てつ機モニタとして導入する際に必要となる改修項目と効果の評価結果を報告する。

## 2. 転てつ機モニタによる転換負荷推定と課題

### 2.1 電気転てつ機の構成と構造

電気転てつ機はトングレール等の分岐器の可動部を移動させる転換動作のため、モータを動力として、歯車等で回転運動を減速し、カム機構やボールねじ等の機構で動作かんの直動運動に変換する転換機構を備える。また、転換中の動作停止や動作かんに大きな負荷が作用した場合にも、電気転てつ機の内部や転てつ付属装置に過大なトルクや力が作用しないよう防護するトルクリミッタに相当する機能が備えられている。一例としてTS-M形電気転てつ機の機器構成を図1に示す。動力源として交流誘導電動機を使用し、過負荷防護機能としてインダクションクラッチを備えている。また減速機構として歯車、転換機構としてカム機構を備える。

モータと減速・転換機構の間に設けられたインダク

\* 信号技術研究部 信号システム研究室

\*\* 信号技術研究部 信号システム研究室（現 日本信号株式会社）

ショッククラッチは、コイルを励磁することでモータと転換機構の間のトルクを非接触で伝達する。クラッチに一定以上のトルクが作用した場合、モータ側（入力）と転換機構側（出力）の間に回転速度差（すべり）が生じる。

動作かんの内部に備えられたカム機構は、最終段の転換歯車上に備えたローラにより駆動される。動作かんの移動量  $x_0$  と回転角  $\theta$  の関係、動作かんに作用する転換負荷  $F_0$  と転換歯車の回転トルク  $T_r$  は幾何学的な関係から、式 (1) および式 (2) により示される。

$$x_0 = \frac{1}{2} L_0 + r_g \sin\theta \quad (1)$$

$$T_r = F_0 r_g \cos\theta \quad (2)$$

$r_g$  は転換歯車上のローラ中心のピッチ円半径、 $L_0$  は動作かんの最大移動量である。

## 2.2 転てつ機モニタによる転換負荷の推定と実測値

転てつ機モニタは、電気転てつ機の動作状態を常時監視し、これらの状態や転換不能の予兆を検出することを目的に設備されている。特に転換負荷の状態監視に関して、スイッチアジャスタ等のひずみを計測する方法が提案されているが<sup>2)</sup>、現行の転てつ機モニタでは、モータの電流や電圧から転換負荷の推定値を間接的に得る方法が採用されている。実験や理論値等で得た結果に基づき、モータ電流、電圧に対する転換負荷やモータトルクの推定値を近似式やテーブルを用いて得る方式などがある<sup>1)</sup>。

転てつ機モニタの転換負荷の推定値と実測値を比較するため、転てつ機モニタが設備されている新幹線用の18番片開き分岐器とTS-M形電気転てつ機を用いて試験を行った。電気転てつ機のモータ電源電圧と分岐器の転換負荷はそれぞれ安定化電源と模擬負荷装置<sup>3)</sup>を用いて変化させた。

図2(a)にモータ電圧に対する転換負荷の平均値（平均転換負荷）の実測値、推定値を示す。模擬負荷装置を作動させない条件での転換負荷の実測値は約1.8kNと一定である一方、転てつ機モニタの推定値は電圧により

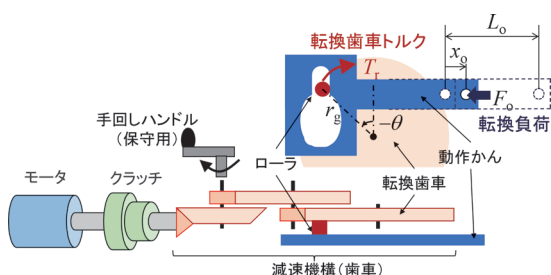


図1 電気転てつ機の機器構成とカム機構の構造

変化し、実測値に対して60%以上乖離するケースも認められた。転てつ機モニタの推定値が実測値と異なる値を示す傾向は、分岐器の転換負荷を変化させた場合にも同様であった。図2(b)に転換負荷の実測値に対する推定値の誤差率、およびその電源電圧との関係を示す。転換負荷の推定値は転換負荷が増加した場合でも実測値に対する誤差を有し、電源電圧に対しても変化する。

このように、転てつ機モニタによる転換負荷の推定値に関して、電圧や転換負荷等の個々の分岐器の使用条件によっては、実測値と大きく乖離するケースがあると考えられる。転てつ機モニタは上記のような特性を有していても、電圧などの条件が変わらない限り転換負荷等の定性的な増加傾向の把握に用いることができる。しかし、電圧や転換負荷等の運転条件によっては実測値と推定値の間に乖離が大きいため、転換負荷増加の原因推定や対策検討への適用には課題があると考えられる。そこで、転てつ機モニタが推定する転換負荷が実測値に対して乖離する条件やその要因について検討を行った。

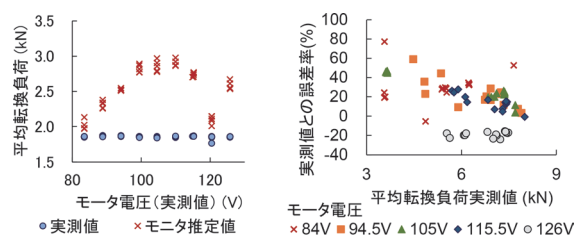
## 3. 転換負荷推定値の誤差とその要因

転換負荷推定値の誤差要因を特定するため、転てつ機モニタの誤差と実測値の関係について電気転てつ機内部の構成や構造を踏まえて分析を行った。

### 3.1 トルク推定における誤差

転てつ機モニタが出力するトルク（手回しハンドル軸におけるトルク）の推定値について、式(1)、式(2)、および減速歯車の歯車比を用いて転換負荷と動作かんストロークの実測値から算出したトルクと比較を行った。図3に実測値から算出したトルクに対する、転てつ機モニタの推定値の誤差率とモータ電圧の関係を示す。トルクの推定値の誤差率は+40%～-40%の範囲に分布しており、現行の電流、電圧に基づくトルクの推定値は実測値から算出したトルクとよく一致しているとは言いがたい。この電流、電圧によるトルクの推定誤差は、転換負荷の推定値に影響すると考えられる。

回転軸のトルクと転換負荷は式(2)より、転換歯車の



(a) 推定値と電圧

(b) 実測値に対する誤差率

図2 転てつ機モニタの転換負荷推定値と実測値

回転角度  $\theta$  と転換歯車のローラ半径  $r_g$  に対して比例関係にある。したがって、式 (2) を用いてトルクの推定値から転換負荷の推定値を計算した場合、両者の誤差率は同程度となることが見込まれる。しかし、転てつ機モニタが推定する転換負荷とトルクの誤差率は、図 3 よりそれぞれ最大 77.4%、40.9% と異なっており上記の関係が成立しない。以上より、転てつ機モニタの内部でトルクの推定値から転換負荷の推定値を計算する過程でも誤差が拡大していると考えられる。

### 3.2 転換機構のトルク・転換負荷伝達特性と誤差

動作かんを駆動するカム機構の構造から、転換歯車の回転角  $\theta$  は転換負荷  $F_0$  と転換歯車軸のトルク  $T_r$  の関数として式 (2) を変形した式 (3) により示される。また、この回転角  $\theta$  は式 (1) より、動作かんストローク  $x_0$  に対して式 (4) に示す関係が得られる。即ち、動作かんストローク  $x_0$  に対する回転角  $\theta$  は一意に決まるため、同時に転換負荷の伝達率  $T_r/F_0$  も一意に決まることがわかる。

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{T_r}{F_0 r_g} \right) \quad (3)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{2x_0 - L_0}{2r_g} \right) \quad (4)$$

現行の転てつ機モニタが出力した転換負荷とトルクの推定値を式 (3) に代入して得た歯車回転角  $\theta_m$  と動作かんストローク推定値  $x_{0m}$  の関係、および式 (4) の幾何学的関係による歯車回転角  $\theta$  と動作かんストローク  $x_0$  の関係を図 4 に示す。転てつ機モニタのトルクと転換負荷の推定値による歯車回転角  $\theta_m$  は、幾何学的関係に基づく  $\theta$  に対して動作かんストロークの中間点付近で特に乖離が大きく、トルクに対して転換負荷の推定値が過大になっていることがわかる。

以上より、転換歯車トルク  $T_r$  による転換負荷  $F_0$  の推定値は、幾何学的関係に基づく式 (2) から算出することが望まれる。この幾何学的関係を用いてトルクから転換負荷を得る方法を本稿では、負荷伝達法と呼ぶ。

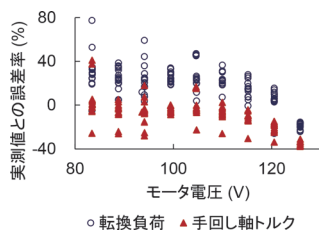


図 3 転てつ機モニタの推定値の実測値との誤差率

### 3.3 クラッチのすべりの影響と誤差

モータと転換機構の間に備えられているクラッチの影響について、図 5 に模擬負荷装置を稼働させモータ電圧 88.3V で転換したときの転換負荷の推定値と実測値、および動作かんストロークの実測値を示す。動作かんストロークの実測値は 5s 付近で速度が低下しており、この地点でクラッチのすべりが発生していると推察される。転てつ機モニタによる転換負荷の推定値は、すべりの発生とほぼ同時に実測値に対して差が拡大する傾向が認められた。

転てつ機モニタがモータ電流と電圧から推定するトルクは、通常の使用状態であるクラッチのすべりの影響がない転換負荷において適切な推定値が得られるよう設計される。そのため、転てつ機モニタがモータ電流と電圧から推定するトルクは、モータが出力するトルクに相当するものであり、ここではクラッチのすべりの影響は考慮されない。また、クラッチにすべりが生じたときの転換機構側に出力されるトルクは、モータ側のトルクに比べて小さい。そのトルクの大きさはクラッチの電磁的特性や機械的な特性に影響を受けるためモータの電流や電圧から推定することは困難である。クラッチのすべりの影響を考慮しない転てつ機モニタにおいて、クラッチのすべりが発生した場合の転換負荷推定値は実測値とは乖離し、かつ過大側の推定値となる。

### 3.4 転換負荷の推定値の誤差要因

以上より、転てつ機モニタが出力する転換負荷の推定値の実測値に対する誤差は、図 6 に示す①～③の要因が影響すると考えることができる。

- ① 電流・電圧によるトルクの推定過程における誤差

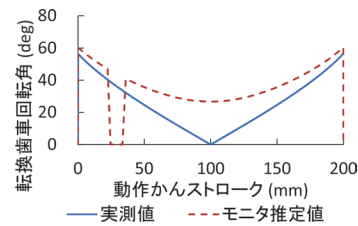


図 4 転換歯車回転角と転てつ機モニタの推定値

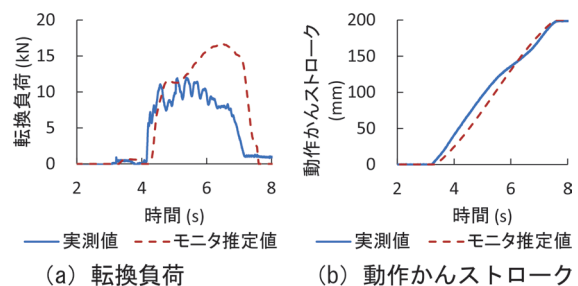


図 5 クラッチすべり時の推定値と実測値



- ② トルクによる転換負荷の推定過程における誤差
- ③ クラッチすべりの影響による誤差

このうち、①と②については試験を行った転てつ機モニタにおいて実測値と乖離する試験結果が認められた。②については転換機構の幾何学的関係を用いた負荷伝達法について提案したが、①のトルクの推定についても電流、電圧とトルクの関係について改めて検討を行うこととした。また、③のクラッチすべりについては、モータの電流や電圧から推定することは困難であるため、計測項目を追加してクラッチすべり時のトルクを推定する手法について検討した。

#### 4. 電流、電圧によるトルク、転換負荷の推定法

##### 4.1 電流、電圧に対するトルク等の特性と電流法

電気転てつ機のモータおよびクラッチの特性を測定するための試験装置として、これらに回転のトルクとして負荷を作用させる回転形負荷試験装置を製作した。

この装置を用いて、負荷トルクが小さくクラッチのすべりが発生しない運転状態における、TS-M形電気転てつ機用のモータ（交流誘導電動機）の電流、電圧とトルク、回転速度の関係について試験を行った。なお、TS-M形電気転てつ機のモータとクラッチは一体構造のため、クラッチの入出力軸の回転速度を共に計測してすべりの発生を特定することができない。そのため、モータ単体の特性を得る試験については、クラッチのすべりトルク（定格電圧において  $6.6\text{N}\cdot\text{m}$ ）<sup>4)</sup> よりも十分に小さい、 $2\text{N}\cdot\text{m}$  以下の負荷トルクが作用したときの試験結果を用いて評価することとした。

図7 (a) にモータ電流に対する出力軸トルクを示す。また、図7 (b) にモータ電流に対する出力軸の回転速度の関係を示す。負荷トルク  $2\text{N}\cdot\text{m}$  以下のとき、モータ電流に対する出力軸トルクは概ね線形関係にある。また、回転速度は電流に対して概ね線形関係にあることが確認された。それぞれの線形近似式の傾きと切片は電圧

によって異なるものの、電流  $I_m$  とトルク  $T_m$  の場合は線形近似式 (5) により、回転速度  $\omega_m$  とトルク  $T_m$  の場合は線形近似式 (6) により得ることができる。例えば線形近似式 (5) では、傾き  $a_{it}$  と切片  $\beta_{it}$  に電圧に応じた値を代入することで両者の関係を得ることができる。なお、線形近似式 (5) を用いて電流からトルクを推定する手法を、電流法と呼ぶ。

電流法と従来手法によるトルクについて、転換負荷の実測値から算出した値に対する推定値の誤差率を図8に示す。クラッチのすべりの影響が少ない、平均転換負荷  $5\text{kN}$  以下の試験結果における誤差率の分布は従来手法が  $+37\% \sim -25\%$  に対して、電流法は  $-6\% \sim -25\%$  であり、動作毎のばらつきが従来手法よりも小さいことを確認した。

$$T_m = a_{it} I_m + \beta_{it} \quad (5)$$

$$T_m = a_{\omega} \omega_m + \beta_{\omega} \quad (6)$$

##### 4.2 電流法、負荷伝達法によるトルク、転換負荷の推定

以上の電流法、および3.2節に述べた負荷伝達法を組み合わせる転換負荷を推定した結果を図9に示す。ま

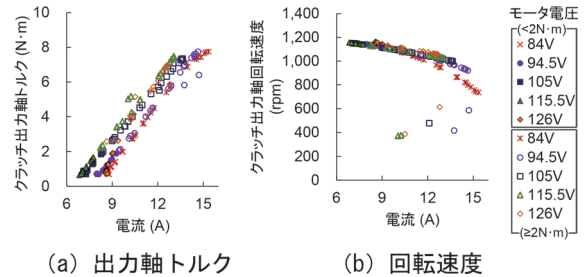


図7 モータ電流に対するトルク、回転速度

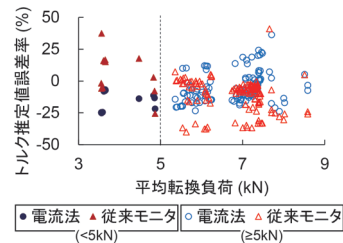


図8 トルク推定値の誤差率（電流法と従来手法）

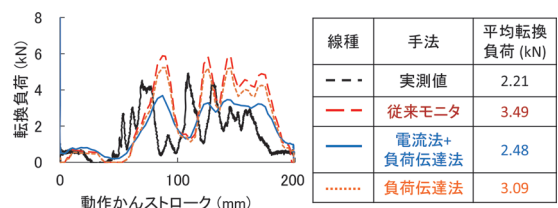


図9 電流法、負荷伝達法による転換負荷推定値

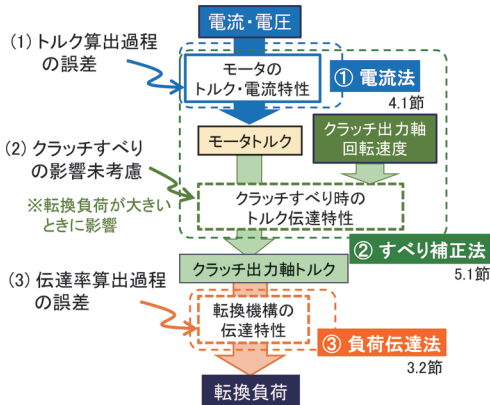


図6 転換負荷の推定誤差の要因と提案手法



た、転てつ機モニタのトルク推定値を用いて負荷伝達法により推定した転換負荷、従来の転てつ機モニタによる転換負荷推定値、および実測値についても示す。

電流法と負荷伝達法を組み合わせた転換負荷推定値は、従来の転てつ機モニタの推定値、および負荷伝達法を単体で適用した推定値と比べると、転換中を平均した転換負荷の大きさが実測値に最も近い。また、負荷伝達法を単体で適用したときの推定値についても、電流法に次ぐ結果が得られた。

## 5. クラッチすべりを考慮したトルク推定法

### 5.1 クラッチすべり時の特性

クラッチの入出力軸の回転速度差（すべり）が発生したときのモータ電流、電圧、および出力軸のトルク、回転速度の関係について回転形負荷試験装置を用いて試験を行った。4.1 節にて述べたモータ電流  $I_m$  に対する線形関係を踏まえて推定したモータの回転速度  $\omega_m$  と、試験装置で計測したクラッチ出力軸の回転速度  $\omega_c$  との比  $\omega_c/\omega_m$  と、クラッチ出力軸に作用させた負荷トルク  $T_c$  の関係を図 10 に示す。モータ電圧 84V の場合、クラッチ出力軸側に作用した負荷トルク  $T_c$  が 5N・m 以上のときに回転速度比  $\omega_c/\omega_m$  が 1.0 を下回り、クラッチにおいてすべりが発生していることがわかる。また、線形近似式 (5) によるモータトルクの推定値  $T_m$  とクラッチ出力軸に作用する負荷トルク  $T_c$  を比較した結果、クラッチのすべりが小さい状態（回転速度比 0.9 以上）では両者が概ね一致する。一方、すべりが著しくなった場合には両者は一致しない。したがって、すべりが著しいときのクラッチの出力トルクを電流法によりモータトルクから推定することは困難であるといえる。

そこで、計測が可能なモータ電流、電圧、およびクラッチ出力軸の回転速度からクラッチの出力軸トルク  $T_c$  を推定する手法について検討した。その結果、図 11 に示す、モータトルク最大値  $T_{mc}$  とクラッチ出力軸トルク  $T_c$  との比  $T_c/T_{mc}$  に対する回転速度比  $\omega_c/\omega_m$  を得た。ここで、回転速度比とトルク比は式 (7) の指数関数により近似される。また、 $T_{mc}$  は式 (6) にクラッチ出力軸回転速度  $\omega_c$  を代入し導出されることから、計測が可能なモ-

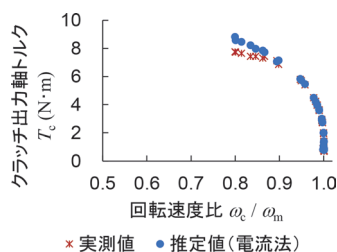


図 10 クラッチの入出力軸回転速度比と負荷トルク

ータ電流、電圧、およびクラッチ出力軸回転速度から TS-M 形電気転てつ機のすべり時のクラッチ出力軸のトルク  $T_c$  を得ることができる。上記の方法によりクラッチ出力軸トルクを推定する手法を、すべり補正法と呼ぶ。

$$T_c = a_{wT} T_c \exp\left(\beta_{wT} \frac{\omega_c}{\omega_m}\right) \quad (7)$$

なお、式 (7) の係数  $a_{wT}$  や  $\beta_{wT}$  はクラッチの構造や特性により異なる値となる。また、接触面圧や摩擦係数が摩耗や調整状態によって変化するクラッチは、構造上、出力軸のトルクや回転速度がこれらの影響を受けるため、この推定手法を適用することは困難である。

### 5.2 すべり補正法、負荷伝達法による転換負荷の推定

図 12 にクラッチのすべりを伴いながら転換が完了した事例、およびクラッチのすべりが発生し転換不能に至った事例のそれぞれについて、すべり補正法と負荷伝達法を用いて得た転換負荷の推定値と実測値、および電流法と従来の転てつ機モニタによる推定値を示す。本結果は、計測を行った動作かんの移動量からクラッチ出力軸の回転速度を推定してすべり補正法を適用した結果であるが、すべり補正法を用いた推定結果は、図 12 (a) の転換が完了した事例、図 12 (b) の転換不能となった事例において、他の推定法に対して最も実測値に近い推定結果となっている。

以上より、本稿で提案したトルクと転換負荷の推定手法を用いた転換負荷の推定値は、いずれも従来の転てつ機モニタでの転換負荷の推定値よりも実測値に近い転換

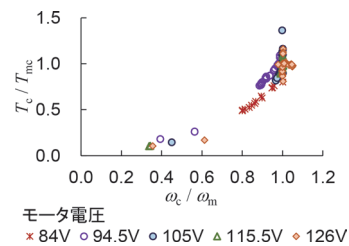
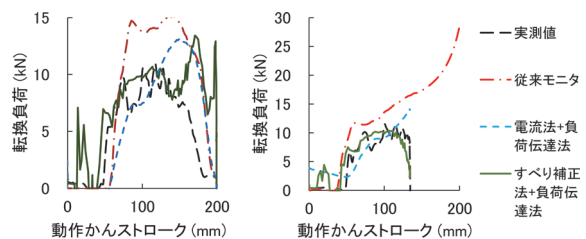


図 11 クラッチすべり時のトルク比・回転速度比特性



(a) 転換完了時 (b) 転換不能時

図 12 すべり補正法による転換負荷の推定

負荷を推定できることを確認した。また、各手法は、すべり補正法と負荷伝達法を組み合わせた場合、電流法と負荷伝達法を組み合わせた場合、および負荷伝達法を単独で適用した組み合わせの場合の順で実測値に近い転換負荷の推定値が得られることを確認した。

## 6. 提案手法の導入に対する評価

転てつ機モニタの導入、特に既に転てつ機モニタが導入されている箇所において提案手法を適用する場合の課題を抽出するため、計測項目の追加、端末等に対する改修項目、および導入効果について評価を行った。表1に評価結果を示す。

負荷伝達法は、現在の転てつ機モニタ内部でのトルクと動作かんストロークの推定値を用いた転換負荷の推定方法のみが変更となるため、駅装置の改修により転てつ機モニタの内部での演算方法を変更することで導入できることが見込まれる。また、暫定的な導入方法として、現行の転てつ機モニタの機能として備えられている、転換動作毎のデータの外部出力機能を用いて書き出したCSV形式のデータを入力して負荷伝達法による推定値を出力する外部ソフトウェアを使用する方法が考えられる。外部ソフトウェアは、利用の都度計算を必要とするが、転換不能の兆候が認められる場合や転換不能後の原因調査の際、より実測値に近い推定値に基づき判断することが可能となる。

電流法についても、転てつ機モニタ内部での電流と電圧に基づく転換負荷の推定方法が主な変更点である。負荷伝達法とあわせた駅装置の改修で転てつ機モニタの内部での演算方法を変更することで改修の効果が得られることが見込まれる。

すべり補正法については、現在計測されていない歯車回転速度の計測が追加となるため、センサのほか、電気転てつ機内端末、転てつ機モニタの駅装置等の全面的な改修が必要となる。しかし、負荷伝達法と組み合わせることで、転てつ機モニタを用いて検出すべき転換不能直前の転換負荷の状態を従来手法よりも正確に得られることが見込まれる。また、正確な動作かんストロークも得られることから、その導入効果は提案する手法の中で最

も高い。同様の効果は回転軸のトルクの計測や、クラッチの入出力軸の回転速度を共に計測する構成でも得られるが、前者は測定の上、S/N(信号/ノイズ)を確保するために回転軸の強度を落とす必要があり、耐久性や実装の観点で困難である。後者は電気転てつ機のモータやクラッチ部の構造変更を伴うことから、コストや実装に関する課題が多い。したがって、クラッチすべりに対する補正については、提案するすべり補正法と負荷伝達法の組み合わせがコストや実現性の観点から最も優れていると考えられる。

## 7. まとめ

転てつ機モニタに適用する転換負荷の推定手法について検討を行った結果、以下の結果が得られた。

(1) 転てつ機モニタにおける転換負荷推定誤差は、モータトルクの推定、トルクや動作かんストロークによる転換負荷の推定、トルクに対するクラッチのすべりが要因である。

(2) モータ電流、電圧からトルク、転換負荷を推定可能な手法(電流法と負荷伝達法)、およびクラッチ出力軸の回転速度を上記に加えて計測してクラッチすべり時のトルクを推定可能な手法(すべり補正法)を提案した。

(3) 提案手法の導入に伴う課題と導入効果を評価した。提案手法はいずれも従来手法に対して実測値に近い推定値が得られることを確認した。

本稿で示した転換負荷推定手法が、転てつ装置の維持管理に活用できると考える。

## 謝辞

本研究における現地試験の実施にあたり、西日本旅客鉄道株式会社の関係者には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

## 文献

- 1) 西武雄：在来線用電気転てつ機モニタの開発，京三サーキュラー，Vol.52，No.5，2001
- 2) 潮見俊輔，五十嵐義信，安藤公志，濱田良和：発条転てつ機の転換負荷の状態監視方法の提案，鉄道総研報告，Vol.25，No.5，pp.23-28，2011
- 3) 潮見俊輔：電気転てつ機の状態推定手法，鉄道と電気技術，Vol.33，No.3，pp.3-8，2022
- 4) 伊東周二，安原碩人：高信頼性電気転てつ機(第2報)-TS形電気転てつ機用クラッチの改良-，鉄道技術研究所速報，No.80-1005，1980

表1 提案手法の導入に伴う改修項目と効果の評価

手法	追加測定項目	精度	ハードウェア更新	コスト	容易性	効果	評価
①電流法 +③負荷伝達法	なし	中	駅装置	中	やや易	中	○
現行モニタ+ ③負荷伝達法	なし	低	不要	低	易	やや低	○
直接測定	回転軸トルク	高	現場端末、 駅装置	高	困難	高	×
②すべり補正法 +③負荷伝達法	クラッチ 出力軸速度	中	現場端末、 駅装置	高	中	高	○

# 使用環境センシングによる信号用電子機器の寿命予測手法

藤田 浩由\* 椿 健太郎\* 高崎 建\* 往古 直之\*\*

Lifetime Estimation of Signalling Electronic Equipment Based on Sensing Information of Usage Environment

Hiroyuki FUJITA Kentaro TSUBAKI Ken TAKASAKI Naoyuki OKO

In recent years, technological development to shift from conventional time-based maintenance (TBM) to condition-based maintenance (CBM) has been progressing. In response to this trend, various efforts are being made for signaling equipment along railway tracks. However, there are issues to be solved when applying CBM to signaling electronic equipment of which indications of deterioration is difficult to be detected. Focusing on the environment in which signaling electronic equipment is installed, this paper describes the results of examining new methods for lifetime estimation of the equipment on the basis of sensing information of the usage environment.

キーワード：信号用電子機器，鉄道沿線環境，寿命予測，CBM，加速試験，センシング情報

## 1. はじめに

鉄道信号設備は、列車の安全・安定運行を確保するための設備として、沿線に広く導入されている。また、信号設備の高機能化および小型化に伴い、リレー制御による継電機器から電子機器への置換えが進んで久しい。一方で、電子機器は劣化傾向の把握が困難であることが多く、導入された電子機器の更新時期の適切な設定が課題となっている。これまでに著者らは、機器室等の屋内ならびに鉄道沿線環境に設置されている信号用電子機器（以下、それぞれ屋内電子機器、沿線電子機器とする）を対象とし、使用環境に応じた摩耗故障期の故障率を算出する評価手法の構築を行った<sup>1) 2)</sup>。その結果、あらかじめ設定した固定の環境条件下において、対象機器の最短寿命部品および箇所を特定し、機器寿命を予測することを可能とした。ただし、沿線電子機器においては、対象機器の収容状況の差異、ならびに将来にわたる環境変動を考慮し、使用環境条件にマージンを設ける必要がある。それゆえ、過大なマージンが設定され、寿命が過小評価される可能性がある。

また、鉄道設備のメンテナンスは、従来の時間基準保全（TBM：Time Based Maintenance）から状態基準保全（CBM：Condition Based Maintenance）への転換が進んでおり、鉄道沿線に点在する信号設備についても様々な取り組みが行われている<sup>3) 4)</sup>。

そこで、著者らは、周囲の状況により環境が変化しやすい沿線電子機器について、寿命予測精度の向上および

CBMへの適用を目指し、使用環境の変化を捉えることで機器の寿命予測を行う新たな手法を構築した。本稿では、信号用電子機器の保全手法についての課題を整理するとともに、新たに構築した使用環境センシングによる寿命予測手法の考え方とケーススタディによる検証結果について述べる。

## 2. 信号用電子機器の保全手法

### 2.1 保全の現状とCBMへの期待

鉄道設備のメンテナンスは、従前より一定周期で検査や保全作業を実施するTBMが主流となっており、保全計画が容易に構築できる利点がある一方、短期的には突発的な故障に対応できないこと、長期的にはより多くのマージンを確保した状態で設備更新が発生することなどの課題を合わせ持っている。これらTBMの持つ課題を解消するため、近年ではCBMへの転換を図る動きが加速している。CBMへの転換により、故障の予兆把握、人手による定期検査の削減、ならびに効率的な設備更新の実現が期待されている。現在、CBM化の取り組みが行われている事例としては、JR東日本が提唱するスマートメンテナンス構想に基づく線路設備や車両設備のモニタリングなどが挙げられる<sup>5)</sup>。また、東京メトロ<sup>3)</sup>やJR九州<sup>4)</sup>などでも同様の取り組みが進んでおり、鉄道設備のメンテナンスにおける革新技術として、CBMに対する期待が大きいことがわかる。

### 2.2 信号用電子機器へのCBMの適用

CBM実現のためには、対象設備における故障の予兆把握が前提となる。線路設備や一部の車両設備のモニタリングにおいては、故障につながる劣化指標を直接セン

\* 信号技術研究部 信号システム研究室

\*\* 信号技術研究部 信号システム研究室（現 日本信号株式会社）



シングでき、かつ連続的に変化を捉えることができることから、CBM化に適した事例と言える。一方、信号用電子機器のように劣化そのもの、あるいはその兆候を捉えることが困難な対象も数多く存在しており、これらの設備に対するCBMの適用が課題となっている。

そこで、信号用電子機器については、これまでに構築した寿命評価手法を基に、対象機器の設置された環境の変化を捉えることで機器の寿命予測を行う新たな手法の構築を目指すこととした。本手法は、あらかじめ設定した使用環境条件にて最短寿命箇所の予測寿命を求め、運用中の使用環境を監視することで当初の予測寿命値の補正を行うものである。これにより、間接的ではあるが、実況での劣化状態を推定できるため、直接的に劣化状態の監視が困難な対象においても、CBMの実現手段として適用可能であると考えられる。

このような使用環境センシングによる寿命予測手法の実現にあたっては、評価対象機器の使用環境を把握するとともに、環境変化の将来予測から寿命予測を行う仕組みが重要となる。前者については使用環境センシング手法、後者については逐次寿命予測手法として、4章および5章に構築した各手法の考え方を述べる。なお、その前段として、あらかじめ設定した固定の環境条件下における寿命評価手法について3章で述べる。

### 3. 固定環境条件下での寿命評価手法

本章では、これまでに構築した固定の環境条件下において、寿命評価を行う手法<sup>1) 2)</sup>の概要について述べる。

#### 3.1 寿命評価のアプローチ

信号用電子機器は、複数の基板から構成されることが多く、各基板上には電子部品がはんだにより接合され、回路が構成されている。したがって、電子機器全体の動作を阻害する故障は、電子部品故障、基板故障、はんだ接合部故障の3点に分類される。過去に事業者ならびに著者により、信号用電子機器の撤去品調査を行った結果、アルミ電解コンデンサなどの有寿命部品に明確な特性変化(劣化)を観測するとともに、沿線電子機器において温度変化に起因するはんだクラックを確認した。また、基板上の配線には錆や亀裂、断線などの特異な点は確認されなかった。ゆえに、電子部品およびはんだ接合部を寿命評価の対象部位として扱うこととした。

沿線電子機器において、寿命に影響する環境ストレスを抽出した結果を表1に示す。さらに、表1に示したストレス要因について、寿命に支配的要因となるものが現地調査に基づき選定されている。選定された結果は、定常温度、温度変化、水分・湿度などの温湿度となる。

そこで、図1に示すように沿線電子機器の寿命評価に

表1 沿線電子機器の環境ストレス要因と寿命影響選定結果

No.	環境ストレス要因		寿命影響選定結果	
	要因1	要因2		
1	熱的要因	定常温度	○	影響あり
2		温度変化	○	影響あり
3	電氣的要因	電磁気・サージ	×	偶発要因
4	周囲環境要因	雰囲気	×	規格値未滿
5		水分(湿度)	○	影響あり
6	機械的要因	振動、衝撃	×	規格値未滿
7		曲げ、疲労	×	該当なし

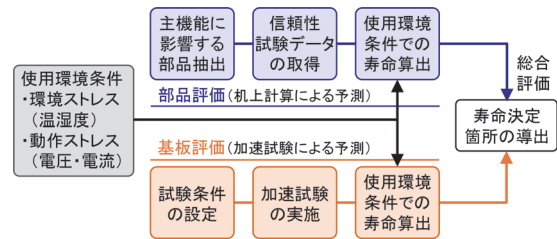


図1 沿線電子機器の寿命評価手法の概要

ついては、実装電子部品の寿命予測（部品評価）と接合部を含む基板の寿命予測（基板評価）の2つのアプローチで実施することとした。以下、3.2節に電子部品の寿命予測手法について述べる。

#### 3.2 電子部品の寿命予測手法（部品評価）

本節では、図1に示す沿線電子機器の寿命評価手法のうち、電子部品の寿命予測手法として、主機能に影響する部品抽出、信頼性試験データの取得、使用環境条件での寿命算出の3段階について概要を示す。

##### (1) 主機能に影響する部品抽出

対象機器において、構成する電子部品が寿命となった場合に、当該機器の機能に与える影響度解析をFMEA (Failure Mode and Effect Analysis) の手法を用い、影響なし (Lv. 0)、動作不安定 (Lv. 1)、部分機能停止 (Lv. 2)、ユニット停止 (Lv. 3)、装置機能停止 (Lv. 4) までの5段階のレベルを定義することで実施する。基本的には、レベル2以上の影響度であれば、自己診断機能により故障検出が可能であるとともに、機能に影響があるため、部品寿命を機器寿命と捉えることが可能と考えられる。特にアルミ電解コンデンサや光系素子（フォトカプラ）に代表される有寿命と考えられる部品、ならびに発熱の大きい部品を選択する。

##### (2) 信頼性試験データの取得

抽出した電子部品について、当該部品製作メーカーより信頼性試験データを取得し、加速条件（温湿度、電圧・電流）、試験時間、試料数、故障判定基準などの試験条件を把握する。ここで、後述する累積故障確率の経年変



化を導出するためには、部品寿命まで試験を実施した信頼性決定試験データの取得が望ましいが、一般には公規格に基づく信頼性適合試験データのみが多い<sup>6)</sup>。

いずれの場合であってもメーカーによる既実施の信頼性試験データを活用することで、新たな加速試験の実施を不要とすることができる。

### (3) 使用環境条件での寿命予測

信頼性試験データを実際使用環境に合わせるため、加速モデルを使用して、使用環境下での故障時間  $L_1$  を算出する（加速係数  $AF$  を求め、検証時間  $L_0$  との積で算出）。このとき、故障メカニズムが複数想定される場合には、それぞれに対応した加速モデルにより故障時間を並列で算出し、最短時間となるものを採用する。なお、加速モデルは、機器稼働時のストレス要因に関するものを選定するものとし、部品製作メーカー毎にモデルが異なる場合は、対象部品の製作メーカーに合わせて選定することとする。アルミ電解コンデンサ、フォトカプラにおける代表的な加速モデルとして、それぞれ電解液蒸散に伴う静電容量低下を表す  $10^\circ\text{C}$  2 倍則（アレニウス則の近似）を式 (1)、内蔵する LED の輝度低下を表す Black モデルを式 (2) に示す。

$$L_1 = L_0 \cdot 2^{\left(\frac{T_0 - T_1}{10}\right)} \quad (1)$$

$$L_1 = L_0 \cdot \left(\frac{J_0}{J_1}\right)^n \cdot \exp\left[\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (2)$$

ここで、 $E_a$  は活性化エネルギー、 $k$  はボルツマン定数、 $J$  は電流密度、 $T$  は絶対温度、 $n$  は係数を示し、添え字の 1 は使用環境条件、0 は試験環境条件を示す。固定環境条件にて予測するため、式 (1)、式 (2) における電流密度および絶対温度について、あらかじめ設定した値を代入することとしている。

また、電子部品の信頼性試験データより、検証範囲を特定する。信頼性決定試験を実施している部品の場合は、定義されている故障時間を使用する。一方、信頼性適合試験のみを実施している部品に関しては、信頼水準 ( $C_L$ ) における試料数 ( $n$ ) で規定される累積故障確率 ( $F(t)$ ) の値を式 (3) より求める<sup>6)</sup>。

$$F(t) = 1 - (1 - C_L)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

ここで、信頼性適合試験結果より累積故障確率の経年変化を推定する手法を図 2 に示す。例えば、試料数 22 個、信頼水準 90%、故障数 0 個の試験結果で検証可能な領域は、式 (3) より図 3 中の A で示される領域となる ( $F(t) = 10\%$ )。本領域を加速モデルにより使用環境下

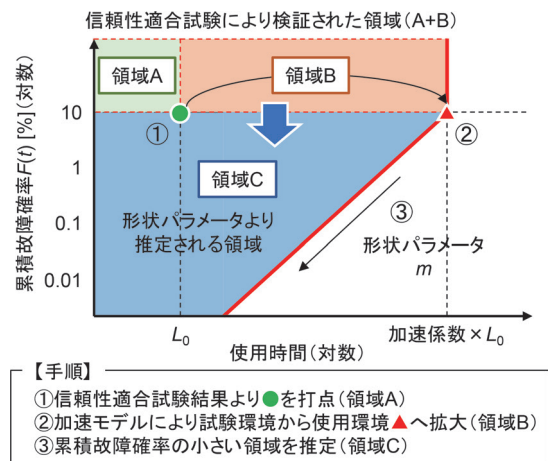


図 2 信頼性適合試験に基づく累積故障確率の経年変化推定手順

での故障時間に拡大すると、B の領域となる。さらに、図 2 に示したようなワイブルプロット上での故障分布の形状パラメータ ( $m$ ) を経験的に決定し、累積故障確率の小さい領域を推定すると、検証領域は C まで拡大できることとなる。これは、B において 1 個目の故障が発生したと仮定し、電子部品毎に最小と考えられる形状パラメータの値を定める（経験値の中での安全側）ことで求められる最悪想定のみ拡大検証領域を推定したものと言える。

このように、図 2 の関係が得られると、任意の累積故障確率に至るまでの時間を推定することができるため、対象部品における耐用寿命の決定を可能としている。

## 4. 使用環境センシング手法

寿命予測を実施するうえで、評価対象機器の使用環境を把握するためには、センシング項目およびセンシング箇所を的確に選定することが必要となる。本章では、信号用電子機器の使用環境におけるセンシング項目および箇所を選定過程とともに、評価対象箇所に対するセンシング精度検証試験の結果について述べる。

### 4.1 センシング項目の選定

3.1 節より、寿命に支配的要因となる環境ストレスは、定常温度、温度変化、水分・湿度などの温湿度となることから、センシング項目として、温度および湿度を選定することとした。なお、信号用電子機器の構成要素のうち、アルミ電解コンデンサや光素子に代表される有寿命部品、ならびに接合部の主要な故障メカニズムは、温度を環境ストレス要因としていることから、センシング項目として、温度を必須項目とすることとした。

## 4.2 センシング箇所の選定

4.1 節にて選定したセンシング項目については、使用環境下で推定される寿命決定箇所を直接センシングすることが理想である。ただし、寿命決定箇所毎にセンサが必要になるとともに、既存機器に対する組み込みに課題がある。それゆえ、比較的センシングの容易な収容箱内空間や機器筐体表面を代表として、機器内部の対象箇所の温湿度を推定する手法が有効と考えられる。そこで、必須のセンシング項目として選定した温度について、センシング箇所に応じた推定精度の検証を行った。

### (1) 検証方法

直射日光を防ぐ遮蔽板付き収容箱に設置した踏切用列車検知装置を供試体として、機器内部の対象箇所の温度を真値として取り扱う。ここで、対象箇所は、あらかじめ設定した使用環境条件にて推定した寿命決定箇所とし、アルミ電解コンデンサ2箇所、およびフォトカプラ1箇所の計3箇所とした。この寿命決定箇所の温度について、収容箱内空間温度、および対象機器筐体表面温度から推定する試験を実施した<sup>7)</sup>。また、対象機器筐体表面温度について、設置箇所の異なる収容箱間でのばらつきを検証した。いずれも温度センサとして、熱電対（T型、HIOKI製）を用い、10分間隔で記録するとともに、天候の網羅性を考慮して検証期間を2週間以上確保することとした。検証にあたっては、記録データから1日毎の平均温度を算出し、比較することとした。1日毎の平均温度とした理由については、5.1節に後述する。

なお、収容箱および機器筐体表面を基準とした温度推定については、鉄道総研国立研究所内にて実施し、代表収容箱を基準とした温度推定については、JR四国土讃線（土佐山田～土佐大津駅付近、10km程度の範囲）にて実施した。それぞれの検証イメージを図3に示す。

### (2) 収容箱・機器筐体表面を基準とした温度推定結果

実測した寿命決定箇所の温度について、1日単位の平均温度における収容箱内空間温度、および対象機器筐体表面温度からの差分の分布を図4に示すとともに、収容箱近傍に設置した百葉箱内空間温度からの差分の分布も併せて示す。図4より、寿命決定箇所の温度との差分は、機器筐体表面温度を基準とした場合に最も分布範囲が小さくなり、次いで箱内空間温度、百葉箱内空間温度の順で分布が拡大する様子が見られる。対象機器が通電により発熱状態となっていることから、百葉箱内空間温度と比較すると、温度差分値が大きく乖離していることがわかる。ここで、図4を用いると、それぞれの温度センサ値を基準とした場合、寿命決定箇所の温度は「温度センサ値+最頻出温度差分±分布範囲」で推定できる。これは、分布範囲が小さいほど、精度よく対象温度を推定

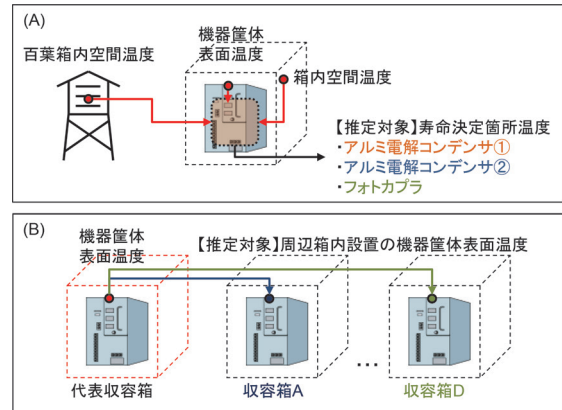


図3 温度推定の検証イメージ ((A) 収容箱および機器筐体表面基準, (B) 代表収容箱基準)

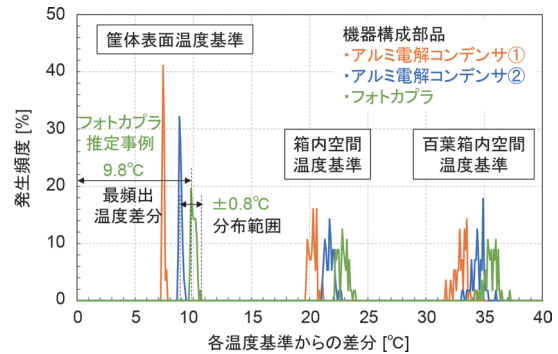


図4 各基準からの寿命決定箇所温度の差分

表2 各基準からの寿命決定箇所の温度推定範囲

基準	寿命決定部品	最頻出温度差分[°C]	分布範囲[°C] (累積頻度 99%)
筐体表面	アルミ電解 C①	7.4	±0.3
	アルミ電解 C②	8.8	±0.5
	フォトカプラ	9.8	±0.8
箱内空間	アルミ電解 C①	20.3	±0.8
	アルミ電解 C②	21.7	±1.0
	フォトカプラ	22.8	±1.1
百葉箱空間	アルミ電解 C①	33.5	±1.8
	アルミ電解 C②	34.9	±1.8
	フォトカプラ	35.3	±1.9

できることを指す。したがって、分布範囲の最も小さい機器筐体表面を基準とすると、例えばフォトカプラの温度は、機器筐体表面の温度センサ値+最頻出温度差分  $9.8^{\circ}\text{C} \pm$  分布範囲  $0.8^{\circ}\text{C}$  で推定（累積頻度 99% を包含）できると言える。それぞれの温度センサ値を基準とした場合の寿命決定箇所の温度推定範囲を表2に示す。

### (3) 代表収容箱を基準とした温度推定結果

実測した周辺収容箱内に設置の対象機器筐体表面温度について、1日単位の平均温度における代表収容箱内の同筐体表面温度からの差分の分布を図5に示す。図5より、10kmまでの範囲に存在する収容箱内の対象機器筐体表面温度は、代表収容箱内の温度センサを基準とす

ると、温度差分値の乖離を含め、ばらつきを持った分布となっている様子がわかる。これは、収容箱毎に設置高さ、設置方角、周辺環境などの設置条件が異なるためと考えられる。ここで、前述の(2)で示した温度推定方法と同様に、「代表収容箱内の温度センサ値+最頻出温度差分±分布範囲」で推定すると、表3に示す温度推定範囲となる。分布範囲は、距離に比例して拡大する傾向があるものの、10kmまでの範囲であれば、±2℃程度（累積頻度99%を包含）で推定できると言える。

#### 4.3 センシング箇所に対する温度推定精度

4.2節では、寿命決定箇所の温度を機器毎あるいは代表収容箱毎に設置した温度センサにより推定する場合の精度について示した。なお、著者らはこれまでの研究において、気象庁の観測所公開データを用い、収容箱内の温度を推定する方法について検討した。その結果、対象とする収容箱と観測所間距離が10km未満の場合、1日単位の平均温度については、±5℃以内（累積頻度99%を包含）で温度推定を行えることを示している<sup>8)</sup>。

本節では、温度推定精度が寿命予測値に与える影響について、上記の観測所公開データを用いた場合を含め考察する。寿命予測にあたっては、温度が環境ストレスの主要因となるアルミ電解コンデンサを例に試算した。ここで、温度センサとして用いた熱電対（T型）の測定精度は、±1℃であるため、センサ単体誤差として考慮することとした。本考察の比較対象は、センサを用いる方式として、①寿命決定箇所毎（部品・箇所毎）、②対象機器毎、③代表収容箱毎にセンサを取付ける3種類の温度推定方式に加え、センサレスの方式として、④観測所公開データを用いる方式の計4種類とした。センサを用いる方式の温度推定精度は、センサ単体誤差、機器筐体表面温度からの推定誤差、代表収容箱からの推定誤差をそれぞれ含むことになる。つまり、①部品・箇所毎にセンサを取付ける場合、温度推定精度はセンサ単体誤差のみとなるため±1℃となる。同様に、②対象機器毎の場合は、①に機器筐体表面温度からの推定誤差が加わるため±2℃、③代表収容箱毎の場合は、②に代表収容箱からの推定誤差が加わるため±4℃となる。センサレス方式の④は、±5℃として扱うこととした。各方式の温度推定精度と寿命予測精度の関係を試算条件と合わせて表4に示す。表4より、寿命予測精度検証用の比較用寿命（真値：13.6年）に対し、温度推定精度の誤差に応じた寿命予測値が得られた。自明のことながら、温度推定精度の誤差が小さいほど寿命予測誤差も小さくなるため、要求する寿命予測精度に合わせ、センサ構成を選択できると言える。

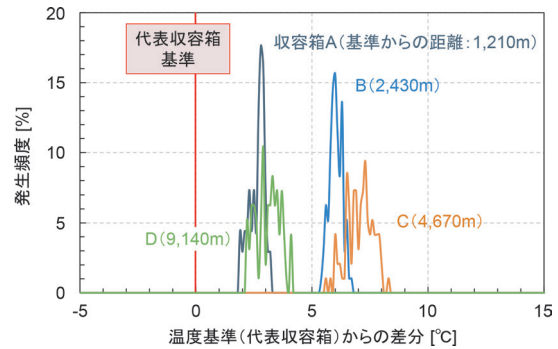


図5 代表収容箱からの周辺収容箱温度の差分

表3 代表収容箱からの周辺収容箱の温度推定範囲

収容箱名称	代表収容箱からの距離[m]	最頻出温度差分[°C]	分布範囲[°C] (累積頻度99%)
A	1,210	2.8	±0.9
B	2,430	6.0	±0.7
C	4,670	7.3	±1.7
D	9,140	2.9	±1.2

表4 温度推定精度と寿命予測精度の関係

方式	センサ設置箇所	温度推定精度	寿命予測精度*
①	対象部品・箇所	< ±1℃	12.7~14.6年 (-1.0~1.0年)
②	機器筐体表面 (各収容箱)	< ±2℃	11.8~15.6年 (-1.9~2.0年)
③	機器筐体表面 (代表収容箱)	< ±4℃	10.5~17.8年 (-3.2~4.2年)
④	気象庁観測所 公開データ使用	< ±5℃	9.6~19.3年 (-4.0~5.7年)

\* ( )内は比較用寿命13.6年からの差分を示す  
 試算条件：アルミ電解コンデンサ（105℃，2,000時間品）  
 試料数22個（故障0個），累積故障確率1%，  
 部品発熱+20℃，観測所公開データ（府中）

## 5. 逐次寿命予測手法

3章で示した固定環境条件下での寿命評価手法は、環境変動の発生しにくい屋内電子機器では有用である。また、沿線電子機器においても、ある程度マージンを見込んだ環境条件を設定することで、固定条件下での寿命予測も十分有用であると考えられる。ただし、環境変動に対して必要以上のマージンを設定した場合、寿命予測結果が大幅に短縮される可能性があるほか、収容箱内環境の変化に追従した予測が難しい。そこで、選定した加速モデルの環境変数をセンシングし、その情報を寿命予測計算の入力値として使用する手法の構築が必要となる。本章では、3章で述べた固定環境条件下での寿命評価手法を拡張し、センシング情報を反映可能とした逐次寿命予測手法の考え方と概要について述べる。

### 5.1 逐次寿命予測手法の考え方

信頼性試験データを実際の使用環境に合わせるため、加速モデルを使用する。このとき、使用環境の時間変化を表現するため、加速モデルを時間に対して離散化し、



積算することで寿命予測を行う。 $L_1$ を実使用環境下での寿命時間、 $L_0$ を試験時間、 $p$ を離散時間間隔、 $n$ を離散化された時刻の総数、 $AF_i$ を離散化された各時刻における加速係数とするときの離散化加速モデルを式(4)に示す。

$$L_1 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{p} \cdot L_0 \cdot AF_i \quad (4)$$

また、式(4)で表される離散化加速モデルを式(1)、式(2)で示したアルミ電解コンデンサ、フォトカプラにおける代表的な加速モデルに適用すると、式(5)、式(6)となる。ここで、 $T_{i_i}$ を離散化された各時刻における使用温度、 $J_{i_i}$ を離散化された各時刻における使用電流密度とする。

$$L_1 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{p} \cdot L_0 \cdot 2^{\left(\frac{T_0 - T_{i_i}}{10}\right)} \quad (5)$$

$$L_1 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{p} \cdot L_0 \cdot \left(\frac{J_0}{J_{i_i}}\right)^n \cdot \exp\left[\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_{i_i}} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (6)$$

式(5)、式(6)ともに温度の積算量が寄与することがわかる。一方、式(6)において、動作ストレスである電流密度についても離散化の要素はあるが、回路構成上変動が生じる可能性が低い場合は、定数として扱うこととした。

なお、この離散化加速モデルにおける時間間隔の設定値  $p$  は、加速モデル毎に考慮する必要がある。例えば、式(5)、式(6)のように温度の積算量が寄与するモデルの場合は、高温側で加速が進むため、温度のピークを捉えることが重要となる。ここで、式(5)を用いた場合の時間間隔設定値と10分毎の予測結果を基準に正規化した寿命予測結果の関係について、図6に示す。寿命予測にあたっては、気象庁の観測所データ(2001年1月1日開始、府中)を用い、10分毎、1時間毎、1日毎、1月毎、4半期毎、および1年毎の平均温度から試算した。図6より、時間間隔をより細分化した場合に真値に近づくこととなり、時間間隔を1日毎とした場合は10分毎に対して103%、同4半期毎とした場合は107%程度となる。使用環境センシング手法において、寿命決定箇所の温度を筐体表面温度などから推定する場合、時間間隔が細分化されると筐体などの熱容量の影響が無視できなくなるため、温度推定精度が悪化する懸念がある。一方、温度サイクルが影響する加速モデルの場合、日間最高温度、最低温度の差分が寄与することから、時間間隔は最低でも1日毎とする必要がある。

したがって、信号用電子機器においては、時間間隔の

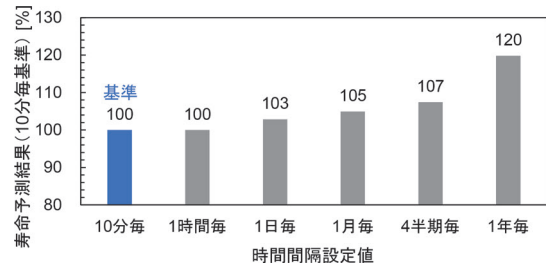


図6 時間間隔設定値と寿命予測結果の関係(アルミ電解コンデンサ, 10分毎基準)

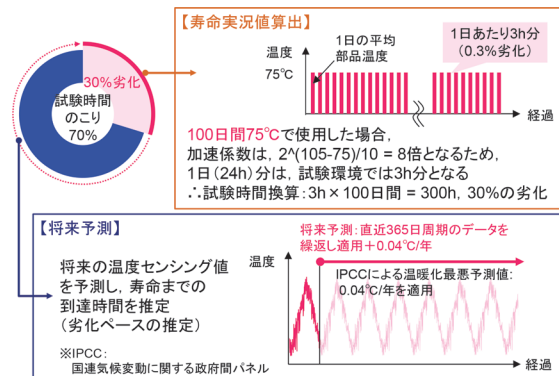


図7 寿命実況値算出および将来予測イメージ

設定値を1日毎とし、予測した値から3%分差し引いた値を最終寿命予測値として提示することとした。

## 5.2 逐次寿命予測手法の概要

逐次寿命予測手法は、5.1節で示した離散化加速モデルを核とし、センシング情報に基づく寿命実況値算出、将来予測、異常検出の3つのアルゴリズムから構成される。本節では、それぞれの概要について述べる。

### (1) 寿命実況値算出

寿命実況値算出アルゴリズムでは、離散化加速モデルを用い、実際の使用環境での劣化進展度合いを信頼性試験データにおける試験時間に換算する。このとき、時間間隔の設定値  $p$  毎に試験時間と対応させる。例えば、アルミ電解コンデンサの信頼性試験データとして105°C、1,000時間が示されている場合の寿命実況値算出イメージを図7に示す。ここで、100日間75°Cで使用した場合、式(5)より1日毎の加速係数は8倍、試験時間に換算すると1日あたり3時間分となる。すなわち、実際の使用環境100日分は、試験時間に換算すると300時間分となり、劣化が30%進展したと表現できる。

なお、任意の累積故障確率を考慮する際は、加速係数は変わらないため、3.2節で述べた式(3)およびワイブル分布の形状パラメータを用い、基準とする試験時間を調整することで対応する。上記の事例において、試料数



22個、故障数0個、形状パラメータを4と仮定すると、累積故障確率10%では1,000時間、同0.1%では556時間となる。

(2) 将来予測

将来予測アルゴリズムでは、将来のセンシング情報を予測するとともに、予測結果に基づき(1)で示した実況値算出アルゴリズムを適用することで、寿命までの到達時間(劣化ペース)を推定する。センシング対象である温度は、国内の多くの地点で年間を通じた大きな変動がある。そこで、図7の下部に示すように1日毎の温度センシング値を1年間蓄積し、直近365日周期のデータとして繰返し適用することで、将来の温度予測を行うこととした。それゆえ、センシング開始直後の1年間は将来予測ができないが、今回構築した寿命予測手法では、初期故障や偶発故障ではなく、摩耗故障を対象としているため、実運用上の問題はないと考えられる。

また、地球温暖化を考慮し、国連気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)の第5次評価報告書に記載される温室効果ガス排出量のシナリオのうち、最悪ケースを想定したシナリオ(Representative Concentration Pathways, RCP 8.5)に基づき、今後100年間での温度上昇を4℃(0.04℃/年)と見積もることとした<sup>9)</sup>。

(3) 異常検出

異常検出アルゴリズムでは、センシング情報から使用環境の異常な変化を検出し、管理端末などに通知を行う。センシング対象である温度は、年間を通じての変動のほか、対象機器の異常発熱、同一収容箱内の他機器の取替えや数量増減、周辺環境の変化などに影響される。収容箱の扉開閉のような一時的な温度変化は、対象機器の寿命に大きく影響を及ぼさないが、恒常的な変化となると無視できない。それゆえ、異常検出は、気候変動によるセンシング値の変化を除いた、恒常的な温度環境変化を的確に識別することが求められる。単独のセンシング情報で気候変動と検出対象の状態との識別を行うことも不可能ではないが、検出までに時間を要する。

そこで、隣接収容箱内のセンシング情報または気象庁の観測所公開データとの比較により、異常検出を行うこととした。異常検出のイメージを図8に示す。いずれも対象のセンシング情報に対して、隣接収容箱内のセンシング情報および観測所公開データとの1日毎の平均温度を比較する。例えば、相互の差分から異常検出の温度差分しきい値を決定し、決定したしきい値を連続して超過した場合に異常とすることで、気候変動を除いた恒常的な変化を速やかに検出することができる。

異常検出時は、管理端末などに通知を行う。寿命予測

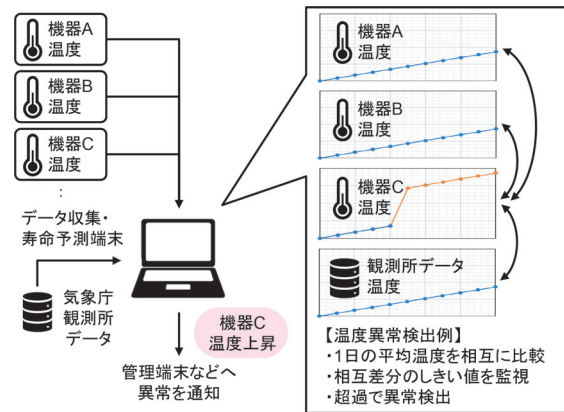


図8 異常検出イメージ

表5 ケーススタディ設定条件

設定条件	設定内容・設定値	備考
対象部品	アルミ電解コンデンサ	
試験時間	2,000時間	
試験温度	105℃	
試料数	22個	故障0個
使用環境温度	観測所(府中)	2001年1月1日～
部品発熱	25℃	
将来温度予測	直近365日繰返し	+0.04℃/年考慮
設定時間間隔	1日毎	日間平均温度
加速モデル	10℃2倍則	式(5)を適用
信頼水準	90%	
形状パラメータ	4	
累積故障確率	10%	

値が短縮する側の異常の場合、使用環境を従前に改善可能であれば、そのように対処することで機器の延命を図ることができる。

6. ケーススタディ

5章で示した逐次寿命予測手法を実装したツールを作成し、沿線電子機器内部に実装されているアルミ電解コンデンサを例に、将来予測に関するケーススタディを行った。ケーススタディの条件を表5に示す。1日毎の温度センシング値として、気象庁の観測所公開データ(2001年1月1日開始、府中)を用い、発熱分25℃を加えた値を部品温度とした。また、センサ誤差±1℃を想定した寿命予測範囲も合わせて試算した。累積故障確率10%(B10 life)に至る寿命時間を予測した結果を図9に示す。

図9は、観測所公開データを真値とした場合に、残寿命の10年前時点での予測結果を示している。図9の上段は、この時点までに実績として得られた温度を赤線、直近365日周期のデータとして繰返し適用し、0.04℃/年の温度上昇を考慮した将来の温度予測値を緑線で表している。図9の下段は、横軸を経過時間、縦軸を残寿命として寿命までの到達時間(劣化ペース)の推移を示し、実績温度センシング値による寿命予測結果



図9 逐次寿命予測手法を実装したツールによるケーススタディ結果（表5の設定条件に基づく）

（真値）を赤線，将来予測温度に基づく寿命予測結果を緑線で表している。結果として，残寿命10年に対して9.8年の寿命予測となっており，5.1節で述べた時間間隔の設定値による誤差分3%を考慮しても半年以内の予測誤差が実現できている。一方，これまでの固定環境条件下では，±5℃のマージンを設けていたため，同条件で試算すると，残寿命10年に対して短い側で4.9年の寿命予測となり，逐次寿命予測手法により予測精度向上が実現していることが示された。なお，他の期間の観測所公開データ（1981年，1991年のいずれも1月1日開始，府中）においても，同様にケーススタディを実施したところ，寿命到達10年前時点で約半年の誤差範囲となることを確認している。これは，更新計画の策定に際して，寿命到達10年前時点で年間の更新箇所の選定が行えることを示唆する結果と言える。ただし，センサ誤差や対象箇所の温度推定誤差を考慮すると寿命予測の誤差範囲が拡大するため，要求する寿命予測精度に合わせ，センサ構成を検討する必要がある。

## 7. おわりに

本稿では，信号用電子機器の保全手法についての課題を整理するとともに，新たに構築した使用環境センシングによる寿命予測手法の考え方とケーススタディによる検証結果について述べた。

使用環境センシングによる寿命予測手法においては，信号用電子機器の寿命に与える環境ストレスの主要因を温度とし，センシング対象として選定するとともに，対象機器毎および代表収容箱毎の温度測定結果より，寿命決定箇所の温度推定精度を導出した。さらに，逐次寿命予測手法として，離散化加速モデルを核としたセンシング情報に基づく寿命実況値算出，将来予測，異常検出の考え方について示し，特に将来予測に関するケーススタディの結果，寿命到達10年前時点で半年以内の予測誤

差を実現した。本寿命予測手法を活用することで，予測精度の向上が可能となり，鉄道事業者において適切な時期での更新計画策定に活用できると考えられる。

また，本寿命予測手法は，使用環境に基づき実況での劣化状態の推定ならびに将来予測が可能であるため，信号用電子機器のように劣化そのもの，あるいはその兆候を捉えることが困難な対象においても，CBMの実現手段として適用可能であると考えられる。

## 謝辞

本研究における現地試験の実施にあたり，四国旅客鉄道株式会社の関係者には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

## 文献

- 1) 藤田浩由，丹羽順一，新井英樹：電子連動装置の使用環境を考慮した寿命評価手法の開発，鉄道総研報告，Vol.32，No.5，pp.23-28，2018
- 2) 国崎愛子，藤田浩由，野村拓也，石井琢：鉄道沿線信号設備における電子機器の寿命予測手法，鉄道総研報告，Vol.34，No.7，pp.11-16，2020
- 3) 状態基準保全（CBM）の導入に向けた技術開発に取り組みます，東京メトロ News Release，2019年3月26日
- 4) 鉄道信号設備のCBM化に向けた共同開発について，JR九州 News Release，2019年6月24日
- 5) 松浦和史：ICTを活用したスマートメンテナンスの展望，JR EAST Technical Review，No.55，pp.5-8，2016
- 6) 松岡敏成：品質保証のための電子部品の信頼性試験，日本接着学会誌，Vol.50，No.10，pp.318-325，2014
- 7) 椿健太郎，藤田浩由，往古直之，高崎建：鉄道沿線信号設備における電子機器構成部品の温度推定手法に関する検討，電気学会交通・電気鉄道研究会，TER21068，2021
- 8) 野村拓也ほか：信号設備収容箱内における温度環境推定，電気学会交通・電気鉄道研究会，TER18091，2018
- 9) 藤田浩由，往古直之：CBMへの適用を目指した信号用電子機器の寿命予測に関する検討，電気学会交通・電気鉄道研究会，TER21023，2021

特集：信号通信分野における設計・メンテナンス技術

# ハンディカメラによる列車前方映像を用いた 信号設備の管理支援システムの開発

向嶋 宏記\* 長峯 望\*

Development of Signal Facilities Management Support System  
Using Camcorder Video on Train Cab

Hiroki MUKOJIMA Nozomi NAGAMINE

Signalling facilities in railways are continuously installed in scattered locations along lines between stations. As a result, a great deal of labor has continued to be required in maintenance work for performing individual inspections and facility management work for verifying the location and type of installation up to the day. Then, to reduce the workload in maintenance, there is a requirement for a system that can automatically recognize and inspect facility without going to the site. Therefore, we have developed a system that supports maintenance work on signalling facility with only one camcorder installed in a train cab. The proposed system recognizes signalling facilities from video obtained by camera and estimates the location of the facility to assist the maintenance work. This paper describes an outline of the proposed system and the fundamental elemental technologies used to build it.

キーワード：ハンディカメラ，列車前方映像，設備認識，キロ程推定，俯瞰画像，劣化推定

## 1. はじめに

鉄道において、信号設備はその役割の性質上、線区を構成する駅および駅間に分散して設置されている。そのため、設備の位置や状態を管理する業務や工事設計の際の現場確認に非常に労力がかかっているのが現状である。

例えば、台帳の情報と現場の設備に相違点がないか確認するために、現場に赴いて徒歩巡視などで調査している。その他にも、工事設計業務に必要な既設のケーブルトラフの蓋の枚数などの情報は、既存のデータベースに登録されていない場合が多く、担当者が現場に赴いて調べている。

メンテナンス業務における作業負担を軽減するために、現場に行かずとも設備の状態や設置位置を確認できるシステムが必要である。レーザービームを照射して物体の位置をセンシングする LiDAR センサや GNSS などを用いて設備の位置や状態を把握する方法も提案されている。しかし、専用車両を用意する必要があり、センサが高額である場合が多いため、閑散線区などではコストに対してメリットが見合わない可能性がある。

そこで、我々は市販のハンディカメラ 1 台だけを用いて信号設備のメンテナンス業務を支援するシステムを開発している<sup>1) 2)</sup>。我々の提案するシステムは、台帳管理や図面のチェック等を補助するために、ハンディカメラから得られた列車の前方映像から、設備を認識し、設備

の位置を推定する。システムを使用するためのハードウェアとして数万円程度のビデオカメラと三脚などのカメラ雲台（マウント）を用意すれば良く、低コストで実現が可能である。

本稿では、システムの概要と、システムを構築する要素技術について述べ、精度検証の結果を報告する。要素技術については、前方映像を疑似的に線路の真上から見た俯瞰画像に変換する手法、俯瞰画像から各フレームに対する位置を推定する手法、前方映像から設備を認識する手法、設備の劣化度を推定する手法の順に述べる。

## 2. システムの概要

提案システムには、列車の運転台から撮影した列車前方の映像を入力する。撮影に必要な機材はハンディカメラ 1 台とカメラを固定するマウントのみである。列車前方映像の例を図 1 に、実際に撮影している様子を図 2 に示す。カメラは前面ガラスなどに固定して列車前方を撮影する。この際、列車近傍の設備が映像中でブレることを避けるために、シャッター速度を速く設定することが望ましい。本研究で使用する列車前方映像は、3,840×2,160 画素のハンディカメラを使用し、30fps で撮影している。

また、提案システムは以下の要素技術から成り立つ。各手法の詳細については 3 章で述べる。

### ① 軌道面の俯瞰画像の生成

各フレームの軌道面を射影変換し、疑似的に軌道を真

\* 情報通信技術研究部 画像解析研究室





図1 列車前方映像



図2 撮影の様子

上から見た俯瞰画像に変換する。俯瞰画像上で、設備間の距離やケーブルの長さなどを計測することも可能である。

② キロ程の推定

俯瞰画像から、フレーム間のオプティカルフローと呼ばれる画素の移動量を求め、各フレームが撮影されたキロ程（走行位置）を推定する。オプティカルフローから求められるのは画素単位の走行距離であるが、フレームに対応した2地点以上のキロ程をユーザーから与えることで、画素に対する距離を割り当て、各フレームのキロ程を推定する。

③ 設備の抽出

深層学習によって各フレームから沿線設備を認識する。複数のフレームに渡って認識した設備は追跡処理により1つの設備として統合させる。

④ 劣化度の推定

深層学習によって、設備外観の劣化度を推定する。学習時には、分類問題として学習させた結果を推定確率の重み付き和として計算することで連続値として推定する。

### 3. 列車前方映像に対する画像解析手法

#### 3.1 俯瞰画像の生成

列車前方の映像は、運転台から撮影されているため、画像内の軌道面は下端から消失点に向かって小さくなる。例えば、軌道面を画像中から切り出すと図3に示す

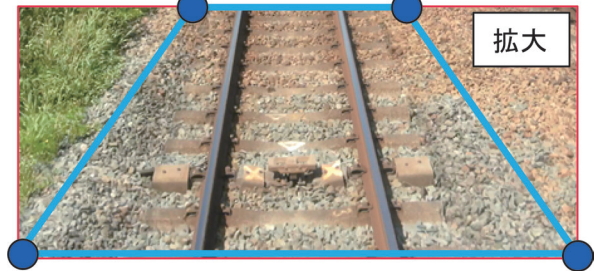
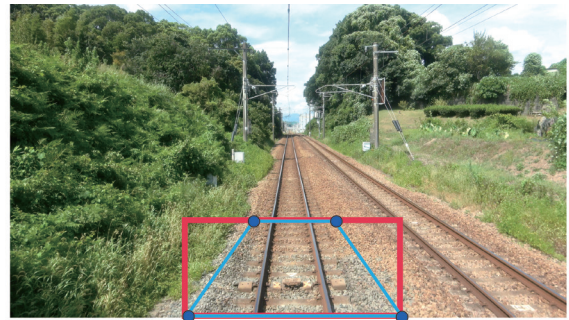


図3 列車前方映像の軌道面



図4 軌道面の画像を俯瞰画像に変換した例

通り台形の形状となり、画像上部ほど、軌間の画素数が少なくなっていることが分かる。この台形状の軌道画像では、実距離と画素の対応が画像中の位置で変化するため、設備間の距離を画像から把握することが難しい。そこで、実距離と画素の対応を任意の位置で同一とさせるために、軌道面に対して射影変換を施し俯瞰画像に変換する。図3を俯瞰画像に変換した例を図4に示す。ここで、射影変換とは任意の四角形を別の任意の四角形に移す変換である。俯瞰画像中の縦横比を正しくするために、まくらぎなどの既知の大きさの設備を基準にして、1画素あたりの実寸法を与え、射影変換のパラメータを調整する。

#### 3.2 長尺俯瞰画像の生成

前節で述べた俯瞰画像を、フレーム間で連結することで図5に示す長尺な俯瞰画像を生成する。まず、俯瞰画像からフレーム間のオプティカルフローを求める。オプティカルフローの平均値を求めることにより、画像の移





図5 長尺俯瞰画像の生成例

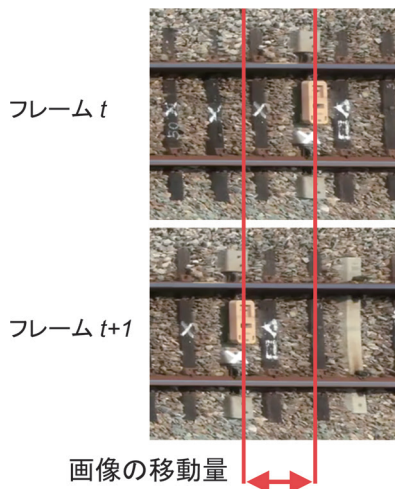


図6 移動量の計算処理のイメージ

動量が計算される。移動量の計算処理のイメージを図6に示す。この移動量は実際には画像の縦と横の2次元の移動ベクトルである。次に、移動ベクトルに従って俯瞰画像の位置を調整し、レールが直線に繋がるように連結する。ただし、カーブなどにおいて、俯瞰画像内のレールが傾くためレールが直線に繋がらない場合がある。そこで、移動ベクトルの角度をレールの傾きとみなし、俯瞰画像をスキューさせることで傾きを補正した後、俯瞰画像を連結する。スキューとは、長方形を傾けて平行四辺形に変換する処理である。また、俯瞰画像の接続箇所にはアルファブレンディングを施すことで滑らかに俯瞰画像を連結する。アルファブレンディングとは、2枚の画像を合成する際に画像を透過させて重ねる手法である。3.1節で述べた通り、大きさが既知の設備を基準とすることにより、長尺俯瞰画像上でも距離を計測することが可能となる。

### 3.3 キロ程の推定

俯瞰画像の移動量から速度を求め、映像を撮影している列車自身の走行速度と現在のキロ程を推定する。図6に示した移動量を、連続するフレーム間で求め、図7に

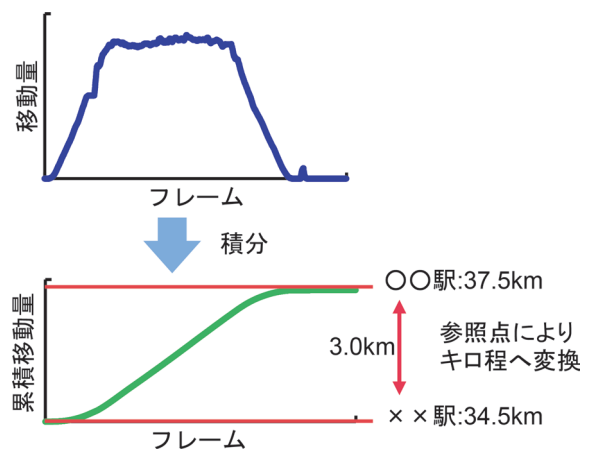


図7 キロ程への変換

示す縦軸を移動量、横軸をフレーム（時刻）とする速度情報を得る。その後、移動量を累積することにより、映像全体の累積移動量が求められる。

ここで、求められる列車の速度は、単位が「画素／フレーム」となるため、累積移動量も単位は画素である。そこで、フレームに対する既知のキロ程（位置情報）を2箇所以上与えることで、画素と実距離の換算を行い、各フレームに対するキロ程とその時の走行速度を推定する。キロ程の与え方としては、データ取得の都度、ユーザーが駅停車のフレームや地上子などの設備を選択し、駅のキロ程や設備のキロ程を手動で割り当てる方法を想定している。なお、キロ程とフレームの対応付けを自動化する方法としては、駅停車フレームを検出し、停車位置目標の位置情報と紐づける方法が考えられる。

### 3.4 設備認識

入力された映像の各フレームから、深層学習により設備を認識する。認識対象とは図8に示す20種類の設備とした。図8と対応する設備の名称を表1に示す。ネットワーク構造としては Scaled-YOLOv4<sup>3)</sup> を用いた。映像の各フレームで認識対象設備の位置、大きさ（検出枠）





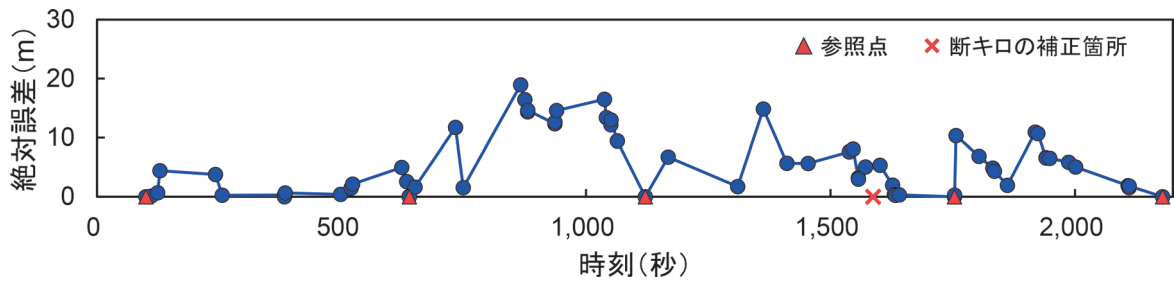


図9 キロ程の推定誤差

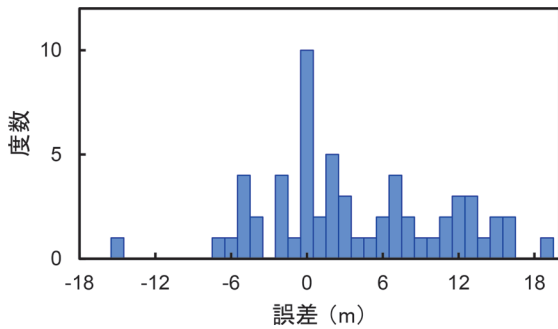


図10 キロ程推定誤差の分布

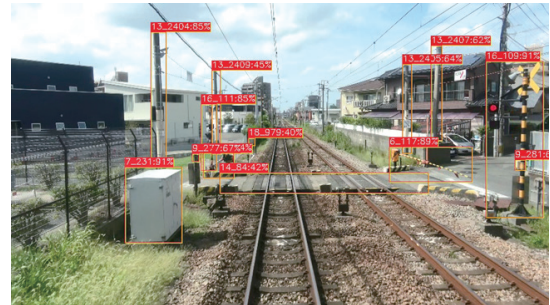


図11 設備の認識結果の例

を使用した。約2km長の区間の映像に対して設備の認識結果を確認したところ、走行線の真横を通過する設備については、見逃しは発生しなかった。認識結果の例を図11に示す。

#### 4.3 劣化度推定精度の検証

営業線で撮影した器具箱と踏切制御子箱の画像を用いて、劣化度推定手法の精度を検証した。学習データには、8,803枚の画像を使用し、評価データには、2,494枚の画像を使用した。評価データにおける劣化度の内訳は、劣化度1が630枚、劣化度2が1,391枚、劣化度3が277枚、劣化度4が184枚となっている。評価データに対する推定結果を、分類の正解率と推定値の平均絶対誤差で評価した。なお、器具箱と踏切制御子箱は学習において区別していない。

劣化度の推定結果について、各クラスでの推定結果の割合を図12に示す。グラフ中の各線はそれぞれ劣化度

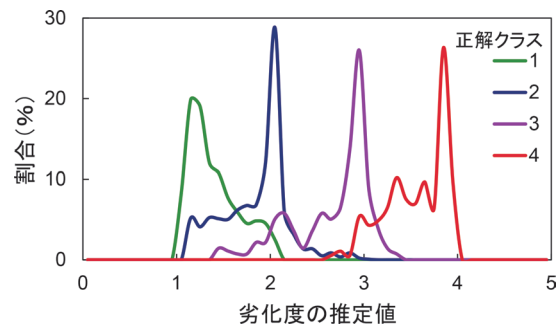


図12 クラス毎の劣化度推定結果

の正解クラスに対応している。それぞれの正解クラス周辺で割合が最大となっており、大きく推定結果が外れていないことが確認できた。分類問題としての正解率は73%であり、劣化度の実数値としての平均絶対誤差は0.33であった。推定結果の例を図13に示す。画像中の右下の数字はアノテーションとして与えた劣化度である。例えば、劣化度3の結果について、天板のみが大き

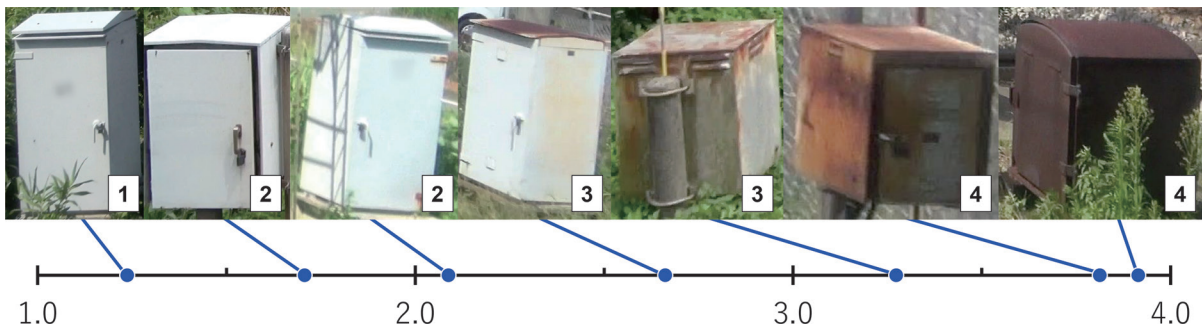


図13 劣化度の推定結果の例



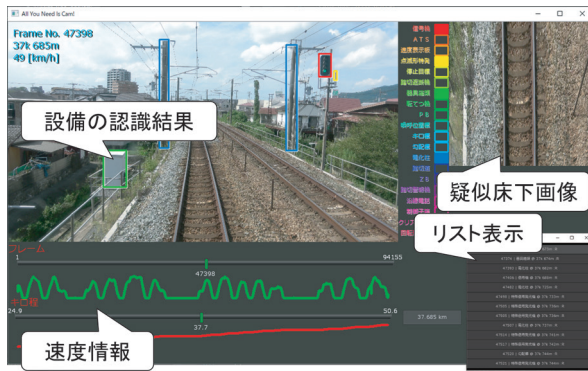


図 14 アプリケーションの動作画面

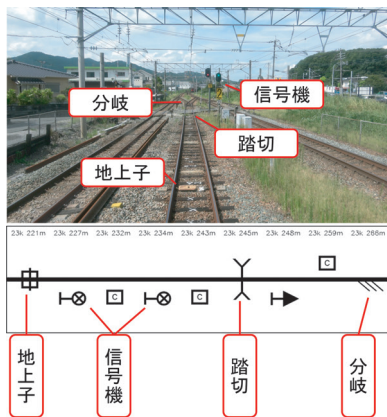


図 15 簡易図面の生成例

く錆びている踏切器具箱は劣化度 2.7、天板に加えて側面にも錆びが濃く出ている踏切制御子箱は劣化度 3.3 とアノテーションが同じクラスであっても劣化の度合によって推定値が変化していることが確認できる。

実用上は、例えば劣化度 2.5 未満は健全、劣化度 2.5 以上、3.5 未満は要注意、劣化度 3.5 以上は要検査などのように、管理区分と劣化度を紐づけて活用する。

## 5. 設備管理支援アプリケーション

提案システムのうち、俯瞰画像生成手法、キロ程の推定手法、設備の認識手法の 3 つを組み込んだアプリケーションを製作した。アプリケーションのスクリーンショットを図 14 に示す。入力した列車の前方映像に対して、認識した設備を矩形で表示している。前方映像の下には映像の各フレームに移動するためのスライダーがあり、その下にフレームに対する速度をグラフとして表示している。グラフの縦軸が速度で、横軸がスライダーに対応したフレームとなっており、駅停車などが視覚的にわかるため、閲覧したい場所をスライダーで探

し易くしている。真上から俯瞰した画像を画面の右側に示している。設備リストも表示しており、表示したい設備をクリックすればその設備が映っているフレームへ移動することもできる。また、各手法で推定した情報の提供方法は様々な方法が考えられるが、例えば、図 15 のように、設備の種類とキロ程情報から、簡易的な図面を作成することで、ユーザーが設備を探し易くすることも考えられる。

## 6. おわりに

設備のメンテナンスを軽減させるための安価なシステムとして、ハンディカメラと画像処理を用いたシステムを提案した。提案システムでは、俯瞰画像の生成、キロ程の推定、設備の認識、劣化度の推定を、ハンディカメラで撮影した列車前方の映像のみによって行う。キロ程の推定精度を検証したところ、35km の区間に対して参照点を 5 点与えることで、平均絶対誤差が 6m 程度であることを確認した。作業者の補助という用途であれば、設備の認識精度も実用上問題のない精度であると考えられる。また、設備の劣化度についても学習データには含まれない中間的な状態も推定できることを確認した。

今後は、実用化に向けて、線区によらずシステムが正しく動作することを確認するとともに、上下線を走行した映像や撮影時期が異なる映像において同一設備を認識して紐づけることで、時系列で設備の情報や劣化度を確認する手法について検討を進めていく。

## 文献

- 1) 向嶋宏記, 長峯望, 山中浩司, 坂元大介: ハンディカメラを用いた沿線設備認識システムの開発, 鉄道と電気技術, Vol.32, No.3, pp.3-7, 2021
- 2) 向嶋宏記, 長峯望, 合田航: ハンディカメラを用いた列車前方映像からの設備の劣化度推定, 第 27 回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2020), No.S-2-6-4, 2020
- 3) WANG, Chien-Yao, BOCHKOVSKIY, Alexey, LIAO, Hong-Yuan Mark, "Scaled-yolov 4: Scaling cross stage partial network," In Proceedings of the IEEE/CVF conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.13029-13038, 2021.
- 4) LIU, Ze, et al, "Swin transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows," In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, pp.10012-10022, 2021.

# 分野をまたがる鉄道メンテナンスデータの 統合分析プラットフォームの開発

流王 智子\* 河村 裕介\*\* 羽田 明生\*\* 栗田 いずみ\*

Development of an Integrated Analysis Platform for Cross-sectional Railway Maintenance Data

Satoko RYUO Yusuke KAWAMURA Akio HADA Izumi KURITA

In order to achieve more efficient and labor-saving maintenance in railway systems through cross-sectional data analyses, it is necessary to share the data collected and accumulated in each railway system. However, since the format and positional representation of the data of each system, there is a problem that it is difficult to use the cross-sectional data. Therefore, we proposed an “integrated analysis platform”, which possesses a database that can centrally manage data from each system and an analysis platform that performs comprehensive analysis processing. This paper introduces the network configuration and functions of the platform, and a prototype system built based on these.

キーワード：プラットフォーム，位置情報一元化，データサーバ，分析基盤，分野横断

## 1. はじめに

近年、様々な産業分野において、メンテナンスの効率化のため、多種多様な状態監視データを用いた分析の検討が進められている<sup>1)</sup>。しかし、鉄道分野では、状態監視データや諸元等のメンテナンスデータが、業務系統毎に独自のデータ形式や位置情報で管理されているため、他業務系統のデータと自系統のデータを一括して扱うことが難しく、自系統のデータのみを用いた分析がほとんどである。しかし、異なる系統間の設備は相互に影響しており、保全の効率化を進めるためには、分野横断的な分析が期待される。そこで筆者らは、鉄道分野のデータを横断的に扱うため、全業務系統のデータを統一した形式で蓄積・管理し、かつユーザの希望する位置表現でデータを提供する「データサーバ」と、系統を超えたデータの相互関係を分析する「分析基盤」を統合した「統合分析プラットフォーム」の構想を提案している<sup>2)</sup>。

分野横断のデータ分析手法は他分野ですでに研究・開発されている<sup>3)</sup>。鉄道においても、データを分野横断で共有する取組みはあるが<sup>4)</sup>、データを共有することの効果やメリットが明確になっておらず、現状では決め手となる手法やシステムは確立されていない。そこで、我々は、分野横断によるデータ共有や分析の効果を検証すると共に、事業者に体现してもらえるように、実機と実データを用いるデモシステムを構築した上で、仕様を策定、提案することを目指している<sup>5)</sup>。

本稿では、まず、統合プラットフォームのネットワー

ク構成、およびデータサーバと分析基盤の仕様について示す。次に、鉄道総研所内試験線で得られるデータ向けに構築した、プラットフォームの小規模なプロトタイプシステム（以下、所内版プラットフォーム）の開発とサンプルデータを用いた動作確認結果を紹介する。

## 2. 統合分析プラットフォーム

### 2.1 現状のメンテナンスデータの課題

鉄道の保守は、定められた点検周期に基づいて行われている。設備の遠隔監視は、従来から実施されてきたが、デジタル技術の発展に伴い、より詳細なデータを高頻度で収集可能になってきている。これにより、計測されたデータから設備等の状態を判断し、その状態に応じて適切にメンテナンスを行う予防保全や状態監視保全が着目されている。これらを実現するためには、収集されたデータから、状態の変化を予測し、適切な保全タイミングを決定する必要があるが、この決定が難しいという課題がある。その要因として次のようなものが挙げられる。

- ・データ収集用のシステム外にデータを取り出せない
- ・データの分析技術や分析環境を有していない
- ・十分なデータ数が得られていない
- ・分析のための測定項目が不足している
- ・自系統のみに閉じた分析しかされていない

### 2.2 分野横断のメンテナンスデータの課題

前節の最後でも示したとおり、メンテナンスデータの分析の多くが自系統で取得されるデータの分析に留まっている。実際は、軌道の状態が車両動揺に影響するなど、系統を超えた相互関係が存在する。系統間の相互関係の

\* 情報通信技術研究部 通信ネットワーク研究室

\*\* 情報通信技術研究部 情報解析研究室

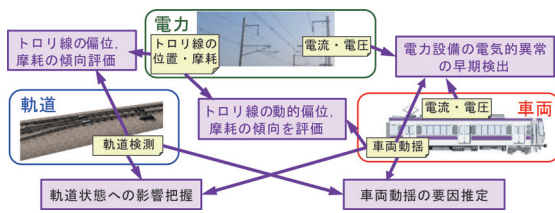


図1 複数システムの相互関係の一例

一例を図1に示す。図1には、軌道、電力、車両で取得されるデータを例として、複数業務システムのデータを用いた活用手法を紫色の四角で示した。図1に示したように、鉄道分野では、各業務システムのデータを相互に活用することで、これまで把握できなかった状態情報や関係性を得られることが期待される。しかし、現状では分野横断的にデータを扱うシステムが存在しない。さらに、前述したとおり、業務システム毎に異なる形式や位置情報でメンテナンスデータが管理されているため、他業務システムのデータと自システムのデータを同じ座標軸で扱うことが難しいという課題がある。

### 2.3 統合分析プラットフォーム導入のメリット

統合分析プラットフォームは、2.2節に示した課題を解決できるよう分野横断的にデータを扱うためのシステムである。このプラットフォーム内で、自システムの距離概念と系統共通の距離概念の二つを持つデータフォーマットにデータを変換する。このテーブルにより、複数システムのデータを統一された横軸で表現したり、他システムの距離を、自システムの距離に再変換したりすることができる。したがって、統合分析プラットフォームを利用すると、2.2節で挙げた、他業務システムのデータと自システムのデータを同じ座標軸で扱うことが難しいという課題に対して、共通の距離概念を介することで、複数システムのデータの利用が実現可能となる。また、2.1節で挙げたデータ数や測定項目の不足の課題に対しては、他システムのデータを利用することで、それらを補間することが可能となる。さらに、分析基盤がプラットフォーム内にあることにより、データ分析者が独自に分析環境や分析手法を構築することなくデータ分析を行うこと、および、他システムですでに開発されている分析手法やアプリケーションを扱うことができ、効率的なデータ利用や分析が可能である。

### 2.4 統合分析プラットフォーム構築の課題

データ共有を実現するプラットフォームは、すでに他の産業分野では実用化されている。例えば、行政サービスで利用されているX-Road<sup>6)</sup>やスマートシティ向けのFIWARE<sup>7)</sup>などがある。これらは、分散型方式を採用しているため、業務システム間で直接データをやりとりするためのネットワークの整備や業務システムごとに対象データ

の一元管理に必要な変換処理、および業務システム間での更新情報の共有などが必要となっている。鉄道システムでは業務システム毎に異なるシステムが構築されているため、分散型方式を採用する場合、各業務システムでネットワークの整備や変換処理、情報共有機能などを用意する必要が生じるため、大規模な改修が発生することが予想される。

したがって、鉄道では集中型の方が適しているといえる。例えば、スイス連邦鉄道(SBB)で利用されている沿線列車モニタリングシステム(WTMS)<sup>8)</sup>では、走行中の車両の状態監視データを沿線に設置されたRFIDで収集し、中央のデータベースで集中管理する、集中型を採用している。なお、WTMSは、鉄道の全ての系統で取得されるデータを対象としたものではない。

鉄道では、車両、土木、電力、信号といった各業務システムで独自の位置表現やデータ形式でデータを管理している。これらのデータを統一のデータフォーマットに変換するためには、各システムのデータ形式やデータの特徴、プラットフォームへの要件を把握して、鉄道向けの仕様を策定しなければならない。また、異なる位置表現やデータ形式を統合して管理するためのデータベースの仕様が必要となる。さらに、コストや業務への影響を考慮すると、既存システムを稼働させつつ、最低限の改修によりプラットフォームを構築することも重要である。

これらの課題を解決し、現状の鉄道システムに適したプラットフォームの仕様を策定するため、以下のステップで開発をすすめている。

- ①プラットフォームの設計段階においては、鉄道向けに求められる機能の整理と基本構成を提案する。
- ②鉄道総研所内試験線から得られるデータを集積するプラットフォームのプロトタイプシステム(所内版プラットフォーム)を構築し、動作検証を行う。
- ③所内版プラットフォームに複数システムの実データを集積して動作検証を行い、実装上の課題や仕様の不足事項を抽出する。
- ④所内版プラットフォームを用いたデモにより、統合分析プラットフォームの活用可能性を各鉄道事業者へ評価して頂き、仕様の深度化を図る。

本稿では、上記開発ステップのうち、①プラットフォームの設計と、②所内版プラットフォームの開発及び、それをを用いた一部機能の確認結果について紹介する。

## 3. プラットフォームの設計

### 3.1 機能の整理

#### 3.1.1 各システムのデータの特徴

鉄道向け統合分析プラットフォームに求められる機能を整理するため、各業務システムにおける、メンテナンスデータの特徴を調査した。その結果を表1に示す。表1の



表1 各業務システムのデータの特徴

系統	対象設備	主なデータの種類	データの形態	位置測定方法	データ発信点	データ受信点
車両	エンジン 空気圧縮機	振動加速度 温度、電流	数値	緯度経度	エンジン 空気圧縮機	状態監視装置 (車内に設置)
車両	車体傾斜 制御装置	ヨー角速度、加速度 車体傾斜等	数値	算出キロ程	台車	車体傾斜制御装置 (車内に設置)
車両	断路器箱	主回路電流 補機電流	数値	緯度経度	断路器箱	状態監視装置 (車内に設置)
土木	トンネル、橋梁 高架橋等	健全度 設備状態等	段階値 文字列	設備名称 キロ程	トンネル、橋梁 高架橋等	設備管理システム (本社・保守区等)
軌道	軌道	動揺、軸箱加速度 軌間、平面性等	数値 画像	キロ程 (速度発電機 +地点検知装置)	軌道検測車 軌道検測装置	軌道検測車 装置内ロガー
軌道	軌道	撮影画像	動画 画像	フレームレート と移動量	軌道検測車	軌道検測車
電力	変電所	電流、温度	数値	緯度経度	取集装置 (変電所内)	取集装置 (変電所内)
信号	電気転てつ機	電圧、電流 鎖錠かん変位	数値	線区、駅名 説明名称	電気転てつ機	信号機器室 沿線器具箱
信号	軌道回路	電圧、電流等	数値 波形	線区、駅名 説明名称	軌道回路	信号機器室 沿線器具箱

うち、データ受信点に着目すると、車両系統のデータは、走行中に取得したデータは車内にある装置に蓄積されることが分かる。土木系統のデータは、本社・保守区等の設備管理システムへデータが蓄積される。軌道系統のデータは、軌道検測車の移動距離に合わせて計測がなされるため、時間軸のデータではなく、距離軸のデータとして記録され、データは検測車に蓄積されることが分かる。電力系統のデータは、データを取得している施設内で閉じていることが分かる。信号系統のデータは、線区や駅に紐づいて定義され、データそのものは機器室や沿線の器具箱に集約される。このように、鉄道で取得されるメンテナンスデータは、業務系統や取得する設備や装置で閉じているものがほとんどであり、これらを統合分析プラットフォームへ集積するためには、各業務系統のシステムと統合分析プラットフォームの間に車上と地上間を含めたネットワークを構築する必要がある。また、位置測定方法が異なることから、同じ座標軸でデータを表示するためには、系統を超えた位置情報や時間の統一的な管理が必要になる。さらに、デジタル技術の導入に伴い、将来的には扱うデータ量がますます増えることが予想されるため、拡張可能な設計とすることが望ましい。

### 3.1.2 システム要件の整理

前項で示した条件を元に、統合分析プラットフォームに求められるシステム要件の整理を行った。なお、システム要件はシステムの動作や機能、性能等多岐にわたるが、本稿では鉄道向けの統合分析プラットフォームを構築する上で特に重要と考えられる運用面とセキュリティ面の要件を例として表2に示す。

本プラットフォームを各鉄道事業者へ展開するためには、データの集積元となる既存保守システムとの連携が

表2 システム要件

	項番	要件内容
運用面	O1	既存業務システムとの連携が容易であること
	O2	業務形態の変更が最小限であること
	O3	他業務形態のデータを自業務系統で扱いやすい形態で利用できること
	O4	原則無停止で稼働すること
セキュリティ面	S1	機器やネットワークの状態を把握できること
	S2	外部との接続は最小限とすること
	S3	各種データが改ざんされないこと

容易であることが求められる。さらに、プラットフォーム構築時に、現在の業務を停止することはできないため、既存の業務形態の変更が最小限であることを運用面の要件として挙げた。また、プラットフォームを各業務系統で利活用するためには、ユーザの希望する軸でのデータ提供が必要不可欠である。さらに、鉄道現場は夜間業務もある他、データのバッチ処理等を夜間に行うことも考えられるため、プラットフォームのサービス提供は原則無停止であるとし、これらも運用面の要件として挙げた。

また、攻撃者によるデータの改ざんや削除、障害等により本プラットフォーム内のデータの整合性が失われると、正しくないデータに基づくデータの分析や予測が行われる。その結果、不適切な補修に起因する鉄道設備の安全性の低下、異常時の対応の遅延等につながる恐れがある。その他、プラットフォーム外部からの攻撃による対象データの窃取や過大な負荷による本プラットフォームのシステムダウン等も考えられる。そのため、プラットフォーム上の機器やネットワークの状態を遠隔で把握できること、プラットフォーム外部との接続を必要最小

限とすること、各種データが改ざんされないことをセキュリティ面の要件とした。

### 3.2 統合分析プラットフォームのネットワーク構成

表2に示した要件を満たすためのプラットフォームのネットワーク構成図を図2に示す。図2の左側に位置するものが、各系統のデータを集約するデータサーバに必要となる機器である。具体的には、各業務系統が保管するメンテナンスデータの写しをそのままの形式・位置表現で蓄積する「ミラーサーバ」、データ形式・位置表現が異なる各業務系統のデータを統一形式へ変換する「データ形式変換サーバ」、変換後のデータを蓄積する「統一形式データサーバ」で構成される。この構成により、各業務系統のデータ形式をそのままプラットフォームに取り込み、プラットフォーム内部で統一のデータ形式・位置表現に変換するため、表2の要件O1～O3を満たす。

一方、図2の右側に位置するものが、データ分析を行う分析基盤に必要となる機器である。分析基盤は、プラットフォームに蓄積されたデータに対して、データの分析・表示処理を行う「アプリケーションサーバ（以下、アプリサーバ）」で構成される。アプリサーバとして、データの前処理や分析をする「分析サーバ」、データの表示処理を行う「表示サーバ」、各業務系統の通常業務で使用する「系統別アプリサーバ」の3種類を想定した。また、ユーザが扱いたいデータ形式や分析処理等を受け付け、処理結果の表示やダウンロードが可能なインタフェースを提供するWebサーバをプラットフォームの入口に設置する。Webサーバより先のアクセスは、認証されたユーザのみが許可される。この構成により、要件S2を満たす。

さらに、これらの機器および機器間のネットワークの監視、ユーザおよび管理者の認証等の機能を有する管理サーバ、およびプラットフォーム内の通信を制御するネットワーク制御装置も設置する。これら機器のログ監視により、要件S1を満たす。また、認証やネットワー

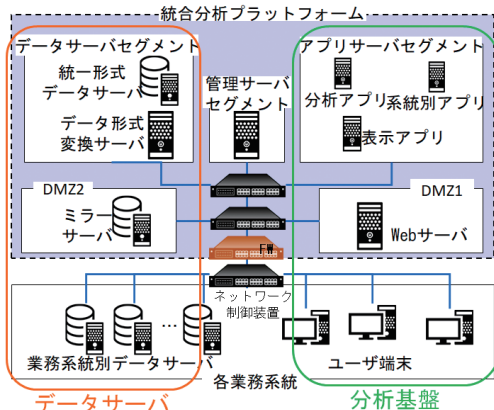


図2 プラットフォームのネットワーク構成図

ク機器によるセキュリティ対策により、データベースを改ざん等から守り、要件S3を満たす。

提案するネットワーク構成では、将来のデータやユーザの規模の変化への柔軟な対応や不正なアクセス等の遮断を考慮し、複数の機器を機能単位で1つのセグメントとした。この構成により、セグメント内で機器を冗長化させ、要件O4を満たす。

### 3.3 データサーバの機能

#### 3.3.1 統一形式データサーバ

統一形式データサーバは、各系統の多様な形式のデータを管理し、アプリサーバからの様々な検索条件を受け付けるため、リレーショナル型データベースでデータを管理する構成とした。各系統のデータを管理するため、それぞれのデータの整理をした結果、共通して管理されている項目と、系統固有の項目とがあることから、共通項目を統一のデータ形式で管理するテーブル（以下、「共通テーブル」と）と個別の項目を管理するテーブル（以下、「個別テーブル」と）を組み合わせる構成とした。共通テーブルは、業務系統、管理区所、設備の所在、共通する計測条件（計測対象設備、計測開始日時等）、時刻や位置情報に関するメタ情報等とした。一方、個別テーブルは設備の種類毎に代表的な諸元項目、機器毎の固有の設定項目、計測データ等とした。また、地上設備の所在地や計測地点のように、位置情報を含む共通/個別テーブルは、各業務系統独自の表現形式と一元化した表現形式の両方を持つ構成とした。図3に計測データに関する統一形式データのフォーマットを示す。図3の機器IDから列車番号までのフィールドは、計測機器の種類を問わず共通するフィールドであり、計測値はそれぞれの計測機器で同時に計測する項目数分のフィールドである。また、図3の「計測地点（元形式）」が各業務系統独自の表現形式により、「計測地点（統一形式）」が一元化した表現形式により、それぞれ位置情報を格納するフィールドである。以降では、統一形式データサーバで扱うデータ形式のことを「統一形式」と呼ぶ。

#### 3.3.2 データ登録処理の流れ

次に、各業務系統のデータを統一形式データサーバに登録する処理の流れを図4に示す。3.2節で示したとおり、データ登録では、ミラーサーバへ各業務系統のデー

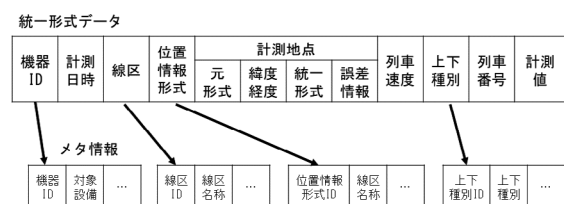


図3 統一形式データフォーマット（計測データ）





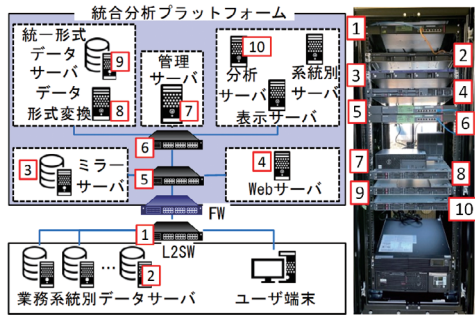


図6 プロトタイプシステム

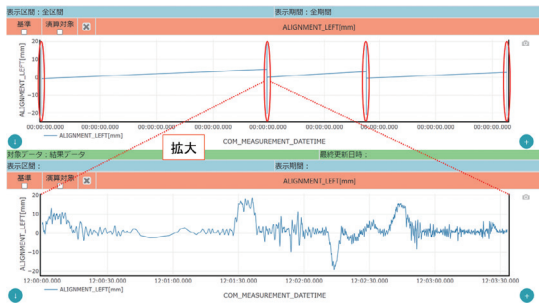


図7 サンプルデータの描画のスクリーンショットの例

プラットフォームを構築した(図6)<sup>9)</sup>。なお、開発のしやすさから、今回構築した所内版プラットフォームでは、表示サーバの機能をWebサーバに実装した。今後、この機能は表示サーバに移行する予定である。

この所内版プラットフォームを用いて、3.3.2項に示したデータ登録処理の動作検証を行った。動作検証用として用意したサンプルデータは、計測条件と計測データの対で構成されており、新規にデータが追加される場合は、このデータの対が新たに発生する。このサンプルデータを業務系統別サーバへ置き、データ登録を実行した。

データ登録処理を実行した結果、統一形式データでは、計測条件が統一形式のデータテーブルに変換されたことを確認した。また、統一形式データテーブルでは、計測条件と計測データが紐づいており、計測条件が変わらない計測データが新たに系統別データサーバへ蓄積された場合、統一形式データサーバ内の既存の計測データテーブルに新規データが追加されることを確認した。

次に、計測条件が変わらない軌道系統の4計測分のサンプルデータを統一形式データに変換し、表示サーバで描画した例を図7に示す。図中の上側にある赤丸は、計測データがある箇所を表す。このうち、左から2つ目を拡大したものが図7の下側である。元形式のデータでは、計測ごとにデータの対が発生するため、同じ時間軸上に複数時点の計測データを表示することができないのに対して、統一形式データでは、同じテーブルにデータが追加されるため、図7に示したとおり複数時点の計測データを同じ時間軸上で表示することが可能である。

## 5. まとめ

本稿では、鉄道の各業務系統で取得されるデータを集約し、システムを超えたデータの共有・活用を実現する「統合分析プラットフォーム」の仕様を策定するため、各系統のデータの特徴を整理し、必要な機能要件をまとめた。そして、この機能要件を満たすプラットフォームのネットワーク構成案を作成した。また、プラットフォームにおけるデータベースや分析基盤が持つ機能や処理の流れを示した。さらに、提案した仕様の一部を所内版プラットフォームとして開発・実装し、当該機能が仕様通り動作することを確認した。

今後は、所内版プラットフォーム上に複数系統の実データを取り込み、プラットフォームの機能確認と仕様の深度化、さらに、実データによる分野横断のデータ分析の効果を示す予定である。

## 文献

- 1) IoT時代におけるICT産業の構造分析とICTによる経済成長への多面的貢献の検証に関する調査研究報告書，株式会社三菱総合研究所，2016
- 2) 河村裕介，流王智子，羽田明生：メンテナンス用統合プラットフォームの提案，第58回サイバネ・シンポジウム論文集，2021
- 3) 木俣豊，鳥澤健太郎，是津耕司：社会の動きを深く横断的に分析するためのビックデータ処理技術，電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン，Vol.8，No.1，pp.18-25，2014
- 4) 吉田尚史，田中博文，西本正人，三和雅史：キロ程ベースでの位置情報一元化による鉄道設備管理システム，鉄道総研報告，Vol.35，No.4，2021
- 5) 流王智子，河村裕介，羽田明生，遠山喬：メンテナンスデータ用統合プラットフォームの構築に向けたネットワーク伝送負荷のシミュレーション，J-RAIL2021，2021
- 6) 松本茂樹，武田淳：スマートタウンを実現するデータ交換基盤“PlanetCross,” UNISYS TECHNOLOGY REVIEW，Vol.138，2018
- 7) 竹内崇，寺澤和幸：データ利活用型都市経営を実現する情報プラットフォーム FIWARE，NEC 技報，Vol.71，No.1，2018
- 8) Jörg Bisang, Martin Fley, Stetan Koller, “Rollmaterial-Zustandsüberwachung mit Zugkontrolleinrichtungen und RFID,” SIGNAL+DRAHT, Vol.109, No.10, 2017.
- 9) 流王智子，河村裕介，羽田明生：メンテナンスデータ用統合プラットフォームのプロトタイプシステムの構築，電気学会全国大会，2022

鉄道総研報告 監修スタッフ

■監修責任者

芦谷公稔

■編集責任者

谷村幸裕 新井英樹

■企画・監修

鈴木浩明	川崎邦弘	長倉 清	日比野有
伊積康彦	石毛 真	神田政幸	重枝秀紀
桃谷尚嗣	布川 修	新井英樹	福田光芳
上田 洋	上半文昭	斉藤実俊	水上直樹
富田 優	小島謙一		

鉄道総研報告 第36巻 第8号

2022年8月1日 発行

監修・発行所：公益財団法人 鉄道総合技術研究所

〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38

©2022 Railway Technical Research Institute

本誌に関するお問い合わせ先  
総務部広報 電話 042-573-7219

# RTRI REPORT

▶ Special Features: Design and Maintenance Technology in the Field of Signal Communication ◀

Vol. 36 No. 8

Aug. 2022

## PERSPECTIVE

- Trend on Research and Development Activities Related to Railway Signalling and Telecommunication Systems  
.....H.ARAI, M.FUKUDA (1)

## PAPERS

- Configuration and Safety Confirmation Method of Image Processing System Applicable to Signalling Devices  
.....A.GION, T.ICHIKAWA, H.MUKOJIMA, N.NAGAMINE, M.FUKUDA, T.ITAGAKI (5)
- Circuit Scale Minimization Method for Automatic Wiring Diagram Creation of Relay Interlocking Devices  
.....S.SEKINE (11)
- Configuration Method of Relay Input-Output System for a Safety-related Application Using General Purpose Devices  
.....A.GION, M.FUKUDA, Y.NAKAZAWA (17)
- Verification of the Applicability of Fifth Generation Mobile Communication Systems to Railway Operations  
.....K.NAKAMURA, T.KITANO, K.KAWASAKI, T.OOMI, K.FUJISHIMA, S.ICHIKAWA (23)
- Estimation Method of Switching Load of Turnout for Point Machine Monitoring System  
.....S.SHIOMI, K.TAKASAKI, N.OKO, K.TSUBAKI (31)
- Lifetime Estimation of Signalling Electronic Equipment Based on Sensing Information of Usage Environment  
.....H.FUJITA, K.TSUBAKI, K.TAKASAKI, N.OKO (37)
- Development of Signal Facilities Management Support System Using Camcorder Video on Train Cab  
.....H.MUKOJIMA, N.NAGAMINE (45)
- Development of an Integrated Analysis Platform for Cross-sectional Railway Maintenance Data  
.....S.RYUO, Y.KAWAMURA, A.HADA, I.KURITA (51)

