

エネルギー効率向上とメンテナンスの省力化を目指した 電車駆動制御システム

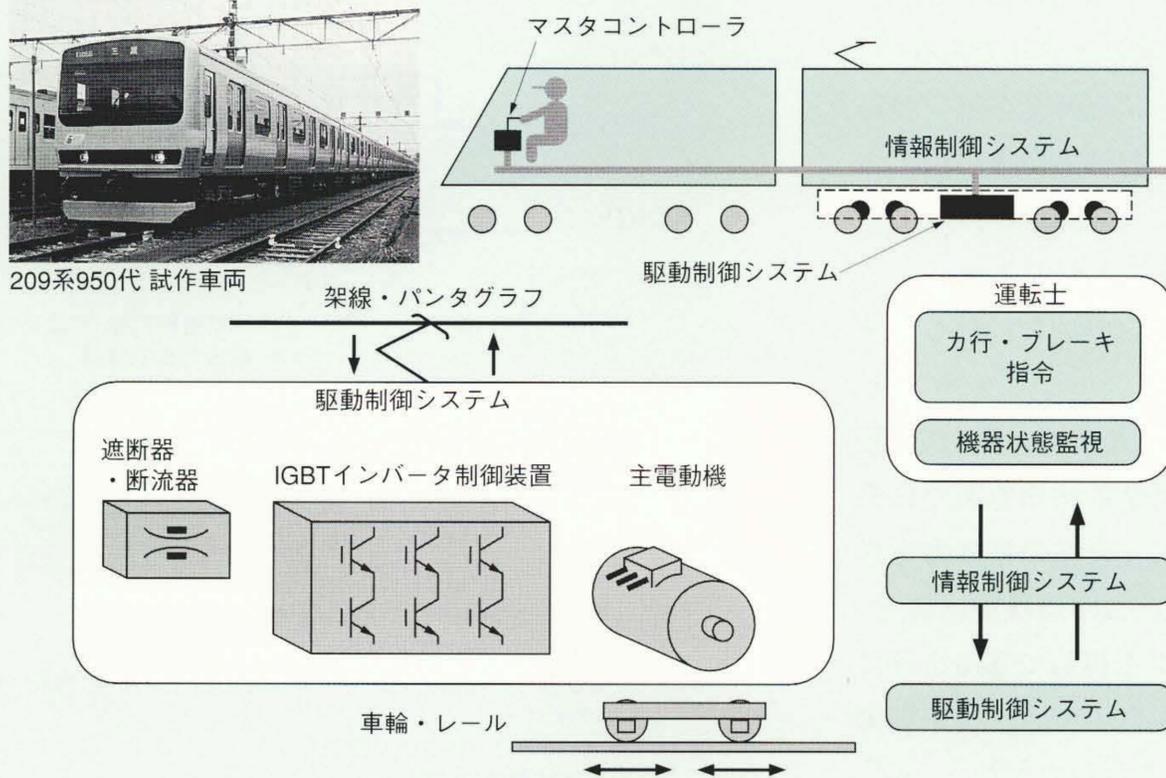
Train Traction System Aiming at High Energy Efficiency and Reduced Maintenance Work

堀江 哲 Akira Horie

関野真一 Shin'ichi Sekino

溝淵哲也 Tetsuya Mizobuchi

中村 清 Kiyoshi Nakamura



注：略語説明
IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

東日本旅客鉄道株式会社
209系950代試作車両と電車駆動制御システムの概念図

メンテナンスが必要な接点部の電子化や遮断器の自己診断化によってメンテナンスの省力化を図るとともに、情報制御システムとの連携により、電車の制御に必要な情報を一括制御できる電車駆動制御システムを開発した。

近年、電車駆動制御システムに要求されるニーズとして、(1) 加減速時のエネルギー効率の向上による省エネルギー、(2) メンテナンスの省力化、(3) 安全で確実な輸送のための情報化などがある。

これらのニーズにこたえるため、電車駆動制御にベクトル制御技術や粘着限界推定による空転滑走制御などを採用し、また、インバータ装置だけでなく、遮断器の自己診断も可能な情報制御に対応した駆動制御システムを開発した。さらに、複数のインバータ群では、乗り心地の改善を目的としたブレーキ力のアンバランス補正制御や、集約された遮断器の制御機能を持った統括制御を開発した。これら制御を行うハードには、小型・軽量化による省エネルギーを実現できる、高耐圧3.3 kV IGBTを用いたインバータ制御装置や、メンテナンスの省力化のために、従来の圧縮空気に代わる電磁方式の遮断器を採用した。また、マスタコントローラを、フェイルセーフ性を併せ持たせて電子化し、無接点化によるメンテナンスの省力化と、制御指令やモニタ情報を相互に情報伝送する電車情報制御システムへの対応を図っている。

1 はじめに

最近の電車駆動制御システムでは、主回路に使用される半導体素子として、高速スイッチングが可能なIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)の適用が主流となっている。高速にスイッチングすることにより、主電動機から発生する電磁騒音の低減や、エネルギー変換効率の向上が可能になった。インバータの制御方式としては、誘導電動機に出力するトルク電流成分と励磁電流成分を別々に制御するベクトル制御が用いられており、これに

よってトルク制御が高速に行えることから、空転滑走制御に応用して粘着力の向上を図っている。

また、メンテナンスの省力化では、各装置の機械的な接点を電子化すること、およびエア操作式を電磁操作式に変えることにより、接点や空気部品のメンテナンスを省略することが可能になっている。

ここでは、インバータ制御技術の高度化、フェイルセーフ性を考慮した電子マスタコントローラ、エアレス断流器、および最近の電車制御システムの応用例について述べる。

2 電車制御システムの特徴

2.1 インバータの制御技術の高度化

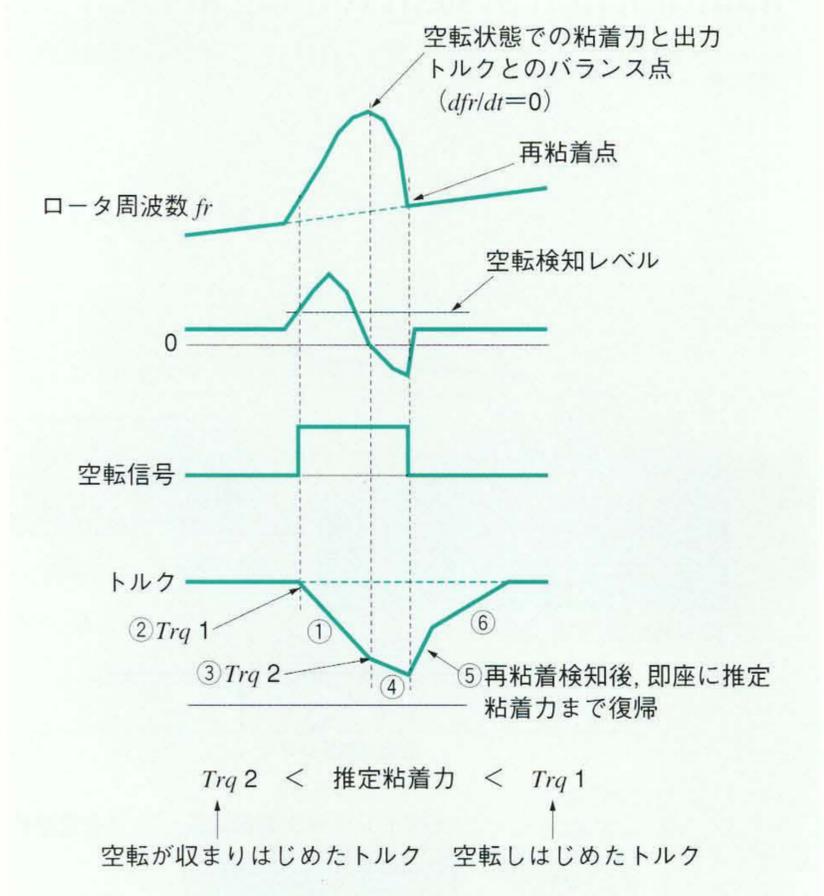
駆動用インバータでは、粘着性能や回生効率のいっそうの向上が常に課題になっている。これを実現するためには、電動機のトルク制御や電流制御の高速化、高精度化を図る必要がある。開発したベクトル制御のブロック図を図1に示す。この方式の特徴は次のとおりである¹⁾。

- (1) 多パルスモードと1パルスモードの両方を単一制御系でカバーすることができるので、制御の切換に起因するトルクの不連続性を防止できる。また、1パルスモードでの弱め界磁制御を自動的に行うことができる。
- (2) 誘導電動機定数の変動の影響を自動的に補償し、トルクの変動を抑制することができる。

このベクトル制御を応用した再粘着制御の概念を図2に示す。この方式の特徴は、(1) 再粘着検出を新たに導入したこと、および(2) 空転状態から現在の粘着力を推定する機能を追加したことである。この両機能により、再粘着を検出した後に即座にトルクを復帰できるようになった。その結果、利用粘着係数を向上でき、従来制御との比較で加速時間を8%短縮することができた。

電車の駆動システムの冗長性を向上するために、複数のインバータ群を設けて故障発生時の運転時間への影響を少なくする方法が採用されている。この複数のインバータ群を独立に制御するのではなく、相互に情報伝送することによって次のような制御が可能になる。

- (1) 回生ブレーキ力の適正配分化によるブレーキシユアの摩耗量の均等化
- (2) モータ回転数の比較による車輪径差の割り出しと、力行時の利用粘着係数の均等化

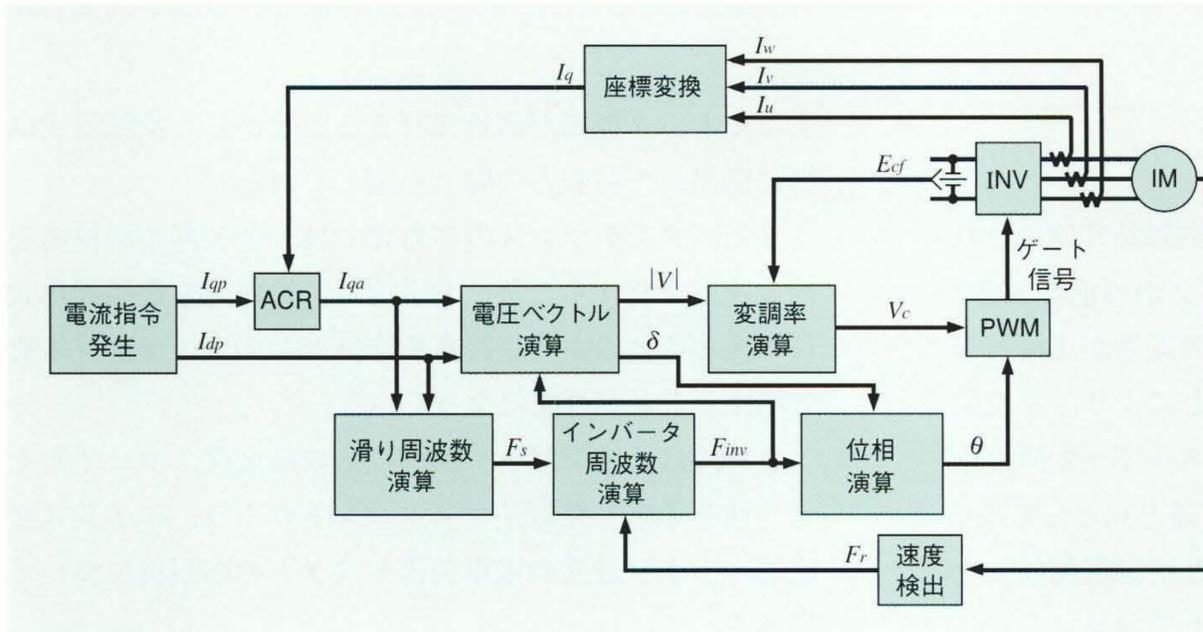


注：

- ① (空転信号発生時のトルク絞り制御)
- ② (空転信号発生時のトルク検出 → $Trq 1$)
- ③ [空転状態での粘着力と出力トルクとのバランス点 ($df/dr=0$) でのトルク検出 → $Trq 2$]
- ④ ($df/dr < 0$ でのトルク絞り制御)
- ⑤ -1 [推定粘着力の演算
推定粘着力 = $K(Trq 1 - Trq 2) + Trq 2$ ($0 < K < 1$)]
- ⑤ -2 (推定粘着力までのトルク復帰制御)
- ⑥ (指令トルクまでのトルク復帰制御)

図2 ベクトル制御を応用した再粘着制御

再粘着検出を導入したことと、空転状態から現在の粘着力を推定する機能を追加したことにより、加速時間を8%短縮した。



注：略語説明

- I_{qp} (トルク電流指令), I_{dp} (励磁電流指令)
- I_q (トルク電流), I_u, I_v, I_w (モータ電流)
- I_{qa} (トルク制御電流), F_s (滑り周波数)
- $|V|$ (電圧指令), δ (位相)
- F_{inv} (インバータ周波数)
- E_{cf} (フィルタコンデンサ電圧)
- V_c (制御電圧), θ (位相)
- F_r (ロータ周波数), ACR (自動電流制御)
- INV (インバータ), IM (誘導電動機)
- PWM (パルス幅変調)

図1 ベクトル制御のブロック図

電車駆動用インバータに適したベクトル制御を開発し、誘導電動機のトルクや電流制御の高速化、高精度化を可能とした。

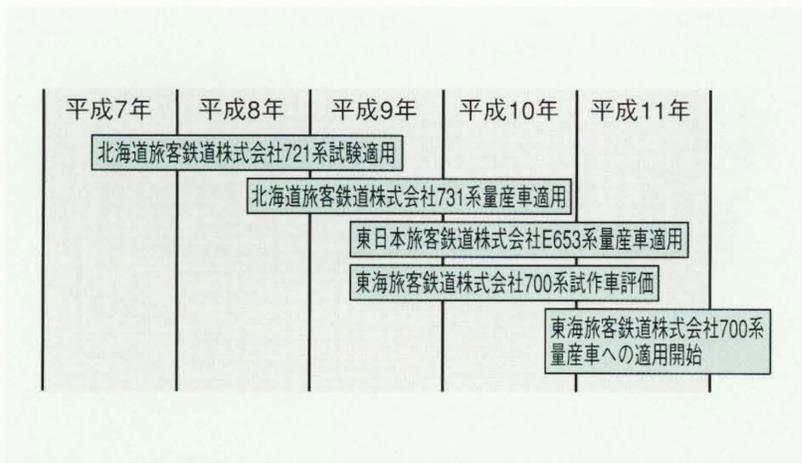


図3 日立製作所の交流電车用IGBT主変換装置の実績

交流回生率の向上，地上側変電設備へ与える影響が少ないなどの実績が評価され，IGBT主変換装置の交流電車への適用を拡大した。

(3) 制御状態監視と自動開放

上記の制御や，集約された遮断器の制御を行う統括制御部を設け，これによって複数群のインバータの協調制御が可能になった。

2.2 交流電車駆動制御システム

北海道旅客鉄道株式会社731系交流電車にIGBTを用いた主変換装置が適用されて3年が経過した²⁾。交流回生率が20%を超える省エネルギー実績や，PWMコンバータの発生する高調波電流は十分に小さく，地上側変電設備に与える影響が少ないことなど，その優位性が確認されている。その後，東日本旅客鉄道株式会社E653系交直両用電車へ適用され，現在では3.3 kV，1,200 AのIGBTを用いて主変換装置を大容量化し，東海旅客鉄道株式会社700系新幹線への適用を進めている(図3参照)。

2.3 メンテナンス省力化要素技術

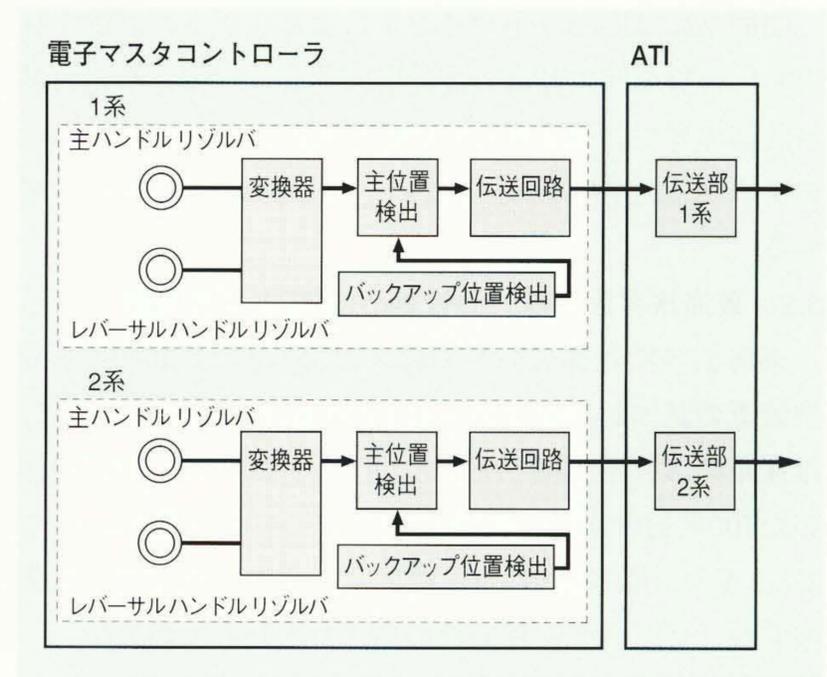
メンテナンスを省力化するためには，無接点化と空気制御部品の電動化があり，磨耗や劣化による故障や定期交換を削減できる。

(1) フェイルセーフ電子マスタコントローラ

マスタコントローラの無接点化を図るため，マイコン制御によるハンドル位置検出とシリアル伝送を採用，バックアップ位置検出によって各系を2重系とし，相互監視によって故障検知を行うことでフェイルセーフ性を考慮した。フェイルセーフ電子マスタコントローラの構成を図4に示す。

(2) エアレス断流器

エアレス断流器のハードウェア構成を図5に示す。チップの位置検出により，投入時間管理や異常検出が可能になり，断流器自体で自己診断機能を持っている。



注：略語説明 ATI (Autonomous Train Integration；車両情報制御)

図4 フェイルセーフ電子マスタコントローラの構成

主位置検出にリゾルバを用い，バックアップ位置検出によって各系を二重系化してフェイルセーフ性を向上している。

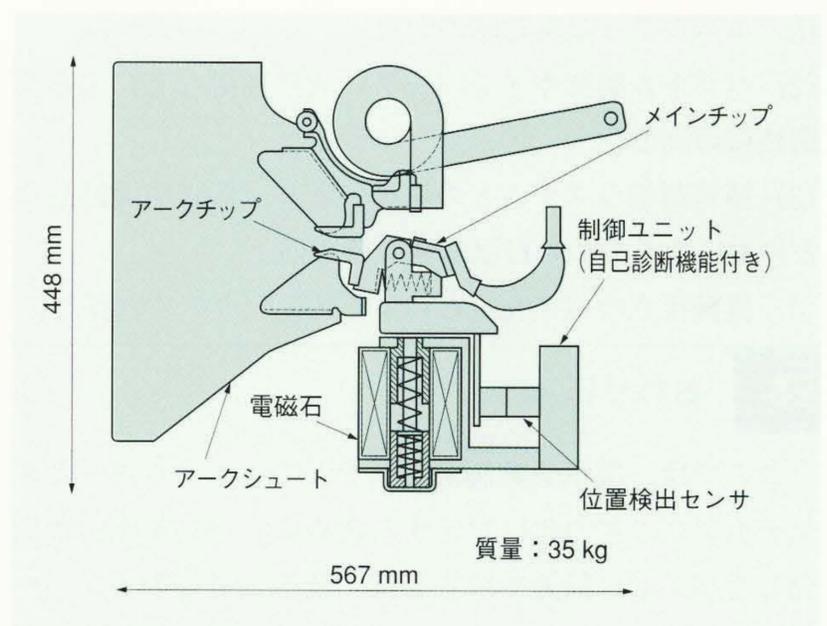


図5 エアレス断流器のハードウェア構成

投入時間の管理や異常検出が可能なエアレス断流器を開発した。

3 最近の電車制御システム

3.1 東日本旅客鉄道株式会社納めIGBTインバータ装置

東日本旅客鉄道株式会社は，首都圏の通勤・近郊電車の置き換え用として，量産先行車となる209系950代を1編成新造した。主回路は95 kW主電動機4台を2群制御する1C4M×2群制御システムとし，主回路素子は3.3 kV，1,200 AのIGBTを使用した2レベルインバータとすることにより，小型・軽量化を図っている。製作したIGBTインバータ装置の外観を図6に示す。

制御部には32ビットマイコンによるベクトル制御を採用し、軽負荷回生制御の高速応答化と、空転・滑走再粘着制御の高性能化を図っている。また、車両情報制御システムと高速指令伝送を行い、自己診断機能も持っている。

3.2 東海旅客鉄道株式会社納めIGBT主変換装置

東海旅客鉄道株式会社では、700系新幹線電車用主変換装置の試作評価を進め、約1年の走行実績を得た後に、量産車の製作を開始した。3.3 kV、1,200 AのIGBTを用いた700系新幹線電車用主変換装置の外観を図7に示す。275 kWの誘導電動機を4台制御し、小型・軽量化、高調波低減、低騒音化、保守性の向上を実現している。

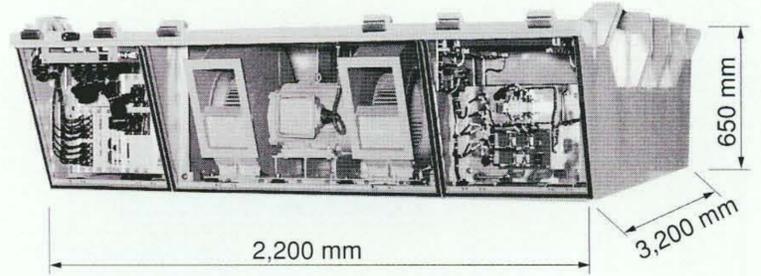


図7 東海旅客鉄道株式会社納め700系新幹線電車用主変換装置
小型・軽量化のほか、高調波低減、低騒音化、保守性の向上を図った。

日立製作所は、今後もさまざまなニーズにこたえるために、電車駆動制御システムのいっそうの高度化を進めていく考えである。

4 今後の動向

今後、電車駆動制御システムには、次のような技術の進展が必要と考える。

- (1) 主回路素子の高耐圧・大電流化による小型・軽量化、エネルギー変換効率の向上
- (2) ベクトル制御やインバータの統括制御などによる制御技術の高度化
- (3) 情報制御システムとの連携により、保守回帰延長などに対応するための自己診断技術の向上
- (4) 機械接点の電子化などによるメンテナンスの省力化

5 おわりに

ここでは、電車駆動制御システムの省エネルギーとメンテナンスの省力化に対応するために、日立製作所が開発したベクトル制御や粘着制御、統括制御等のインバータ制御技術、機械的接点を電子化したフェイルセーフ電子マスタコントローラ、自己診断が可能なエアレス断流器など、駆動制御システムの今後の動向について述べた。

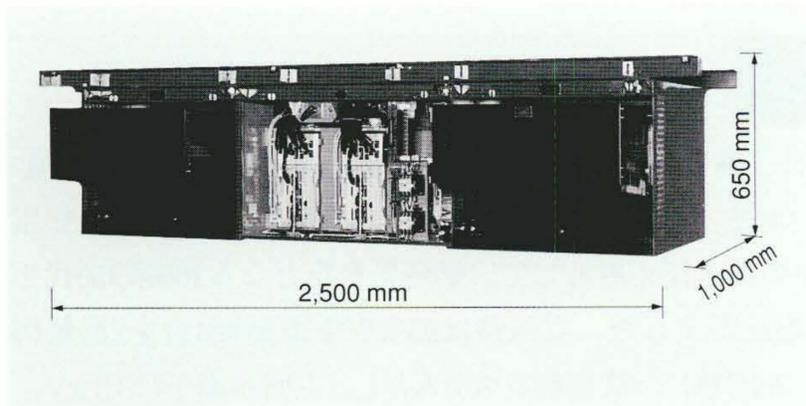


図6 東日本旅客鉄道株式会社納め209系950代IGBTインバータ装置

3.3 kV、1,200 AのIGBTを使用し、小型・軽量化を図った。

参考文献

- 1) 安田, 外: 単一制御系で全PWMモードに対応する車両用インバータのベクトル制御, 電気学会産業応用部門全国大会(1998)
- 2) 堀江, 外: 最近のIGBTを適用した電車駆動システム, 日立評論, 79, 2, 157~160(平9-2)

執筆者紹介



堀江 哲
1979年日立製作所入社, 水戸工場 交通設計部 所属
現在, 電車駆動制御システムの設計に従事
E-mail: ak-horie@cm.mito.hitachi.co.jp



溝渕 哲也
1979年日立製作所入社, 水戸工場 交通設計部 所属
現在, 電車駆動制御システムの設計に従事



関野 真一
1981年日立製作所入社, 水戸工場 交通設計部 所属
現在, 車両運転制御システムの設計に従事
E-mail: sekino@cm.mito.hitachi.co.jp



中村 清
1967年日立製作所入社, 交通事業部 所属
現在, 電車システム技術の取りまとめ業務に従事
工学博士
電気学会会員
E-mail: k-naka@cm.head.hitachi.co.jp