

29. 省燃費型エレクトリックドライブブルドーザの開発

世界初 電動ブルドーザ「CAT D7E」

キャタピラージャパン(株) ○ 富永 安生
鎌田 康生

1. はじめに

社会環境の変化と共に、建設機械に求められる要求は年々厳しくなっており、

社会的要求として、

(1) 地球環境保護

大気環境汚染防止、温暖化防止、省エネルギー

(2) 安全性の向上

オペレータと周辺環境の安全確保

経済的要求として、

(3) 燃料消費量の削減

(4) 運転経費の削減

などが求められており、建設機械メーカーとして、これらの要求に応えるべく、日々技術開発に努めている。これらの要求を満たすために、世界初のディーゼレクトリック駆動のブルドーザ CAT D7Eを開発したので、ここに報告する。

2. 建設機械の省燃費技術

建設機械メーカーでは、省燃費技術として、ハイブリッド油圧ショベルや電動駆動の建設機械の技術開発に取り組んでおり、既に実用化されている。以下にその特長を簡単に紹介しつつ、ブルドーザにディーゼレクトリック駆動を選択した理由を述べる。

(1) ハイブリッド駆動

ハイブリッド駆動は既に油圧ショベル⁽¹⁾で実用化されている。旋回電気モータ、発電機モータ、インバータ、キャパシタ等から構成され、旋回電気モータが旋回減速時に発生するエネルギーを電気エネルギーとして回収し、蓄電器（キャパシタ等）に蓄える。これを旋回時のエネルギーとして回生利用すると共に、発電機モータを通じて高負荷時のエンジンをアシストするもので、待機状態を始め、エンジン負荷を低く抑え、燃料消費量の低減が可能である。但し、回生しにくい機械もあり、そのような機械では省エネ効果が低い。

(2) 電動駆動

電動駆動は、①エンジンの代わりに電動モータを搭載し、油圧ポンプを駆動する商用電源を動力

源としているものと、②バッテリータイプのものに分かれる。商用電力の発電効率、電動機の効率の良さを利用することで消費エネルギーの低減を図れること、排気ガスが出ないこと、騒音・振動も少ないことにより、地下工事、自動車解体などの屋内作業現場には有効である。しかし、商用電源を用いるタイプは、電源ケーブルが必要であり、電源設備の整った、限られた場所でのみ使用できないことや、現場間の移動や搬出入に難点がある。また、バッテリータイプはコストと連続稼働の観点から普及にはまだ時間がかかりそうである。

(3) ディーゼレクトリック駆動

ブルドーザは作業の性質上、ブレーキを多用したり、ブレードを大きく上下しないため、十分なエネルギーを回収することができない。そのため、ハイブリッド駆動での大きな省エネ効果は期待できない。また、電源ケーブルを必要とする電動駆動も適していない。そこで、ブルドーザの省燃費技術としてディーゼレクトリック駆動方式を採用した。ディーゼレクトリック駆動とは、ディーゼルエンジンで発電機を駆動し、その発生電力で電動機を回し、駆動する方式である。1930年代頃より、ディーゼル機関車等に利用されてきた技術であるが、パワーエレクトロニクスが発展していなかった当時は、高出力・高効率の電力変換、制御技術がなく、省エネ効果は乏しかった。しかし、パワーエレクトロニクスの発展に伴い、高出力・高効率の電力変換、制御することが可能となり、メンテナンスが容易な交流電動機を使用する、可変電圧可変周波数制御により省エネ化が可能となった。ディーゼレクトリック駆動方式のメリットは以下の通り。

- (1) エンジンの最も効率の良い回転域で運転でき、燃料消費量を低減することが可能。
- (2) エンジンをほぼ一定回転で使えるため、騒音、振動対策や排出ガス浄化が、比較的容易。
- (3) 動力部レイアウトの自由度が高く、エンジンに直接負荷が伝わらないため、エンジン寿命を延長することが可能。
- (4) 無段階変速により、作業に最適な車速が得られる。

3. ディーゼルエレクトリックドライブ

中型ブルドーザの動力伝達装置は、トルクコンバータとパワーシフトトランスミッションを組み合わせたメカニカル駆動方式が主流である。現在では、ロックアップ機能付のトルクコンバータにより燃料消費量を低減する方法などが開発されているが、D7E では動力伝達部でのパワーロスをさらに低減し、伝達効率を上げるために、トルクコンバータやトランスミッションに代えて、ディーゼルエンジンで駆動された発電機からの電気をインバータやモータ等の制御装置を利用し、動力伝達するディーゼルエレクトリック駆動方式を採用した。以下にディーゼルエレクトリック駆動について説明する。図 1 にディーゼルエレクトリックドライブを搭載した CAT D7E ブルドーザの外観を示す。図 2 にディーゼルエレクトリックドライブ構成図を示す。



図 - 1 D7E ブルドーザ外観

(1) ディーゼルエンジン

オフロード法（2006 年基準）に適合したエンジンを搭載。また、ディーゼルエレクトリック駆動方式の採用により、ディーゼルエンジンの効率の良い回転域（低速）での運転ができ、従来のメカニカル駆動方式と比べて排気量が約 1L 少ない、ひと回り小さいエンジンの搭載を可能にし、燃費低減を実現した。表 1 に各駆動方式のエンジン比較表を示す。

表-1 各駆動方式のエンジン比較表

	D7E	D7R2
駆動方式	ディーゼル エレクトリック	メカニカル
定格出力 (kW)	175	179
定格回転数 (rpm)	1,700	2,100
排気量 (L)	9.3	10.2

(2) 交流発電機

永久磁石型の発電機（図 3）でエンジン後部に直結されており、連続定格出力は、1,600 rpm で 175kW である。エンジンが始動すると、発電機は三相交流（AC480V）を発生させ、パワーインバータへ送る。

(3) パワーインバータ

パワーインバータ（図 4）は、内部に整流器が組み込まれており、発電機からの 480V の交流を整流器により 650V の直流に変換後、インバータによって任意の周波数、電圧の交流に変換（可変周波数制御）し、ファイナルドライブを駆動させる交流モータに電力を供給する。また、変換された直流電流の一部をアクセサリ用パワーコンバータに供給する。

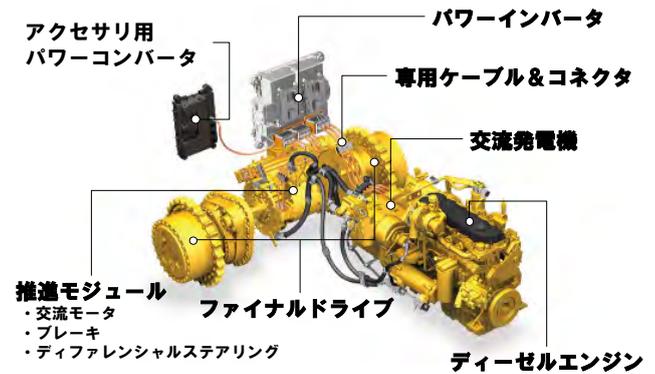


図 - 2 ディーゼルエレクトリックドライブ構成図



図 - 3 交流発電機



図 - 4 パワーインバータ

(4) 交流モータ

交流モータ(図5)は、前後進切り替えおよび無段階での車速調整を電氣的に行うことができ、トルコン車に見られるシフトショックやトルクの落ち込みがなく、スムーズな作業を可能にしている。また、従来のトルクコンバータやトランスミッション等の機械装置が不要になったことにより、エネルギー変換および伝達ロスの低減により、燃費を低減するとともに、可動部品の削減により、メンテナンスにかかる稼働経費の削減も実現した。

(5) アクセサリ用パワーコンバータ

パワーインバータで変換された直流電流は、アクセサリ用パワーコンバータ(図6)にも送られ、車両用電源(DC24V)を供給すると共に、電動化したエアコンコンプレッサの駆動、ラジエータやパワートレーンオイルを冷却するウォータポンプの駆動(DC320V)に電力を供給する。これにより、従来エンジンからベルト駆動で行っていたものが完全にベルトレスとなり、燃費低減、サービス性の向上に大きく寄与する。



図 - 5 交流モータ



図 - 6 アクセサリ用パワーコンバータ

4. 省燃費効果の検証

ディーゼルエレクトリック駆動の省燃費効果を検証するため、2つの方法で試験を実施した。

4.1 スロットドージングによる燃費試験

従来のメカニカル駆動方式を採用したCAT D7R2とディーゼルエレクトリック駆動方式を採用したCAT D7Eを用いて、比較試験を行った結果、メカニカル駆動方式と比較して、約20%の燃費低減効果が確認でき、ディーゼルエレクトリック駆動の有効性を確認した。試験結果を図7に示す。

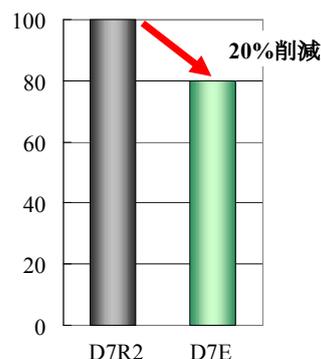


図 - 7 試験結果 (燃料消費量) /-フルード'使用時

4.2 JACMAS に基づいた燃費試験

日本建設機械化協会では、ブルドーザにおける燃費試験標準 JCMAS H021「土工機械-燃料消費量試験方法-ブルドーザ」を制定しており⁽²⁾、この燃費試験方法に基づいて、燃費試験を実施した。

その結果、燃料消費量評価値は、425g/kWhであった。この数値は、国土交通省がCO2排出低減効果の高い低炭素型建設機械の普及を促進するために、認定している低炭素型建設機械の認定基準値を約20%上回るものであり、エレクトリック駆動の有効性を確認できた。表2に低炭素型建設機械の燃費基準値を示す。尚、D7Eは170-300kWの区分に該当する。

表-2 ブルドーザの燃費基準値

区分 定格出力 (kW)	燃費基準値 (g/kWh)
19 以上 75 未満	568
75 以上 170 未満	530
170 以上 300 未満	508

5. 安全性の向上

建設業における労働災害は、様々な取り組みにより減少傾向となっているが、依然として、全業種に対する建設業の割合は高い。建設機械に対して、オペレータや周囲の作業員に対する安全性の向上が強く求められており、D7Eにおいても安全を考慮した開発を行った。

(1) 視界性向上

ブレードを作動させる油圧シリンダを一本としたシングルリフトシリンダと、運転席の窓枠を正面に一本としたセンターポストキャブの採用により、センターポスト、プレクリーナ、マフラ、リフトシリンダが運転席から見て一直線上に配置し（図8）、かつてないワイドな作業視界を確保することで、大幅な安全性向上を図った（図9）。



図-8 コンポーネントの直列配置



図-9 作業視界

(2) オペレータ着座感知システム

オペレータが運転席に座っていないと、車両の走行システムや作業装置制御システムの操作を無効にするオペレータ着座感知システムを採用している。これにより、オペレータが車両から降りる際など、誤ってレバーに触れた場合でも車両が動いたり、作業装置が動いたりすることがなく、巻き込まれ事故を防ぐことができる。

(3) リアビューカメラ

切り欠き付き燃料タンクの採用などにより、後方視界性を向上させているが、より安全性を向上

させるため、リアビューカメラを装着できるように設計した。

(4) 高電圧部の隔離構造

発電機を初めとした高電圧部分は個々に完全な密閉構造となっており、各コンポーネントを繋ぐケーブルやコネクタは米軍規格を満たした、極めて絶縁性の高い部品を使用し、安全性を確保した。

また、故障等で高電圧部にアクセスする場合は、システム内に電気が残っていないことを確認するための警告ランプ（危険電圧表示ランプ）を装備し、高電圧ケーブルはオレンジ色のケーブルで分かりやすく区別することで安全性を確保した。

(5) 作業機ロックスイッチ

作業装置の油圧回路をロックすることにより、オペレータが不意にレバーに触れてしまった場合の誤動作を防止することができる。

(6) ROPS/FOPSキャブ

現在では一般的である、ROPS（転倒時運転者保護構造）及びFOPS（落下物保護構造）キャブを備えており、車両転倒時や落下物からオペレータの安全を守る。

6. おわりに

ブルドーザの作業と機構の特長から、ディーゼルエンジンで駆動された発電機からの電気をインバータやモータ等の制御装置を利用し、動力伝達するディーゼルエレクトリック駆動のブルドーザを開発した。この方法により、エネルギー回生なしに大幅な燃費改善を実現した。今回開発したディーゼルエレクトリックドライブ方式は、エネルギー回生のしにくい機械の省燃費技術として有効であり、ニーズによって他の建設機械への展開が可能である。今後も省エネルギーに対するニーズは益々高まると考えられ、ユーザの要望、期待に応えるべく、技術開発を行っていく所存である。

参考文献

- 1) 井上：PC200-8 ハイブリッド油圧ショベルの紹介，コマツ技報，Vol.54 No.161，pp.26～31，2009
- 2) ブルドーザにおける燃費試験標準JCMAS H021「土工機械－燃料消費量試験方法－ブルドーザ」，改正第3版，pp.2～10，2010