

# 省エネルギーと環境適合性を追求する 鉄道車両用パワーエレクトロニクス装置

Power Electronics Equipment for Rolling Stock Pursuing Energy Saving and Environmental Accommodation

安岡 育雄      青山 育也      石川 倫章  
YASUOKA Ikuo      AOYAMA Ikuya      ISHIKAWA Michiaki

鉄道車両においては、新幹線、在来線、地下鉄、機関車などの駆動用電力変換装置の基本コンセプトである小型・軽量化、エネルギー効率向上、環境適合性の改善、乗りごこち向上、信頼性向上に関するコア技術が不可欠である。

当社は、このような流れの中で、最新のパワーデバイスとその適用技術及び車両駆動制御技術を融合させ、これらのコンセプトの実現に向けて大きく前進させることができた。

In rolling stock such as the Shinkansen, conventional trains, subways, electric locomotives, and so on, core technologies for miniaturization, weight reduction, and the improvement of energy efficiency, environmental accommodation, riding comfort, and reliability are essential, and form the fundamental concept for power converter equipment.

Toshiba has taken a major step forward in realizing this concept by integrating advanced power devices and application/control technologies.

## 1 まえがき

最近の鉄道車両用パワーデバイスは、高圧IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)の標準化が進んでおり、基本となっているのはユーロスタンダード型パッケージタイプであり、国内、海外のどのメーカーのデバイスでも取付け互換が可能となっている。

車両駆動としての高圧IGBTの主要定格は、図1に示すように、大別して3種類に集約される。

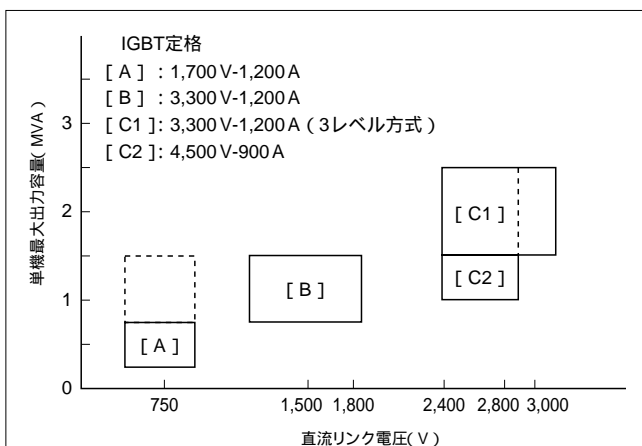


図1. 車両ドライブへのデバイス適用マップ - 出力容量は1パラレル接続時を示し、1.5 MVA 以下は自冷方式である。

Ratings of power devices for rolling stock

このような背景において重要な課題は、電力変換部及び駆動制御を含めたアプリケーション技術であり、市場のニーズにいかにか合致したコア技術を提供できるか、にかかっている。

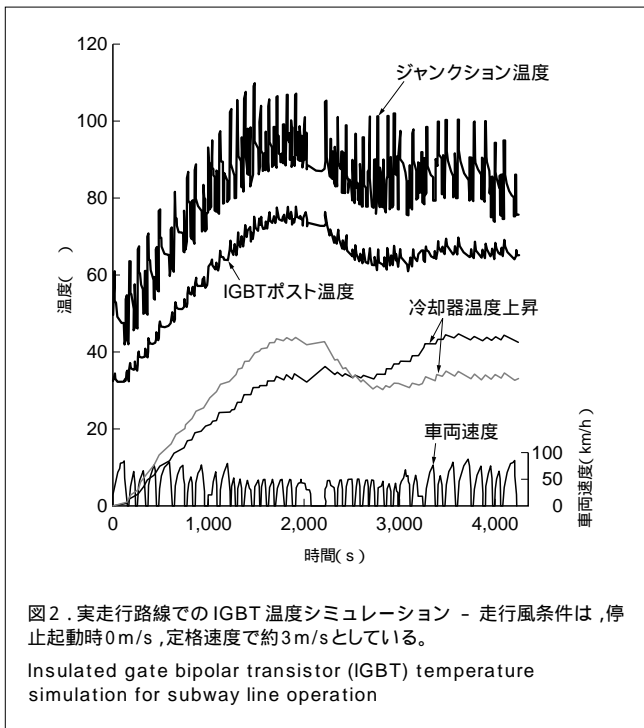
ここでは、小型・軽量化、省エネルギー化、環境適合性、快適性、信頼性向上の基本コンセプトに関する具体的コア技術について述べる。

## 2 基本コンセプトとコア技術

### 2.1 小型・軽量化(車体実装省スペース化)

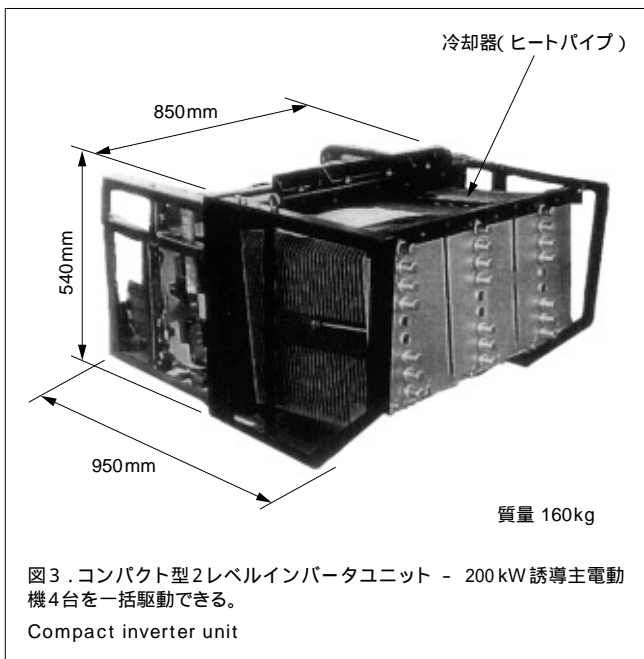
車両駆動用変換装置は、パワーユニットのスペースが1/2程度を占めるので、これを小型・軽量化すれば、車体実装上の自由度が増え、保守性も向上する。

在来線用変換装置のように冷却器(放熱部)の熱時定数が大きい(10分程度)自冷式の場合、加速中の走行風を考慮することで、従来の設計よりコンパクト化が可能となることが実車走行試験により検証できた。更に、IGBTポスト面(受熱部)の過渡熱抵抗を考慮し、走行パターンに合わせた温度上昇シミュレーションを実施することにより、変換装置の大容量化に対して冷却構造の最適化を図っている。図2は、実走行路線に合わせたIGBT温度シミュレーションの一例を示しており、車両速度に応じた走行風変化を考慮することにより、実車走行運転条件での温度測定結果との誤差も少なく、精度の高い冷却設計が可能となった。



また、小型・軽量化のもう一つの課題はIGBTの低損失化であり、当社は、現行IGBT比較で同じ飽和電圧に対してターンオフ損失を30%低減した3.3kV-1,200A 定格デバイスを量産化した。

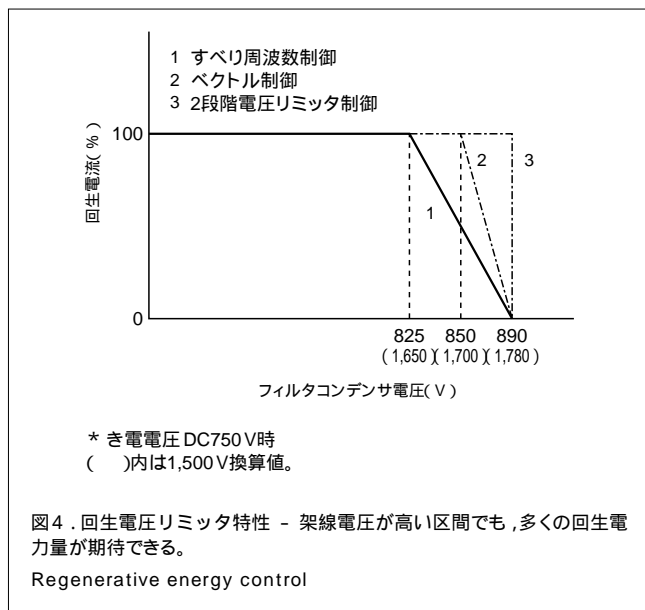
これらの冷却技術と低損失タイプIGBTを用いて開発したコンパクト型2レベルインバータユニットの外観を図3に示す。このユニットで、200kW 定格の誘導電動機4台を一括駆動できる。



## 2.2 省エネルギー化

省エネルギー化の施策として、機器の高効率化、軽量化及び回生電力量増大があるが、ここでは回生効率( = 実回生電力量/理想的な回生電力量 ),つまり、実運用上の回生率向上について述べる。

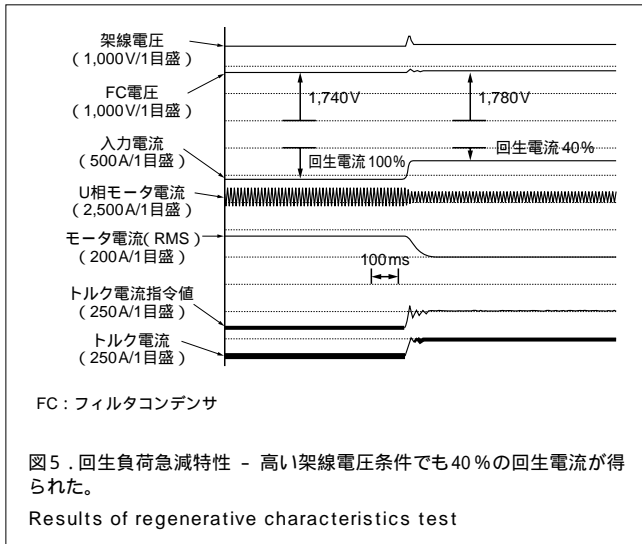
最近の新型式車は、大半がベクトル制御を採用している。これにより、従来のすべり周波数制御に比べて回生負荷急変時にも応答の良いフィルタコンデンサ電圧制御が可能となるので、図4における の特性のように、回生電圧リミッタゲインを高くできる。



この考え方を力行/回生の繰返し頻度の高い地下鉄電車用VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータに適用した場合の回生率の比較を表1に示すが、約7~8%の改善効果が得られた<sup>1)</sup>。更に、PI(Proportional Integral)制御による2段階電圧リミッタ制御を採用することで、図4の に示すフルスクエア特性が実現できる。ダイナミックシミュレータでの回生負荷急減試験の結果を図5に示すが、フィルタコンデンサ電圧が最大値に張り付いても、従来のよ

表1. 回生率の比較  
Comparison of regenerative ratios

制御方式	すべり周波数制御			ベクトル制御		
走行距離	47,372 km			23,163 km		
部 位	M 1車	M 2車	M 3車	M 1車	M 2車	M 3車
力行電力量 (kWh)	197,350	210,353	200,966	93,764	94,386	95,927
回生電力量 (kWh)	52,610	52,032	54,942	31,499	31,337	32,740
回生率 (%)	26.7	25.8	27.3	33.6	33.2	34.1



うに回生電流は0にならず、負荷に見合う電流を回生できるので、電系の送り出し電圧が高い区間や時間帯では、更に回生率の向上が期待できる。

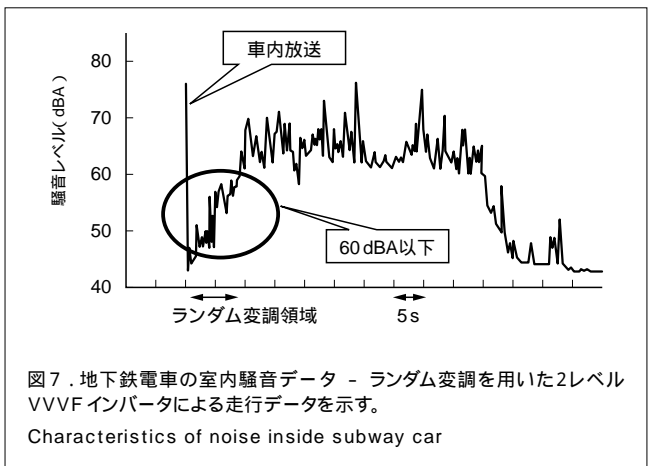
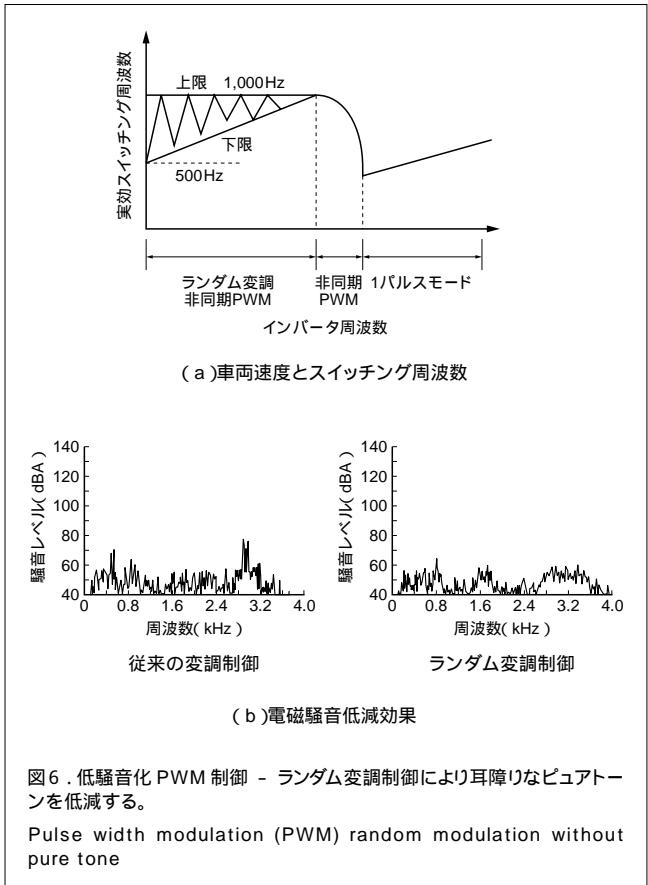
### 2.3 環境適合性

2.3.1 車両の騒音 鉄道車両の騒音は、走行時に発生するレールと車輪の摩擦音、車両の風切り音、モータやトランスの騒音、ブロワやクーラの送風音などがある。

特に、VVVFインバータで主電動機を駆動する車両や、電源装置にCVCF(Constant Voltage Constant Frequency)インバータを搭載する車両では、パワーデバイスのスイッチングに伴うモータやトランスからの電磁音が発生し、耳障りな騒音源となっている。

(1) 車両駆動装置の低騒音化 電磁音を抑制する技術の一つとして、パルス幅変調(PWM)キャリア周波数のランダム変調制御がある。これは図6に示すように、キャリア周波数を上限と下限の間で、あるランダム関数に基づいて変調することで高周波スペクトルを分散し、特定の高調波成分を出さないようにして電磁騒音を低減する制御方法である。周波数変調幅は、おおむね500~1,000Hz程度である。当社が開発した高速演算プロセッサ(PP7)の適用により、上記のランダム変調が容易となり、制御周期やA/D(Analog/Digital)割込みタイミングをPWMキャリアに同期させることができるために、ビートを生じることもなく、安定した制御系を構築できる。適用事例として、地下鉄電車用2レベルVVVFインバータ駆動による走行試験での車内騒音データを図7に示す。車両速度が低いPWMランダム変調制御の適用領域では、車内騒音が60dB以下に抑えられており、低騒音化の効果が出ている<sup>2)</sup>。

(2) 車両電源装置の低騒音化 ゲートターンオフサイリスタ(GTO)を用いた電源装置では車内騒音が70dBを

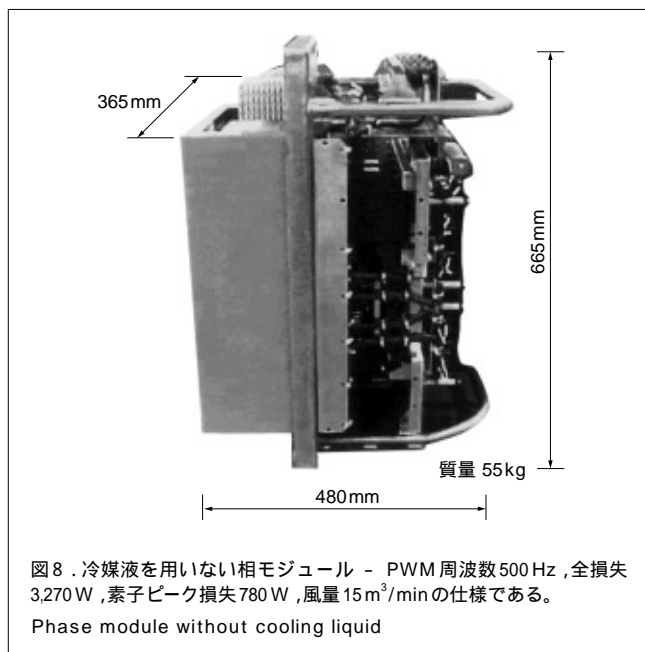


を超えるケースもあったが、IGBT化によりキャリア周波数を約3倍に上げることで、騒音低減を図っている。

また、電源装置の騒音発生源は出力の交流フィルタ用リアクトルであるため、リアクトルの鉄心材料やギャップの構成の仕方によっても騒音が低減できる。すなわち、高周波での損失が少ない6.5% Siケイ素鋼板を採用し、また、振動源であるギャップを薄くしたり、含浸材でギャップと鉄心を完全に固定することで、安定した低騒音化が図れる。

2.3.2 冷媒(液)レス IGBTの冷却器として,在来線では純水を使用したヒートパイプ(一部に冷媒液を使わない直接フィン)が主流となっているが,新幹線や機関車などの大容量変換器では,専用冷媒液を使用した沸騰冷却が主流となっている。

当社では,機関車駆動用550 kWモータを制御するインバ



ータとして,冷媒液を使わないシンプルパワーユニットを製品化した。これは,IGBTの発生損失を分散化して,素子取付けフィン部の温度こう配を低減することにより実現した。

1相分ユニットの外観を図8に示す。

#### 2.4 快適性(乗りごち改善)

最近の新型式車では,編成中の電動車比率の低減要求が強く,このためモータ軸当たりの引張力が大きくなるので,雨天時などレール面の粘着条件が悪い状態では,空転再粘着を繰り返す可能性が高くなっている。このため,加速特性の低下や再粘着時の粘着力の急激な変化による乗りごちの低下が課題となっている。

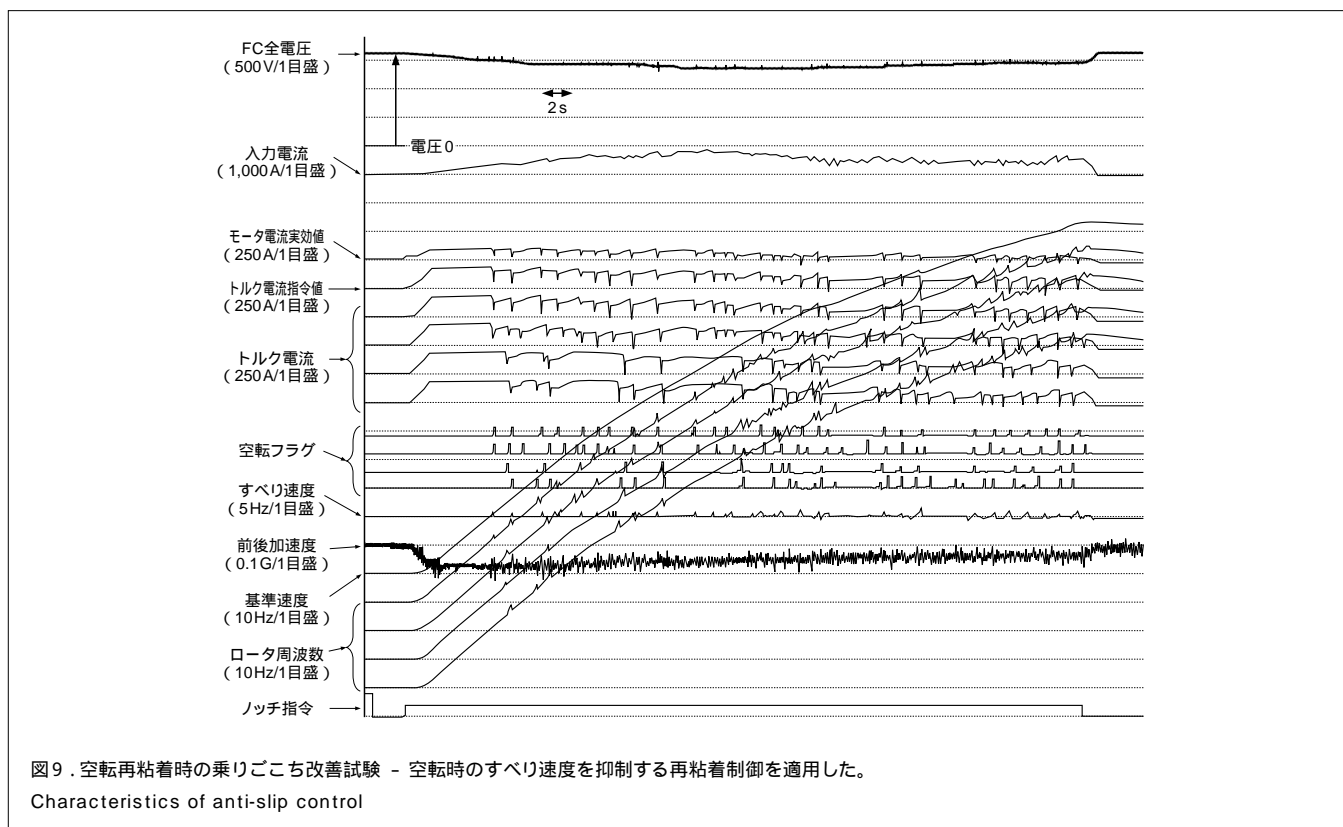
当社ではこれを改善するため,空転時のすべり速度を学習し,再粘着時のトルクパターンを最適化することにより,再空転頻度を低減するとともにすべり速度を制限し,乗りごちの改善を図った<sup>(3)</sup>。

乾燥時の粘着係数が19%の条件で,各車輪に散水(散水量 = 6 l/min)させた時の空転制御特性を図9に示す。

平均加速力は83%を維持し,乗りごちを示す前後振動加速度も空転再粘着時0.04 Gp-p以下と良好な特性が得られている。

#### 2.5 信頼性向上

現在製品化されているベクトル制御車両は,モータの回転数を検出する速度センサを必要としている。このセンサは,モータの反駆動軸側に歯車とペアで設置されており,モータ



本体の大きさを制限する要素となっているうえ、高温、振動、電磁ノイズにさらされる環境で使用されるため、高い信頼性を要求される。

当社は、産業ドライブで実績が得られているdq軸誘起電圧演算方式を用いた速度センサレスベクトル制御をベースとして、実車走行試験を通して、空転再粘着制御、回生負荷遮断、こう配での後退起動制御などの車両駆動用アルゴリズムを確立した<sup>(4)</sup>。

速度推定基本演算式(1)は、2次磁束 $\psi_2$ に直交する誘起電圧 $E_q$ がq軸に一致するようにインバータ周波数 $\omega_1$ を制御する。

$$\omega_1 = \frac{E_q}{\psi_2} - G(S) \times E_d \quad (1)$$

$\omega_1$ とすべり周波数指令 $\omega_s$ から、速度周波数 $\omega_R$ を算出し、この変化率により空転検出を行う。

$$R = \omega_1 - \omega_s \quad (2)$$

ここで、 $E_d$ 、 $E_q$ はd軸、q軸の誘起電圧を、 $G(S)$ は補償要素を示す。

当社では、モータ個別制御や台車制御のみならず、1台のインバータで4個のモータを一括駆動するシステムに関して

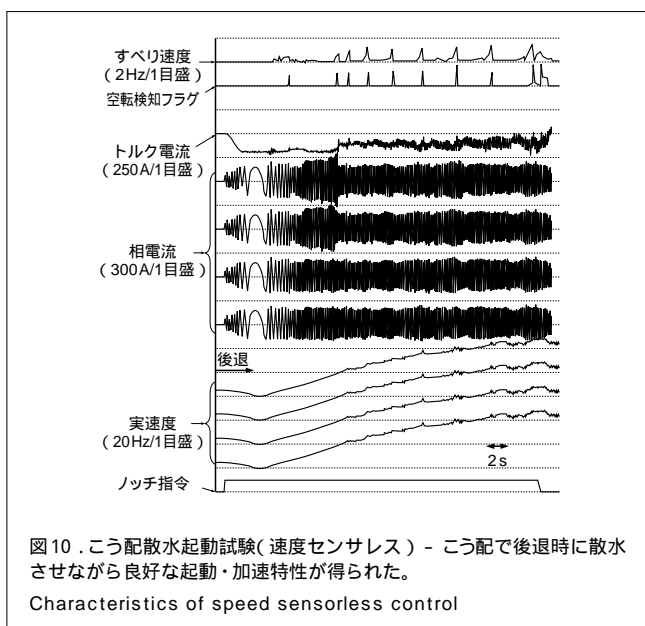
も実用化試験を完了した。一括駆動システムにおいて20%こう配で散水しながら実車走行したときの後退起動特性を図10に示す。空転検知遅れ、すべり速度、トルク絞り量とも従来の速度センサ付きベクトル制御と同等の特性が得られた。

### 3 あとがき

鉄道車両は公共性の高い製品分野であり、ここで述べた環境に優しい車両ドライブを目指したコンセプトとコア技術を、新幹線、在来線、機関車など多くの車種に適用拡大していきたい。

### 文献

- (1) 戸田伸一,ほか.“電気鉄道におけるベクトル制御による省エネルギー化の一方法”.平成11年電気学会全国大会.p.264-265.
- (2) 野田智史,ほか.“台車制御IGBT 2レベルVVVFインバータ装置”.平成12年電気学会全国大会.p.2289-2290.
- (3) 戸田伸一,ほか.“鉄道車両駆動用空転再粘着制御に関する一考察”.電気学会論文誌.121-D,9,2001,p.923-933.
- (4) 結城和明,ほか.“速度センサレスベクトル制御の電鉄への適用について”.平成13年半導体電力変換研究会.資料番号SPC-01-67.



安岡 育雄 YASUOKA Ikuo  
社会インフラシステム社 府中社会インフラシステム工場 交通ドライブシステム部主幹。車両ドライブシステムの開発・設計に従事。電気学会会員。  
Fuchu Operations - Social Infrastructure Systems



青山 育也 AOYAMA Ikuya  
社会インフラシステム社 交通システム事業部 交通車両システム技術部グループ長。車両ドライブシステムの技術開発に従事。電気学会会員。  
Transportation Systems Div.



石川 倫章 ISHIKAWA Michiaki  
社会インフラシステム社 府中社会インフラシステム工場 交通ドライブシステム部グループ長。車両ドライブシステムの開発・設計に従事。電気学会会員。  
Fuchu Operations - Social Infrastructure Systems