

入換用ハイブリッド機関車の開発

添田 正 寺内 伸雄 新田 浩 杉山 義一 小川 知行* (日本貨物鉄道)
氏家 昭彦 (東芝)

Development of a Hybrid Shunting Locomotive

Tadashi Soeda, Nobuo Terauchi, Hiroshi Nitta, Yoshikazu Sugiyama, Tomoyuki Ogawa*
(Japan Freight Railway)
Akihiko Ujiie (Toshiba)

Type HD300 is a diesel hybrid shunting locomotive. The series hybrid system of the Type HD300 is composed of a diesel engine and lithium-ion batteries. As a result of a hauling test, the Type HD300 achieves environmental load reduction compared to a conventional diesel shunting locomotive.

キーワード：シリーズハイブリッドシステム、リチウムイオン蓄電池、ディーゼルエンジン、永久磁石同期電動機
(Series hybrid system, Lithium-ion battery, Diesel engine, Permanent magnet synchronous motor)

1. はじめに

入換機関車の環境負荷低減を目的として、シリーズハイブリッドシステムを採用したハイブリッド機関車HD300形式を開発した。HD300形式のシリーズハイブリッドシステムは、ディーゼルエンジンとリチウムイオン電池によって構成され、入換作業に特化して機器選定・容量決定を行った。これにより、従来型入換用ディーゼル機関車と比較して、燃料消費量・排出ガス排出量の低減を確認した。

環境負荷低減を狙ったHD300形式の主要な設計方針は、次の通りである。

- ・ディーゼルハイブリッド方式の採用
- ・高出力型リチウムイオン蓄電池の採用
- ・低公害小型エンジンの採用
- ・回生ブレーキの採用
- ・全閉自冷式の永久磁石同期電動機の採用
- ・モジュラーコンセプトの導入

本稿では、HD300形式の試作機であるHD300-901号のハイブリッドシステムの構成とエネルギー制御システムについて述べ、実際の入換作業を模擬したけん引走行試験(図1)による燃料消費量・NOx排出量の測定試験結果を紹介する。



図1 HD300-901号 けん引走行試験

Fig. 1 An HD300-901 hauling test

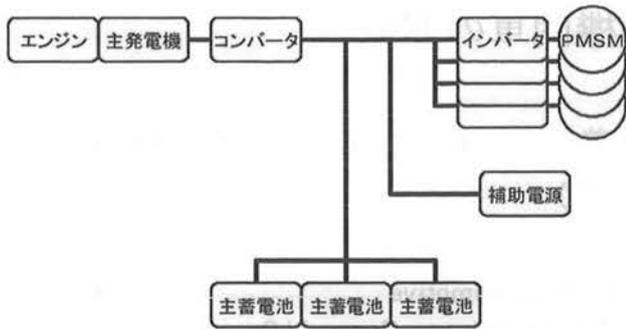


図2 ハイブリッド構成

Fig. 2 Composition of a hybrid system



図3 モジュール構成

Fig. 3 Composition of a module system

2. ハイブリッドシステム構成

〈2・1〉 概要 HD300-901号のハイブリッドシステムの構成を図2に、モジュールの構成を図3に示す。また、諸元を表1に、けん引力特性を図4に示す。ハイブリッドシステムは、エンジン発電機と蓄電池から電力を供給するシリーズハイブリッド方式としている。

HD300-901号のエンジン及びバッテリーの機器選定・容量決定は、入換作業の実態調査に基づき行った。例えば、東京貨物ターミナルでの入換作業は、発列車を荷役線であるコンテナ線から着発線に移動させる引上げ作業、着列車を着発線からコンテナ線に移動させる押込み作業、空車の貨車を組み替える貨車組み替え作業に大別される。また、各作業の間には機関車の単機走行が行われる。ここで、入換作業の時間割合の例を図5に示す。貨車をけん引して走行する時間と単機での走行時間の他に、連結や解放時の地上での作業時間はもちろんのこと、進路の構成待ち時間や対象列車の到着待ち時間など停車時間が長いことがわかる。このため、ハイブリッドシステムを導入し、負荷を平準化すれば、短時間の大きな負荷はバッテリーが負担し、エンジンは長時間の負荷の平均程度の出力に小型化してシステムを構成できる。

また、HD300形式は、モジュラーコンセプトを導入し、搭載機器を機能ごとに集約してユニット化し、図3のように主変換モジュール、蓄電モジュール、運転室モジュール、発電モジュールから構成している。これにより、将来は各モジュールを換装することで性能変更が行える。

表1 主要諸元

Table 1 A specification

車号	HD300-901	
運転整備重量	60 [t]	
軸配置	4軸 (B o - B o)	
車輪直径	新製: 910 [mm]	
最大けん引力	20 [tf]	
最大踏面出力	500 [kW]	
最高運転速度	力行時: 45 [km/h] 回送時: 110 [km/h]	
長さ	14300 [mm]	
幅	2950 [mm]	
高さ	4088 [mm]	
エンジン	種類	ディーゼルエンジン
	台数	1台
	定格出力	270 [HP]
主発電機	種類	三相誘導発電機
	台数	1台
	定格出力	173 [kVA]
主蓄電池	種類	リチウムイオン蓄電池
	直列数	26直列
	並列数	3並列
	定格電圧	750 [V]
	総容量	67.4 [kWh]
主電動機	種類	永久磁石同期電動機
	台数	4台
	極数	6極
	冷却方式	全閉自冷方式
	定格回転数	550 [rpm]
	定格出力	連続: 62 [kW] 1時間: 80 [kW]
	定格効率	97.6 [%]

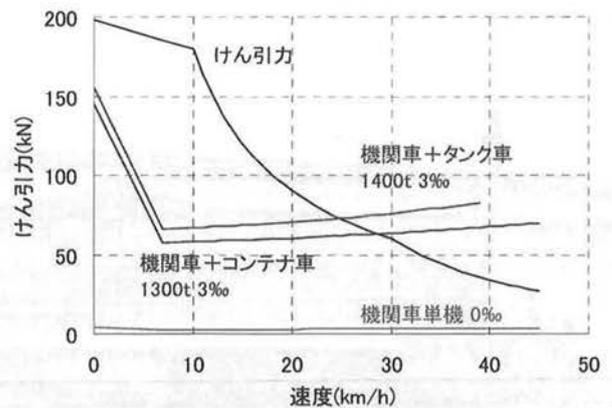
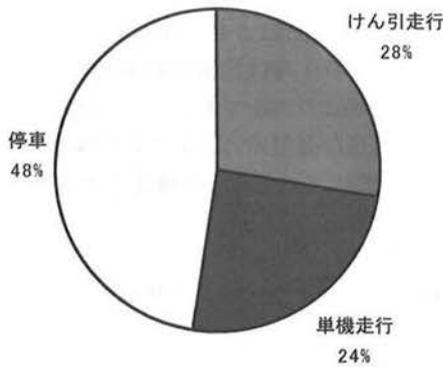


図4 けん引力特性

Fig. 4 Tractive effort

〈2・2〉 エンジン エンジンには、有害排出ガス低減のため国土交通省の定める自動車排気ガス規制（平成18年度規制：通称“第3次排出ガス規制”）に適合しているディーゼルエンジンを採用した。ハイブリッドシステムの採用により、踏面出力500 [kW]に対して大幅に小さい定格出力



(停車時間に留置時間は含まない)

図5 入換作業の時間割合の例

Fig. 5 An example of a hauling work time

のエンジンの採用が可能となった。

〈2・3〉 主蓄電池 主蓄電池は、出力密度が高く、軽量で高出力形のリチウムイオン蓄電池を採用した。エネルギー容量 864 [Wh] のモジュールを 26 直列に用いて 1 バンクを構成し、3 バンクを並列とすることで、67.4 [kWh] のエネルギー容量となっている。高出力形のリチウムイオン蓄電池の採用により、最大充放電電流は、最大力行電力及び最大回生電力に対して余裕があり、蓄電池の充放電電力に関する制約は生じない。これにより、ノッチ変化時や車輪空転時などの負荷変動に対しても、エンジンの動作状況に関係なく即応性が高く安定した電動機出力が可能となっている。また、エネルギー制御の観点では、車両の駆動電力の制約を受けずにエンジンの動作・停止の制御が可能となり、エネルギー制御の自由度が高くなっている。

また、蓄電池の技術開発は急速に進み、新たな高性能蓄電池も想定される。設計時点で将来の各種蓄電池搭載を考慮して予備空間を設けている。これにより、現在搭載のリチウムイオン蓄電池を 5 バンク分搭載できる空間を確保している。また、高容量型のリチウムイオン蓄電池やニッケル水素蓄電池など他の電池の搭載も可能としている。今後の蓄電池の劣化に応じての換装や、負荷の異なる駅に合わせた容量変更などが可能である。

〈2・4〉 主電動機 主電動機は、原理的に回転子に通電する必要がなく効率が良い永久磁石同期電動機を採用した。高効率のため全閉自冷方式の採用が可能となっている。定格効率 97.6 [%] の高効率な電動機を採用したことで、電動機損失の低減はもちろんのこと、プロアレスとなったことでの補機負荷の低減にもつながり、本機関車の燃料消費量・排出ガス排出量の削減に貢献していると考えられる。

〈2・5〉 主変換装置 主変換装置は、コンバータ装置、インバータ装置、補助電源装置等を 1 つの箱に収め、熱的検討の上、プロアレスとし補機負荷を削減した。

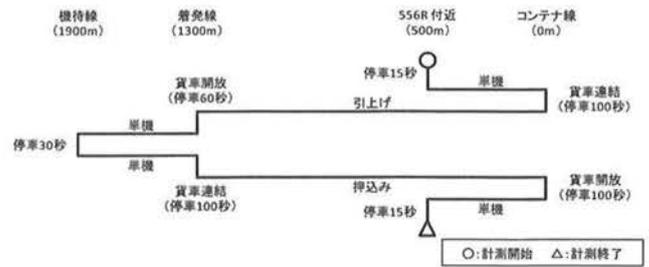


図6 試験サイクル

Fig. 6 A test cycle

3. エネルギー制御

〈3・1〉 制御概要 HD300-901号は、踏面出力 500 [kW] に対して、発電機出力は 173 [kVA] とエンジン発電機からの出力は低くなっている。このため、エネルギー制御は、主蓄電池からの電力供給を基本としている。力行時には、SOC (蓄電池残存容量) が低下した場合や駆動電力が大きくなった場合にエンジンを起動し、一定回転で発電する。また、回生時には、主電動機を発電機として機能させ回生エネルギーを蓄電池に回収する。

〈3・2〉 エンジン制御 エンジン動作は、一定回転・一定出力での発電とアイドルストップを基本とした。SOC と負荷電力に応じて、エンジンの発電・停止を制御する。

〈3・3〉 回生ブレーキ 電気指令式自動空気ブレーキをベースに回生ブレーキを追加した。回生時には、発電機の発電電力の絞込及び機関車の BC 圧力の絞込が行われる。

4. けん引走行試験

〈4・1〉 試験条件 東京貨物ターミナルにて、実際の入換作業を模擬したけん引走行試験を行った。HD300-901号と液体式変速機を用いる従来型入換機関車に、燃料流量計及び排出ガス分析装置を仮設し、燃料消費量・排出ガス排出量を測定した。東京貨物ターミナルの入換作業におけるけん引重量を調査し、引き上げ・押込み・貨車組み替え作業の平均重量となる 700t のデッドウエイトを用いて試験を行った。試験サイクルは、東京貨物ターミナルでの入換作業の基本的なパターンとして、引き上げ 1 回、押込み 1 回とその前後の単機走行合計 4 回とした (図 6)。比較のため、HD300-901号と従来型入換機関車で同じデッドウエイトを積載した貨車編成を用いて、同じ試験パターンで走行を行った。

〈4・2〉 試験結果 図 7 に NO_x 排出量の測定結果を、図 8 に燃料消費量の測定結果を示す。サイクルの開始時と終了時では、SOC が異なるため、SOC の補正を行っている。また、試験は複数回行い、その平均を採用した。

従来型入換機関車に比べて NO_x 排出量で 6.2%、燃料

消費量で36%の削減効果を確認した。燃料消費量削減の要因としては、シリーズハイブリッドシステムを採用することによる、液体式変速機の廃止、高効率点へ限定したエンジン動作、アイドリングストップの実現、全閉自冷式永久磁石同期電動機の採用による損失低減などによるものと考えられる。これに加えて、NO_x排出量の削減効果としては、低公害エンジンの採用によるもの大きいと考えられる。

また、ハイブリッドシステムの採用による騒音の低減効果として、エンジン高速回転時の騒音の比較を図9に示す。車両の走行に伴う騒音を排除するため、定置での騒音測定

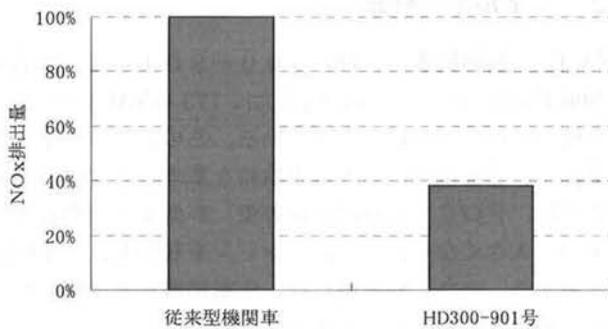


図7 NO_x排出量の比較

Fig. 7 NO_x emission

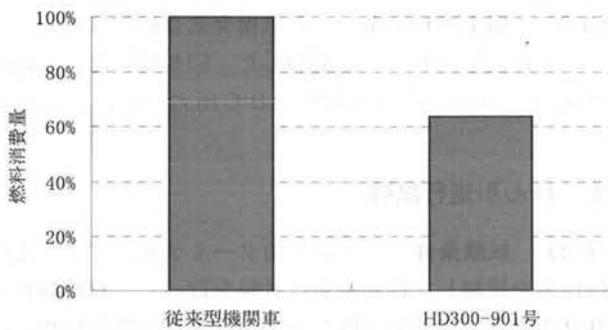


図8 燃料消費量の比較

Fig. 8 Fuel consumption

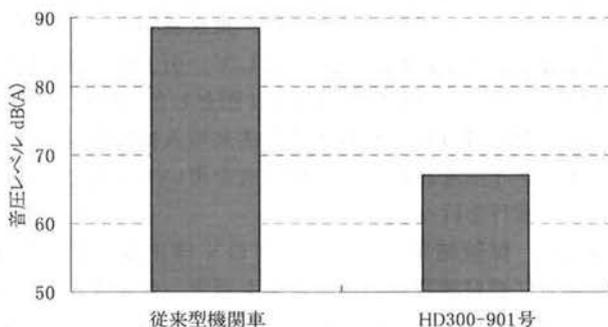


図9 騒音レベルの比較

Fig. 9 Noise level

結果を比較した。従来型入換機関車は最大ノッチとしエンジンを最高回転速度で回転させた場合の騒音レベルであり、HD300-901号は定格回転速度・定格出力で発電を行った場合の騒音レベルである。この比較の結果、小型エンジンの採用及び発電ユニットの防音構造により、大幅な騒音低減を実現していることが確認できる。

5. おわりに

HD300-901号は、ディーゼルエンジンとリチウムイオン電池から構成されるハイブリッドシステムを採用することで、燃料消費量・排出ガス排出量の大幅な削減を実現した。入換作業は、負荷の変動が激しく、停車時間も長いなどハイブリッドシステムによる負荷平準化の効果が大きいシステムであったと考えられる。東京貨物ターミナルでの入換作業を調査し、入換作業を対象に最適化したシステムを構成したことで環境負荷の少ない入換用ハイブリッド機関車が実現できたと考えている。

また、HD300-901号は、モジュラーコンセプトを採用しており、発電モジュールと蓄電モジュールの容量を調整して組み合わせることで、中小貨物駅入換機関車から本線用機関車、あるいは環境問題の厳しい都市部にある貨物駅で使用される更なる低環境負荷型機関車などへの展開が容易である。今後は、モジュラーコンセプトを活かし、用途に応じたハイブリッド機関車の技術開発を進めていく予定である。

最後に、HD300-901号の環境性能測定に協力頂いた鉄道総合技術研究所の関係者にお礼申し上げます。

なお、HD300-901号の動力協調システムの開発には、国土交通省の鉄道技術開発補助を受けています。

文 献

- (1) 日本貨物鉄道(株)・ロジスティクス本部技術開発部:「HD300形式ハイブリッド機関車(試作車)の概要」, 運転協会誌, 2010年5月号 pp.25-28 (2010)
- (2) 添田正:「JR貨物ハイブリッド機関車HD300形の概要」, 鉄道車両と技術, No.166 pp.12-17 (2010)
- (3) 添田正:「JR貨物 HD300-901 ハイブリッド機関車試作車の概要」, R&M, 2010年8月号 pp.10-14 (2010)
- (4) 添田正・長谷部寿郎・村上理・前田芳宏:「JR貨物向け入換機関車用 永久磁石同期主電動機の開発」, 2010年サイバネティクスシンポジウム予稿集 No.512 (2010)
- (5) 添田正・杉山義一・新田浩・大滝紀人・氏家昭彦:「JR貨物向け新型入換機関車 車体構造の開発」, 2010年サイバネティクスシンポジウム予稿集 No.525 (2010)