

新しい鉄道車両システム技術

Latest System Technologies for Railway Electric Cars

和嶋 武典 Takenori Wajima

松本 雅一 Masakazu Matsumoto

関野 眞一 Shin'ichi Sekino



東海旅客鉄道株式会社納め
N700系新幹線電車



福岡市交通局納め
3000系リニア地下鉄電車



東京地下鉄株式会社納め
05系東西線電車

最新の技術を盛り込んだ日立製作所の各種車両

新幹線車両や地下鉄車両に盛り込まれた日立製作所の鉄道車両システム技術が、鉄道の未来を築いていく。

社会情勢の変化を受け、鉄道では、「環境負荷の低減」、「ライフサイクルコストの削減」、「今後予想される熟練就業者人口の減少」などが課題となっている。日立製作所は、それらの課題への対応をコンセプトにした「A-train次世代アルミ車両システム」を基盤に、いっそうの快適性を求め、車内低騒音化や曲線通過速度向上技術に取り組んでいる。また、新幹線車両では、到達時間の短縮と環境との調和を目指し、先頭形状最適化による車外騒音低減、振動抑制技術を開発している。

駆動システムでは、環境負荷軽減のためハイブリッド駆動システムにいち早く取り組み、その性能改善による実用化とともに、主回路インバータの回路技術、制御技術の進化によって小型・軽量化、性能向上を図っている。

列車制御の分野では、わが国初の全自動運転対応システムを搭載した地下鉄車両を開発し、将来の少子高齢化、ランニングコスト削減への対応と、安全かつ高信頼な運転を支援している。

1 はじめに

環境問題や少子高齢化などを背景に、鉄道では、「環境負荷の低減」、「ライフサイクルコストの削減」、「今後予想される熟練就業者人口の減少」への対応が必要

とされている。一方、わが国の鉄道輸送量が横ばい傾向の中で、旅客の獲得に向けて、「輸送の上質化」を求められている。

日立製作所は、車両構体の組立でのFSW(Friction Stir Welding:摩擦かくはん接合)などの自動化、装置

集約化によって、シンプルかつ高精度、高品位な車体・ぎ装を実現した「A-train次世代アルミ車両システム」で、上質化とコスト低減の両立を果たしてきた。このA-trainは、さらなる進化を続けている。

また、新幹線に求められる速達性、環境との調和、車内快適性を同時に実現することは、都市間輸送の重要なニーズである。日立製作所は、車外騒音の低減と乗り心地を追求するため、各種シミュレーション技術やメカトロニクス技術を駆使した、さまざまなソリューションを提案している。

車両に搭載される駆動システムでは、省エネルギー、環境対応技術としてのハイブリッドシステムのほか、インバータ回路の小型化技術、最新の制御技術などの開発に取り組んでいる。

さらに、列車運転システムの革新として、地下鉄に初めて採用された全自動運転対応の運転システムは、日立製作所の鉄道技術の集大成であり、鉄道経営へのソリューションを示すものと言える。

ここでは、このような新しい鉄道車両システムを支える日立製作所のソリューションについて述べる。

2 進化するA-train

「A-train次世代アルミ車両システム」は、「環境負荷の低減」、「ライフサイクルコストの削減」、および「今後予想される熟練就業者人口の減少」への対応をコンセプトに、材料、構造および生産方式を抜本的に見直した車両である(図1参照)。2003年から現在に至るまで、首都圏新都市鉄道株式会社のつくばエクスプレスTX-2000系電車、福岡市交通局七隈線の3000系電車、東日本旅客

鉄道株式会社の外房・内房線E257系特急電車、東京地下鉄株式会社の東西線05系電車、東葉高速鉄道株式会社の東西線乗り入れ2000系電車、東武鉄道株式会社の東上線50000系電車などへの採用により、通勤電車から特急電車に至る各車種で、着実にファミリーを増やしている。

さらに、鉄道輸送の経営環境変化を見据え、日立製作所は、A-trainのいっそうの上質化とコスト低減の両立に取り組んでいる。

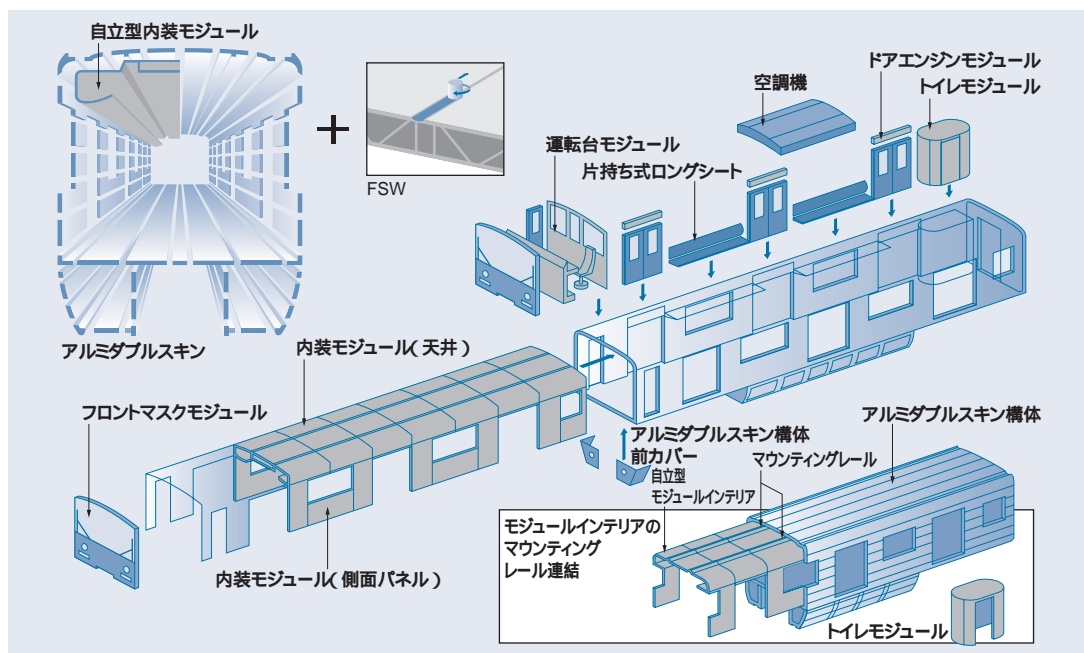
鉄道車両の客室としての快適性には、各種の環境下で、過ごしやすい室温と、走行中の静粛性がある。屋根構体の内側に、性能的に必要な断熱・遮音層を設け、さらにその内側に内装材を取り付ける従来構造に対し、A-trainでは、屋根構体に断熱・遮音層と内装材を統合化することで、従来の屋根構造の厚さに比較して80%薄くでき、広い室内空間を実現することができる。

また、これまでは機能別のモジュールであった空調ダクト、荷物棚、蛍光灯取り付け、電線櫃(とい)といった、それぞれ別々に機能している部品を有機的に結び付けることで、部品の集約化を図ることができる。

このように、進化するA-trainでは、いっそうの上質化に向けた取り組みを継続し、優れた鉄道経営のツールとして貢献する車両を実現していく考えである。

3 高速新幹線車両の技術

0系新幹線電車が210 km/hで営業運転を開始してから40年の月日が経過し、現在では東海道・山陽新幹線では一部区間で最高速度300 km/hでの営業運転が行われている。この間、速度向上を実現しつつ環境へ



注：略語説明
FSW(Friction Stir Welding; 摩擦かくはん接合)

図1 | A-trainの基本構成
アルミダブルスキン構体と一体成形したマウンティングレールに、自立型モジュールインテリアをボルトで取り付ける構造としている。

の適合と省エネルギーを推進し、さらに、車内快適性の向上を達成してきた。

2005年4月にその集大成と言えるN700系新幹線がデビューした(図2参照)。N700系で採用されている高速車両技術について以下に述べる。

3.1 車体傾斜システム

新幹線の駅間の到達時分短縮には、(1)最高速度の向上、(2)加速性能の向上、および(3)曲線通過速度の向上が必要となる。

特に曲線区間の多い東京 新大阪間では、曲線通過速度の向上が不可欠である。そのため、N700系では、新幹線として初めて車体傾斜システムを採用した。

車体傾斜システムにはさまざまな方法がある。N700系では、曲線通過時に外軌側の空気ばねを上昇させ、車体を内軌側に傾斜させる空気ばね上昇式を採用した。この空気ばね上昇式の車体傾斜システムは、構造がシンプルで質量増加も抑制できるものの、地点検知から動作までの所要時間が比較的長く、270 km/h(秒速75 m)の高速で走行する新幹線車両には不適とされていた。この方式がN700系に採用された背景には、新型ATC(Automatic Train Control)装置による高精度の速度・位置情報を、デジタル伝送技術を用いた制御伝送システムにより、車体傾斜制御装置に伝送する技術が確立したことがある(図3参照)。

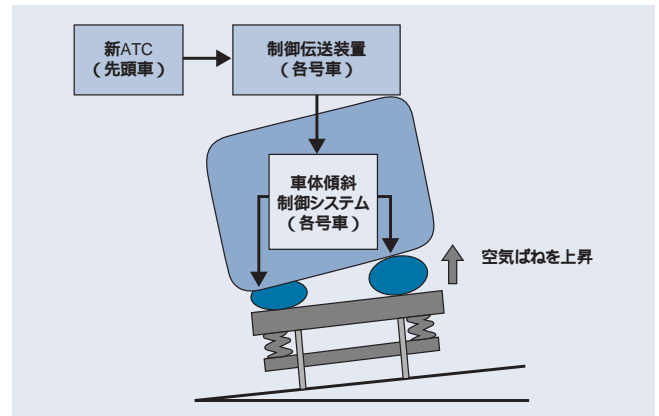
3.2 快適性の向上

東海道・山陽新幹線の山陽区間では最高速度の向上、東海道区間では曲線通過速度の向上によって駅間時分短縮が図られている。したがって、N700系には、速度向上に伴う乗り心地や車内静粛性の悪化を防ぐための、さまざまな技術が導入されている。

乗り心地に関しては、700系では先頭車、パンタグラフ車、グリーン車など一部の車両だけに搭載されていたセミアクティブ制振制御装置を全号車に展開するとともに、



図2 N700系新幹線電車の外観
N700系は、速度向上、快適性の向上、環境への適合を最新の技術で融和させた新幹線車両である。



注:略語説明 ATC(Automatic Train Control)

図3 車体傾斜システムの概要

曲線通過時に空気ばねを上昇させて車体を傾斜させる。新型ATCによる高精度の位置・速度情報の検出と、制御伝送システムの導入によって実現した。

これまでの車両では揺動を5段階制御していたものを無段階制御とし、さらにきめ細かな制御を行う。また、前述の車体傾斜システムを採用による曲線通過時の左右加速度の低減と、新型ATC装置の採用による一段ブレーキの円滑な減速により、前後加速度の低減を図っている。

車内静粛性については、車体外部からの騒音侵入(透過音)と床下機器や駆動系からの振動伝播(ばね固体伝播音)を遮断する最新の技術を導入した。透過音に対しては遮音性の高いダブルスキン構体の適用範囲を拡大して客室のいっそうの静音化と、全周ほろの採用によってデッキの静粛性向上を図った。固体伝播音に対しては、静音型1本リンクの採用によって駆動系からの振動低減を図ったほか、床下機器からの振動・騒音については静音床を採用した。

3.3 環境への適合と省エネルギーへの取り組み

新幹線電車は高速で走行することから、さまざまな環境問題と向き合っていくことが要求される。

N700系では、最高速度の向上と、曲線通過速度の向上に伴う空力問題に取り組んでいくことになる。これらは主に、トンネル微気圧波と車外騒音である。

トンネル微気圧波の問題は、高速車両がトンネルに突入する際に形成される圧縮波に起因する。一つは、トンネル内を伝播する圧縮波によって車体に変動圧力が作用する問題で、もう一つは、トンネル出口に達した圧縮波が反射する際に一部がトンネル外に放出され、これに伴う騒音が環境問題を引き起こすことである。

トンネル微気圧波を低減するためには、先頭部の断面積変化率を一定、かつ緩やかにすることが最も有効な手段と考えられている。しかし、それは先頭部分を延伸させることを意味しており、結果として、乗客定員の減少や運転設備への悪影響といった問題が発生する。N700系では、この問題を解決するために、航空機など

で採用されている最新の解析手法であるGA(Generic Algorithm:遺伝的アルゴリズム)を用い、断面積変化の空力的寄与度を最適化した結果、先頭長さが700系の9.2 mより1.5 m長い10.7 mで、300 km/h走行に最も適した先頭形状「エアロダブルウイング形」を見いだした。

車外騒音対策では、車体表面の平滑化をさらに進めるために全周ぼろを採用し、さらに、各種床下機器でも低騒音化を図っている。

速度向上に伴う環境負荷についても、さまざまな方法で低減を図っている。N700系では、車体傾斜システムの導入などによる車両質量の増加要因がある中で、車体各部の徹底した軽量化、制御伝送システムの採用による車体配線の削減などにより、700系より軽量化することができた。また、先頭形状の最適化や全周ぼろの採用により、走行抵抗の低減を図っている。車体傾斜システムの採用により、曲線通過時の加減速頻度を減少させることができるほか、700系では付随車のブレーキは渦電流ブレーキによって熱として消費していたものを、N700系では、電動車14両の回生ブレーキですべてを賄う方式で、大幅な省エネルギーを実現している。

回生ブレーキは、ブレーキをかけて減速する際に、駆動源であるモータを発電機として使用し、発生した電力をパンタグラフから架線に供給し、その電力を他の車両が消費するというものである。この結果、消費電力は700系比-10%まで低減できた。

4 車両主回路システムの技術

4.1 車両主回路システムへのニーズ

車両主回路システムへのニーズと最新の対応技術を図4に示す。日立製作所は、省エネルギーや保守性、環境性の向上などのニーズに応えるため、以下の技術開発を進めている。

- (1) 気動車の保守性向上、省エネルギーを図るハイブリッド動力システムの実用化
- (2) 主回路システムの小型・軽量化を図る低損失・低ノ

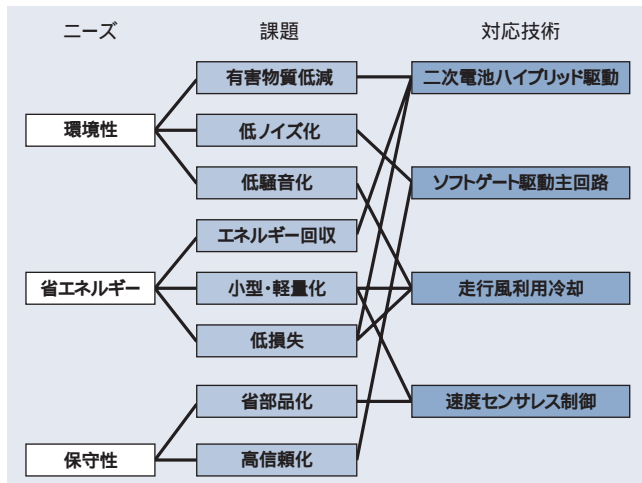


図4 車両主回路システムへのニーズと対応技術
日立製作所は、省エネルギーや保守性、環境性の向上などのニーズに対応した新しい車両システムの技術開発を進めている。

- イズ主回路・ゲートドライブ技術の高度化
- (3) 走行風を活用し、小型化と低騒音化を両立させる冷却技術
- (4) 保守性の向上、省エネルギーを図りながら粘着性能の改善を実現する速度センサレスベクトル制御技術の高度化

4.2 ハイブリッド動力システム

ディーゼルエンジンを動力源とする気動車の環境負荷の低減と、ライフサイクルコストの低減を目指して、保守性の向上や省エネルギー化が期待できる蓄エネルギー技術を応用したハイブリッド動力システムの開発、実用化を進めている。

システムの機器構成を図5に示す。エンジンで発電した交流電力を主変換装置でVVVF(Variable Voltage, Variable Frequency)交流電力に変換して誘導電動機を駆動する。二次電池(蓄電装置)を主変換装置の中間直流部に配置し、コンバータとインバータの出力バランスで二次電池の充放電電力を制御する。このシステムでは、エンジンなどの動力源は従来の気動車と共通とし、主変換装置などの電機品にはインバータ電車と共通化で

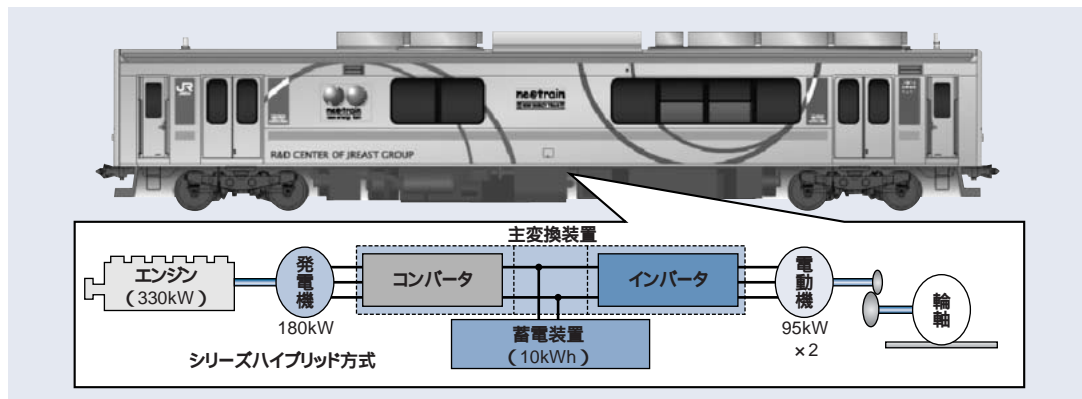


図5 ハイブリッド動力システムの概略構成
エンジン出力を電気エネルギーに変換し、電動機だけで車輪を駆動するシリーズハイブリッド方式を採用している。

きるシリーズハイブリッド方式を採用し、両者の保守技術を継承しながら、変速機や転換器などの機械部分を減らすことにより、保守コストを低減している。

4.3 低損失・低ノイズ主回路技術

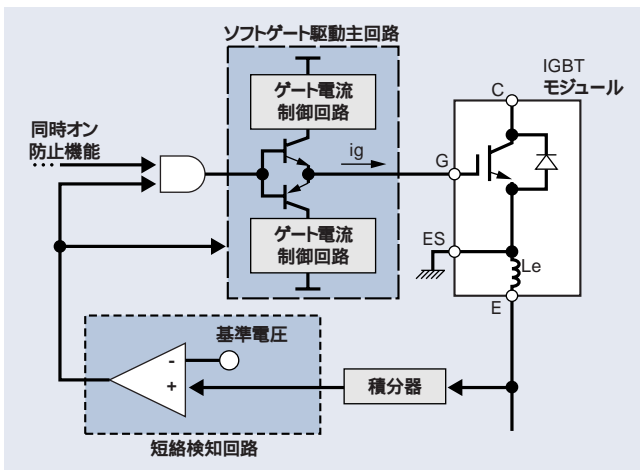
IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)インバータの発生損失を最小化し、信号システムなどへの影響を抑制する主回路・ゲート制御技術として、スマートインバータシステムを開発している(図6参照)。主回路部品の最少化によって構造的な小型・軽量化を図る、スナバレス主回路に好適なソフトゲートドライブ技術に加え、いっそうの高信頼化のための保護機能を付加しており、以下の特徴を備えている。

- (1) ソフトスイッチングIGBTモジュールと100 nH級の超低インダクタンス実装で主回路を構成し、電圧変化率と電流変化率をゲート制御することで低損失と低ノイズを両立
- (2) 高電圧検出なしで主回路ノイズの影響なしに短絡を即座に検出し、IGBTを遮断保護するアーム短絡保護機能
- (3) 上下アーム点弧による相短絡を防止する上下アーム同時オン防止機能

4.4 小型・軽量冷却システム

これまで新幹線車両のような大容量主回路システムでは、高性能の沸騰冷却システムが広く使われてきた。小型・軽量化と低騒音化を両立させる次世代の冷却技術の実現には、走行風をいかに有効活用するかが重要なポイントとなる。

車両側面から冷却風を取り入れる構造には、ラジエータの設置位置の自由度が高く、効率的に走行風を取り



注:略語説明 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor), C(コレクタ), ig(ゲート電流)
G(ゲート), ES(補助エミッタ), Le(内部インダクタンス), E(エミッタ)

図6 低損失・低ノイズのスマート主回路のシステム構成
ソフトゲート制御による低ノイズ主回路駆動に加え、アーム短絡防止機能や同時オン防止機能を付加して信頼性を向上させた。

込み、配置できるという特徴がある。

また、ラジエータをアルミイン化して床下面に実装し、走行風冷却するプロレス冷却システムの開発も進めている。

これらの開発により、高速走行中の騒音低減や駅構内停車中の静粛性の実現を目指している。

4.5 速度センサレスベクトル制御技術

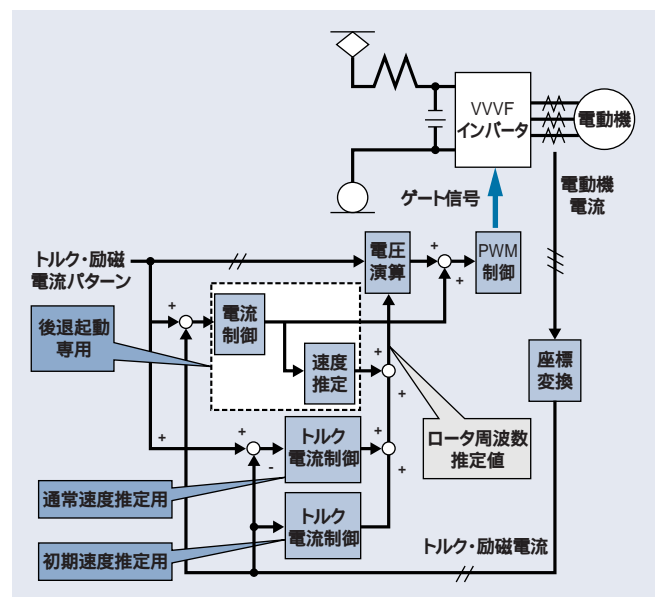
速度センサを省略できる速度センサレス制御に対する期待が、保守性と耐環境性の観点から急速に高まってきている。日立製作所は、電圧制御の改良によって省エネルギーを図りながら、速度信号処理の遅れを排除して粘着性能を改善する速度センサレスベクトル制御技術の高度化を進めている(図7参照)。その特徴は以下のとおりである。

- (1) トルク電流制御による速度推定演算により、空転・滑走状態発生時にも遅れなく高精度に速度検出が可能
- (2) モータ定数変動に強い励磁電流フィードフォワード制御方式を採用し、定数変動に対する高いロバスト性を実現
- (3) 初期速度推定・後退起動専用の制御ユニットの追加により、さらに高速で高精度に初速度推定が可能

5 信号・情報システムの技術

5.1 信号・情報システムへのニーズ

運転にかかわる保安度向上と、少子高齢化社会に対応した自動化、省保守化、バリアフリー化のニーズはま



注:略語説明 VVVF(Variable Voltage, Variable Frequency)
PWM(Pulse Width Modulation)

図7 速度センサレスベクトル制御の高度化の仕組み
省エネルギーを図りながら、粘着性能を改善するとともに、初期速度推定・後退起動制御ユニットの追加により、初速度推定性能を向上させる。

すますます高まっており、人に優しい車両の実現が強く望まれている。

日立製作所は、このようなニーズに応える以下の技術開発を進めている。

- (1) 自動運転を主体に、非常時の対応や監視、機器管理などの自動化技術を総合したドライバレス運転システム
- (2) デジタルATCをはじめ、各種の信号システムに共通のフェイルセーフアーキテクチャで対応する統合型信号保安システム
- (3) 車両内、車両対地上の伝送系を高速・大容量化し、情報の一元管理を行う車両情報システム

5.2 ドライバレス運転システム

ドライバレス全自動運転では、運転業務を単に自動化するだけでなく、運行に伴って発生するさまざまな異常事象に対して乗客の安全を確保することが必要である。

全自動運転システムに求められる、(1)列車を駅間に停車させないこと、(2)乗客に不安を与えないこと、および(3)運行の安定性を確保することの三つの要件について、運行管理システム、可動式ホーム柵(さく)、ATO (Automatic Train Operation)、列車無線、ATI (Autonomous Train Integration)などの技術で実現している。

5.3 信号保安システム

信号保安システムの代表例は、軌道回路の連続誘導信号を用いるATCである。これ以外にも、点制御式ATS(Automatic Train Stop)、ATS-P(パターン形ATS)など、方式や構成の異なる多種の信号保安システムが用いられている。

日立製作所は、デジタルATCに適したフェイルセーフ演算装置の技術をベースに、共通のアーキテクチャの採用による安全性の確保と、相互乗り入れ時の小型化・高信頼化を図るため、これら多数の種類のシステムに対応できる車上装置を開発している(図8参照)。

5.4 車両情報システム

日立製作所は、車両の情報化に対応する基本技術として、共通インタフェースで制御系・保守系・サービス系の統合が可能な高速車上传送システムを開発し、これを軸に種々の応用システムに展開している。その代表例は以下のとおりである。

- (1) 車載機器の監視、保守データ収集や自動検査を行うモニタシステム
- (2) 機器間の制御信号、監視信号をデジタル伝送化することによってぎ装配線を削減する制御伝送システム

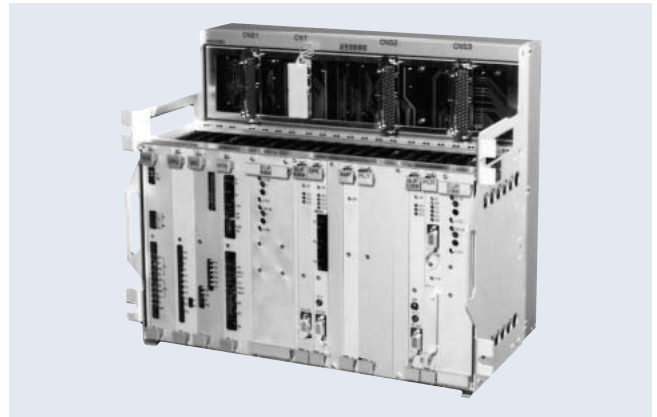


図8 フェイルセーフ演算装置の例
ATC用演算回路と二重照合機能をLSI化し、マイコン動作のフェイルセーフチェックを実現し、ATS-P(パターン形ATS(Automatic Train Stop))に適用した。

- (3) 案内情報、監視画像などのマルチメディア情報をデジタル伝送で各車に配信、収集する情報伝送システム

6 おわりに

ここでは、鉄道経営を支える鉄道車両システムのための日立製作所のソリューションの例として、A-train次世代アルミ車両システム、高速新幹線車両、車両主回路システム、および信号・情報システムへの取り組みについて述べた。

鉄道を取り巻く環境は、常に変化している。日立製作所は、少子高齢化、地球環境問題など、鉄道車両に求められるさまざまなニーズを先取りした、新しい形を示すことで技術をリードし、また、不変の要求である安全性と信頼性に応えるため、さらに技術の開発に努めていく考えである。

執筆者紹介



和嶋 武典

1980年日立製作所入社、電機グループ 交通システム事業部 車両システム本部 車両技術部 所属
現在、車両システムのエンジニアリング取組みのために従事
電気学会会員
E-mail: takenori_wajima@pis.hitachi.co.jp



松本 雅一

1981年日立製作所入社、電機グループ 交通システム事業部 笠戸交通システム本部 車両システム設計部 所属
現在、車両システム設計の取組みのために従事
日本機械学会会員
E-mail: masakazu_matsumoto@pis.hitachi.co.jp



関野 真一

1981年日立製作所入社、電機グループ 交通システム事業部 水戸交通システム本部 車両電機システム設計部 所属
現在、車両電気システム設計の取組みに従事
E-mail: sn-sekino@em.mito.hitachi.co.jp