

25. トンネル用ハイブリッド式 ダンプトラックの開発

(株)大林組：山本 幸信，井上 幸芳
トモエ電機工業(株)：*田崎 愛真郎

1. はじめに

近年、山岳や都市トンネル工事において、大断面や長距離の施工が増加しつつある。また工事費縮減のために工事期間の短縮とそれに伴う施工速度の向上が求められている。そこでこれらの要求を満たすために、高性能な大型機械の導入や台数の増加が図られているが、エンジンから排出する有害ガスのために坑内の空気をより一層汚染する原因ともなっている。そこで今回、電気自動車の低公害性とディーゼルエンジン車両の持つ良好な作業性に着目し、長距離施工に対応できしかも坑内汚染が少ないダンプトラックの開発を行った。本稿ではこのハイブリッド式ダンプトラックの開発経緯と小型試験車両（写真1）による現場適用結果について報告する。



写真1 ハイブリッド式ダンプトラック

2. 開発経緯

2.1. 背景

近年、地球環境保全が社会的課題となり、

地球温暖化防止のために炭酸ガスの排出抑制が叫ばれている。またISO14000の批准により、各事業者にも事業活動を通じて可能な範囲での環境対策が求められている。このような環境問題に対する関心の高まりの中、国内の社会基盤整備の一環として、第二東名名神工事などのように、従来よりも長大なトンネルの計画が、今後さらに増加すると考えられている。ところが、トンネル工事では、線形の狭隘な作業空間という特殊性から換気が悪く、従来より坑内車両から排出される有害物質、特にNOx等による作業環境汚染の防止が特に重要な課題となっていた。

2.2. 開発の目的

そこで山岳トンネル工事において、車両の排気ガスによる汚染を少しでも防止し、快適な作業環境の確保を図ると共に、最適な動力システムを構築することで省エネルギー化を促進し、さらに換気設備等の低減などを意図し、最も多数の同種の車両が稼動するずり出し作業に対して適用可能な車両の開発に着手した。以下に開発目的をしめす。

①トンネル坑内環境の改善

作業に最適な車両動力システムを採用することにより、エンジンの小出力化を行い排気ガス量を少なくし、有害ガスによる、坑内空気汚染を最小とする。

②省エネルギー化

燃料消費率の向上と廃棄エネルギーの回収を行うことにより、運搬に要するトータ

ルエネルギーの低減を図る。

③付帯設備の低減

トンネルの長大化に伴い大容量化するプロアーなど付帯設備への負担を低減する。

2.3.開発期間

本開発は、平成7年より基礎研究を行い、山岳トンネルにおけるずり搬出（写真2）に必要な諸条件を調査の後、車両の仕様を定め、平成8年において試作車両による現場適用試験を行い、設計法の確認と適用評価を行った。

2.4.トンネルずり運搬作業の現状

通常、トンネル工事のずり運搬作業は、大出力のエンジンを搭載した数台のダンプトラックを用いて、切羽から坑外のずり捨場までの往復を繰り返すことにより、1時間程度の比較的短時間に集中的に行われる。このとき坑内の排気ガスの発生量は最大となるため、対策が求められている。通常この対策としては、大容量のプロアーにより坑外の新鮮な空気を切羽まで送り、排気ガスを希釈して坑外へ排出する方法が採られている。また、排気ガス発生源への対策としては、低公害認定エンジンの車両を用いたり、触媒マフラーを用い有害ガスの除去を行ったりしている。しかし他の建設工事の作業環境と比較しても、現状ではまだ満足な環境状態には至っていない。



写真2 ずり搬出状況

3. 低公害車両

低公害車両としては、実用車両にもさまざまな方式のものが実施されている。今回はトンネルに適応可能な動力源として、基本的に電気自動車を選択した。以下に低公害車の特徴を述べる。

3.1.電気自動車

モーターとバッテリーを搭載した電気自動車であり、自動車でなければバッテリー機関車としてレール方式の施工現場で利用されている。特徴として以下のものがある。

- ①排気ガスをまったく出さないため、坑内車両として最適である。
- ②運転時間以外に充電時間が必要であり、時間がかかる。
- ③充電用の車両外設備が必要である。このため作業距離が大きく取れない。

3.2.ハイブリッド式電気自動車

ハイブリッド方式の自動車には電気とエンジンを組み合わせたものや、油圧とエンジンを併用したものなど動力源を種々組み合わせたものが開発されている。以下にモーター（電気）・エンジン併用のハイブリッド式電気自動車の3つの方式についてのべる。これには動力エネルギーの方式により①シリーズ方式②パラレル方式③スプリット方式が有る²⁾。

(1)シリーズ方式

発電機で発電し、この電力でモーターを回し車輪を駆動する。余剰電力はバッテリーに充電し高負荷時のエネルギー源とする。

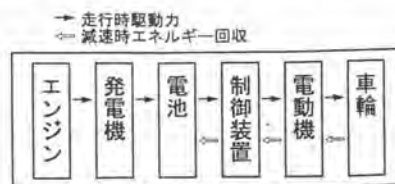


図1 シリーズ方式

(2) パラレル方式

エンジンは既存の自動車と同様に車輪を駆動する。モーターは高負荷時にバッテリーの電力を使い駆動を補助する。軽負荷時にはモーターを発電機として作動させ、発生電力をバッテリーに充電する。

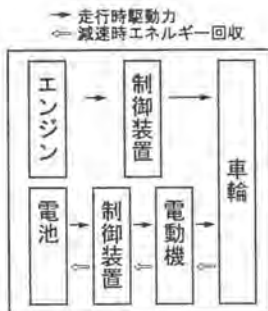


図2 パラレル方式

(3) スプリット方式

シリーズ方式とパラレル方式の複合方式で、車速やエンジンの負荷時に応じて車輪の駆動をエンジン、モーターで単独駆動したり併用したりする方式。充電はエンジンの低負荷時に行われる。

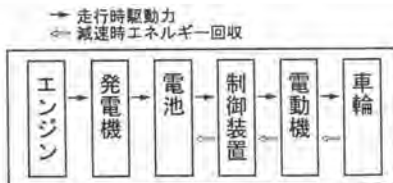


図3 スプリット方式

3.3.他のシステム

低公害車両には電気自動車以外にもさまざまなものが開発されている。表1に参考として示す。

表1 低公害車の例

番号	名称	特徴	用途
1	電気自動車	排気ガスなし	ゴミ回収車、トラック、バス、軽四輪車、フォークリフト、ゴルフカート
2	ハイブリッド電気自動車	モータ・エンジン併用	バス、トラック、乗用車
3	LPG車	比較的導入が容易	ゴミ回収車、小型トラック、乗用車
4	天然ガス車	イオウ、黒煙なし	バス、トラック、乗用車、軽四輪車、フォークリフト
5	メタノール車	Noxがディーゼル車の半分	バス、トラック
6	水素自動車	炭素化合物の発生なし	実験室段階

4. ハイブリッド式ダンプトラック

4.1. 採用システム

検討の結果、建設現場での使用が多いモーター・ディーゼルエンジン併用のハイブリッド式ダンプトラックを開発することとした。方式はシリーズ式である。

この中で期待した項目は次のとおりであった。

- ①有害物質を発生源で抑制が可能。
- ②省エネルギーシステムの構築が容易。
- ③現場導入が容易。

4.2. 仕様

試験車のベース車両としては市販の2ton積みダンプトラックを用いた。そしてトンネル施工現場における車両の実態調査により、車両の走行エネルギー状態を解析し、試験車両の仕様を表2のように定めた。

また開発のコンセプトはつぎの項目のように定めた。

- ①ハイブリッド方式を活用した低公害・省エネ車両とする。
- ②通常のダンプトラックの機能をすべて保持する。

③良好な操縦性や作業性を確保する。

表-2 2トン積みハイブリッド式ダンプトラック仕様

番号	項目	原型車	ハイブリッド車
1	定員・重量 ・乗車定員 ・最大積載重量 ・車両重量 ・車両総重量	3名 2,000kg 2,700kg 4,865kg	3名 2,000kg 4,250kg 6,410kg
2	寸法 ・最低地上高	1990H*1695W*4690Lmm 200mm	1990H*1695W*4690Lmm 170mm
3	性能 ・登坂能力(Tanθ)	0.53	0.15
4	駆動機構 ・駆動原動機 ・変速機 ・最終減速比	ディーゼルエンジン 前進:5速、後進:MT 6.142	直流直巻モータ 前進:1速、後進:1速 6.142
5	動力供給システム a. 原動機 ・エンジン型式 ・定格出力 ・回転速度 ・総排気量 b. 電池 ・種類・型式 ・容量・電圧 ・積載個数 ・総電圧	ディーゼルエンジン 4HF1 130PS 3,200rpm 4,334cc ---	ディーゼルエンジン 発電機YAG25S-4型 4TNE84T-AGD 33PS(60Hz) 1,800rpm 1,955cc 鉛蓄電池, 165AH/5HR, 2V 96個 192V
6	制御方式	---	トランスミッション制御
7	充電装置 ・充電制御方式	---	モーター制御, 定電圧, 定電流

4.3.本体の構成

(1)試験車両の構成

ベース車両のフレームを生かし、モーター、エンジン、バッテリーなどの主要機器を重量バランスを考慮して配置した。特に運転感覚を通常の車両と異ならないように配慮した。

また保安機器や制動機、ステアリング、などの主要装備については現状のままとした。

図4に機器配置を示す。

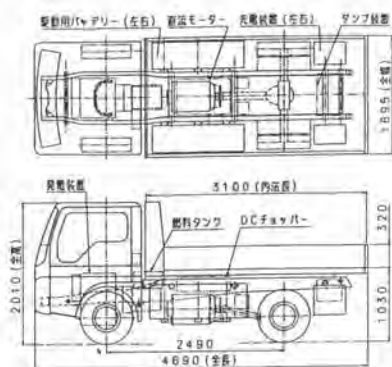


図4 機器配置

(2)システム構成

車両のシステムは次の構成となっている。

- ①駆動部：直流モーターによる直接駆動
- ②発電部：動力源となる発電機を搭載
- ③充電部：余剰・不足電力の充放電
- ④制御部：各機器の制御

また、図5に従来の自動車とのシステム比較を示す。

(3)機能・性能

基本コンセプトにより、通常のダンプトラックの機能はすべて組み込んだ。この車両の性能・特徴をつぎに示す。

1)走行

モーターによる電気走行。変速機無し。

設計走行速度 15km/H (勾配上り 3%)

2)エネルギー回収

回生ブレーキによるエネルギー回収可能。

3)発電・充電

常時発電と充電をサイリスタ制御により行う。

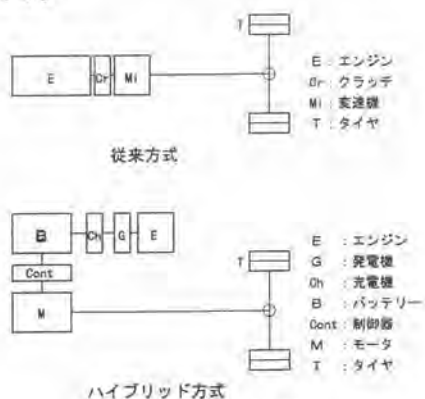


図5 システム比較

5. 試験結果および考察

5.1 排出ガス測定

車両の排出ガスの測定を以下のように行った。今回の開発システムでは、車両走行状態において、エンジンは常に一定回転数の状態であり、バッテリー充電を行いながらモータ

走行を行う。つまり、車両の発進、加速など
と関係無くエンジン回転数は一定となる。こ
のため、開発車両に直接適合する車両の測定
法が見当たらなかったため、旧6モードテス
トを参考にして評価を行った。結果は表3の
ようになり、NO_xは6モードの規制値に対
して52%程度の値となった。また黒煙も小
さい値であった。全体として低公害システム
となっている。

参考として6モードテストの規制値を表4
に示す。また黒煙規制値は3モード運転条件
で、50%以下とされている。

表3 排ガス測定

項目	測定結果	規制値
NO _x	305ppm	590ppm
HC	80ppm	670ppm
CO	205ppm	980ppm
黒煙	11%	50%

(回転数 1500rpm)

表4 6モードテスト規制値

各モードによるエンジン回転数、負荷お
よび運転時間の状態で排出されたガス濃度
に一定の加重係数を乗じた値が以下のとお
りでなければならない¹⁾。

NO_x≤590ppm、HC≤670ppm、CO≤980ppm

(車両重量 2.5 トン以上の重量車用ディーゼル機関が対象)

5.2. 現場適応試験

平成8年、阪神高速道路公団唐櫃東トンネ
ル工事において、試験走行と適用試験を実施
した。試験項目は①動力性能②走行性③操縦
性④作業性の確認などであった。

なお、試作車は2トン積載のため、実際の
ずり出し作業のように、岩塊をホイールロー
ダーから直接積み込むことはできなかった。
従って2トンの鋼材を用いて試験を行った。

(1)現場条件

トンネルの縦断勾配や切羽ずり捨場間の距
離などは図6のとおりであり、BからDの区
間で計測を行った。なお試験状況を写真3に
示す。

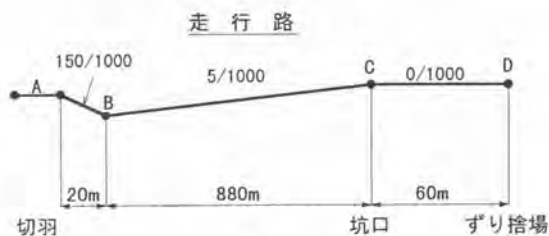


図6 現場条件



写真3 試験状況

試験場所のトンネル縦断勾配が0.5%であ
り、当初開発計画時の上り3%でなかったた
め、動力関係では余裕のある値が得られた。
運搬作業については従来のディーゼルダンプ
トラックと比べて全く遜色がなく、走行性、
操縦性、作業性とも問題がないことが確認で
きた。

(2)調査結果

- ・最高速度 50km (空車)
- 29km (実車)

- ・ 1 充電走行距離 124km (空車)
 55km (実車)
- ・ 燃費：9 km/L 空車 (V=23km/H)
 4 km/L 実車 (V=12.4km/H)
- ・ 回生電力：電力は 15%程度回生できた。
(走行時の運動エネルギーを 100%とする)
- ・ 作業性の評価
 充電しながらモーター走行を行うため、
 前もって充電しておく必要が無く、また
 外部充電設備も必要がないため、建設現
 場での導入が容易である。複雑な機器搭
 載のため整備性が悪い。

6.まとめ

トンネル工事対応のハイブリッド式ダンプトラックについて以下にまとめる。

(1)長所

①低公害

トンネル工事用として設計したため、市販車と比べ小出力のエンジンで済んだ。

(130PS から 33PS のエンジンへ変更)有害ガスの発生量も少なく低公害である。

②省エネルギー

エネルギーの利用効率が良いため省エネルギー性に優れている。

③現場適応が容易

外部充電設備や充電作業が不要なことから、低公害車として現場への導入が容易である。

(2)短所

①バッテリー等の重量と容積が大きい。

このため機器搭載場所に制約がある。

②システムが複雑

従来の自動車に比べメンテナンスや機器の耐久性に課題がある。

③車両に適したエンジンが必要

自動車用エンジンは汎用エンジンと比べ小型、軽量であり大出力を発揮する。本システムをより有効に発揮させるには車両用の専用エンジンが望ましい。

(3)課題

ハイブリッド車両がトンネル工事用車両に方式が有効なことは確認できた。しかし、今後の適用を図る上で、バッテリーなどの主要機器の性能の向上が必要である。今後より高エネルギーを貯えられるバッテリーや小型軽量の周辺機器の出現が望まれる。

7.おわりに

トンネル現場における作業は、主として掘削や吹き付け作業による粉塵、そして発破や車両の排気ガスによる有害ガスなどにより汚染されている。この中で坑内車両の排気ガスによる汚染を少しでも減少させ、坑内作業環境を改善するためにモーターエンジン併用のハイブリッド式ダンプトラックを開発し、現場への適用確認を行った。今後、より実用的な大型ダンプトラックや各種の建設機械、またバッテリー機関車などへの適用性についても検討を行い、より快適な建設環境の創造の手助けとなるよう検討を行っていきたいと考えている。最後に協力していただいた現場の方々に感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 広安博之、寶諸幸男： 内燃機関 1986年 p148～149 (株)コロナ社
- 2) 大阪低公害自動車コミュニティシステム事業推進協議会： 電気自動車資料「ハイブリッド自動車について」1998年