

東京メトロ銀座線車両向け PMSM 主回路システム

Permanent-Magnet Synchronous Motor Propulsion System for Tokyo Metro Ginza Line Trains

川合 弘敏

■ KAWAI Hirotoshi

春原 輝彦

■ SUNOHARA Teruhiko

田坂 洋祐

■ TASAHA Yosuke

深澤 真吾

■ FUKASAWA Shingo

昨今の鉄道車両用主回路システムは、環境問題の高まりや少子高齢化社会への移行による保守技術の継承困難などを背景に、高効率、低騒音、及び省メンテナンスへの要求が高まっている。

東芝は、これらを解決するため、永久磁石同期電動機 (PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor) 主回路システムを開発した。このシステムを東京メトロ銀座線車両に搭載し試験を行った結果、従来の誘導電動機 (IM: Induction Motor) 主回路システムと比較し、低騒音かつ省エネであることを確認できた。引き続き営業線での試験やメンテナンス性の評価などを行い、次世代主回路システムとしての確立を目指していく。

The demand for high efficiency, low noise, and reduction of maintenance work has been increasing in the field of propulsion systems for rolling stock, accompanying the rising awareness of global environmental issues and the shift to an aging society with fewer children in recent years.

In response to these conditions, Toshiba has developed a permanent-magnet synchronous motor (PMSM) propulsion system and evaluated this system through running tests on the Ginza Line of Tokyo Metro Co., Ltd. As a result, we confirmed that the PMSM propulsion system has lower noise and greater energy saving compared with the conventional induction motor (IM) propulsion system.

We are now aiming at the establishment of this system as a next-generation propulsion system by carrying out further running tests, evaluating maintainability, and so on.

1 まえがき

鉄道輸送は、従来から省エネの観点で環境にやさしいシステムと言われている。近年、改正省エネ法の施行に伴い省エネ、低騒音、低振動などいっそうの環境性能向上への要求、少子高齢化社会を背景とした保守の省力化への要望などが高まっている。

鉄道車両用の主電動機についても例外ではなく、これまで小型・軽量化及び高出力化をいかに達成するかが大きなポイントであったが、更に、省エネ、低騒音、及びメンテナンス性をいかに向上させるかも重要視されている。

これらを克服する有力な次世代主電動機として永久磁石同期電動機 (PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor) がある。このたび、東京メトロ銀座線01系車両において、PMSM 主回路システムの現車試験を実施した。

ここでは、PMSM 主回路システムについて、概要、特長、及び現車走行試験の結果について述べる。

2 01系車両の仕様

01系車両の外観を図1に、仕様を表1に示す。



図1. 01系車両 — 01系試験車両に、直流 (DC) 架線600 Vを電源とする PMSM 主回路システムを搭載した。

01 series train

表1. 車両仕様

Specifications of 01 series train

項目	仕様
編成	東京メトロ01系車両
MT比	3M3T
電気方式	DC600 V
最高速度	75 km/h
加速度	3.0 (km/h)/s
減速度	4.0 (km/h)/s (常用) 4.5 (km/h)/s (非常)
軌間	1,435 mm

MT比：鉄道車両で電動車 (M) と付随車 (T) の構成を示した比。

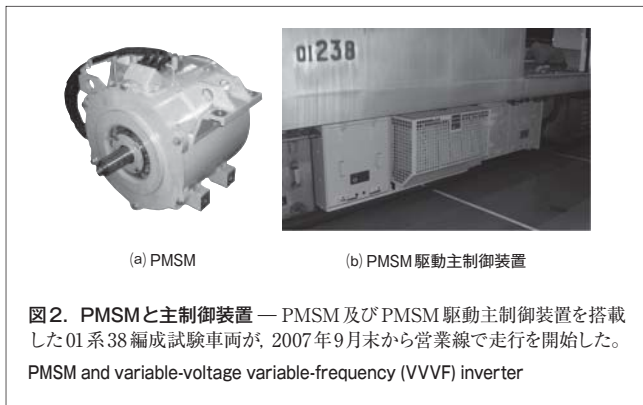
3 PMSM主回路システム

3.1 PMSM

3.1.1 PMSMの仕様 PMSMの仕様と定格を表2に、外観を図2に示す。既設の誘導電動機(IM:Induction Motor)と同じ外形寸法及び出力で、全閉自冷式構造となっている。

表2. PMSMの仕様と定格
Specifications and ratings of PMSM

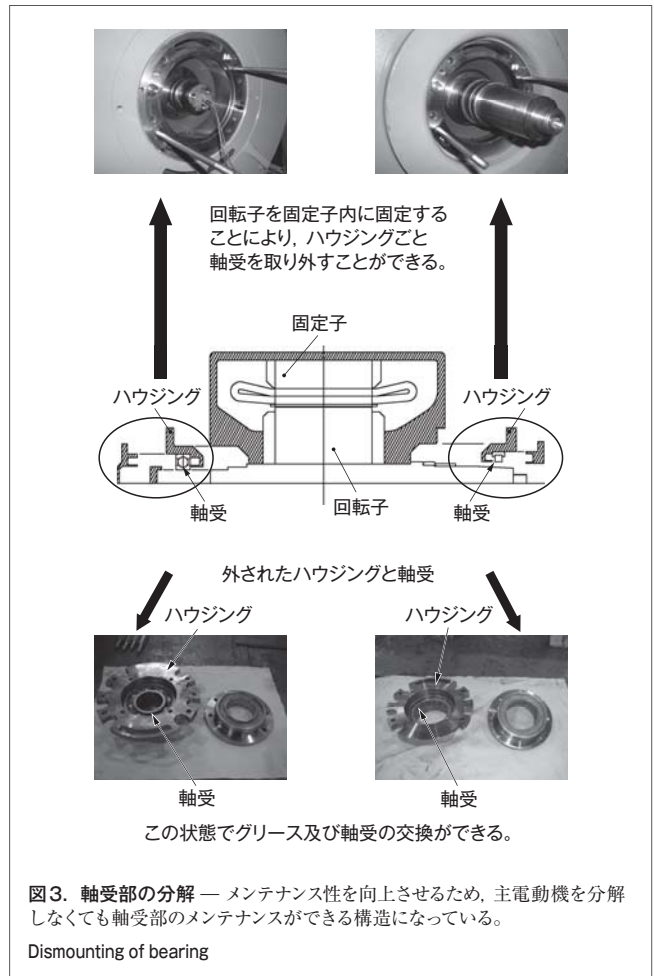
項目	仕様・定格	
方式	PMSM	
相数	3	
極数	4	
冷却方式	全閉自冷式	
駆動方式	平行カルダン歯車形継手方式	
装荷方式	台車装荷式	
定格	定格の種類	1時間定格
	出力	120 kW
	線間電圧	440 V
	相電流	204 A
	定格回転速度	1,890 min ⁻¹
周波数	63 Hz	
絶縁種別	Class200	
質量	610 kg	
最高使用回転速度	3,664 min ⁻¹	
その他	センサレス	



3.1.2 PMSMの特長 PMSMは、回転子に永久磁石を使用しているためロータバーや短絡環がなく、IMに比べ発熱量が少ない。そのため全閉構造にしてもフレームの冷却フィンや放熱器が不要となり、シンプルな構造となっている。

また、全閉構造のため低騒音化やメンテナンスの軽減を実現できる。

3.1.3 メンテナンス PMSMは回転子に永久磁石を組み込んでいるために、通常の主電動機よりも分解や組立てが複雑である。そこで、メンテナンス性を向上させるため、主電動機を分解しなくても軸受部のメンテナンスができるような構造を採用している(図3)。モータ外側から回転子を固定子

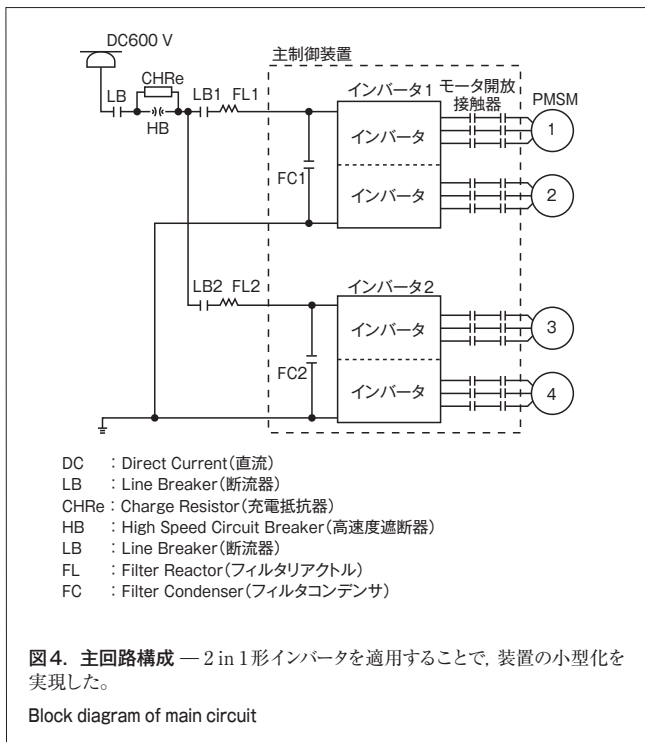


内に固定することで、ハウジングごと軸受を外す構造とした。

3.2 主制御装置

3.2.1 装置構成 PMSM 駆動主制御装置の主回路構成を図4に示す。PMSMは、各電動機の永久磁石の回転方向に応じて最適な位相の電流を流し込むことで、必要とするトルクの制御が可能になる。このため、IMのように、複数の電動機を1台のインバータで駆動することができず、1台の電動機に1台のインバータを用いる個別制御が必要になる。したがって、装置の大型化が懸念されるが、2台のインバータを1台の冷却器で賄う2 in 1形インバータを適用することで、装置の小型化を実現した。また、1台の制御ユニットで2個のPMSMを個別制御することにより、制御ユニットの小型化も実現した。更に、インバータとPMSMの間にモータ開放接触器を挿入し、万一インバータに異常が発生した場合、PMSMを切り離すことで、PMSMの誘起電圧により発生する電流がインバータへ流れ込むのを防止し、信頼性を向上させている。

3.2.2 回転子位置センサレス制御 PMSMは、発生トルクを精度よく制御するために、回転子の磁極位置を常に把握しておく必要があり、従来、主電動機にレゾルバと呼ばれる回転子位置センサを搭載し、磁極位置を精度よく検出しな



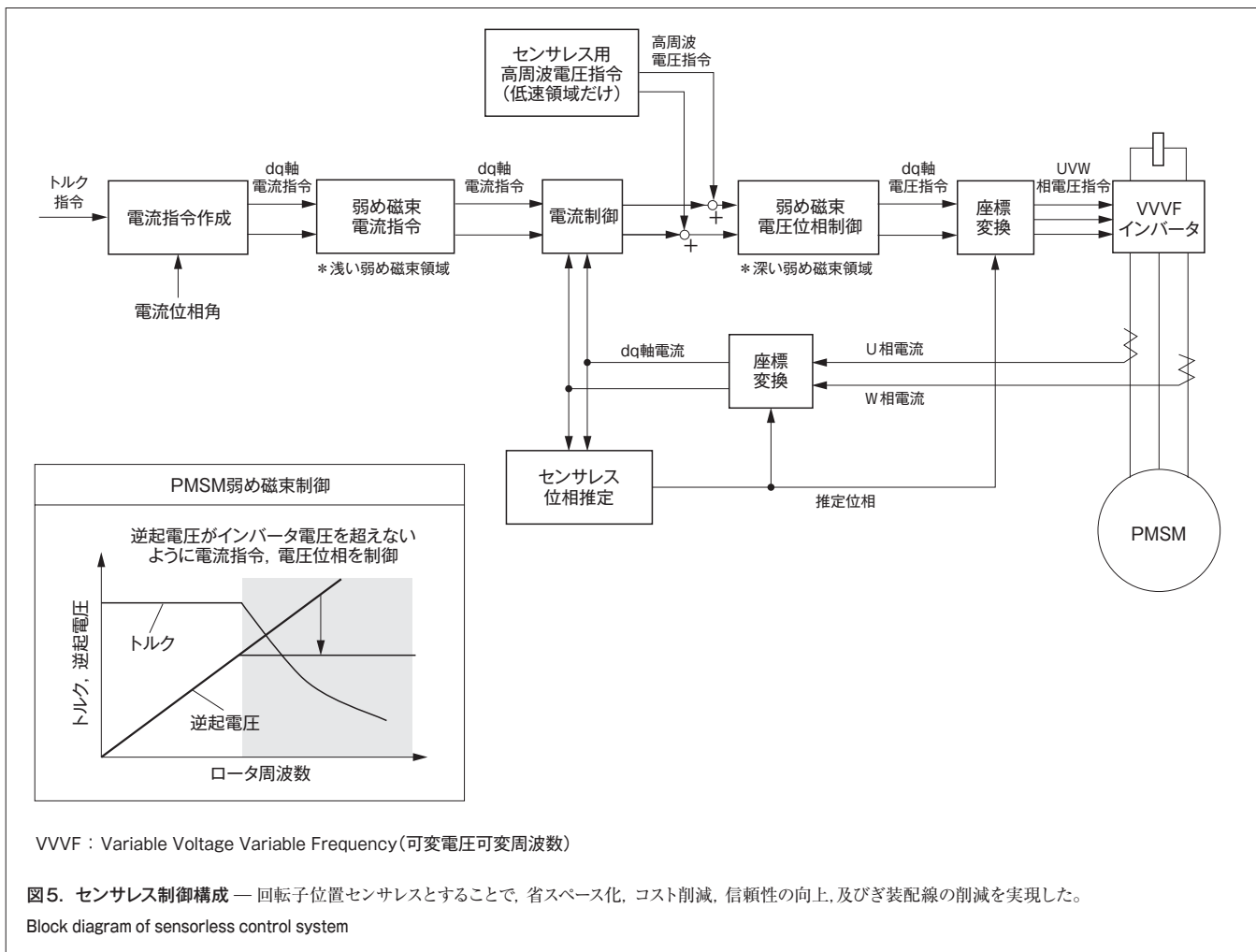
がら制御を行っていた。しかし、台車内の限られたスペースに大容量の電動機を収納する必要があるため、試験車両では図5に示すセンサレス制御構成を適用し、省スペース化、部品点数削減によるコスト削減、信頼性の向上、及びぎ装配線の削減を実現している。高速域では永久磁石による誘起電圧を利用した回転子位置推定を行い、誘起電圧の小さい低速とゼロ速時は、電動機の鉄心突極性を利用することで、高精度に回転子位置を推定している。

4 走行試験結果

試験車両(銀座線01系38編成)の構成を図6に示す。238号車にPMSM及びPMSM駆動主制御装置を搭載し、438号車及び538号車には現行のIM駆動主回路システムが搭載されている。2007年9月末から営業運転に投入し、更に、営業線における走行データの採取を行っている。

4.1 騒音測定

車内の床上1.2 mにおける騒音測定結果を、PMSMと現行の自己通風式IMを比較して表3に示す。車両速度にもよる



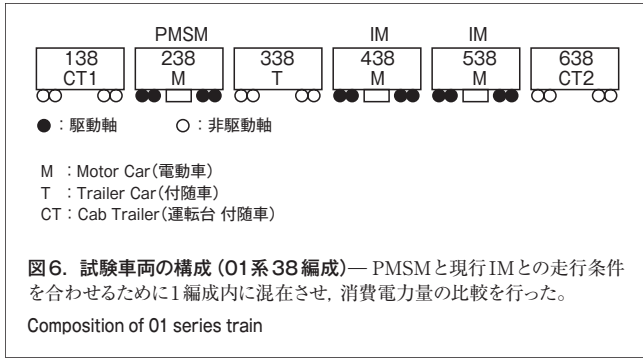
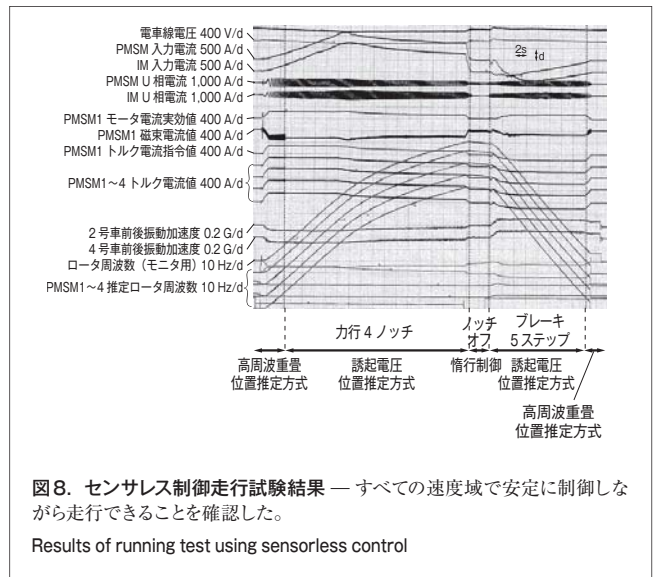
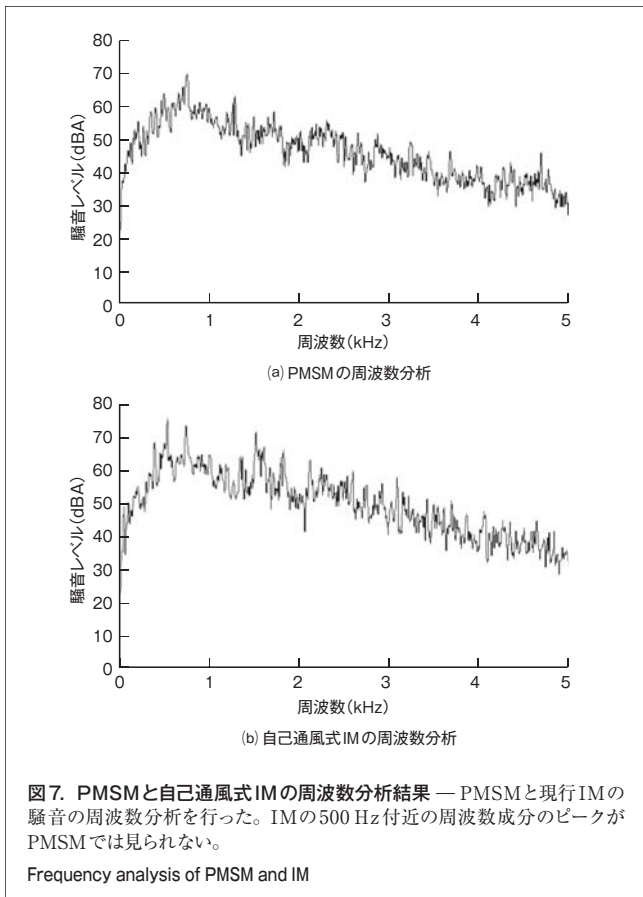


表3. 騒音の測定結果

Results of noise tests

車両速度 (km/h)	床上1.2m騒音 (単位:dBA)	
	PMSM	自己通風式IM
20	70.5	76.0
40	74.5	76.2
60	79.8	80.7
65	85.0	86.7

が、PMSMのほうが1.7～5.5 dBA低騒音であることがわかる。また、PMSMと自己通風式IMの車両速度66 km/hでの周波数分析結果を図7に示す。IMには構造上必要なファンと



ロータバーの周波数成分が500 Hz付近に見られるのに対し、PMSMには見られないことがわかる。

4.2 センサレス制御性能試験

ゼロ速から高速までの加減速試験結果を図8に示す。永久磁石による誘起電圧の小さい低速とゼロ速時に高精度の位置(回転角度)推定を実現しており、低速域から高速域まで安定に制御している。また、高速惰行中は、永久磁石による誘起電圧がフィルタコンデンサ電圧を超えて、自然に回生ブレーキが作用するのを抑えるため、惰行中もゼロトルクとなるようインバータを動作させる惰行制御を行っている。

4.3 消費電力量の低減効果

図9に示す2007年11月18日午後の空車試験走行(渋谷→上野間1片道)における、PMSMの力行^(注1)消費電力量の低

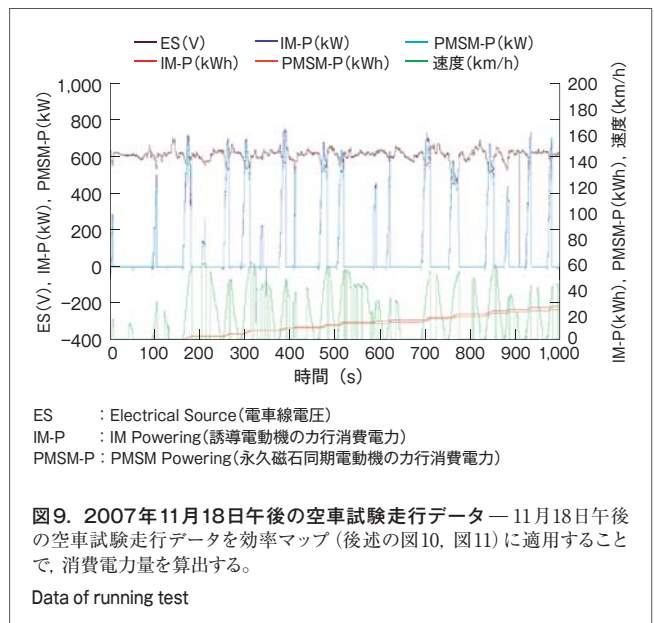


表4. 消費電力量の低減効果 (2007年11月18日走行結果)

Comparison of power consumption of PMSM and conventional IM

項目	PMSM (kWh)	IM (kWh)	低減率 [PMSM/IM](%)
計算値	91.3	97.7	6.6
実測値	92.0	98.7	6.8

減率を表4に示す。実測した電車線電圧及び入力電流から力行消費電力量を計算し、PMSMと現行IMを比較すると、6.8%の低減効果が得られることを確認した。これは、図9の走行パターンと力行4ノッチにおけるモータ効率マップ図10、図11から演算した力行消費電力量の低減率6.6%とほぼ同

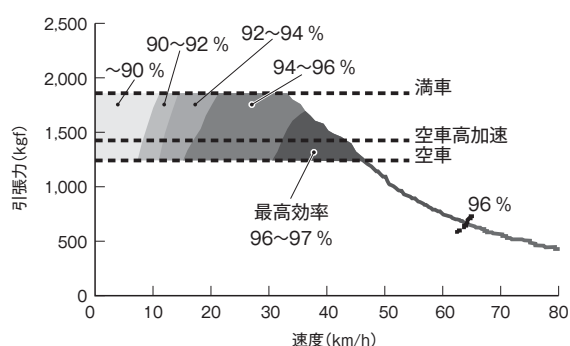


図10. PMSMの効率マップ—PMSM力行4ノッチの効率マップを示す。PMSMは高速域ほど効率が大きく、IMに比べて最高効率範囲が広い。

Efficiency map of PMSM

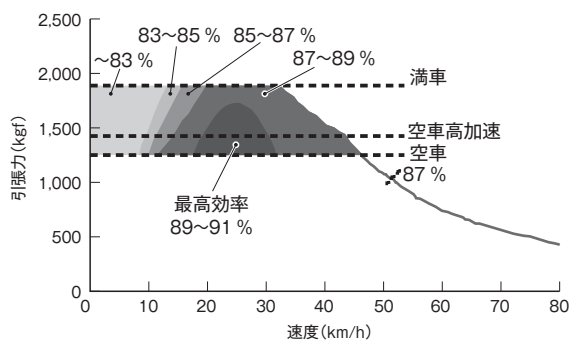


図11. 現行IMの効率マップ—IM力行4ノッチの効率マップを示す。PMSMに比べて全体的に6~7%効率が低く、最高効率範囲が狭い。

Efficiency map of conventional IM

(注1) “りっこう”と呼ぶ。鉄道において、電車や機関車などのモータやエンジンの動力を駆動輪に伝えて走行すること。

等の値であり、設計どおりの実測結果が得られたと言える。このように、PMSMを導入することで、省エネ性能が向上した。

5 あとがき

この試験により、PMSM主回路システムが、従来のIM主回路システムと比較し、低騒音かつ省エネであることを確認できた。引き続き営業線での試験を行い、メンテナンス性などの評価を行う予定であり、次世代主回路システムとしての確立を目指していく。

文献

- (1) 山田敏明, ほか. 更なる低騒音, 省エネルギーを実現する鉄道車両用パワーエレクトロニクス製品. 東芝レビュー. 61, 9, 2006, p.11-14.



川合 弘敏 KAWAI Hiroto

電力流通・産業システム社 府中事業所 交通ドライブシステム部。鉄道車両用ドライブ装置の開発に従事。

Fuchu Complex



春原 輝彦 SUNOHARA Teruhiko

電力流通・産業システム社 府中事業所 交通システム部主務。鉄道車両用主電動機の開発に従事。

Fuchu Complex



田坂 洋祐 TASAKA Yosuke

電力流通・産業システム社 交通システム事業部 交通車両システム技術部。鉄道車両システムのエンジニアリング業務に従事。

Transportation System Div.



深澤 真吾 FUKASAWA Shingo

東京地下鉄(株) 鉄道本部 車両部副主任。鉄道車両の設計に従事。

Tokyo Metro Co., Ltd.