

列車運行向け情報統合ネットワークの提案

中村 一城* 川崎 邦弘**
竹内 恵一* 流王 智子*

The Proposal of the Information Combination Network for Train Operation

Kazuki NAKAMURA Kunihiro KAWASAKI
Keiichi TAKEUCHI Satoko RYUO

The informations of different area in the railway system are not sufficiently shared among each other. Therefore, we propose to realize a safer and more flexible transportation service by sharing the informations relevant to railway operation with the use of ICT. In this paper, firstly the results of the survey of the current information flows in the railway system are presented. After that, the efforts to realize the combination network for sharing the various information related to the railway operation, including the concept of new communication protocols for railway operations and study of the cyber security are presented.

キーワード：列車運行，情報統合，ネットワーク，プロトコル，セキュリティ

1. はじめに

鉄道システム内には運行・保守・旅客サービス等，様々な用途のために多くの情報が流れている。従来の鉄道システムでは，主として系統毎に情報を収集・伝送する仕組みを構築しており，情報の様式や形態も異なっているため，系統間での情報共有が難しく，これらの情報の運行制御への活用には課題がある。一方，近年の ICT の急速な発展・普及に伴い，最新の無線通信技術・ネットワーク技術の活用によって新しい運行制御方式を実現できる可能性が高まっている¹⁾。

列車内での各種センサーからの検知情報や列車制御情報などの安全に関わる情報と保守情報や旅客向けサービス情報を車内及び車上・地上間で伝送するための情報配信技術の検討がこれまでも行われているが，これらは車内ネットワークと地上ネットワークを構成し，両ネットワーク間を無線で伝送する手法であり，鉄道システム全体を一つのネットワークとして構成するものではなかった。そこで本稿では，列車の運行制御に関わる情報を系統間で共有できる統合的な情報ネットワークのあり方を提案した。

2. 鉄道システムにおける情報の流れ

列車の運行制御に関わる情報を系統間で共有できる統合的な情報ネットワークを検討するためには，現状の鉄

道システム内を流れている情報について把握する必要がある。そこで，現状の鉄道システム内を流れている情報の調査を実施した。

2.1 調査方法

2.1.1 分野の分類

現状の鉄道システムにおいては，主として系統毎に情報の収集・伝送するシステム構成となっている。そこで，現状の系統等を考慮しながら「車両」，「土木」，「保線」，「駅・営業」，「電力」，「信号」，「通信」，「運転」の8分野に分類して，情報の流れ調査することとした。

2.1.2 情報の特性を示す指標

情報ネットワークを検討する際には，ネットワーク上を流れる情報の特性を把握する必要がある。そこで，情報の特性を表す指標（分類・値など）を検討し，それらの指標に基づく調査項目を定めた。主な調査項目を表1に示す。

2.2 調査結果

前節に示した方法で調査した結果，全分野合計で約350種類（分野ごとに約40～90種類）の情報の流れがあり，鉄道運行用の情報の発信元と受信先，情報の形態，情報の量などを定量的に把握することができた。さらに，情報の流れとその傾向から，現状の鉄道システムにおける情報の流れの課題を抽出するために，調査した情報の流れを矢印で示すマップを作成した。

鉄道における情報の流れの概要マップを図1に示す。また，異常時の鉄道における情報の流れの概要マップを

* 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

** 信号・情報技術研究部

特集：信号通信技術

表 1 情報の特性を表す指標に基づく調査項目

項目	分類・値など
情報の発信点・受信点	情報の発信・受信場所（指令、沿線、駅、車両など）と人か装置かの区別
情報の蓄積の有無、場所	情報が蓄積されているか否か、蓄積されている場所
情報の用途	運輸、保安制御、車両制御、指令、保全、営業、課金など
情報の形態	色、音、音声、ON/OFF、画像、文字、段階評価、数値など
時間軸上の特性	発生・使用のタイミング、頻度、有効期限、許容できる遅れ時間など
情報の量	データ量、紙の量、音の長さ・大きさ、色・画像の種類など
情報の信頼性	情報を伝える際に求められる到達率やS/Nなどの品質

表 2 矢印の線種

矢印の線種	分類
●————→	実線
●-----→	破線
●-.-.-.-→	一点鎖線
●-.-.-.-→	点線（角）
	分類
	運転・制御（車両、信号系）
	運行（ダイヤ、メンテナンス情報等）
	営業・サービス
	データベース、共通項目

表 3 矢印の色と情報の形態との関係

矢印の色	情報の形態
赤	色・音・光の ON/OFF（有無）
橙	文字列、数値
茶	評価値（1/2/3/…、A/B/C/…など）
青	音声
緑	画像、図形、図面
紫	アナログ信号（電圧、電流など）

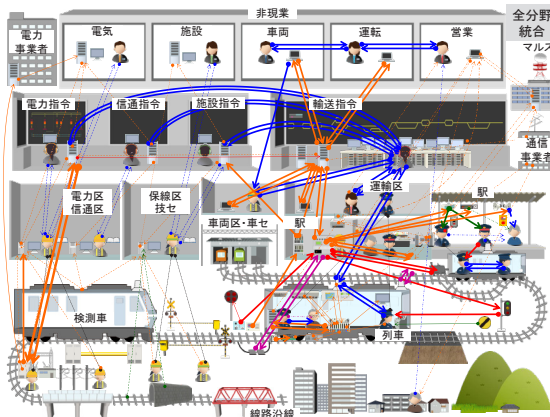
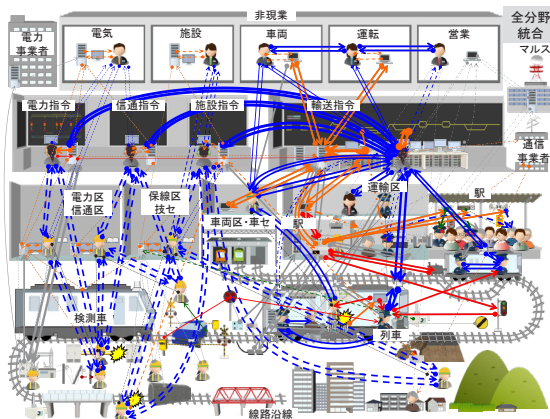
図 1 鉄道における情報の流れの概要マップ
（平常時）図 2 鉄道における情報の流の概要マップ
（異常時）

図 2 に示す。

各業務分野内の情報の流れ、業務分野間の情報の流れ、非現業・指令と現業（車両、駅、現業区、沿線）の情報の流れの傾向を把握するため、マップの縦方向は上方向が非現業、下方向が現業となるように配置し、マップの横方向は業務分野毎に並ぶように配置した。この配置のもとで情報の流れの矢印を示すことで、矢印が縦方向の

場合は非現業と現業の情報の流れ、横方向は業務分野間での情報の流れを業務分野毎にマップとして作成した。

また、各情報の特性をマップに反映するため、情報の流れを示す矢印は下記の通り分類し、それぞれの矢印の線種・太さ・色によって情報の特性を表すこととした。

(a) 矢印の線種

矢印の線種は情報の用途を示すこととし、分類は表 2 の通りとした。

(b) 矢印の太さ

情報量が多いものや情報が流れる頻度が高いものは矢印を太くすることとし、矢印の太さで 3 段階に分類した。

(c) 矢印の色

矢印の色は情報の形態を表すものとし、表 3 のように定義した。赤や橙、茶などの暖色系は数値や ON/OFF などデジタル伝送に適した形態を、また青・緑・紫などの寒色系は音声や電圧といったアナログ量での伝送形態に分類した。

2.3 現状の鉄道システムにおける情報の流れの課題

調査結果を基に、現状の鉄道システム内における情報の流れに関する課題を抽出した。

2.3.1 情報共有

いずれの業務分野においても、情報の流れは業務分野内での発信・受信が中心であることが分かった。図 1 で示した鉄道における情報の流れの概要マップ（平常時）においては、イラストの上部（非現業や指令）とイラスト下部（現業区、列車、駅、線路沿線等）を結ぶ「縦方向」の情報の流れ（矢印）が大半を占めている。また、各業務分野を横断して流れる「横方向」の情報は、イラストの上部（非現業や指令）に集中しており、イラストの下部では少なくなっている。このことから、現状の鉄道システムにおいては、イラスト下部に位置している現業区、列車、駅、線路沿線等の現業設備においては、業務分野間での情報の共有が難しい構成になっていることがわかる。

図 2 で示した異常時の鉄道における情報の流れの概要

マップにおいても、各業務分野の情報は指令経由で他の業務分野に伝送される流れに大きな変化はない。このため、情報を必要とする全ての箇所が、リアルタイムで最新の情報を得ることが難しい構成となっている。

2.3.2 情報の形態

鉄道システム内を流れる情報の形態は、情報毎に異なっているが、紙面等により情報の伝達や蓄積する情報が存在している。紙面の情報をリアルタイムに取得・共有するのは難しい場合があり、最新と認識していた情報が実際には古い情報であったという状況も想定される。また、図2に示すとおり、異常時の情報の多くは音声によって伝送されているのも特徴的である。

3. 列車運行向け統合情報ネットワークの検討

第2章に示した調査結果より、現状の鉄道システムにおいて情報を共有するためには、情報の形態、情報のフォーマット等に課題があることが分かった。今後、車両内や沿線の状況を指令所もしくは運転台で把握するための画像情報の伝送に対するニーズの増加、あるいはセンサーネットワークの導入に伴うセンシングデータの発信箇所の増加等が見込まれることを考慮すると、列車運行向けの統合ネットワークは単なる「伝送路」としてだけの役割だけでなく、情報を共有・分配する機能を持たせた賢いネットワークとする必要がある。そこで、現状の課題と今後のニーズの変化を考慮し、列車の運行制御に関わる情報を業務分野間で共有できる新しい統合情報ネットワークのあり方を検討した。

3.1 基本的な考え方と前提条件

新たに提案する統合情報ネットワークでは、アプリケーションシステムが、送受信間の伝送経路や伝送媒体を考慮することなく情報を伝送可能とすることを前提としている。その実現のため、ネットワークに以下の機能を持たせることとした。

- ① 伝送フォーマット変換
- ② 通番確認、送達確認
- ③ 伝送媒体の選択
- ④ 再送・伝送エラー処理
- ⑤ 情報の蓄積
- ⑥ 伝送媒体の状態把握
- ⑦ 経路テーブルの交換

ネットワークに上記の機能を持たせるため、アプリケーションシステムと統合情報ネットワークとの境界点に、情報の伝送を制御する上記の機能を実装したルータを設置することとした。統合情報ネットワークの基本的な考え方を図3に示す。ここで、送信者はデータ様式に従った情報が送信できること、受信者はこのデータ様

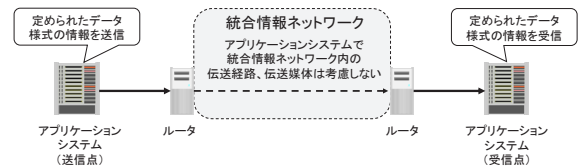


図3 統合情報ネットワークの基本的な考え方

式の情報が受信できることを考慮したアプリケーションシステムを構築し、統合情報ネットワークに接続することでより効率的な情報の伝送が可能となる。また、現在は、情報通信基盤を支える重要な技術の一つであるインターネット・プロトコル技術を利用したIPネットワーク²⁾が普及しており、鉄道分野でも社内のコンピュータネットワークの他、音声電話網、旅客案内・サービスなど様々なシステムにIPネットワークが用いられるようになってきている^{3)~9)}。そこで、提案する統合情報ネットワークもIPネットワークを利用することを前提とし、後述するRITPのフレームフォーマットへの変換機能をルータに持たせることで、既存のネットワークを統合情報ネットワークとすることが可能である。

3.2 通信プロトコルの検討

「通信プロトコル」とは、伝送する情報の形式（フレームフォーマット）と、伝送するための機能や動作を定義したものである。現状の鉄道システムでは、情報ごとに情報の様式や伝送方法を定めているため情報共有が難しいという課題があった。そこで、今回新たに提案する統合情報ネットワークでは、ネットワーク上を流れるデータの様式を定めることとした。

前節で設定した前提条件に基づいて、アプリケーションとTCP/IP・UDP/IPとの間で情報伝送を制御するための機能とフレームフォーマットを検討し、鉄道向けの統合情報ネットワーク用プロトコルRITP（Railway Information Transfer Protocol）として定義した。本節では、各業務系統間で情報共有を行うためのフレームフォーマットとRITPの機能について述べる。

3.2.1 フレームフォーマット

RITPにおけるフレームフォーマットの案を図4に示す。図4のフォーマットは、IPパケットのフレームフォーマットを基に、伝送する情報の種類を表すフィールドと、伝送に対する信頼性の要求を指定するフィールドを付加した構成となっている。信頼性の要求については、許容できるデータの損失率と遅延時間を、表4、5に示すようにそれぞれ5つのクラスに分けて定義し、情報の種類・用途に応じて損失率と遅延時間を個別に指定できるようにすることを想定している。

発信元 IP	宛先 IP	情報の 種類・用途	伝送の 信頼性	発信 時刻	データ 量	ユーザーデータ	チェック 符号
4 byte	4 byte	2 byte	2 byte	4 byte	4 byte	(最大300M byte)	4 byte

図4 フレームフォーマット案

表4 許容損失率のクラス分けの例

要求品質 のクラス	許容損失率
A	$\leq 10^{-3}$
B	$\leq 10^{-2}$
C	$\leq 10^{-1}$
D	< 0.5
E	< 1

表5 許容遅延のクラス分けの例

要求品質 のクラス	許容遅延
A	≤ 100 ms
B	≤ 500 ms
C	≤ 1 sec
D	≤ 1 min
E	≤ 10 min

3.2.2 統合プロトコルの機能

RITP では、前節で述べたフレームフォーマットに、伝送制御のための情報と冗長化符号を添付し、要求された品質が確保できるよう、RITP ルータ間の伝送経路を選択して情報を伝送する。

RITP ルータは前述した①～⑦の機能を持っており、このうち、②、④、⑦の機能は一般的なルータと同様の機能であるが、①、③、⑤、⑥の機能は、一般的な QoS 制御と呼ばれる技術を基に鉄道向けにカスタマイズしたものである。特に、⑥の機能によって RITP ルータ間での伝送路の状態を各 RITP ルータが把握し、③の機能によって伝送媒体を選択する動作と、⑤の機能によって伝送する情報を一時的に RITP ルータ内に蓄積し、端末からの要求に合致する情報を提供する動作、の2つの動作が可能となっている点が特徴である。上記の機能を、ISO/IEC 7498 (ITU-T 勧告 X.200, JIS X5003) で規定されている「OSI 参照モデル」に準じて表現したものを図5に示す。これらの機能により、図6に示すように、従来のような1対1通信だけでなく、複数の伝送路を同時に利用して信頼性を上げる、あるいは一時的に蓄積されているデータを別系統の端末の要求に応じて提供する、といったことが可能となる。

現在、⑥の伝送媒体の状態把握機能の実現に向けた検

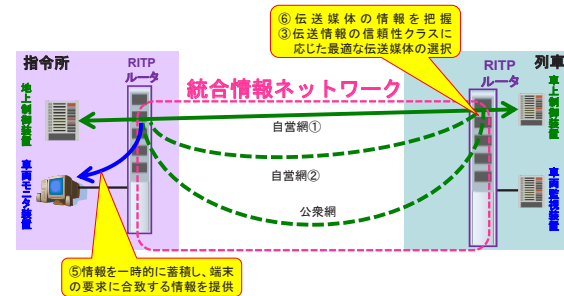


図6 提案するプロトコル（RITP）の動作例

討を行っている。まず、RITP ルータが定期的に伝送媒体ごとにコマンドを送信して Round Trip Time (RTT) や無線部分の RSSI を計測し、その結果を RITP ルータ内部に保持しているテーブルに記録していくことで、複数の伝送媒体の最新の状態を把握し、伝送情報の信頼性レベルに応じて伝送媒体を選択することができると考えている。

3.3 シミュレーションによる RITP 機能の確認

前節で述べた鉄道向け統合情報ネットワーク用のプロトコル RITP の機能を確認するため、列車運行制御システム用の小規模なネットワークをモデル化し、ネットワークシミュレータによるシミュレーションを試行した。本節では、シミュレーション条件と結果を示す。

3.3.1 シミュレーション条件

鉄道総研では、情報ネットワークを活用した新しい列車運行制御方式を検討しており、運行に係るあらゆる情報を地上の制御装置に集約するような情報ネットワークを想定している（図7）。想定している情報ネットワークの基本構成を基に、地上制御装置、車上制御装置から構成される制御用のネットワークと、センサーネットワークを組み合わせた小規模なシミュレーションモデルを作成した。図8はネットワークシミュレータのスクリーンショットを表しており、この画面上でシミュレーションのやりとりを確認することができる。このモデルは、2台の制御装置、センサー、状態監視装置の各ノードを所内試験線と試験車に配置し、RITP の機能の一部（情報の種類と伝送路の状態に応じて伝送経路を切

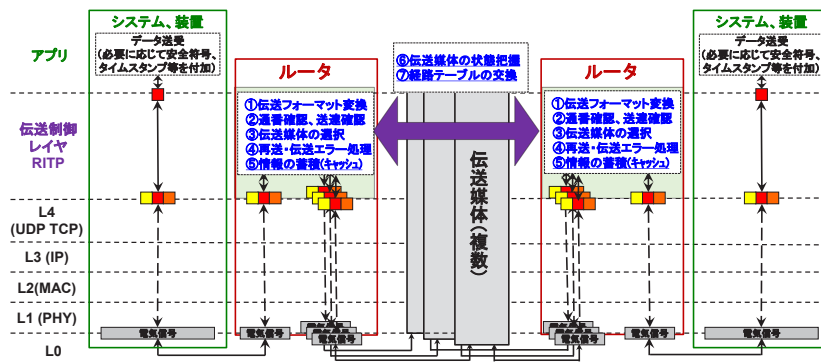


図5 提案するプロトコル（RITP）の機能

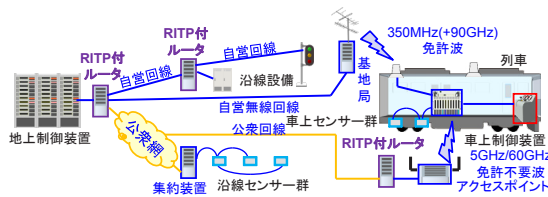


図7 統合情報ネットワーク構成の一例

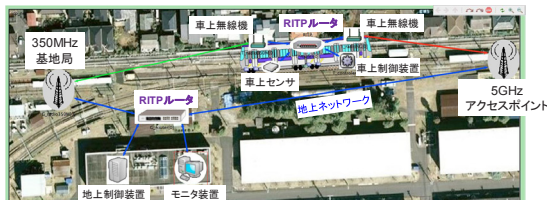


図8 ネットワークシミュレータ OMNeST 上に実装したモデル (OMNeST のスクリーンショット)

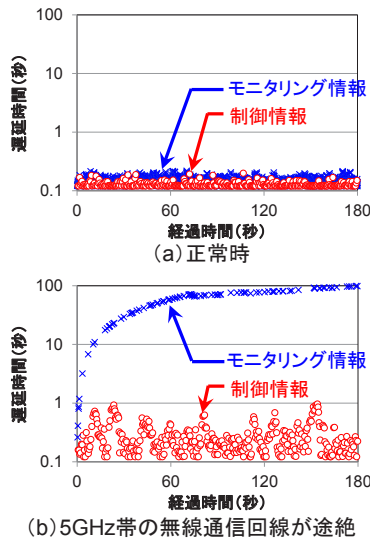


図9 シミュレーション結果の例

り替える機能)を実装したルータを介して各ノードを接続するネットワークとなっている。RITP ルータ同士は 350MHz 帯の低速・高信頼 (9.6kbps, 電文損失率 10^{-3} 以下) の無線通信回線と, 5GHz 帯の高速・低信頼 (1Mbps, 電文損失率 10^{-1} 以下) の無線通信回線の 2 種類の伝送媒体によって接続されている。2 台の制御装置間では 0.5 秒ごとに 150 バイトの情報を伝送し, センサーからは 0.1 秒ごとに 50 ~ 800 バイト (1 回の伝送ごとにランダムに決定) のモニタリング情報を伝送することを想定した。また, 制御情報の伝送に対しては, 許容できる伝送遅延時間が 1 秒に設定されていることを想定した。

3.3.2 シミュレーション結果

シミュレーションは, 汎用のネットワークシミュレータである OMNeST を使用して実行した。シミュレーションシナリオとして, 350MHz 帯・5GHz 帯とも正常に通信できる状態と, 5GHz 帯の無線通信回線が途絶した場

合の 2 種類の状態を設定した。

シミュレーションの結果を図 9 に示す。図 9 (a) は両周波数帯とも正常な場合, (b) は 5GHz 帯の無線通信回線が途絶した場合の結果を示している。図 9 (a) では, 制御情報・モニタリング情報とも伝送遅延が 300ms 以内となっているのに対し, 図 9 (b) では伝送遅延が大きくなっているものの, 制御情報は許容伝送遅延時間である 1 秒以内に収まっており, RITP の機能によって情報に要求される遅延時間のレベルに応じた伝送の制御が適切になされていることが確認できた。

4. 今後の課題と展開

第 3 章において鉄道システム内に流れる情報を統合的に扱う情報ネットワークのあり方と提案するプロトコルである RITP の機能の一部について, その有効性を示した。本章では, この情報ネットワークの実現に向けて, 今後の課題について示す。

4.1 RITP 機能の各種パラメータの検討

今回提案した情報統合ネットワークは, RITP によってその機能が実現される。本稿では, RITP の機能の一部である伝送経路の状況を RITP ルータがモニタリングし, 情報の種類 (信頼性のレベル) に応じて適切に伝送経路を選択する機能の有効性を確認した。その他の RITP が持つ機能については, これから決定すべきパラメータが複数存在する (例えば, RITP ルータが複数存在する伝送媒体の状態を把握するタイミングやその更新周期, また, 情報を RITP ルータが蓄積する期間など)。

様々なシナリオを想定し, シミュレーション等を活用した検討を重ね, 各種パラメータの値を決定していく予定である。

4.2 最新の無線技術の適用

現状の鉄道システムにおいて地上一車上間の伝送は, 列車無線と公衆無線網により実現されている。しかし, 統合的なネットワークにおいては, 地上一車上間を流れる情報量が増大することが予想される。近年は, 40GHz 帯や 90GHz 帯などの大容量通信が可能なミリ波帯を鉄道分野で利用するための研究開発が進められている¹⁰⁾。そこで, ミリ波帯の無線技術を適用する場合のネットワーク構成についても検討し, 地上一車上間を流れる情報量の増大にも対応できる統合情報ネットワークを提案する必要がある。

さらに, 地上 - 車上間のネットワークに障害が発生して列車が緊急停止した場合であっても, 前後の列車同士や駅構内で隣接線に入線している列車同士で運行情報の交換を行い, 少しでも列車を動かすことを想定した車車間通信についても検討を進めている。

特集：信号通信技術

4.3 サイバーセキュリティへの対応

第3章で提案した統合情報ネットワークは、列車の運行に関わる情報を同一のネットワーク上で伝送する構成である。ネットワーク技術の進捗により、利便性が高まると同時に、ネットワーク経由の攻撃や不正アクセスなど(いわゆるサイバー攻撃)が問題となっている。そこで、提案する情報ネットワークの各階層で想定される主な攻撃について、安全性・安定性の観点で整理を行い、サイバー攻撃を受けた場合であっても安全性を確保しつつ、列車を運行させるためのしくみなど、より安全かつ安定した列車運行に利用可能な統合ネットワークの実現に向けたサイバーセキュリティに関する検討も進めている。

4.4 デモシステムによる検証

本稿では、統合的な情報ネットワークの基本構成とプロトコルについて提案し、シミュレーションによる機能検証と有効性を示した。しかし、3.2節で示したプロトコルにおいて、要求品質の定義や、伝送路の状態を把握する周期、また伝送情報を一時的に蓄積する際の周期や期間などの定義については、一案を示してシミュレーションで機能確認を行った段階であり、実用に供するための設定値については、さらなる検討と検証が必要である。提案したネットワークの実現に向けて、上記の定義に関する検討を深度化したうえで、地上一車上間も含めたネットワークの基本構成とプロトコルを一部実装したデモシステムを構築し、実測データによる機能及び有効性を検証すべく、計画を進めている(図10)。

鉄道総研では、所内試験線にデモシステムを構築して、RITPの機能の一部を実装して、動作の確認を行うとともに、試験線で実施する各種実験の通信インフラとして活用することで、実用化を目指した開発を進めていく予定である。

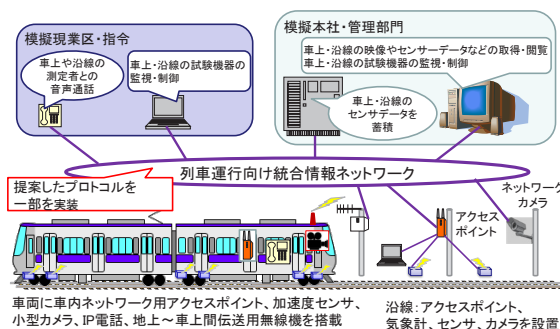


図10 デモシステムで実現を目指している主な機能と構成

5. まとめ

本稿では、列車の運行制御に関わる情報を系統間で共有できる統合的な情報ネットワークのあり方を提案す

ることを目的として実施した各種検討内容について報告した。

まず、現在の鉄道システム内に流れる情報の特性を調査し、鉄道システム内での情報の発信箇所～利用箇所間の流れと、情報の形態や頻度などを定量的に把握した。さらに、調査結果で得られた流れる情報の特性をマップとして整理し、現場における業務分野間での情報共有とそれを実現する伝送手段が必要であること、情報のデジタル化とそれに伴う共通フォーマットが必要であることを示した。

次に、鉄道向けの統合的な情報ネットワークの構想を示すとともに、基本構成と通信プロトコルを仕様書案として提示し、シミュレーションによってその一部の機能の有効性を確認した。

さらに、列車運行向け統合ネットワークの実現に向けた課題として、RTIPの各種機能におけるパラメータの決定、最新の無線技術の適用、鉄道の安全運行に必要なネットワークセキュリティ対応策の検討、デモシステムによる検証が必要であることを示した。

今後は、上記で示したRITP機能の実現に向けたプロトコル実装方法の検討、鉄道におけるサイバーセキュリティに関する調査を進めるとともに、デモシステムの構築・各種検証を行うなど、列車運行向け統合ネットワークの実現に向けた取り組みを進めていく予定である。

文 献

- 1) 平栗滋人：鉄道におけるICT活用に関する研究開発，鉄道総研報告，Vol.31，No.3，pp.1-4，2017
- 2) 日本鉄道電気技術協会：鉄道通信ネットワーク，日本鉄道電気技術協会，2016
- 3) 栗山繁男：IP技術と鉄道への適用(10)，鉄道と電気技術，Vol.22，No.8，日本鉄道電気技術協会，2011
- 4) 植山友美子：IP技術と鉄道への適用(11)，鉄道と電気技術，Vol.22，No.9，日本鉄道電気技術協会，2011
- 5) 今井誠治，吉川邦浩：IP技術と鉄道への適用(12)，鉄道と電気技術，Vol.22，No.10，日本鉄道電気技術協会，2011
- 6) 高月真明：IP技術と鉄道への適用(13)，鉄道と電気技術，Vol.22，No.11，日本鉄道電気技術協会，2011
- 7) 岩本高幸：JR四国のネットワーク更新について，鉄道と電気技術，Vol.26，No.10，日本鉄道電気技術協会，2015
- 8) 植苗肇：九州新幹線(新八代～鹿児島中央)の通信設備，鉄道と電気技術，Vol.15，No.5，日本鉄道電気技術協会，2004
- 9) 宮口牧人：ITを活用した貨物鉄道サービス，鉄道と電気技術，Vol.13，No.1，日本鉄道電気技術協会，2002
- 10) 川崎邦弘，中村一城：ミリ波技術の鉄道応用に関する動向，鉄道総研報告，Vol.30，No.1，pp.51-54，2016