

次世代車両制御システム (INTEROS) の開発



川崎 淳司* 菅谷 誠* 祖父江 昭彦* 星野 健太郎* 佐藤 春雄*

次期通勤電車での実用化をめざして次世代車両制御システム (INTEROS) を開発している。INTEROSでは、「信頼性向上」「サービス向上」などを開発コンセプトに、インターネットの基本伝送技術である100Mbpsイーサネットを採用している。本稿では、まず、電気連結器などの100Mbpsイーサネット用伝送路の開発内容、各種伝送試験による100Mbpsイーサネット伝送について述べる。さらに、試験電車に搭載して、問題なく動作することを確認した、二方式の装置構成について述べる。また、WiMAXを用いた地上-車上間通信による新たな機能開発など、今後の開発についてその概要を記載する。

●キーワード：列車内情報制御伝送系 (TCN)、イーサネット (Ethernet)、100BASE-TX、国際規格、状態監視、電気連結器

1. はじめに

車両の運転台からの指令を各搭載機器に伝え、各機器状態を運転台に表示する車両制御システムは、車両の情報をつかさどる中枢部としてその重要性を増している。JR東日本では、車両情報管理装置 (TIMS: Train Information Management System) を多くの車両に導入し、車両間を引き通す制御線の削減および編成全体としての機能向上を図ってきた。¹⁾

一方、インターネットの普及によりイーサネット伝送技術は、高速化・汎用化し、伝送機器の信頼性、コスト、技術者の数などの点において利用しやすくなってきている。よって、伝送容量が頭打ちである現状のTIMSの伝送方式 (アーケネット: 10Mbps) を一新して、将来求められる更なる高機能化に向けた拡張性を向上させることが期待できる。また、イーサネットの適用は、物理層などの下位層だけでなく、TCP/IPやUDP/IPなどのルールを使用することで、従来メーカーが規定していた中位層についても汎用性を持たせることができる。

さらに、欧州を中心として、国際直通運転を実現する列車内情報制御伝送系規格 (TCN: Train Communication Network) をイーサネット化しようという国際標準化の審議も精力的に行われている。²⁾

このような背景の中で、車両制御システムには、これまで以上の高機能化、信頼性・拡張性向上が要求されており、

次期通勤電車への適用をめざして、次世代車両制御システム (INTEROS: INtegrated Train control / communication networks for Evolvable Railway Operation System) の開発を進めている。

以下に、現在JR東日本で開発を進めているINTEROSについて、伝送路開発およびシステム構成を中心に開発概要を述べる。

※「イーサネット」、「Ethernet」は、富士ゼロックス (株) の登録商標である。

2. 開発コンセプト

2.1 イーサネット伝送技術の採用

図1にTIMSとINTEROSの伝送技術の比較を示す。車両間をわかり編成を引きとおす基幹伝送路で比較すると、TIMSで採用しているアーケネットは10Mbpsで頭打ちとなっているが、インターネットで汎用化しているイーサネットは、1990年代以降急速に進化しており、2011年現在では100Gbpsイーサネットの製品開発が進められている。この中で100Mbpsイーサネットの一規格である100BASE-TXは、これまで最も普及している。

また、イーサネットは、図1のように、下位層 (物理層とデータリンク層) を規定している。INTEROSでは、中位層で汎用プロトコルを採用することでさらに汎用性を高め、車両制御ネットワークに多様な製品を容易に接続できるように考慮している。

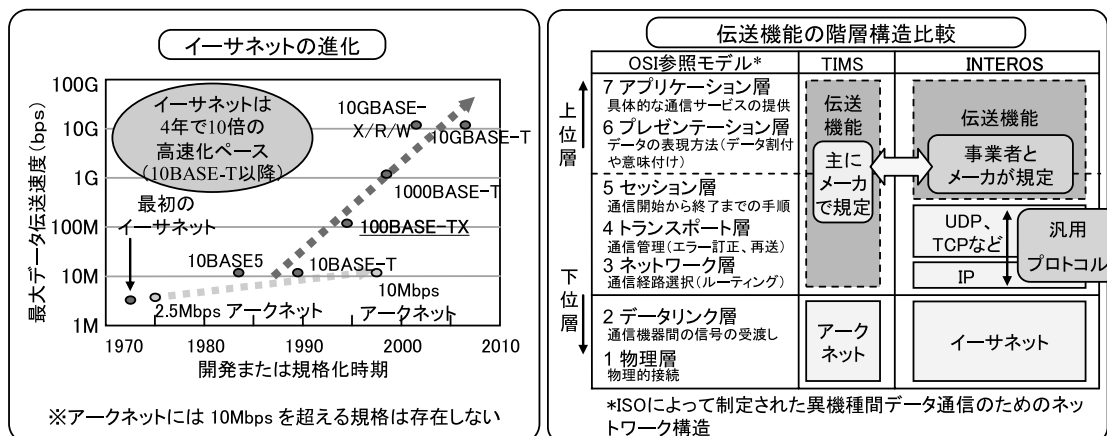


図1 TIMSとINTEROSの伝送技術比較

2.2 機能別ネットワーク

INTEROSでは、開発コンセプトとして「信頼性の向上」、「サービス向上」、「次世代の首都圏鉄道システムへの対応」、「国際規格への対応」を掲げている。³⁾ これらのコンセプト実現のために、情報伝送の大容量化による拡張性の向上が必要であり、前述のように、基盤技術として、100BASE-TXを採用した。また、TIMSでは制御に関するデータと状態監視に関するデータを1つのネットワークで伝送していたが、信頼性向上のためネットワークを機能別に分離した。図2にネットワークの構成と各装置の接続イメージを示す。

(1) 制御系ネットワーク

「走る」、「止まる」など、車両の走行に関する情報をつかさどる情報を扱うネットワークであり、異常時における冗長性を考慮した構成としている。

(2) 状態監視系ネットワーク

機器のモニタリング情報やメンテナンスに必要な情報を扱うネットワークであり、異常が発生しても運転に支障がないものとしている。制御系とハードウェアおよびソフトウェアを分離することによりシステム全体の信頼性向上をめざしている。軌道や架線の状態など地上設備に関するモニタリング装置については、後述する試験車においては地上設備専用のネットワークを介してINTEROSと接続していたが、INTEROSの実用化に際しての仕様としては、状態監視系ネットワークに接続することを検討している。

(3) 情報系ネットワーク

お客さまへ提供する動画・静止画などコンテンツ配信など

を扱うネットワークである。従来の情報提供装置（VIS：Visual Information System）に相当するネットワークだが、INTEROSでは、車内ITサービス装置などの機器の追加・拡張を可能としている。

また、従来よりも高速になった伝送路によって集めたデータは、高速、大容量のモバイルブロードバンド通信の方式であるWiMAX（Worldwide Interoperability for Microwave Access）を用いて、地上システムに送信することを検討している。さらに、車両搭載機器のソフトウェアの一部や設定パラメータの変更など、地上システムから車上システムへのデータ送信にもWiMAXを用いた機能開発を行う計画である。

3. 100Mbpsイーサネット用伝送路の開発

3.1 現状伝送路の評価と開発方針

100Mbps イーサネット対応の連結器、コネクタの開発に先立ち、現状の車両を使用した場合の伝送特性を把握するため、JR東日本E233系電車で使用している電気連結器や伝送ケーブルを組み合わせて伝送路特性試験を実施した。⁴⁾

IEEE802.3が規定している100Mbpsイーサネット用規格100BASE-TXにおいて、ISO/IEC11801（伝送媒体とその敷設の仕様）が参照されている。この中で100BASE-TXはクラスDに相当し、この基準を用いて評価を行った。評価は、図3に示すように最も多くの接点を経由するため状況が厳しいと思われる固定編成間を模擬した。システムの機器箱から始まり、つなぎ箱、電気連結器を経由して編成をまたいで機器箱で終わる伝送路を想定した。図4に示すように、挿入損失

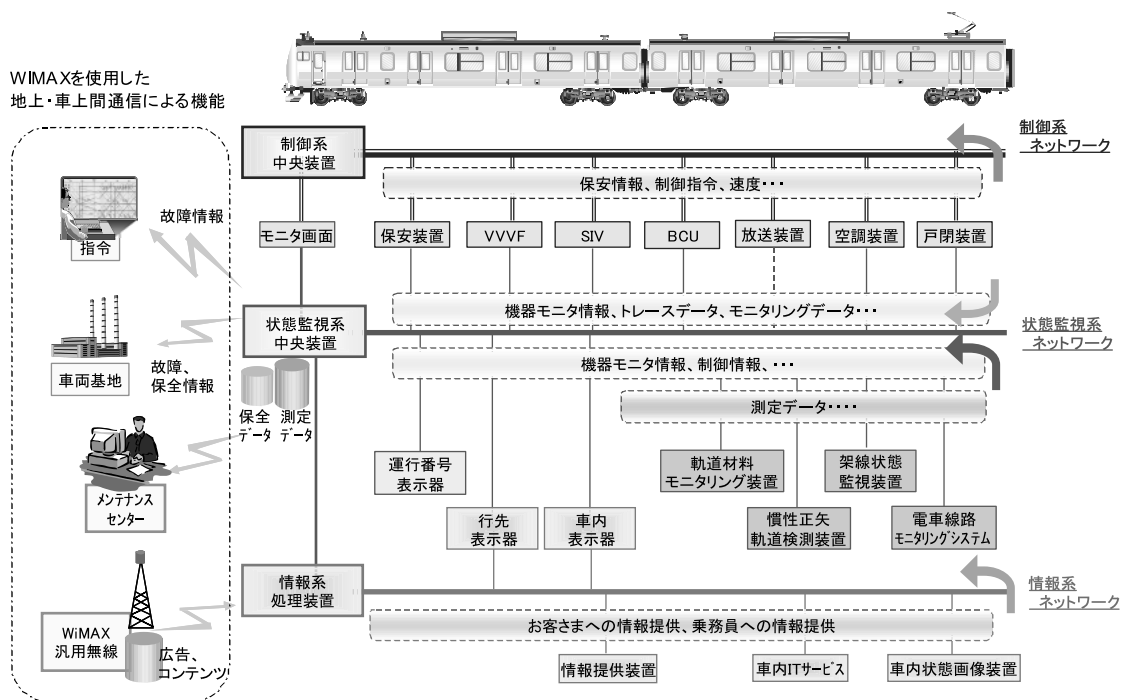


図2 INTEROSのネットワーク構成

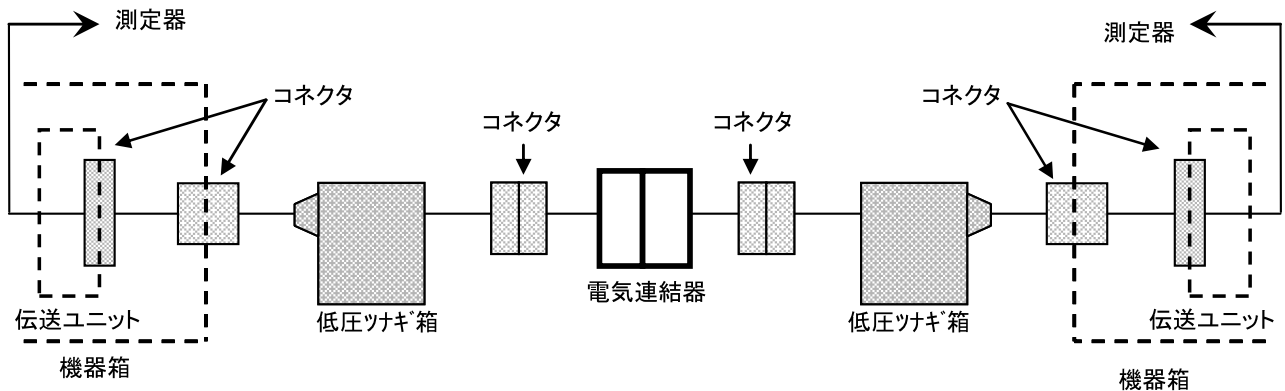


図3 伝送路の特性試験構成

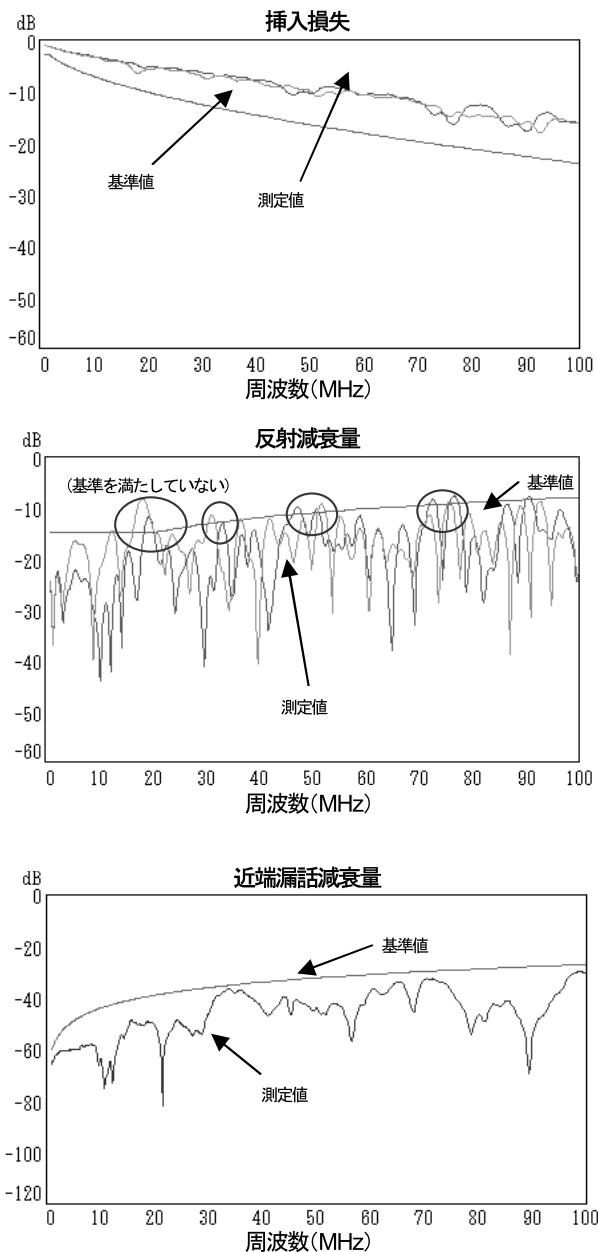


図4 現状車両における伝送路特性測定結果

や近端漏話減衰量については、基準値を満たすものの、余裕が少なく、反射減衰量に関しては基準値を超える結果となった。

また、IEC11801で規定している基準とは別に、100Mbps非増幅2V_{p-p}（信号振幅を最大値1Vから最小値-1VまででIEEE802.3で規定している2Vとする）および100Mbps増幅8V_{p-p}（信号振幅を増幅して-4V～4Vとする）信号による伝送時のビットエラー率（BER: Bit Error Rate）の測定を行った結果、増幅信号の場合はエラーの発生は無かったものの、非増幅信号の場合にはエラーが発生することが分かった。

上記の主要要因として考えられるのは、次のとおりである。

- ①コネクタや連結器などの接続箇所において、インピーダンス不整合となり、信号の反射が発生し、伝送特性が劣化する。
- ②信号ケーブル（ツイストペアシールド線）をコネクタに接続する箇所ではシールドを剥がし、ツイストペアをバラ線としているため、耐ノイズ性が低下する。

よって、INTEROSにおける伝送路については、次の（1）～（4）の設計方針により、100Mbpsイーサネット伝送用の伝送路を開発した。

- （1）DC100V制御線とイーサネット伝送線は極力分離する
- （2）100BASE-TX（IEC11801クラスD相当）規格を満たすケーブルを採用し、この規格を満たす連結器、コネクタを開発する
- （3）耐ノイズ性を向上するため、伝送線接続箇所において、シールド（電磁遮蔽）を極力連続させる
- （4）耐ノイズ性を向上するため、車両間を接続する伝送線（基幹伝送線）における信号振幅を、100BASE-TXの標準（2V_{p-p}）から8V_{p-p}へと昇圧する

3.2 新規電気連結器・コネクタの開発

図5～7は、上記(1)～(4)の設計方針を満たす新規接点を使用し開発した電気連結器、ジャンパ連結器、コネクタの外観を示している。いずれの開発品にも共通して言えることは、上記(2)(3)のとおり、インピーダンス(100Ω)整合性を保ちつつ、また完全にシールドで覆うことにより、耐ノイズ性を向上させていることである。例えば、図5に接点部の詳細を示すが、ペアとなっているピン間距離、絶縁物の材質によってインピーダンスを決めている。また、外周シールド部は、コネクタ接続時のガイド機構となっている。

図5の電気連結器は、固定編成同士が分割・併合する際に制御電源線、制御指令線や伝送線を開放・接続する機器である。機装スペースの制約があるため、方針(1)のように、制御線と伝送線を完全に分離することは困難であるが、図5に示すように電気連結器内部において極力分離するように設計した。図6のジャンパ連結器は、固定編成内で車両間を接続する部品であるが、(2)(3)は電気連結器と同様である。ジャンパ線を2本として、1本を従来型のジャンパ連結器、もう一本を図6に示すジャンパ連結器という構成にして、(1)も満たした。また、(2)(3)に基づいてコネクタを開発したものが図7であるが、従来のコネクタより機装効率が低下することが課題である。

新しい接点を用いた開発品(図5～7)に対しては、メンテナンスやコスト上の課題があるので、従来タイプの接点を用いた伝送路構成品の採用可否や信号振幅を昇圧する範囲などを含めて、今後引き続きさまざまな試験を行い、INTEORSにおける最終的な伝送路仕様を決定していく予定である。また、(4)の昇圧に関しては、標準イーサネットにはない仕様である。しかし、主にオフィス向けの汎用のイーサネットでは考慮されない大きさのノイズを鉄道車両では考慮しなくてはならない。信号振幅の大きさを大きくすればS/N比が向上するため、耐ノイズ性は向上する。よって、鉄道用イーサネット規格には、昇圧信号振幅(8V_{p-p})がオプションとして盛り込まれるように国際標準化の場では要求しており、車両間をまたがる基幹伝送には、昇圧信号振幅を使用する予定である。

3.3 伝送路特性試験

今回開発した100Mbpsイーサネット対応電気連結器、ジャンパ連結器、コネクタを用いて、図3に示す編成間を模擬した伝送路を構成し、伝送路特性試験を行った。

挿入損失・反射減衰量・近端漏話減衰量の各特性を測定した結果を図8に示す。いずれも余裕を持ってISO/IEC11801クラスDにて規定される基準を満たしている。なお電気連結器のほか、ジャンパ連結器を用いた伝送路についても試験を実施し、同基準を満たすことを確認している。これらの構成要素を盛り込んだ伝送路を209系試験電車(MUE-Train)に実装し、基準に対して余裕があり、営業走行に使用できるレベルであることを本線走行試験において確認している。⁶⁾

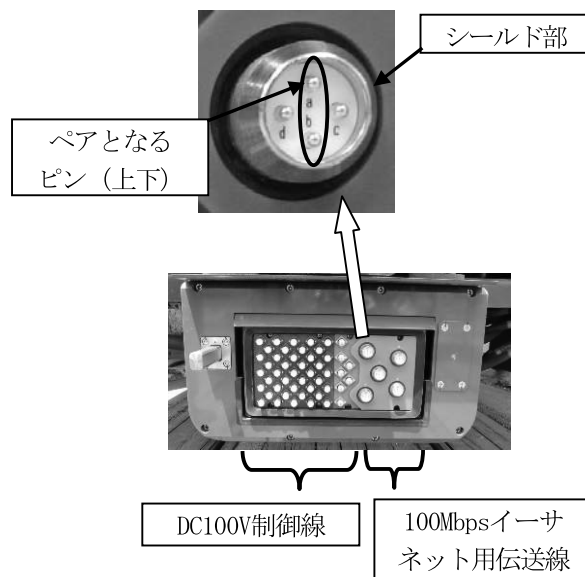


図5 100Mbps イーサネット対応電気連結器



図6 100Mbps イーサネット対応ジャンパ連結器



図7 100Mbps イーサネット対応コネクタ

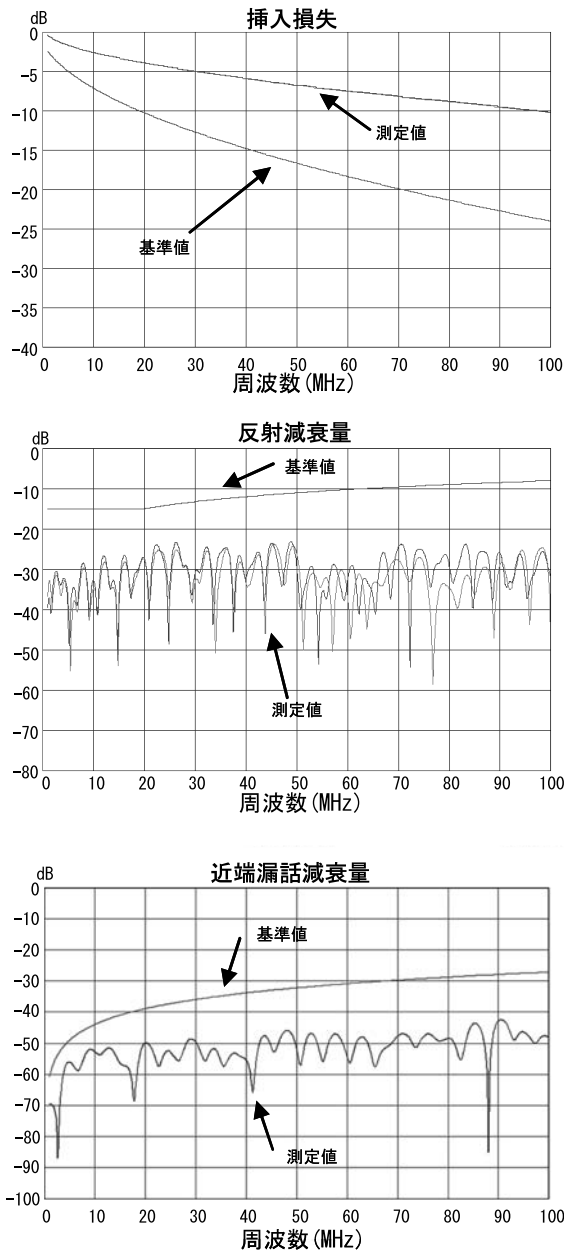


図8 新規開発伝送路の特性測定結果

4. INTEROSシステム構成と試験車搭載

4.1 システム構成

INTEROSは、100Mbpsイーサネットを採用しているためTIMSの伝送仕様とは大きく異なっている(表1)。TIMSでは、基幹伝送にアーキネットを、支線伝送(車両内のシステム機器間の伝送)にRS485を使用しているのに対し、INTEROSではこれまで述べてきたようにイーサネットを採用している。伝送媒体としてはクワッドケーブル(4芯)を使用するが、これは従来3芯だったものからの変更になるが、これは全二重通信(システムと搭載機器が同時に双方向伝送すること)が100BASE-TXの仕様となっているためである。

冗長性に関しては、制御系は従来どおり二重系構成とし

ているが、制御系から分離した状態監視系に関しては一重系としている。また、従来、制御系に関してはより高い冗長性を追求してラダー構成(はしご型)としていたが、INTEROSではネットワーク全体の冗長性のレベルはほぼ変わらないことから、平行構成として簡素化を図っている。また、伝送プロトコルとしては、周期伝送に対してUDP/IPを、イベント伝送にUDP/IP、又は、TCP/IPを使用している。

表1 INTEROSとTIMSの伝送仕様

	TIMS (E233 系)	INTEROS
伝送制御	アーキネット(基幹) RS485+HDLC(支線)	イーサネット
伝送速度	10Mbps	100Mbps
信号振幅	24Vp-p	8Vp-p(基幹) 2Vp-p(支線)
伝送媒体	ツイストペア線 3芯シールド線	クワッドケーブル (4芯)
冗長性	二重系 (制御・状態監視混合)	制御系: 二重系 状態監視系: 一重系
制御系トポロジー	ラダー	平行

表2 INTEROS基本仕様

		基本仕様
伝送速度		100Mbps (100BASE-TX)
信号振幅	車両間伝送	8Vp-p(昇圧)/2Vp-p(標準)
	車両内伝送	2Vp-p(標準)
冗長性	制御系	2重系
	状態監視系	1重系
	情報系	1重系
プロトコル	機器制御情報	UDP/IP
	機器状態情報	UDP/IP
	機器トレース	TCP/IP及びUDP/IP

表3 各機器のインタフェース仕様一覧

機器区分	機器名	MUE-Trainにおける インタフェース
運転台機器	INTEROS 運転台表示器 (No.1メータ表示器、 No.2メータ表示器、 INTEROS表示器)	100BASE-TX
	マスコン	
	放送装置(乗務員用)	
	ATS-P、D-ATC	
	運転台IF (デジタル入出力)	
車両機器	新情報送受信装置 (無線データ伝送)	RS-485(※)
	VVVFインバータ装置	100BASE-TX
	SIV装置	
	ブレーキ制御装置	
	放送装置(客室用)	
	車両1/F (デジタル入出力)	接続なし(※)
	ドア制御装置	
	空調制御装置	
	前面行先表示器	
運行番号表示器		
		20mA カレントループ伝送(※)

※実用化時には100BASE-TXを適用予定

INTEROSの各機器インタフェイスは表2に示すように100BASE-TXを採用している。表3にMUE-TrainにおいてINTEROSと接続している機器の一覧およびインタフェイスの種別を示す。車両改造の制約上、一部の機器については従来の伝送方式のままとしているが、INTEROSの最終仕様としては100BASE-TXを基本に検討する。しかし、1両に8ヶ所あるドアについては、従来のインタフェイス (RS485) にも配線量に有利な点があるため、今後INTEROSとしてのインタフェイス仕様を検討していく。

次に、図9にINTEROSのシステム構成をTIMSと比較して示す。一般的に、車両制御システムにおけるネットワーク構成と機能配置には関連があり、機能については、統合型と分散型がある。⁷⁾ TIMSでは、各号車に先頭車の中央装置に相当する端末装置が配置してあり、各端末装置が伝送・演算機能を持っている機能統合型システムとなっている。

INTEROSでは、信頼性向上のため、システムのハードウェアを極力削減することを前提にシステム構成を検討し、「集中方式 (A方式)」、「自律分散方式 (C方式)」という名称で開発を行なった。集中方式では、データの伝送制御は中央装置 (先頭車) が一括管理する。

演算機能は、即時性を必要とする電空協調制御は端末装置 (制御単位毎 (3両~5両) に1台設置) で行い、その他の演算機能は中央装置に集約した。このシステム構成により、従来のTIMS方式を踏襲しながらハードウェアを削減することができる。

一方、自律分散方式では、演算機能を中央装置 (先頭車) に集約し、伝送機能は、各車に一つ配置するルータに委ねて単純化している。伝送タイミングは非同期方式としている。

この構成により、自律分散方式では接続する搭載機器がネットワーク内で自律して動作することが可能になっている。

4.2 試験車への搭載

二方式のINTEROSは、図10に示すように、MUE-Trainに、3両編成+3両編成という形で仮想的に二編成の併結状態を模擬して搭載した。MUE-Trainは、2010年9月より走行試験を開始し、東北本線を中心に川越線、埼京線などで2010年度には、約8,000kmの走行実績がある。

INTEROS-Aでは、運転台に搭載される中央装置に運転台機器、3号車床下に搭載される端末装置に車両機器が各号車のHUB装置を経由して接続される構成となる。3号車の床上にはゲートウェイ装置 (Gateway:GW) を搭載し、INTEROS-Cとの差異を吸収する。通常、編成併結は先頭車にて実施されるため、将来異なる方式のINTEROSを搭載した編成と併結する場合は、GW機能を中央装置に内蔵することを想定している。

制御系・状態監視系におけるINTEROS-Aの中央装置の外観を図11に示す。伝送用のコネクタは、従来のTIMSの構成を踏襲し装置上部に集約している。

一方、INTEROS-Cでは、運転台機器、車両機器ともにルータ装置との接続となる (ただし、運転台機器は中央装置 (編成制御装置) のHUBを経由して接続する)。5号車床下のルータ装置にはGW装置を内蔵し、INTEROS-Aとの差異を吸収する。将来異なる方式のINTEROSを搭載する編成と併結する場合、GW機能付きルータ装置が先頭車に搭載される。

制御系・状態監視系におけるINTEROS-Cの中央装置を図12に示す。伝送用のコネクタは、前面に配置している。

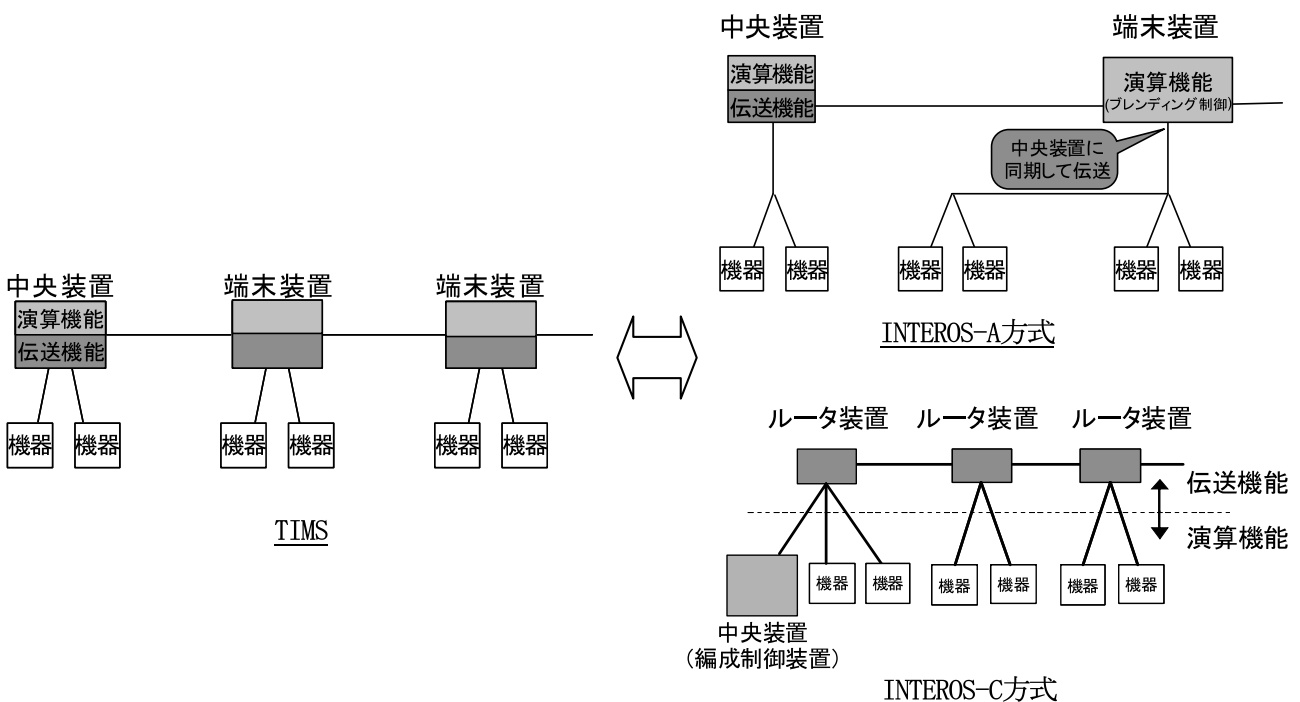


図9 TIMSとINTEROSのシステム構成の比較

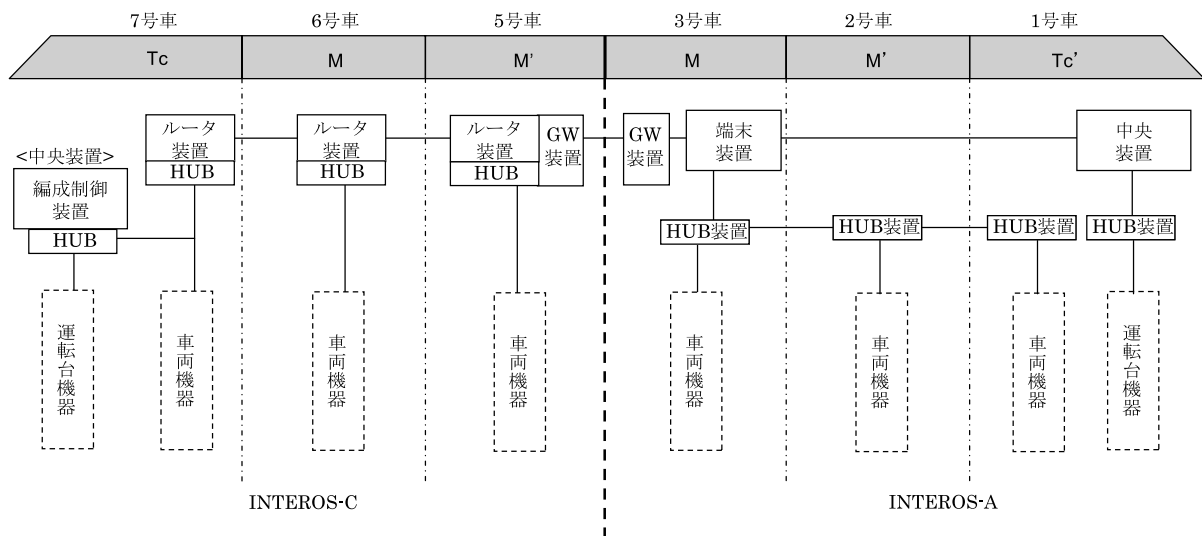


図10 MUE-Trainにおける制御系システム構成

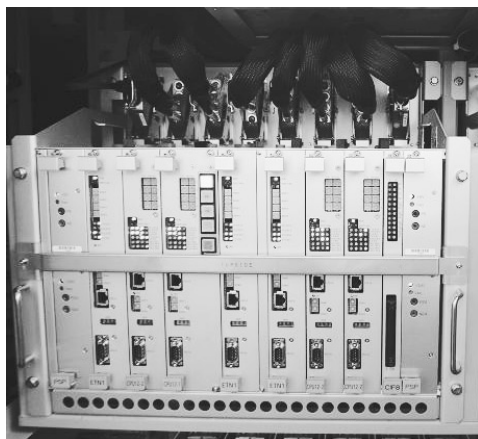


図11 中央装置 (INTEROS-A方式)

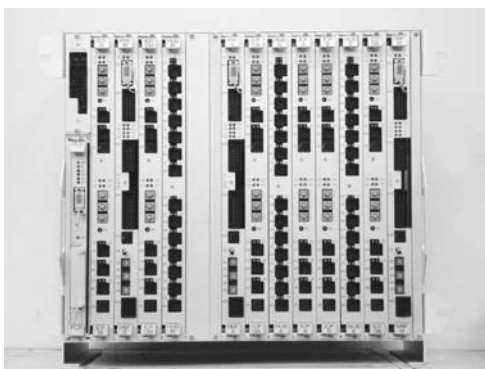


図12 中央装置 (INTEROS-C方式)

5. 新規機能の開発

従来のシステムでは、車両力行時の主回路制御において、運転士のマスコンハンドルによる指令を、マスコンのノッチ数と応加重信号（各車両の重量値）という形で主回路制御システム（VVVFインバータ）へ伝送する。VVVFインバータでは、伝送されたノッチ数と応加重信号より、踏面力を演算しそれに合わせてスイッチング制御することにより主回路制御を行ってきた。

今回の開発においては、踏面力の演算をVVVFインバータからINTEROS側へ移管した。INTEROSにおいて、マスコンハンドルのノッチ数から編成全体に必要な踏面力を計算し、各車両の重量情報からVVVFインバータごとに必要な踏面力を分配し、踏面力指令値を直接伝送することにした。これにより、車両を他線区に配置換えする場合などに、車両の組成を変更するなどの理由によりマスコンのノッチと踏面力の関係をVVVFインバータ側で変更する必要がない。INTEROSにおけるテーブルを変更すれば良いため、全体として作業量が軽減でき、車両システムとしての拡張性が向上できたと言える。

また、従来のシステムではVVVFインバータに重大な故障が発生した場合、運転士によるリセット操作を行い復旧できない場合は、開放操作を実施する。INTEROSでは、このような場合のダウンタイムを削減することを目的としてVVVFインバータを自動で開放する機能を開発した。

6. 今後の新規機能開発

図2に示したように、100Mbpsイーサネットで収集した各種データを、地上に送信することによって、新しい機能開発を実現する。表4に今後開発する機能の概要をまとめる。車上・地上の双方向の大容量通信により、これまで以上に、故障時の対応の迅速化、劣化などの機器状態把握、車上機器データの地上からの変更などの機能を充実させる。

表4 WiMAXを使用した機能の概要

機能名称と送信先		機能概要
故障情報伝送 (車両)	指令/ 車両基地	車両で発生した故障内容を指令や車両基地に伝送 (一部機能は一部の既存車で実用化済み)
故障情報伝送 (設備)	指令/ 施設基地	線路設備状態や架線状態について緊急に対応すべき場合にデータなどを伝送
機器情報伝送	指令	車両・車内状態の伝送
	車両基地	空調・ドアなどの詳細データの伝送
	計画部門	乗車率・空調状態などを伝送
車両機器 リモートローディング		ダイヤ改正時のサービス系車内保有データの変更や搭載機器の制御ソフト変更

7. おわりに

本開発において、イーサネット技術を適用した100Mbpsの大容量のネットワークを鉄道車両に構築するため、次世代車両制御システム (INTEROS) を開発し、検証を行った。

ノイズ環境の厳しい鉄道車両の特性を考慮して、電気連結器やジャンパ連結器、コネクタなどの伝送路構成部品を開発し、参考としている伝送規格の基準を満たし、試験車両による走行試験により実用化できるレベルにあることを確認した。

システム構成として、従来方式より高機能化を図りながら信頼性を向上させるため、「集中方式」と「自律分散方式」の2方式を開発した。それぞれの方式において、汎用のイーサネット用プロトコルを用いて車両搭載機器と接続し、試験電車による走行試験を実施した。これにより、鉄道車両の制御系における100Mbpsイーサネットを適用した車両制御システムの開発を実現した。

今後、地上-車上間の情報伝送機能の開発を進め、次期通勤電車において実用化する予定である。

参考文献

- 1) 新井、白樫：「列車情報管理装置 (TIMS) の10年と今後の取り組み」, サイバネティクス, Vol.12 -No.1, pp.25-32.2007.
- 2) 落合：「列車内制御情報伝送技術と国際規格」, 鉄道車両と技術 No.156, pp.2~7, 2009.
- 3) 中村：「首都圏鉄道システムの革新」, JR East Technical Review, No.28 (夏号) http://www.jreast.co.jp/development/tech/pdf_28/Tech-28-03-06.pdf
- 4) 川崎、飯田、星野、杉山、祖父江：「車両制御システムにおけるイーサネット伝送路特性実験」日本機械学会第16回鉄道技術連合シンポジウム J-Rail2009講演論文集, pp.97-100.2009.
- 5) 田村、川崎：「209系試験電車 (MUE-Train) の概要」, 鉄道車両工業, No.455, pp.28~31, 2010
- 6) 田淵、内山、川崎、甲村、中西、向井、橋口：「次世代鉄道車両制御システムにおけるイーサネット伝送路特性実験」, 平成22年電気学会全国大会 講演論文集, pp.109-110.2010.
- 7) 本間：「鉄道車両における制御ネットワーク」, JREA, Vol.42-No.10, pp.32-34, 1999.
- 8) 川崎、祖父江、星野、佐藤、綾部、宮内、甲村：「イーサネットを用いた車両制御システムにおけるネットワークの構築」, 日本機械学会第17回鉄道技術連合シンポジウム J-Rail2010講演論文集, pp.207-210.2010.