

駅構内ネットワーク ワーク信号制御 システムの開発



国藤 隆*



西山 淳*



遠藤 優史*



才木 喜徳*



福井 聡*

近年、お客さまニーズの高度化、多様化が進み、柔軟な輸送サービスの実現が求められている。これらニーズを実現していく上では、信号システムについても従来以上の高い安全性、信頼性を保ちつつ、改良の容易なシステムへと変革する必要がある。そこで、機器室の制御論理部と現場信号機器との間を光ネットワークで結び、従来の電気制御にかえてデジタルデータにより制御を行うネットワーク信号制御システムの開発を段階的に行っている。本稿では、ネットワーク信号制御システムの開発構想、およびその基盤技術について解説する。また、駅構内ネットワーク信号制御システムの最終形態である駅構内論理装置の開発状況、および現地モニターラン試験の実施状況について報告する。

●キーワード：ネットワーク信号制御システム、駅構内論理装置、連動、ATS、構内踏切

1. はじめに

近年、お客さまニーズの高度化、多様化が進展している。特に、安全・正確な輸送を前提としつつ、速達性向上、列車本数の増加、直通運転の拡大など、より柔軟な輸送サービスが求められるようになってきている。ところで、このようなサービスの提供には信号制御システムの改良が不可欠であり、これまでも信号制御システムの継続的な改良を行ってきたところであるが、高い安全性・信頼性を保証する上での制約事項から、必ずしも施工、改良が柔軟に行えるシステム構造とはなっていないのが現状である。

そこで信号工事の施工性向上、すなわち工期短縮と品質向上の両立を目的として、機器室の論理装置の統合化・共通化、現場信号機器制御基盤の情報化・ネットワーク化によって、システム構造の簡素化、および変更に対する柔軟性向上を実現する、新しい信号制御システム（ネットワーク信号制御システム：以下、NW信号）の開発に取り組んでいる[□][□]。本稿では、NW信号の開発経緯、および駅構内の現場信号機器を集中制御する統合型論理制御装置（駅構内論理装置）の開発について述べる。具体的には、第2章でネットワーク信号制御システムの開発構想について、第3章では、ネットワーク信号制御システムの基本概念を、第4章では、構内論理装置の開発について述べ、第5章で全体のまとめについて述べる。

2. ネットワーク信号制御システムの開発構想

2.1 信号制御システムの課題

一般的な信号制御システムの構成を図1に示す。信号制御システムは、大きく、制御論理部と現場機器制御部とに分類されるが、それぞれの課題を以下に示す。

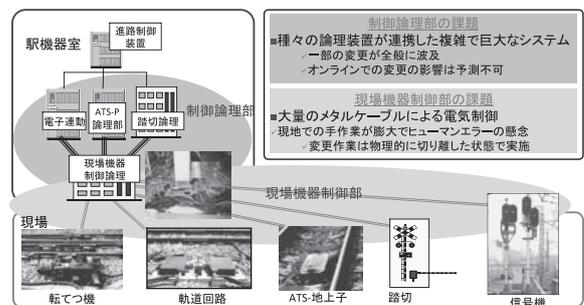


図1 信号制御システムの構成と課題

(1) 制御論理部の課題

制御論理部は連動、ATS、踏切などの制御機能単位でシステム化を進めてきたが、これら制御装置のアーキテクチャは統一されておらず、装置間の情報授受の手段もリレー接点から、イーサネットまで多岐にわたっている。このようなシステム構成に起因して以下の課題が存在する。

- a) 機能変更の影響範囲が広範に及ぶ
- b) 変更の影響範囲を明確化しづらい

(2) 現場機器制御部の課題

鋼線1本1本に電気を送り直接制御する方式であるため、配線量が膨大かつ手作業となることから以下の課題が存

在する。

- a) 試験点数が多く、かつ確認に時間を要する
- b) ヒューマンエラーに起因する輸送障害の懸念

2.2 ネットワーク信号制御システムの段階開発

これら課題の解決へのアプローチとして以下の4つのステップでシステム開発、および実用導入を進めている(図2)。

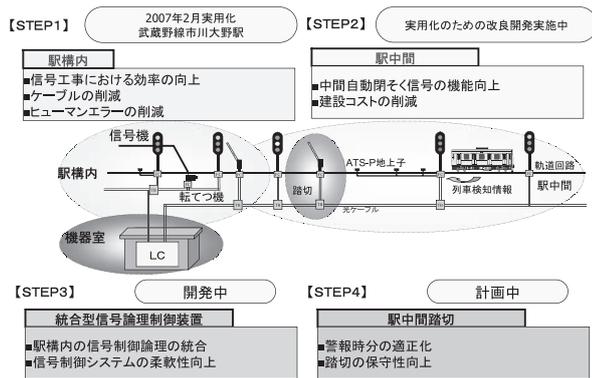


図2 NW信号の開発ステップ

(1) STEP1：駅構内ネットワークシステム

現場機器制御部の課題解決を主目的として、現行の電子連動装置の配下で、ネットワークを介した現場機器制御を行うシステムの開発を実施し、2007年2月武蔵野線市川大野駅に実用導入を行った。また、汎用IPネットワークを介した信号制御の安全性確保など、NW信号全体の基盤技術を確立した。

(2) STEP2：駅中間ネットワークシステム

Step1で確立した技術を駅中間信号機器制御に応用したシステムであり、駅中間信号設備の高稼働率・高信頼化を目的としている。

(3) STEP3：駅構内論理装置

制御論理部の課題解決を主目的として、論理装置ハー

ドウェアの統合化、共通化、また、信号制御論理の統合化を行っている。現在、連動機能、踏切制御機能のモニター試験を行っている。

(4) STEP4：駅中間踏切ネットワーク

駅中間ネットワーク信号制御システムを介して駅中間踏切を制御することで、警報時分の適正化、踏切の保守性向上を目的としている。本開発は計画段階である。

3. ネットワーク信号制御システムの基本概念

3.1 システム構成

図3にNW信号の構成事例として、駅構内ネットワーク信号制御システムの構成を示す。NW信号は大きく、論理制御装置、小型制御端末、光ネットワーク、遠隔監視制御システムから構成される。各部の役割を以下に示す。

(1) 論理制御装置 (LC : Logical Controller)

LCは現場信号機器の制御論理を集中処理し、ネットワークを介して現場機器と制御条件の授受を行う装置の総称である。NW信号では、施工性向上の観点から結線論理を廃し、すべての信号機器をソフトウェアで制御することを原則としている。また、制御論理の記述方式については、ソフトウェアの標準化による品質向上、およびデータ変更のみで、あらゆる箇所への展開を可能とする観点から、汎用電子連動装置などで採用され実績のある制御図表内蔵方式としている。LCの種類としては、301形電子連動装置配下のネットワーク制御対応電子端末として位置づけられるFCP、駅中間信号機器の制御を行う中間LC、連動装置、構内踏切制御も含めて駅構内の信号機器の制御を行う構内LCの3種類の開発を行っている。

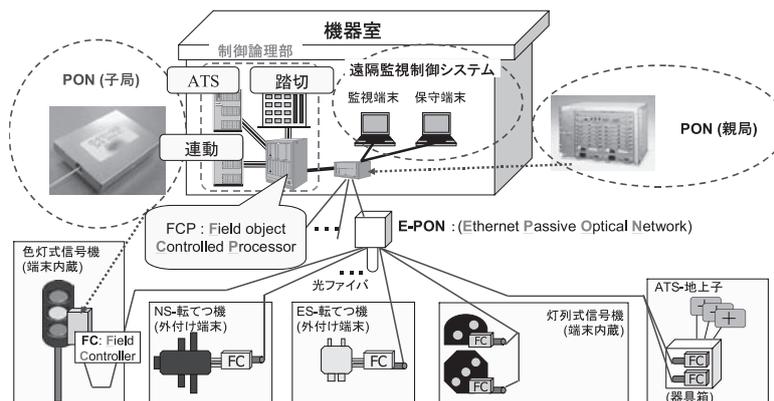


図3 NW信号の構成

(2) 小形制御端末 (FC : Field Controller)

FCは、LCからの制御データにもとづき信号機の点灯や転てつ機の転換などの電氣的制御を行うフェールセーフな端末装置である。施工の簡素化、雷害対策における優位性の観点からFCは信号機構に内蔵することを原則とし、1チップ・フェールセーフマイコン (FS-LSI)、高効率電源 (テスラコンバータ)、省電力LED電球など、小型・省電力化技術の開発、導入を行った。図4に信号機構に内蔵した小型制御端末の一例を示す。



図4 色灯式信号機構内蔵FC

(3) 光ネットワーク

光ネットワークシステムには、汎用IPネットワーク方式の一つで、FTTH (Fiber to the Home) で実績のあるE-PON (Ethernet Passive Optical Network) を採用している。汎用ネットワーク方式での伝送において、高い安全性を確保するための方式として、後述する保安情報伝送技術の開発を行った。

(4) 遠隔監視制御システム

NW信号においては、すべての装置、および信号機器の動作状態、制御電流値などの監視が可能である。これらの情報は、機器室ごとに設置されるデータベースサーバ

に集約され、リアルタイムに状態変化、閾値超過の監視が行われ異常時には警報通知が行われる。また、イントラネットで接続された、信号通信指令などの監視制御端末においても、すべての蓄積情報にアクセスでき、障害箇所の特定、障害要因の分析を容易なものとしている。その上、電子機器の一過性の障害に対する、遠隔リセット機能も提供しており障害からの早期復旧も期待できる。

3.2 NW 信号の基盤技術

NW信号の基盤技術であるデータによる信号機器の制御と、LCとFCとの間でデータを安全に授受するための保安情報伝送技術について以下に述べる。

3.2.1 データによる信号機器の制御

信号機器の制御方式を電圧制御からデータによる制御へと変革することで、伝送路の芯線数を増やすことなく制御条件に以下の特性を付加することが可能となり、安全性向上と多様な制御機能の実現に寄与する^[3]。

(1) 高信頼化

冗長符号の付加により、データの信頼性が向上し、システムの安全性が高まる。

(2) 抽象化

FCに対して「進行」、「停止」など、抽象的な制御情報を送信し、FCがその情報を解読し信号機の形状に見合った電気制御を行うことで現場信号機器の変更に対して柔軟に対応可能である。

(3) 多様化

制御情報に「保守」、「試験」など、システムの運用に関わる情報を付加することで、システム保守に関わるオペレーションをシステムでサポートすることが可能となる。

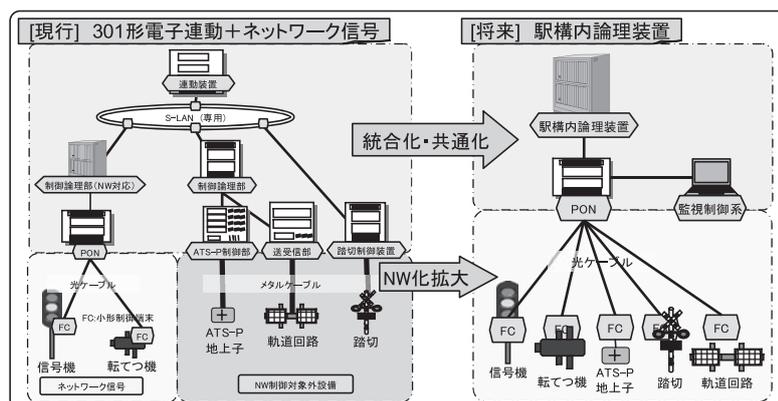


図5 構内LCへの移行

3.2.2 保安情報伝送技術

伝送を介した信号機器制御の安全性確保は、伝送路上で発生するあらゆる誤りを伝送路の両端のフェールセーフ装置で検出し、迅速な安全制御を行うことが基本であり、詳細の安全性要件は国際規格IEC-62280-1（鉄道用通信規格）に規定されている^[4]。本システムでは、汎用ネットワーク製品を適用することから、伝送プロトコル、媒体、機器に依存しない伝送誤り検出手法の確立が必要であった。そこで、FTA（Fault Tree Analysis）を実施した結果、発生し得る誤りは、以下の3つのタイプに集約されることとなり、伝送データに適切な誤り検出情報を含めることで、それぞれを確実に検知可能な方式を確立した^{[5][6][7]}。

- a) 情報誤り：データの一部が欠ける、あるいは置換される誤りで、CRC検査、反転符号検査により検出する。
- b) 配送誤り：宛先とは異なる装置に伝送される誤りであり、電文に含まれる装置固有のIDを照合することで検出する。
- c) 時間誤り：データの到着が遅延、あるいは順序が逆転する誤りで、通番検査、タイムアウト検査により検出する。

4. 駅構内論理装置（構内LC）の開発

4.1 開発の概要

駅構内ネットワーク信号制御システム（Step.1）の開発・実用化により、施工性向上、試験の簡素化に一定の効果を得た。一方で、ATS-P地上子、軌道回路など、ネットワーク制御の対象となっていない設備が多数残存していること、制御論理部は、連動装置、ATS-Pなど、機能別にシステム化が行われてきた経緯より、つぎはぎのシステム構成となっていることから十分な施工性向上効果が得られているとはいいがたい。この課題を解決するため、ネットワーク信号制御システムの開発の第3ステップとして、現在機能ごとに分離されている機器室の論理制御装置を統合することによるシステム構成の簡素化、およびネットワークによる制御範囲の拡大を目的として構内LCの開発を行っている（図5）^[8]。

構内LCの開発項目を以下に示す。また、構内LCの開発スケジュールを図6に示す。

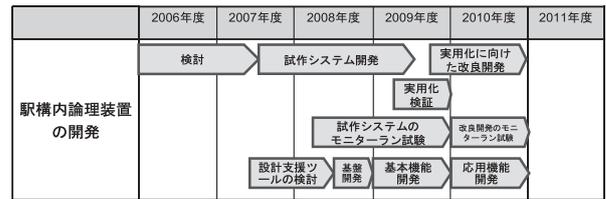


図6 構内LCの開発スケジュール

(1) システム構成の統合化・共通化

従来機能別に設けられていた論理制御装置を、1組の高信頼、かつ高性能なハードウェアに統合する。これにより、従来信頼性を確保する上でボトルネックとなっていた装置間インタフェースが削減される。また、あわせて多重系装置相互間の構成制御機能が簡素化され、完全な撲滅が困難であった、構成制御に関わる不都合を解消することができる。結果としてトータルシステムとしての信頼性向上を図る。

(2) 制御論理の再構築

連動、ATS、踏切など、従来別々に構築されていた制御論理を共通の基盤上で再構築し、データ改修、機能改修時の影響範囲の局所化、明確化が可能なソフトウェア構造とすることで、改修容易性を向上させる。

(3) 設計の一元化

各制御論理、NW、監視系定数の設計を共通のデータをもとに一元化して行うことを可能とし、設計の手間を削減するとともに、設計品質を向上させる。

4.2 システム構成の統合化・共通化

4.2.1 システム構成の考え方

構内論理装置NW信号システムの周辺装置を含めた全体構成を図7に示す。本システムは、大きく構内LC論理装置ブロック、構内LC小形制御端末ブロック、統合化監視制御系ブロック、他システムIFブロックの4つのブロックに分けられる。各ブロック間の接続IF、および各ブロック内の装置間の接続IFはすべてイーサネットIF（IP接続）に統一している。それぞれのブロックは異なるネットワークセグメントを割り当てることにより、ブロック間で不要なデータが授受されないようコントロールしている。各ブロックの構成を以下に示す。

(1) 構内LC論理装置ブロック

構内論理装置の固定系（常時接続、2重系）、可搬系（必要時接続、1重系）から構成され、駅構内の制御論理を一

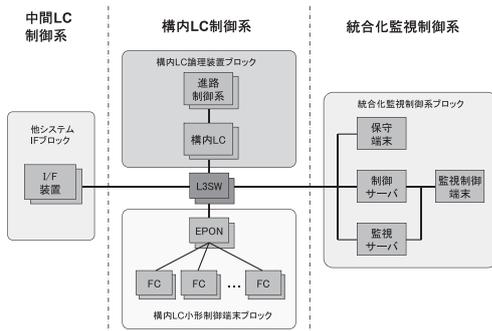


図7 構内LCと周辺装置のシステム構成

括して処理する。

(2) 構内LC小形制御端末ブロック

LC-FC間の制御/表示電文、FC-統合化監視系間の監視制御電文を伝送するPONネットワーク、および信号機構内に内蔵されLCの制御電文にもとづき現場信号機器の制御を行うFCから構成される。

(3) 統合化監視制御系ブロック

本システム、および今までに開発された構内NW信号、駅中間NW信号の遠隔監視・保守機能を統合した遠隔監視制御システムである。システムなどの動作状態を蓄積する遠隔監視サーバ、システム機器への遠隔保守要求を処理する遠隔制御サーバ、マンマシンIFである遠隔監視制御端末から構成される。

(4) 他システムIFブロック

駅中間NW信号などの他NW信号システム、TC型列車接近警報装置などの他システムへのIFを提供する。IFはすべてイーサネット上で統一されており、イーサネットIFを持たない従来システムの接続については、IF変換を行うアダプタを個別に開発することで対応する。

4.3 制御論理の再構築

現状の信号制御システムの運用においては、構内改良工事など、システムに変更を加える場合については、安全の観点より、列車運行のみならず、システム全体の運用を停止させて行うことが求められる。そのため作業時間の確保が非常に困難であり、さらに、現行システムから改良後のシステムへと切り替える時間、また、試験終了後に現行システムに戻し確認を行うための時間が必要で非常にオーバーヘッドが多く、信号システムの改良工事には長い期間を必要としている。列車運行とシステム変更を共存させた場合の安全確保が困難であることの要因

の一つに、変更の影響範囲が広範にわたり、かつ明確でないことがあげられる。電子式の制御システムにおいては、制御論理がソフトウェア化されブラックボックスとなっているため、変更時に工場内で行う試験範囲の明確化が、重要な課題となっている。システム変更時の影響範囲が広範にわたり明確にできない原因は、信号機器どうしを連鎖させるための制御条件授受のインターフェースが多岐にわたっているという構造的な問題が存在する。

そこで構内LCでは、それを解消することで、システム変更時の影響範囲の極小化、明確化を図る。そのための手法として、汎用電子連動装置の軌道回路予約の概念を発展させ、信号機器間の条件授受のインターフェースを単一化する区分進路という概念を提案し、開発に取り組んでいる。以下に制御論理ごとの考え方を示す。

4.3.1 連動論理

連動装置の機能は、信号機器相互間の鎖錠関係を制御するスタティックな機能と、列車の移動に伴って、進路上の転てつ機の鎖錠/解錠を行う、信号機の現示を制御するダイナミックな機能との2つに分類できる。汎用電子連動装置では、前者を軌道回路予約機能、後者を軌道回路追跡機能として、軌道回路を制御条件授受のインターフェースとするよう集約化が図られている^[9]。しかし、転てつ機の競合チェックなどの例外が残っており、完全な単一インターフェースは実現できていない。

構内LCでは、これらの予約状態、追跡状態に加えて、転てつ機の開通状態、信号機の現示状態など、すべての信号制御条件を統合管理し、信号機器に対して一元的に条件授受を行うインターフェースとして、区分進路という概念を提案した(図8)。

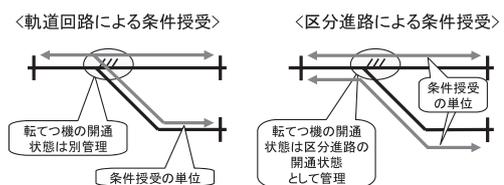


図8 区分進路の概念

構内LCでは、汎用電子連動装置で軌道回路に対して予約を行うのと同様に、軌道回路に含まれる区分進路に対して予約を行い、区分進路単位で競合チェックを行う。区分進路は転てつ機の開通状態を内包していることから、

同時に転てつ機に対する競合チェックも行われることとなる。さらに、汎用電子連動装置では進路の発点、着点など、予約の対象外であった軌道回路に含まれる区分進路に対しても予約を行うことにより、汎用電子連動装置では例外処理を行っていた競合チェックを、完全に予約により行っている。

4.3.2 ATS 制御論理

ATS地上子の制御については、主体となる信号機の現示に従い、停止現示のときに警報、進行を指示する現示のときに警報を解除することが原則である。しかしながら、地上子の設置位置などによる地形的制約、列車・車両の運用上の制約によって原則に依らない制御を行う、いわゆる特殊条件と呼ばれる制御パターンが存在する。従来の信号システムにおいては、特殊条件は設計者によってすべて抽出し、制御図表に記載する必要があった。そのため設計者の作業量・負担が増大するとともに、設計ミスによる輸送障害を発生させる可能性もある。

構内LCでは、地上子が設置されている区分進路に対する予約にもとづき、適用する特殊条件の種別をアルゴリズムで決定する方式を考案することで、制御論理設計の簡素化、および誤り防止を実現している。具体的には、設計データとして地上子が所属する区分進路、主体信号機、特殊条件の有無が指定される。構内LCは、地上子が所属する区分進路に設定されている予約を抽出し、それにもとづき適切な特殊条件を決定し、対応する制御シーケンス（状態遷移パターン）によりATS地上子の制御（警報/解除）を行う。図9に特殊条件として傍踏を指定した

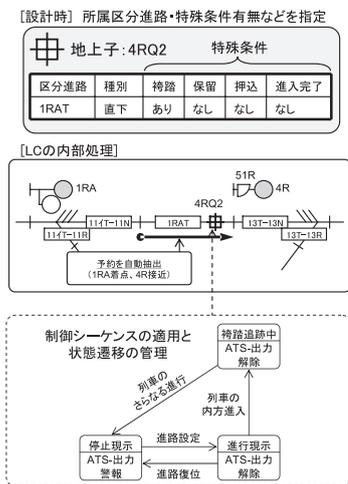


図9 傍踏指定時のATS地上子制御

場合の事例を示す。

4.3.3 踏切制御論理

駅構内の踏切制御は線路配線、信号機配置などの地形条件、分割・併合、構内入換などの運用条件により多様な制御シーケンスの実現が求められる。また、踏切の制御シーケンスは警報進路単位で定義されるが、特に大駅構内においては1つの警報進路に関わる制御条件の数と種類が非常に多く、設計、試験に多大な労力を要しているのが現状である。特に、各条件の成立順序の不正があっても踏切が安全側に動作することを検証する試験が必須であるが、条件数の増大がテストケース数の爆発的増大に直結し、事実上全条件の検査は不可能であることが深刻な課題となっている。

そこで、構内LCでは警報進路を区分進路単位（警報区分進路と呼ぶ）に細分化し、個々の警報区分進路単位で警報状態を判断した結果を警報進路で集約する、新しい制御方式を提案している（図10）。この方式では、警報区分進路ごとの条件成立の順序性を考慮する必要がなく、かつ、警報区分進路における条件数が少ないため、検証試験のテストケースはそれほど増大しない。その結果、トータルとしての試験の労力を減らすことができる。

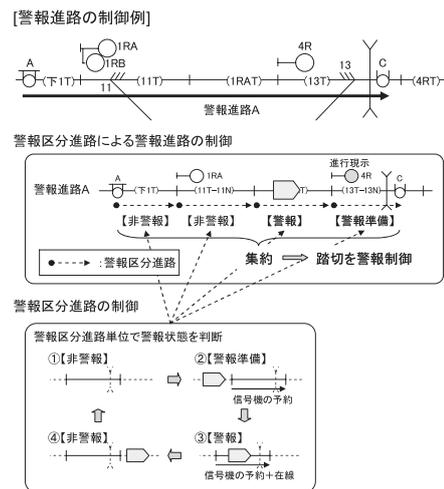


図10 踏切制御の概要

4.4 設計の一元化

信号制御システムの構築にあたっては、設計者が連動・踏切・ATSなど、機能ごとに制御図表を作成し、これらの図表により制御論理部の各装置を製作している。これらの図表の種類は多岐にわたるうえ、作成には運転取扱

の規程、図表の詳細な記載方法を熟知していることが求められ、作成した図表の整合性チェックは人の経験や注意力に依存しているのが現状である。このため、信号制御システムの制御図表の作成・整合性チェックに多くの時間を要するだけでなく、作成ミスに起因する輸送障害を発生させる可能性がある。

そこで、各設計段階で作成する図表のデータを一元管理し、その整合性を自動チェックすることで、信号制御システムの設計業務の負担を軽減させるための開発に取り組んでいる。

設計者は、設計段階ごとに支援ツールを用いて、対話形式で設計に必要なデータを入力する。入力したデータの整合性チェックはツールにより自動で行い、一元化された設計データとして出力する。設計段階が進むごとにデータが蓄積され、設計が完了すると信号制御システムに必要な設計データが網羅される。

この一元化された設計データから構内LC、FC、NW機器、監視装置で必要となるデータを自動抽出する。このように信号制御システムの設計支援機能、整合性チェック機能、データの自動抽出機能を開発することで、設計作業の簡素化と設計品質の向上をめざす。また、設計者がCADにより作成している図表類を、一元化された設計データを元にして作成する機能についても検討を行っている(図11)。

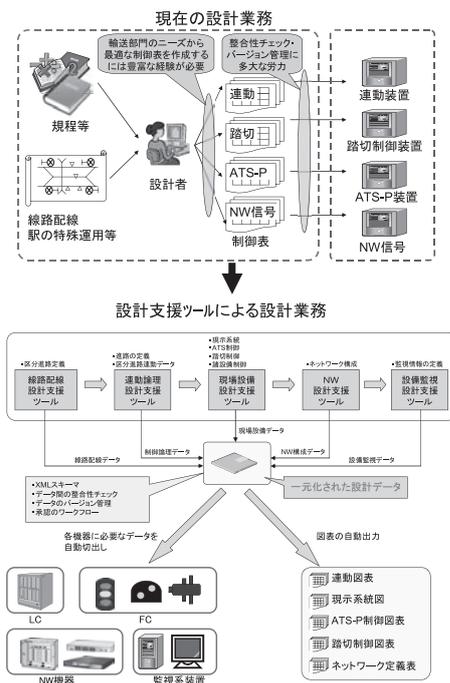


図11 設計支援ツールでのデータの流れ

4.5 モニターラン試験

構内LCの制御論理においては、区分進路をはじめとした新しい概念を導入している。このため、既存の連動装置と構内LCの制御タイミングを比較することで、今回開発した制御論理の妥当性を検証するためのモニターラン試験を行うこととした。

4.5.1 モニターラン試験による検証方法

モニターラン試験を実施する駅の選定にあたっては、比較のための制御条件取得が容易である継電連動の駅であることを前提とし、以下の条件を満たす駅を試験の候補とした。

- a) 信号設備種別が多数
- b) 構内踏切がある
- c) 構内入換作業が頻繁に行われる
- d) 100進路前後の中規模構内である

これらの条件を満たす駅として、篠ノ井線南松本駅、および東北本線岩沼駅を選定した。一例として、南松本駅モニターラン試験の対象設備を表1に示す。

モニターラン試験における検証は、開始当初は連動機能のみであったが、信号制御、ATS、踏切制御の各機能について、順次追加を行ってきており、今後も諸設備制御などを追加する予定である。

表1 モニターラン試験の対象設備

モニターラン対象設備		南松本
進路	場内・出発	16 進路
	入換信号機	なし
	入換標識	76 進路
	照査てこ	4 進路
踏切	構内踏切	1 箇所
ATS	地上子	16 個

構内LCで進路設定・信号制御を行うためには、継電連動装置の進路設定条件、列車在線情報を構内LC側へ伝達する必要がある。また、継電連動装置と構内LCの制御タイミングを比較するためには、継電連動側の信号機、踏切、ATSなどの制御結果を取得する必要がある。今回のモニターラン試験では、これらの条件をリレー接点(接点に余裕のない箇所は電流センサ)により取得している(表2)。

表2 既設連動条件の取込点数

既設連動条件の取込	南松本
リレー接点	225 接点
電流センサ	86 箇所

モニターラン試験による検証は、構内LCで開発した制御論理による結果と継電連動装置の制御結果をそれぞれ比較装置に取り込み、制御出力が変化した時刻を比較することで実現している（図12、図13）。

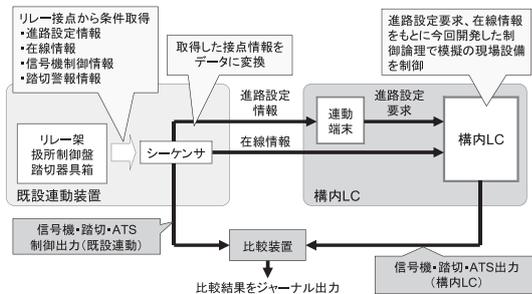


図12 モニターラン試験の概念

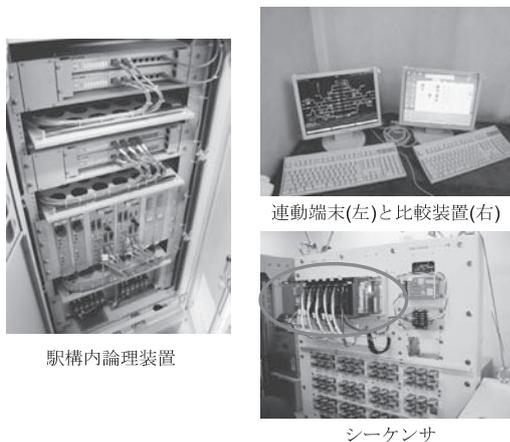


図13 モニターラン試験の構成機器

4.5.2 モニターラン試験の実施状況

モニターラン試験は2008年6月より継続して実施している。南松本駅における試験開始から2009年6月までの課題発生状況を図14に示す。試験開始当初は不具合などの発

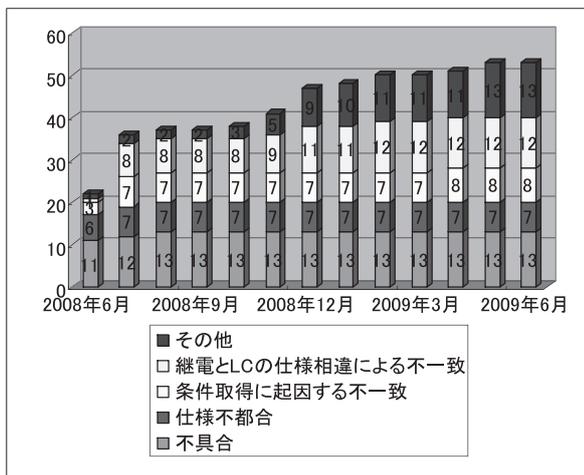


図14 モニターラン試験における課題発生状況

生もあったが、対策後は構内LCの制御論理に起因する新たな不具合の発生はない状況である。しかしながら、モニターラン試験における比較対象である継電連動装置の動作は、信号扱者が取り扱うことを前提とした制御機能であり、自動進路制御を前提とした電子連動装置の仕様を基本としている構内LCとの間では、いくつかの相違点が存在する。これら相違点について、構内LCとして、どちらを標準とするかは今後の検討課題である。

5. おわりに

本稿では、よりよいお客さまサービスの早期実現を目的として、従来以上の安全性・信頼性を保ちつつ、施工性の向上、構内改良工事に対する柔軟性の向上を実現するNW信号の段階的開発、および駅構内ネットワーク信号制御システムの最終形である構内LCの開発目的、および開発内容について述べた。構内LCについては、開発が進行中であり、現時点では、連動、信号制御、ATS制御、踏切制御機能のモニターラン試験を行っている状況である。試作機能については、良好な試験結果が得られていることから、モニターランの結果などをふまえて、実用化開発を行っていく予定である。また、設計の一元化についても実用化のための開発を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 国藤, 樋浦; ネットワーク信号制御システムの開発について, JREA, Vol.48, No.5, pp.30839-30842 (2005)
- 2) 国藤, 加藤, 服部, 平野, 樋浦; ネットワーク信号制御システムの開発, JR EAST Technical Review, No12, pp.32-38 (2005)
- 3) 菅原, 国藤, 服部, 平野, 福田, 松本; ネットワーク信号制御システムにおけるアシュアランス技術, 電子情報通信学会, アシュアランス研究会, 2005-11
- 4) IEC62280-1 RAILWAY APPLICATIONS-COMMUNICATION, SIGNALING AND PROCESSING SYSTEMS, 2002, IEC
- 5) 国藤, 平野, 菅原, 渡部, 江田; 「IPネットワークを基盤とした保安制御システムの安全性・信頼性設計」, 信頼性学会秋季シンポジウム, 2005-10
- 6) 国藤, 菅原, 岡田, 二瓶, 早乙女; ネットワーク信号制御システムにおける保安情報伝送の安全性の考え方, 日本信頼性学会第19回秋季信頼性シンポジウム, 2006-10
- 7) 国藤, 平野, 西山, 松本; 「汎用IPネットワークを活用した信号制御システムの安全性について」, 電子情報通信学会, 安全性研究会, 2007-10
- 8) 西山, 岡田; 駅構内論理装置の開発, JR EAST Technical Review, No.20, pp.35-37, 2007
- 9) 北原文夫, 宮崎孝俊, 渡辺敬一郎; 東京圏輸送管理システムにおける新電子連動装置, 鉄道と電気技術, Vol.1.5, No1, pp.25-30 (1994)