

# モーダルシフトを支える機関車・貨物輸送システム

## Locomotive and Freight-Traffic System Supporting Modal Shift

長瀬 光範      沼崎 光浩

NAGASE Mitsunori

NUMAZAKI Mitsuhiro

日本の鉄道貨物輸送は機関車により貨車をけん引する動力集中方式が主流であり、異なる電化区間(直流電化区間、交流電化区間)や非電化区間へも、機関車を交換することで貨車を直通運転することができる。近年、鉄道車両の駆動システムは誘導電動機を用いたものが主流となり、半導体素子も大容量・高速スイッチングに対応するものが開発され、制御システムの高速化とあわせ瞬時値トルク制御が実現されるなど、高出力・高けん引力を必要とする機関車システムへの適応が可能となっている。東芝はこのような技術動向を取り入れ、高出力で保守省力化が可能なインバータ制御方式の機関車を開発した。これら機関車は、運用面でのニーズにも応えるために、電気式ディーゼル機関車、交直流電気機関車、直流電気機関車をそろえ、国内のほとんどの線区に対応できる。また、速達性の向上などを目的に、動力集中形(機関車方式)から動力分散形(電車方式)へ移行するための固定編成貨物電車の開発も進めており、現在評価試験を実施中で、新世代の貨物輸送システムとして輸送ニーズの多様化にも対応しようとしている。

Freight trains in Japan are mainly powered by locomotives employing a concentrated traction system. By passing the freight cars to a variety of different locomotives, the train can travel through sections of direct and alternating current as well as through areas that have not been electrified. In recent years, the induction motor has become the main type of motor used. The control systems of such motors use high-capacity semiconductors capable of high-speed switching. These control systems are able to perform near-instantaneous control of the motor torque, leading to the development of high-power locomotives with large tractive force capability. Toshiba has developed these technologies and incorporated them into an inverter system for a locomotive that offers both high power and low maintenance. To meet the needs of different lines, diesel-electric locomotives, AC/DC electric locomotives, and DC electric locomotives can be used to cover almost all of the railway sections in Japan. In order to increase expediency, a new system to meet the freight transportation needs of the next generation is currently being tested where the powering of a fixed train set has been considered for both the current concentrated traction system and the distributed traction system.

### 1 まえがき

鉄道貨物輸送に使用されている機関車は、置換え用の車両を投入する時期であり、高速化が図られている旅客車両と同一線路上で運用されるため、旅客車両運用を阻害しないよう、機関車の高出力化と高けん引力化が必要である。また、保守性を向上し機関車運用効率を高めていく必要もある。

新形式機関車の開発方針は、鉄道輸送全体の動向を見据え、高出力化と保守性向上を主眼に高冗長性や安全性などを踏まえて決定され、それに基づいて開発と量産化が進められている。

主電動機に誘導電動機を使用することで、高出力化と再粘着性能が向上し、整流子の保守削減も可能となる。主電動機を制御する制御機器も、インバータ装置に代表されるような半導体素子を利用した無接点化を図ることが可能であり、機関車全体での保守省力化に寄与している。

このような基本構想をもとに、主制御装置と補助電源装置の構成の高冗長性を十分に検討して開発が進められ、随時量産

車両を投入している。開発シリーズの投入線区を図1に示す。

これら既存車両の更新のほか、新しい鉄道貨物輸送システムの開発として、動力分散形(電車方式)固定編成方式を

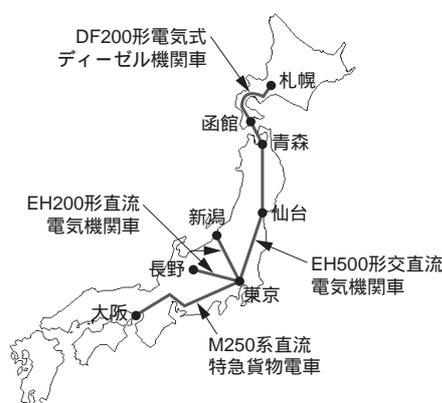


図1. 開発シリーズの投入線区 - 開発した機関車と輸送システムが投入されている線区を示す。

Railway sections in which newly developed series introduced

採用した高速貨物電車システムも開発し、新システムへのニーズにも応えている。これらのシステムは、東北本線、函館本線、中央本線、東海道本線などへ投入され、大阪、東京、函館、札幌など主要都市間の鉄道貨物輸送を担う全国展開が可能なシステムラインアップをそろえている。

## 2 DF200 形電気式ディーゼル機関車

DD51形液体式ディーゼル機関車の置換え用として開発を行い、随時量産車を北海道地区へ投入している。東芝は、この機関車の主回路電気品及び補助電源装置、モニタリングシステムなど電気品一式を納入している。

この機関車では、DD51形の重連運用を解消することと、高速化が図られている旅客列車とのダイヤ協調を図るため高出力化が必要であるが、液体式変速機では構造や寸法の制約からそれが困難であり、保守性についても摩耗部品の多い機械部品を削減するため、ディーゼル発電機にて発電した電力で主電動機を駆動する電気式ディーゼル機関車としている。DF200形機関車の外観を図2に示す。

重連運用解消と高出力化のため、ディーゼルエンジンは1,800 PS × 2台を6軸車体(F形)に搭載し<sup>(1)</sup>、更に重連運用と同等の冗長性を保つため、主回路システムと補助電源システムは完全2群構成とし、主電動機回路は冗長性から1台ごとに開放可能で、最適制御を行える個別制御方式を採用している。電気ブレーキ採用のニーズも強く、発電ブレーキ用抵抗器の搭載や、主要電気回路の2群化、開放単位の細分化など回路構成機器が多く、装置の小型・集約・軽量化を行い狭軌(軌間1,067 mm)最大出力の2エンジン方式で高冗長度を備える機関車として開発している。DF200形主回路のブロック図を図3に示す。

このシステムでは、発電機側に流れる交流電流が、インバータ側のコンデンサにより瞬間的に進相電流と同様な位



図2 . DF200 形電気式ディーゼル機関車 - 1,800 PS ディーゼルエンジン発電機2台を搭載した、インバータ駆動方式のディーゼル機関車である。  
Type DF200 diesel-electric locomotive

相関係になることがあり、また負荷トルクの急変により発電機の速度が一瞬変化することでも、進み力率と同様の磁束関係が成立する。同期機の電機子反作用は、進み力率の場合には、電機子電流により発生する起磁力が界磁磁束を強める。したがって負荷電流が増加すると、発電機の出力電圧も増加し不安定となる。同期機は、制動巻線(ダンパーバー)を設けることで回転子に同期しない電機子反作用分を打ち

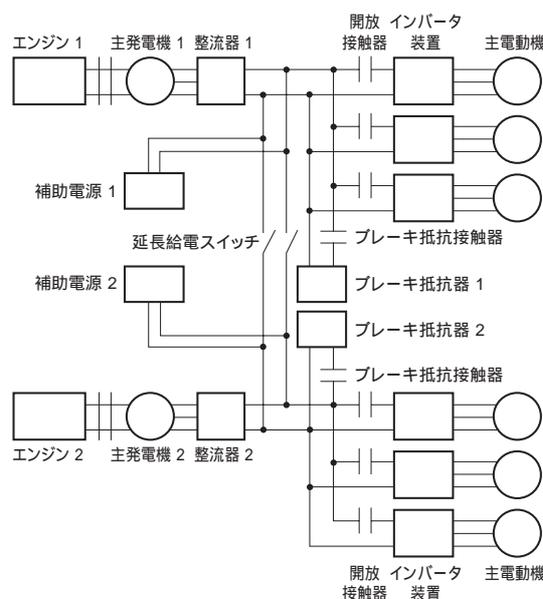


図3 . DF200 形主回路のブロック図 - ディーゼルエンジンを2台搭載し、主回路も完全2群化されている。万一の故障時には他群から主回路・補助電源とも給電可能である。高粘着と冗長度を加味して、主回路は個別制御とした。

Block diagram of Type DF200 main circuit

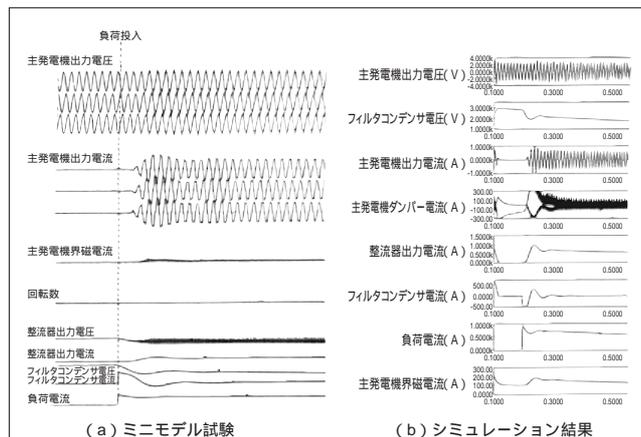


図4 . 制動巻線付き発電機のミニモデル試験とシミュレーション結果 - 負荷出力変動などにより発生する主回路の電圧変動を抑制し、安定した動作を確保できるようシミュレーションとミニモデル試験で検証を行い、実機に反映した。

Mini model generator with damping bar testing data and simulation results

消すように電流が流れる。これにより出力電流変動に伴う出力電圧の不安定性を補償することが可能になり、特に、容量性負荷に起因する電機子反作用の変動に伴う増磁作用を打ち消すことができ、出力電圧変動が抑制され、主回路を安定化することができる。これらは、EMTPシミュレーションとミニモデル試験を実施して安定性を確認している<sup>2)</sup>。ミニモデル試験とシミュレーション結果を図4に示す。

### 3 EH500 形交直流電気機関車

ED75形交流電気機関車の置換え用として開発し、首都圏～函館間を結ぶ貨物輸送へ随時量産車投入を行っている。EH500形交直流電気機関車の外観を図5に示す。

現在この区間は、直流電化区間ではEF65形直流電気機関車、交流電化区間ではED75形交流電気機関車、青函トンネル区間(交流電化区間)ではATC(自動列車制御装置)設備を備えるED79形交流電気機関車と2回の機関車交換を行っている。運用効率と速達性向上を目指し交直流電気機関車方式として、青函トンネル走行にも対応できるよう抑速発電ブレーキ、ATC設備を搭載している。また、EH500形の開発は、ED75形/ED79形の重連運用解消も目的としており、性能は短時間定格を4,520 kWに設定し、ED75形重連相当の性能を確保している。

重連運用の解消を図るとともに、青函トンネルにおける運転冗長性の確保、25%勾配(こうばい)における安定した勾配起動性能を確保するため、8軸駆動方式を採用した2車体永久固定方式のH形機関車とし、1コンバータ1インバータ2主電動機を駆動単位とし、補助電源装置は1両に2台搭載して運転冗長性が十分確保できるようにしている<sup>1)</sup>。これらの要求を満足するには、交流/直流電化区間向け機器の搭載、開放単位の細分化、発電ブレーキ抵抗器搭載、補助電源装置の二重化、ATC装置搭載など搭載装置が多くなっている。また、交流電化区間(単相交流20 kV)では特別高圧が機関車内に



図5 . EH500 形交直流電気機関車 - 4,520 kW の出力を備え、青函トンネル走行も可能な交直流電気機関車である。  
Type EH500 AC/DC electric locomotive

引き込まれるため、感電事故防止に対する安全性の確保など、装置構成の最適化とぎ装機器配置は大きな開発ポイントとなっている。駆動制御部の開発ポイントとしては、旅客車両でも普及してきた鉄道車両電動機用ベクトル制御を採用し、車輪空転と再粘着の迅速な対処が可能となっている。このベクトル制御に、トルク低減制御関数と時定数の適正值をシミュレーションにより求めている。このシミュレーションは、構内走行実測値による車輪空転速度に対する接線力係数変化から回転部分機械系時定数を求めて行っている。構内走行実測値から車輪空転速度  $n_s$  に対する電動機引張り指令  $T_{MTA}$  をプロットし、接線力係数  $\mu_v$  の近似線を中心に引いたものを図6に示す。接線力係数  $\mu_v$  は軸重で正規化され、実験式を求め、接線力係数の傾き  $= 8.6 \times 10^{-3} \text{ h/km}$  が得られ、機械系時定数  $m$  は0.38sとなる。これは、既存車両であるED75形交流電気機関車の  $m = 0.31 \text{ s}$  に類似した値である<sup>3)</sup>。

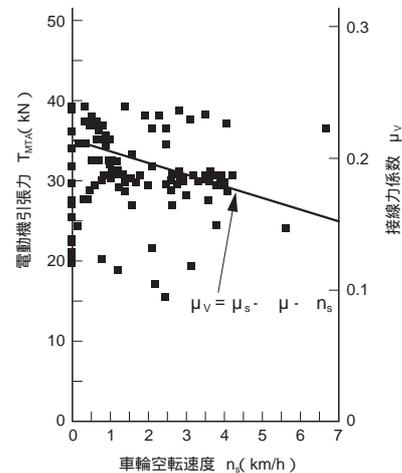


図6 . 車輪空転による接線力係数の変化 - 車輪空転速度に対する接線力係数の変化から回転部分機械系の時定数を求め、トルク低減制御関数と時定数の適正值をシミュレーションにより求めている。  
Change in tractive coefficient due to wheel slip

### 4 EH200 形直流電気機関車

EF64形直流電気機関車の置換え用として開発し、中央本線、篠ノ井線をはじめ、直流電化勾配線区へ投入されている。機関車出力は、短時間最大定格を5,120 kWに設定し、EF64形直流機関車の重連相当の性能を確保している。EH200形直流電気機関車の外観を図7に示す。

この機関車では、安定した勾配起動性能の確保と冗長性の向上を図るため8軸機関車とし、粘着性能向上を図るため各軸個別ベクトル制御を採用したほか、軸重移動量を最小限に抑えるため、中間連結器高さに配慮している。運転冗長性を確保するため、補助電源装置に異常が発生した場合には主回路インバータ装置の1台を速やかにCVCF(Con-

stant Voltage Constant Frequency : 電圧・周波数一定) 運転に切り替える,デュアルモード方式を採用している。

車体構成及びデザイン面は,21世紀初頭を飾るにふさわしいざん新たなデザインを採用しながらも,車体強度が確保できるよう,構造部材の強度解析など各種シミュレーション技術を用いて開発を行っている。車体は,圧縮/引張荷重に耐え,ねじれによる亀裂が生じない十分な強度を持つよう,図8に示すモデルでシミュレーションを行った。先に開発したEH500形交流直流電気機関車の解析も実施しており,これらのデータを基に,強度上の難点になる運転室前面ガラス回りや側面窓,側扉などの開口部に対して更に詳細なシミュレーションを行い,構造部材の最適化と効果的な補強部材の構成を検討している。

主電動機,主回路インバータ装置,ブレーキ抵抗は,車体側面から冷却風を取り入れる強制風冷方式であり,車体ダクトの構成が重要となる。車体ダクトは,雨水浸入対策として送風機を利用した遠心分離方式で構成しており,分離された雨水は車体ダクトに設けた排水口から排水する方式としている。この車体ダクトは,圧損を低減しつつ,機器配置及び

装配線用電線ダクトと干渉しないよう検討する必要があり,三次元CADデータとリンクしたダクト内圧損シミュレーションを採用して車体ダクト構成の最適化を図っている<sup>4)</sup>(図9)。

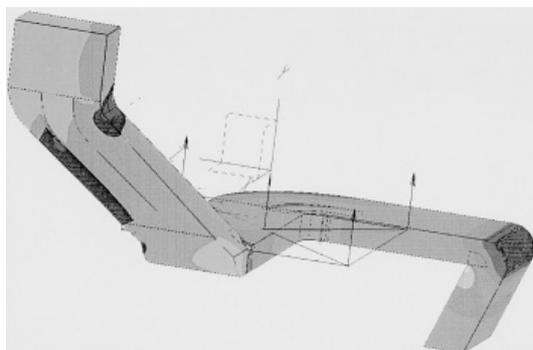


図9.ダクト内圧損シミュレーションモデル - 車体ダクトは,圧損を低減しつつ,機器の配置とぎ装配線用電線のダクトが干渉しないよう,三次元CADデータとリンクしたダクト内圧損シミュレーションを採用した。  
Simulation model of duct internal pressure loss

## 5 あとがき

当社は,各種機関車や貨物電車システムなどを通じ鉄道貨物輸送に貢献してきた。今後も,新技術の導入を行い,振動・騒音などの環境問題や電力回生エネルギー貯蔵デバイスの採用などエネルギー問題も視野に入れた新システムの開発を続け,安定かつ安全な鉄道貨物輸送に貢献するとともに,これらの技術蓄積を生かして,鉄道輸送システム全般に幅広く貢献していく。

## 文 献

- (1) 日本貨物鉄道株式会社.2001年車両形式図.
- (2) 沼崎光浩,ほか.“誘導電動機駆動によるディーゼル電気車両における同期発電機ダンパーの主回路安定化効果の検証”.平成8年電気学会産業応用部門全国大会論文集.電気学会.1996.
- (3) 中川哲郎,ほか.“ベクトル制御電気機関車のシミュレーションによる車輪空転制御時定数の検討”.平成11年電気学会産業応用部門全国大会論文集.電気学会.1999,p.375-378.
- (4) 西重樹,ほか.“EH200形直流電気機関車”.平成13年鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム.日本鉄道サイバネティクス協議会.2001.



図7.EH200形直流電気機関車 - 直流電化勾配線区向けに開発された,短時間最大出力5,120kWを備える直流電気機関車である。  
Type EH200 DC electric locomotive

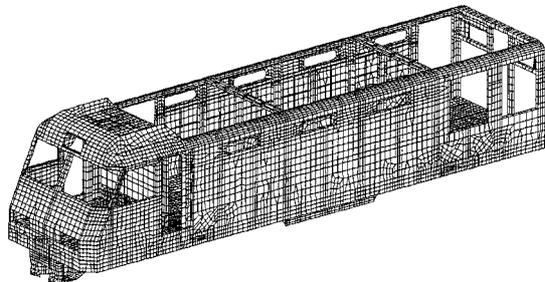


図8.EH200形強度解析モデル - 斬新なデザインを採用しつつも,車体強度が確保できるよう,構造部材の強度解析など各種シミュレーション技術を用いて開発を行っている。  
Strength analysis model of Type EH200



長瀬 光範 NAGASE Mitsunori

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

Transportation Systems Div.



沼崎 光浩 NUMAZAKI Mitsuhiro

電力・社会システム社 府中電力・社会システム工場 交通ドライブシステム部主査。機関車車両システム,機関車用電力変換装置の設計業務に従事。

Fuchu Operations - Industrial and Power Systems & Services