

## 利便性を考慮した賢い踏切の開発

Development of smart level crossing system for traffic convenience



寺本 学\*\*\*



安倍 孝典\*



神作 洋一\*\*\*\*



宮口 直己\*\*



岡田 明正\*



福田 和人\*

Safety of a level crossing is an important matter for the railway operators. A level crossing has a possibility of a long warning time by our safety concept. Long warning times create a nuisance to those who want to cross the level crossing. In this development, in order to shorten the crossing warning time, we have studied from two points of view, one normal state and the other is failure state. From the view point of normal, We have developed a microelectronic level crossing controller with built-in constant warning time control logic. From failure, we have developed a mechanism to avoid long warning times when a level crossing detects a failure. Specifically, we connect level crossings in a network and control them using information of other level crossings instead of the one with a failure. We made a prototype, good results were obtained.

●キーワード：開かずの踏切、中間電子踏切制御装置、定時間制御、ソフトウェア化、ネットワーク

### 1. はじめに

踏切の安全は鉄道事業者にとって重要な事項である。現在の踏切は、異常時には警報・遮断制御を行うことを基本としている。これは、フェールセーフの考え方からは正しい制御であるが、踏切通行者にとっては過剰な警報・遮断になってしまう一面もある。特に、「開かずの踏切」は道路交通を長時間遮断することに繋がるため、社会的に大きな影響を与えてしまう。そこで、本開発では、踏切警報時間を短くするために、踏切正常時と踏切故障時の両方の観点から検討を行った。踏切正常時の観点では、踏切定時間制御の導入を促進するために、従来リレー結線で構築されていた定時間制御論理をソフトウェア化する「定時間制御機能付電子踏切制御装置の開発」を行った。このことで、コストダウンと設計・施工・試験の簡素化が実現できた。定時間制御論理の仕組みづくりは過去のテクニカルレビューにて述べている<sup>1)</sup>ため、本報告では工場内試験およびモニタラン試験の概要について述べる。また踏切故障時の観点では、踏切が故障しても警報持続<sup>2)</sup>を防ぐ取組みを行った。具体的には、従来は独立した制御を行っていた電子踏切制御装置<sup>3)</sup>をネットワークで接続し、故障時でも近接踏切の情報を活用して、踏切制御を継続させる「ネットワーク踏切システムの開発」を行った。本報告では試作品の仕組みづくりと工場内試験について述べる。

### 2. 定時間制御機能付電子踏切制御装置の開発

#### 2.1 踏切定時間制御の概要

踏切定時間制御のシステム構成を図1に示す。通過列車と停車列車で警報開始点を変えることで踏切警報時間の適正化を実現している。

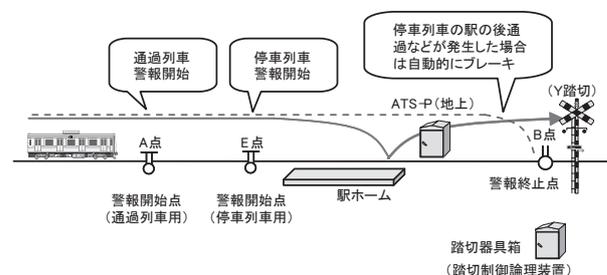


図1 踏切定時間制御システム構成

#### 2.2 定時間制御論理のソフトウェア化

「定時間制御機能付電子踏切制御装置の開発」では定時間制御論理をソフトウェア化することによるリレー結線の削減をめざした。本開発では実用化をめざし、工場内試験およびモニタラン試験を実施した。

#### 2.3 工場内試験

本開発ではソフトウェア製作後の2012年6月から10月にかけてソフトウェアの機能試験を実施し、ハードウェア製作後の2014年3月から6月にかけて、ハードウェアとソフトウェアを組み合わせた工場内総合試験を実施した。試験に先立ち、限られた時間で効率のよい試験方法について検討したため、本項目ではその内容について述べる。

## 2.3.1 試験項目作成方法

今回提案する試験項目作成方法の手順を示す。

### (1) 試験項目作成手順

#### ①試験項目案の作成

試験項目案の洗い出しのために、図2に示すRAMSライフサイクルの考え方を取り入れる。鉄道事業者の視点から導入後に現場で起こりうる事象を明確化させるため、RAMSライフサイクルの段階ごとに区別して起こりうる事象を洗い出す。



図2 RAMSライフサイクル

#### ②FTA (Fault Tree Analysis, フォルトツリー解析) を活用した危険事象に至るパターンの明確化

FTAの事象のトップに危険事象を想定し、トップダウンの観点から起こりうるパターンを明確化する。

#### ③FMEA (Failure Mode and Effect Analysis, 故障モード影響解析) を活用した故障・取扱誤りの明確化

FMEAを活用し、起こりうる故障モードや取扱誤りのモードを洗い出し、ボトムアップの観点から起こりうるパターンを明確化する。

#### ④試験項目案へのフィードバック

①で作成した試験項目案に対して②および③で明確化されたパターンをフィードバックさせることで、トップダウン・ボトムアップの両面から試験項目案をブラッシュアップする。

#### ⑤試験項目の確定

④でフィードバックさせた試験項目案に対して、同じタイムチャートとなる項目や、当該システムの範囲外となる項目を除いたものを「試験項目」と定める。

### (2) 試験項目スリム化手順

試験チェックリストは試験項目の数だけ作成しなければならないが、試験を現実的な時間で行うために、以下の2点に着目して試験チェックリストのスリム化を行う。

#### ①項目数のスリム化

本ソフトウェアの場合、上下線の制御が独立しているため、各々の対照試験を実施後にスリム化を行う。また、状態表示に関しても全表示の対照試験実施後にスリム化を行う(図3)。

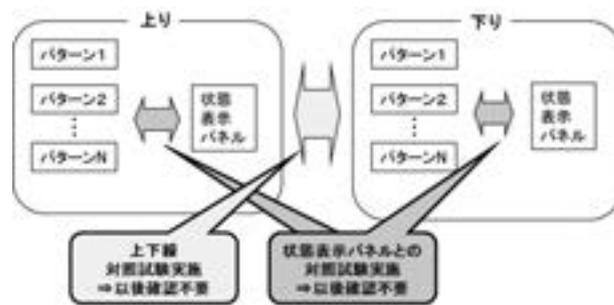


図3 項目数のスリム化の例

#### ②手順数のスリム化

ある状態からの遷移が共通の場合は、共通部分から先の故障はスリム化可能となる。本研究の場合、踏切が故障遷移した後のパターンが共通であるため、これ以降の手順のスリム化を実施する(図4)。

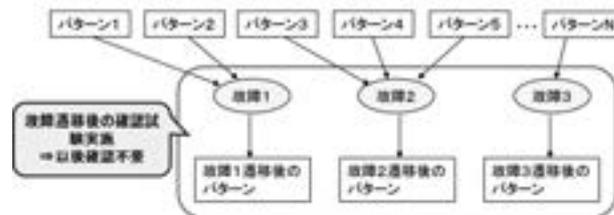


図4 手順数のスリム化の概念図

以上の手順を踏むことで、効率的な試験チェックリストを作成することができた。

## 2.3.2 工場内試験結果

### 工場内試験

#### (1) 機能試験

定時間制御の基本機能の開発後、2012年6月から9月にかけてメーカーによる機能試験を実施し、良好な結果を得た。

#### (2) 試験チェックリストを活用した機能試験

メーカーによる機能試験後、2012年9月28日から10月4日にかけて2.3.1で作成した試験チェックリストを用いて機能試験に該当する部分を実施し、良好な結果を得た。

#### (3) 総合試験

本体のハードウェアやユーザーIFのソフトウェアなど製品化レベルの開発を実施した後、2014年3月から6月にかけて工場内総合試験を実施した。従来と同等のハードウェア試験や従来機能への影響確認試験、同時入力試験などを行い、良好な結果を得た。

#### (4) 試験チェックリストを活用した総合試験

メーカーによる総合試験後、2014年7月7日に2.3.1で作成した試験チェックリストを用いて総合試験に該当する残りの部分をすべて実施し、良好な結果を得た。

## 2.4 モニタラン試験

### 2.4.1 モニタラン試験概要

工場内試験が良好であったことから、東北本線大宮土呂間氷川踏切においてモニタラン試験を実施した。以下にその概要を示す。

#### (1) 現地での環境における一定期間の安定稼働の確認

モニタラン期間を2014年7月～2015年2月までの8ヵ月間と設定し、夏から冬まで長期的に稼働させて、正常動作を確認する。

#### (2) 実列車による入力パターンにおける正常動作の確認

現地で実列車のリレー条件を横取りした本開発品の動作と、実際に稼働している踏切を比較する(図5)。これにより、工場内試験で実施できない数多くの実列車による動作確認が可能となる。

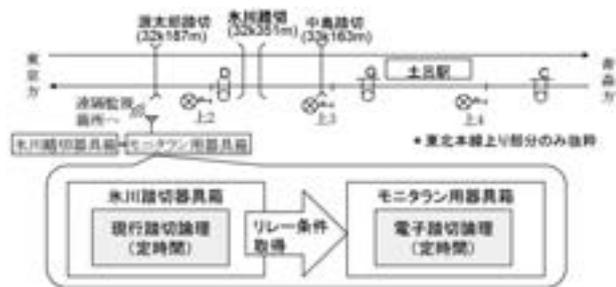


図5 モニタランの概要

### 2.4.2 モニタラン試験結果

表1にモニタラン試験結果を示す。モニタラン期間中、以下の環境下で安定稼働を続け、動作の不具合は一度も発生しなかった。

- (1) モニタラン期間：平成26年7月7日～平成27年2月28日  
全237日
- (2) 器具箱内最高温度：44.7度(8月6日)、器具箱内最低温度：-6.85度(2月10日)
- (3) 雷サージ：0回
- (4) 列車数：約38,500本(停車列車：約23,700本、通過列車：約14,800本)

表1 モニタラン試験結果

試験項目	判定基準	結果
1. 警報時間		良
2. 入出カタイミング	氷川踏切の動作と一致していること(機能仕様書とおりの動作であること)	良
3. 故障検知		良
4. 環境性能	現場環境で安定稼働を続けること	良

なお、氷川踏切では現状遅延時素がある。そのため、警報時間について続行列車の位置によっては警報遅延がかかるかどうか若干の違いが見られ、現行システムの警報時間と比べ、稀に本開発品の警報時間が長くなるケースが発生している。しかし、いずれも安全には問題はなく機能仕様とおりの動作であり、動作の不具合は一度も発生しなかった。

工場内試験およびモニタラン試験とも良好であったことから、本開発品は2015年度の実導入を予定している。

## 3. ネットワーク踏切システムの開発

### 3.1 はじめに

現在の踏切保安装置(以下 踏切)は、フェールセーフの考え方から、一旦踏切が故障検知すると、警報持続に遷移する仕様になっている。ところが、長時間の警報持続は通行者から見ると開かずの踏切となってしまう、社会的に大きな問題となっている。

この問題を解決するために、従来は独立した制御を行っていた踏切をネットワークで接続し、当該踏切が故障しても、近接踏切の情報を利用して当該踏切の故障警報を抑制することをめざした。

### 3.2 本開発の目的

#### 3.2.1 現在の踏切の課題

現在の踏切の構成を、図6に示す。なお、本報告では中間踏切を対象としている(踏切名称をB踏切、C踏切、D踏切とした)。それぞれの踏切制御は独立しており、踏切ごとの責任範囲内で安全を確保しながら踏切制御を行っている。そのため、各踏切が一旦故障を検知した場合、フェールセーフの考え方から警報持続が発生する。

一旦踏切の故障が発生すると、保守員が現場に向かい、原因を調査したうえで復旧させるため、長時間の警報持続が発生することになる。特にバス通りなど交通量が多い踏切でこの状態が発生すると、社会的に多大な影響を与えることになる。



図6 現在の踏切の構成

## 3.2.2 目的

以上のような課題を踏まえ、本開発では現在の踏切の構成そのものを見直すこととする。JR東日本では踏切の安全を司る、あるいは適正な警報制御を行うために電子踏切制御装置（以下 電子踏切）を多用している。そこで、ネットワークで電子踏切同士を接続することにより、電子踏切が故障を検知した場合に近接電子踏切の情報を活用しながら安全に踏切の動作を継続させる仕組み（以下 ネットワーク踏切システム）をめざした。

ネットワーク踏切システムの構成イメージを図7に示す。

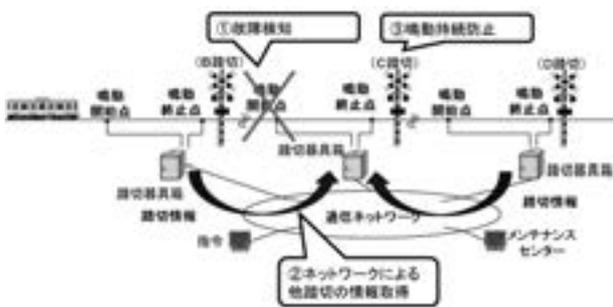


図7 ネットワーク踏切システムの構成イメージ

## 3.3 ネットワーク踏切システムの基礎開発

### 3.3.1 開発概要

電子踏切の故障検知時に警報持続にならず、近接踏切の情報を活用して安全な制御を継続（以下 縮退運転）させる仕組み作りを行った。

図8に縮退運転の制御区間を示す。

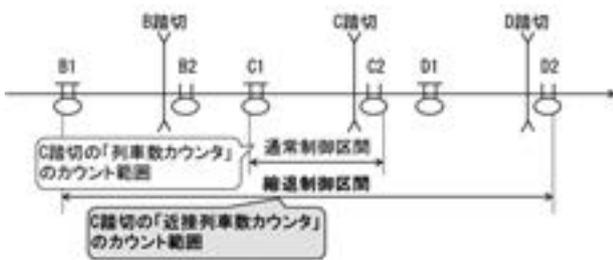


図8 縮退運転の制御区間

縮退運転の基本的な考え方は以下のとおりである。C電子踏切が故障検知した時には、故障している踏切の情報は信頼できないため使用しないこととする。その代わりに、B電子踏切とD電子踏切の信頼できる情報を使用することとした。そのため、縮退運転の制御区間はB踏切からD踏切までとなっている。

### 3.3.2 制御論理の開発

制御論理の基本方針を実現するために実際の制御論理の開発を行った。以下に技術的に検討した事柄を示す。こ

こでは、C踏切を中心に議論する。

#### (1) 列車位置管理方法

従来の踏切では、C電子踏切が把握している制御区間内の列車本数である「列車数カウンタ」で列車位置を管理し、警報制御を行っていた。ところが、制御子の不具合などで電子踏切が故障検知するとC電子踏切が管理している列車数カウンタが信頼できなくなる。そこで、C踏切の制御区間内の列車位置管理を行う列車数カウンタとは別に、B踏切からD踏切までの範囲で列車位置管理を行う列車数カウンタ（以下 近接列車数カウンタ）を定義した。「近接列車数カウンタ」は、B電子踏切とD電子踏切の列車数カウンタの変化に応じて列車数を増減させる。そして、C踏切自身が故障検知すると、近接列車数カウンタによる縮退運転へ移行する仕組みとした。このように近接列車数カウンタを用いて従来と同様の列車位置管理を行うことで安全を確保することができる。この概念図を図9に示す。



図9 縮退運転の概念図

#### (2) 近接電子踏切の論理の活用

近接電子踏切の情報を使用して踏切制御を行うが、情報の信頼性の保証のためだけに、新しい論理を開発することは望ましくない。そこで、フェールセーフ装置である近接電子踏切の論理を最大限活用することとした。具体的には、故障検知は近接電子踏切に任せ、ネットワーク踏切システムは近接電子踏切が故障していない時のみ縮退運転を行う。このことで、C踏切自身はB踏切とD踏切の故障判断を行う必要がなくなった。

#### (3) 安全性の確保

安全な踏切制御を行うためには、踏切の状態に応じた適切な制御方法の構築が必要になる。そこで、電子踏切が検知している踏切の状態に応じてどのような制御を行えば安全な制御を実現できるかという検討を行った。その結果、電子踏切には以下の2つの観点からのアプローチが必要であることがわかった。

①ネットワークによる情報取得

ネットワークによる近接電子踏切の情報取得に関する正常／異常

②当該踏切の状態

当該踏切（C踏切）の状態に関する正常／異常

電子踏切の状態としては、これらの組合せである4つの制御モードが必要である。以下に定義した4つの制御モードについて説明する。

(a) ネットワークモード

（①ネットワークによる情報取得：正常、②当該踏切：正常）

故障検知時に安全に縮退運転機能に切替えられるためには、通常時の制御を行っている場合でも常に近接踏切の情報を取得しておき、バックグラウンドで縮退運転のロジックを動かし続けることで安全を確保する。この状態をネットワークモードと定義した。

(b) 縮退モード

（①ネットワークによる情報取得：正常、②当該踏切：異常）

当該電子踏切が故障検知をして縮退運転に切替えた後の状態である。縮退運転機能としては、(1)に示したように「近接列車数カウンタ」によって従来と同様の列車位置管理を行うことで安全な踏切制御を行う。この状態を縮退モードと定義した。

(c) ローカルモード

（①ネットワークによる情報取得：異常、②当該踏切：正常）

通常時の制御を行っている場合、もし近接踏切の情報が取得できない、あるいは近接踏切の情報が信頼できない場合には縮退運転へ移行することはできない。従来機能に加え、誤った状態遷移をさせない仕組みを作ることで従来と同等の安全性を確保する。この状態をローカルモードとして定義した。

(d) 故障モード

（①ネットワークによる情報取得：異常、②当該踏切：異常）

(c) の状態で故障検知をした場合には、警報持続の状態に固定することによって安全な状態とする。この状態を故障モードと定義した。

以上のように安全性の確保のために4つのモードを定義し、それぞれの遷移条件を検討した。状態遷移図を図10に示す。

3.3.3 機能確認試験

実際にネットワーク対応電子踏切を3台試作し、本機能の確認を行った。

機能確認試験のシステム構成を図11に示し、その試験風景を図12に示す。試験構成は3台の電子踏切を並べ、それ

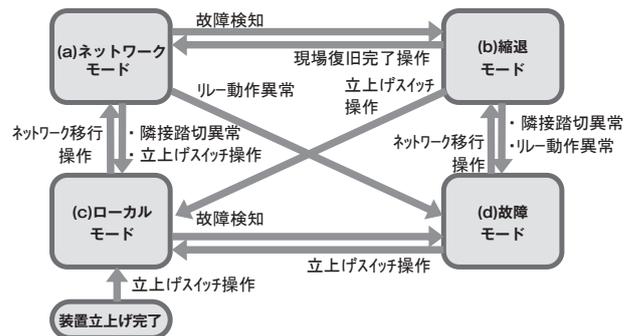


図10 状態遷移図

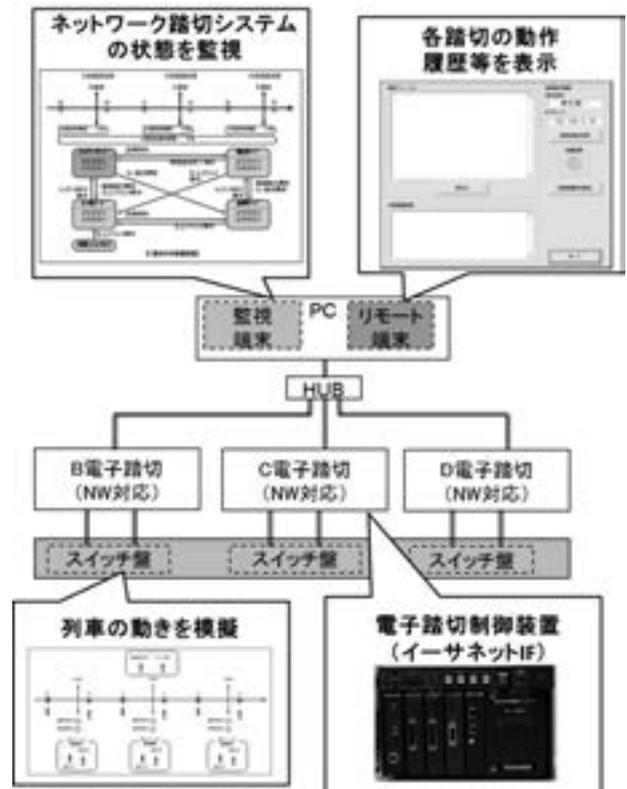


図11 機能確認試験のシステム構成図



図12 機能確認試験の試験風景

それをハブ経由のイーサネットに接続したものである。ハブに接続されているパソコンには、電子踏切の故障状態を遠隔で確認するために開発したりモート端末の機能に加え、列車数や状態遷移等、ネットワーク踏切システムの内部状態を確認するために開発した監視端末の機能を組み込んだ。さらに、現場の制御子の動作を模擬し、電子踏切の出力をLEDで確認するためにスイッチ盤を製作した。

入出力の試験、ネットワークの試験、近接列車数カウンタの試験、各状態における制御機能の試験等を行い、すべて機能仕様とおり問題なく動作をしていることが確認できた。

### 3.3.4 縮退運転の効果の試算

縮退運転機能の効果を示すため、東京近郊における駅中間踏切が多い区間を想定し、平日の朝7時台に縮退運転をした場合の効果を試算した。その結果を表2に示す。踏切が故障検知すると、通常の踏切は警報持続するため1時間における警報時間の割合は100%であるが、縮退運転を行うネットワーク踏切システムでは18.7%と現行踏切と比べて短い警報時間が実現できていることがわかる。

表2 1時間あたりの警報時間(分)

	通常時	下り線 故障検知時
従来の踏切	8.4 (14%)	60 (100%) ※
ネットワーク 踏切システム (本開発品)	8.4 (14%)	11.2 (18.7%)

※踏切が故障検知すると警報持続する

### 3.3.5 実用化へ向けた課題

本開発の中で、実用化へ向けた課題がいくつか存在することがわかったため、これらを紹介する。

#### (1) 機能に関する課題

- ・複雑な制御子の設置配列の場合の検討
- ・駅中間の2踏切以上が故障した場合の縮退運転実現方法の検討
- ・単線の仕様検討
- ・通信異常に関する故障仕様の整理

#### (2) 運用に関する課題

- ・縮退運転機能を使う場合、故障復旧時の在線確認範囲の拡大

#### (3) インフラに関する課題

- ・踏切ネットワークを構築するためのネットワークインフラの整備

#### (4) 安全性に関する課題

- ・実用時に必要な多角的な安全性の検討

## 4. おわりに

本開発では、踏切警報時間を短くするために、踏切正常時と踏切故障時の両方の観点から検討を行った。

踏切正常時の観点では、踏切定時間制御の導入促進のための開発をめざし、定時間制御論理をソフトウェア化し、電子踏切制御装置に組み込む「定時間制御機能付電子踏切制御装置の開発」を行った。開発品は、工場内試験およびモニタラン試験が完了し平成27年度に製品化される予定である。コストダウンおよび設計・施工・試験の簡素化が実現できたことで、今後もさらなる導入促進が期待される。

また踏切故障時の観点では、踏切が故障しても警報持続を防ぐ取組みとして、従来は独立した制御を行っていた踏切をネットワークで接続し、故障時でも近接踏切の情報を活用して、踏切制御を継続させる「ネットワーク踏切システムの開発」を行った。開発の過程にて、安全な制御を継続するためには4つの状態が必要であることがわかり、状態間の遷移に関する検討を行った。さらに、試作したネットワーク踏切システムをイーサネットに接続し、スイッチ盤で現場の制御子の動作を模擬することによって機能確認試験を行った。機能確認試験では列車数カウントや制御機能等の試験を行い、良好な結果が得られた。実用化へ向けた課題は残っているが、将来的に本ネットワーク踏切システムを活用することで故障による不要な長時間警報を抑制し、通行者の利便性を向上させることができると考えられる。

本開発の成果を用い、踏切による道路交通の遮断時間をより短くすることで、社会に貢献できると考えている。

#### 参考文献

- 1) 寺本学・宮口直己・熊坂一彦・石間礼次・福田和人, 定時間制御論理を内蔵した電子踏切制御装置の基礎開発: JR EAST Technical Review-No.43, pp33~38, 2013
- 2) 日本鉄道電気技術協会: 鉄道技術者のための信号概論「踏切保安装置」, 1995.
- 3) 日本鉄道電気技術協会: 鉄道と電気技術, VOL.10, No.11, pp.37~41, 1999.11.