

3216 ディーゼルハイブリッド車両の 走行シミュレーションによるシステム構成の検討

正 [電] ○小川 知行 正 [機] 中村 英男

正 [機・電] 近藤 稔 山下 修 (鉄道総合技術研究所)

大塚 洋功 御木 孝亮 (ニューメディア総研)

Study on Hybrid System Configurations of Diesel-Hybrid Vehicles by a Running Simulation

Tomoyuki Ogawa, Hideo Nakamura, Minoru Kondo, Osamu Yamashita,
Railway Technical Research Institute 2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo
Hironori Ootsuka, Kosuke Miki New Media Research Institute

Various hybrid system configurations of diesel-hybrid vehicles are proposed. Running performance and fuel consumption depend on hybrid system configurations. We developed a running simulator of diesel-hybrid vehicles considering various hybrid system configurations. This paper deals with a diesel railcar, a series hybrid car, a parallel hybrid car with a transmission motor, and a parallel hybrid car with bogie motors. In this paper, we discuss advantages and disadvantages of hybrid system configurations by a running simulation.

Keywords: Diesel railcar, Series hybrid, Parallel hybrid, Energy consumption

1. はじめに

近年、非電化区間用の気動車の燃費改善や環境負荷改善を主な目的としてディーゼルハイブリッド車両の研究開発が広く行われている^{(1)~(3)}。これらの中で、ディーゼルハイブリッド車両として、種々のシリーズハイブリッド方式やパラレルハイブリッド方式のシステム構成が提案されている。ディーゼルハイブリッド車両は、システム構成によって引張力特性や回生電力の得失が異なるため、評価にあたっては、走行性能と消費エネルギーの両面から考察を行う必要がある。そこで、様々なシステム構成のディーゼルハイブリッド車両の検討を行うため、構成機器の組み合わせを選択して計算可能なシミュレータを開発した。筆者らは、開発したシミュレータを用いて、シリーズハイブリッド方式と2種類のパラレルハイブリッド方式を対象として、単純な線形の路線を対象として検討を行ってきた⁽⁴⁾。本稿では、特徴の異なる複数の実路線を対象として走行シミュレーションを行い、各システム構成の走行性能と消費エネルギー低減効果について検討したので、その結果について述べる。

2. シミュレーション

2.1 シミュレータ

線路条件・車両条件などを与えて運転曲線を作成する運転曲線作成システムにエネルギー計算機能を付加することで、走行性能と消費エネルギーの評価が可能なディーゼルハイブリッド車両のシミュレータを開発した。シミュレータは、様々なシステム構成に対応するため、エンジン・モータ・バッテリー・変速機などの構成機器の有効・無効を切り替えることによりシステム構成を定義することができる。

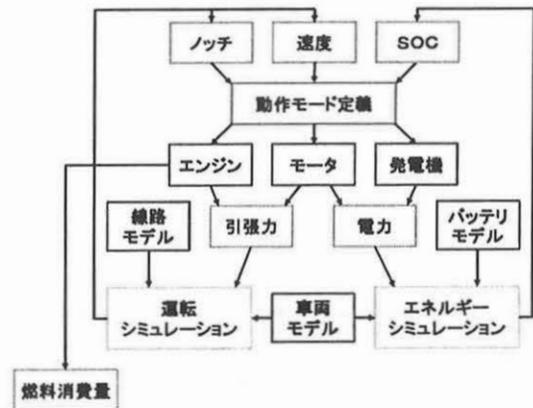


図1 シミュレータの概念図

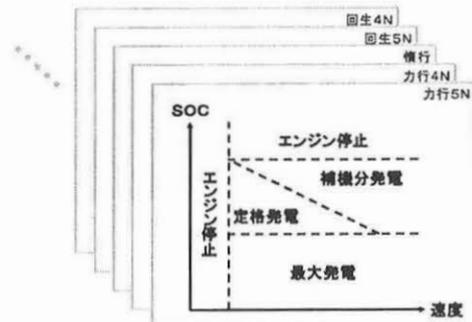


図2 動作モードの概念図

シミュレータの概念図を図1に示す。エンジンやモータから出力される引張力に基づき、車両モデル・路線モデルを反映した運転シミュレーションが行われる。同時に、モータや発電機からの電力に基づき、バッテリーモデルを反映したエネルギーシミュレーションが行われる。動作モード定義は、図2に示すように力行・惰行・ブレーキ・停車の運転状態及び力行・ブレーキのノッチ毎に、速度とSOCに応じたエンジン・モータ・発電機などの機器の動作を定義する。

2.2 対象路線

駅間距離及び勾配に注目し、シミュレーションの対象路線として、図3に示す特徴の異なる3つの路線を選定した。始発駅と終着駅の高低差が大きい場合は位置エネルギーの影響も考慮した検討が求められるため、高低差が少ない区間を用いた。基準とする運転最高速度は、駅間距離を考慮して、表1のように設定した。また、減速度は、気動車の実測データに基づき一般的な値と考えられる1.5 [km/h/s]とした。

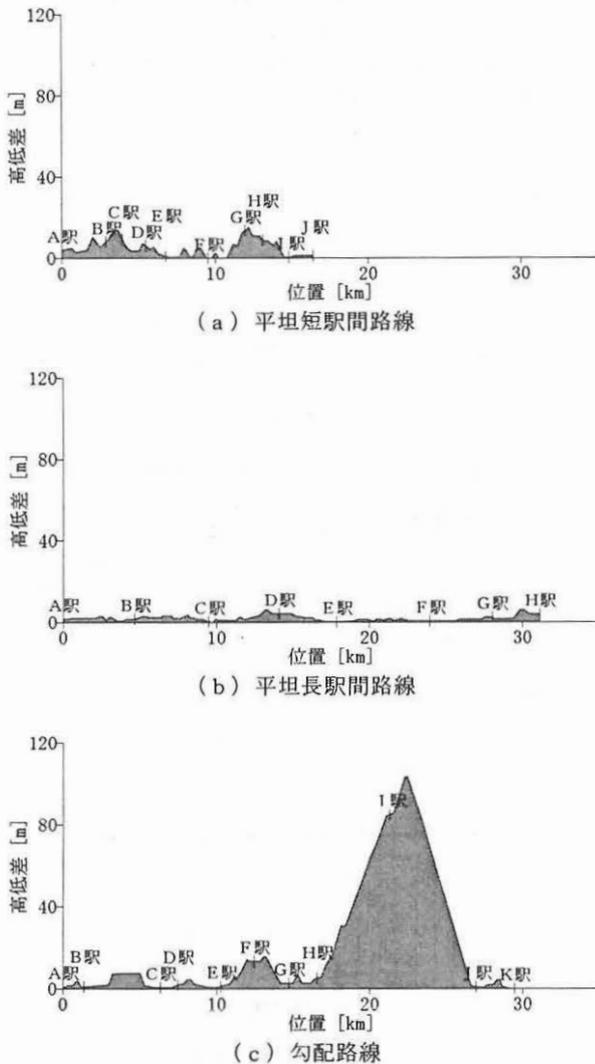


図3 路線特性図

表1 路線特性表

路線名	平均駅間距離 [km]	最高速度 [km/h]	運転時分 [s]
平坦短駅間路線	1.8	55	1732
平坦長駅間路線	4.4	80	2023
勾配路線	2.9	80	2262

3. 車両モデル

普通列車用の気動車を置き換えることを前提に車両モデルを設定した。ハイブリッドシステム構成を図4に、車両諸元を表2に示す。比較の基準として、バッテリーを用いない従来の気動車モデルを用いる。比較条件を揃えるため、エンジン（出力331 [kW]）及びバッテリー（容量10 [kWh]）は全ての方式で同一とした。補機負荷は全ての方式で一定負荷（20 [kW]）とした。また、車両質量はシステム構成に応じて設定した。

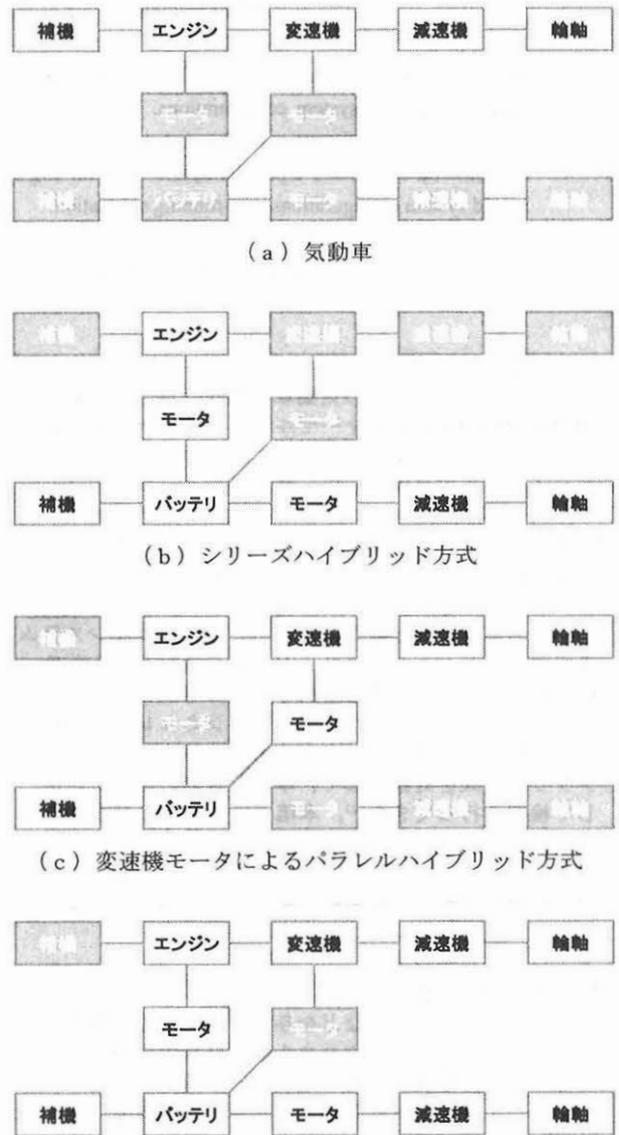


図4 各ハイブリッド方式のシステム構成
（灰色で示した機器が無効な機器を示す。）

表2 車両諸元

	気動車	シリーズハイブリッド方式	変速機モータによるパラレルハイブリッド方式	台車内モータによるパラレルハイブリッド方式
車両質量 [t]	35	37	37	39
乗車率 [%]	100	100	100	100
バッテリー容量 [kWh]	無	10	10	10
充電効率 [%]	-	90	90	90
放電効率 [%]	-	90	90	90
補機負荷 [kW]	20	20	20	20
エンジン出力 [kW]	331	331	331	331
トルコン	有	無	無	無
台車モータ出力 [kW]	無	300	無	300
直結モータ出力 [kW]	無	300	無	40
変速機モータ出力 [kW]	無	無	180	無

3.1 気動車

近年の普通列車用気動車として一般的な、変速1段直結4段の変速機を用いる気動車モデルを設定する。

3.2 シリーズハイブリッド方式

エンジンを発電機と接続して使用し、モータにより車両を駆動するシリーズハイブリッド方式の車両のモデルを設定する。モータの負荷は、エンジン発電機の最大発電電力を超えないように設定し、連続勾配でSOCが低下した場合でも力行性能が低下しない設定とした。

3.3 変速機モータによるパラレルハイブリッド方式

気動車の変速機からトルクコンバータを廃し、モータが付加される変速機モータによるパラレルハイブリッド方式の車両のモデルを設定する。力行時には、変速機モータとエンジンからの引張力が同一の台車から出力される。トルクコンバータを有しないため、低速域では変速機モータからの出力のみで駆動される。高速域では、エンジンからの出力を基本として、モータからのアシストも可能とした。

3.4 台車内モータによるパラレルハイブリッド方式

エンジンによって駆動される台車（エンジン台車）とモータによって駆動される台車（モータ台車）を有する台車内モータによるパラレルハイブリッド方式の車両のモデルを設定する。トルクコンバータを有しないため、低速域ではモータ台車からの出力のみで駆動され、高速域ではエンジン台車とモータ台車の両方からの出力によって駆動される。

4. 評価手法

ディーゼルハイブリッド車両は、蓄電装置を有することから、エンジンの出力と車輪踏面での出力のタイミングが一致しない。このため、従来の気動車の性能評価の考え方をそのまま用いることは困難である。また、様々なディーゼルハイブリッド方式を比較するに当たっては、システム構成によって引張力特性や回生電力の得失が異なり、走行時分や消費エネルギーに影響することも考慮する必要がある。加えて、消費エネルギーの妥当な評価のためには、運転時分やSOCの適切な考慮が必要となる。以下に評価手法について述べる。

4.1 評価値

エンジンはシステム構成に関わらず同一のものを用いて、消費エネルギーとしてエンジンの燃料消費量を評価対象とする。ただし、距離の異なる路線を検討するため、燃料消費量当たり走行距離を示す燃費を評価値として用いる。

4.2 運転時間

システム構成の違いにより、同一のエンジンを使用しても各方式の引張力特性は異なる。しかしながら、消費エネルギーを評価するに当たっては、運転時間を等しくする必要がある。そこで、運転最高速度を調整することにより、運転時分を合わせることにした。具体的には、表1に示す気動車の運転時分を基準として、他の方式では気動車の運転時分と同じ運転時分となるように運転最高速度を増減させた。

4.3 SOC

初期SOCと最終SOCの差となるSOC増加量が異なる場合、充放電に伴う燃料消費量も評価する必要が生じてしまう。そこで、本検討では初期SOCと最終SOCを等しくなるようにすることで、充放電に伴う燃料消費量を考慮する必要があるようにした。具体的には、初期SOCを変化させて最終SOCと等しくなる場合を評価の対象として用いた。なお、終着駅到着後に充電することも考慮して、終着駅到着後60[s]までを計算の対象とした。

5. 計算結果

図5に燃費の比較、図6に力行時間の比較、図7に力行エネルギーの比較、図8に回生エネルギーの比較、及び表3にこれらをまとめたシステム構成の得失の傾向を示す。なお、力行エネルギーと回生エネルギーは、車輪踏面でのエネルギーであり、車両駆動機器での損失は含まない。

5.1 燃費の比較

蓄電媒体を用いるハイブリッド車両とすることで、回生電力の回収という消費エネルギー削減の効果があるが、車両質量の増加による消費エネルギー増加の要因ともなり得る。シミュレーションの結果、図5に示すようにいずれの方式においても気動車よりも燃費が向上した。しかしながら、システム構成により燃費の改善効果の傾向は異なる。

5.2 各システム構成の特徴

シリーズハイブリッド方式は、図6に示すように他の方式と比べて力行時間の割合が大きくなっている。シリーズハイブリッド方式は力行時には、エンジン→発電機（エンジン直結モータ）→モータ（台車内モータ）→減速機と経て動力を伝達するため、伝達損失が大きく力行性能が劣る。従って、一般的に力行時間が長くなると考えられる。一般に、同じ最高速度に達するまでの力行時間が長いと燃料消費量が大きくなる。一方、図8よりシリーズハイブリッド方式では回生電力は確実に回収していることが確認できる。

パラレルハイブリッド方式は、トルクコンバータを有しないため、低速域ではモータ発進を行い、シリーズハイブリッド方式と同様の引張力となる。一方、高速域では、エンジンから変速機を介して駆動する。特に、台車内モータによるパラレルハイブリッド方式では、モータからのアシストも可能となる。このため、高速域の力行性能は優れているものと考えられる。

変速機モータによるパラレルハイブリッド方式は、変速機モータの容量が小さいため、図8に示すように回生エネルギーがやや少ない結果となった。また、減速機と

変速機を介する分の損失が大きくなるため、バッテリーに充電される電力はさらに限られる。一方、台車内モータによるパラレルハイブリッド方式は、モータ台車で回生電力を確実に回収していることが確認できる。

また、図7に示す走行時間あたりの力行エネルギーは、気動車が最も小さく、台車内モータによるパラレルハイブリッド方式が最も大きくなる傾向となっている。これは、車両質量の違いによるものであると考えられる。なお、力行エネルギーの路線による違いは、最高速度の違いが大きく影響しているものと考えられる。

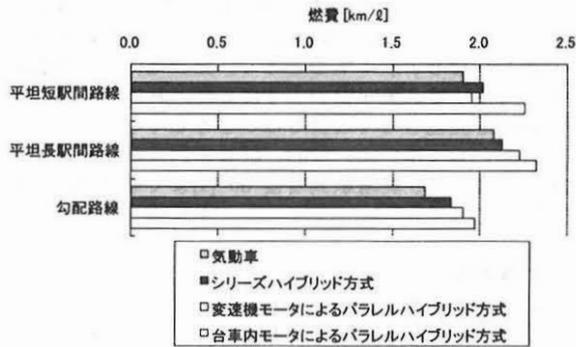


図5 燃費の比較

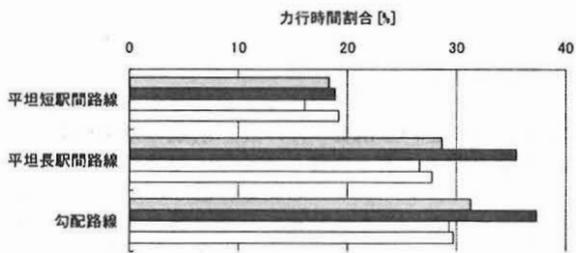


図6 力行時間の比較

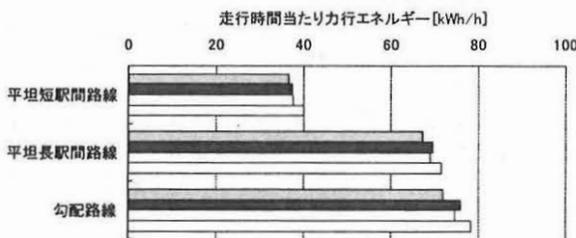


図7 力行エネルギーの比較

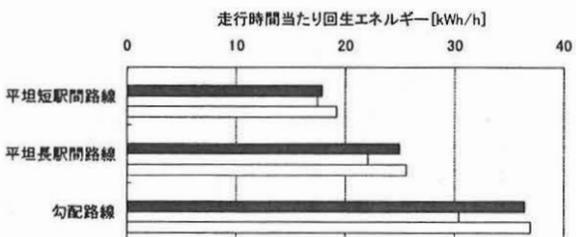


図8 回生エネルギーの比較

表3 得失比較

	気動車	シリーズハイブリッド方式	変速機モータによるパラレルハイブリッド方式	台車内モータによるパラレルハイブリッド方式
力行性能	○	×	◎	△
力行エネルギー	○	△	△	×
回生エネルギー	—	○	△	◎
短駅間区間 燃費	×	○	△	◎
長距離・勾配区間 燃費	×	△	○	◎

5.3 路線特性による特徴

路線の特性とシステム構成の関係について注目すると、図5より路線の特性によって、システム構成の得失が異なることが確認できる。全体的な傾向としては、駅間距離が短く最高速度が低い路線では、回生エネルギーを確実に回収できる方式が優れ、最高速度が高い路線では、高速域での力行性能の高い方式が優れているものと考えられる。

6. まとめ

様々なシステム構成のディーゼルハイブリッド車両の検討を行うため、構成機器の組み合わせを選択して計算可能なシミュレータを開発し、特徴の異なる複数の実路線を対象として走行シミュレーションを行い、各システム構成の走行性能と消費エネルギー低減効果について検討した。

本検討により、ディーゼルハイブリッド車両のシステム構成の違いによる走行性能と消費エネルギー低減効果の一例を示すことができた。路線の特性によって、ハイブリッドシステム構成の得失が異なることが確認され、適用路線に合わせたシステム構成を採用することが望ましいと考えられる。

本検討では、各システム構成でそれぞれ1通りの機器容量かつ、それぞれ1通りの充放電制御方式を想定したが、ハイブリッドシステムのコンセプトは様々なものが考えられ、それに応じて同一のシステム構成でも、走行性能や消費エネルギーの特性も異なってくる。最適な機器容量や充放電制御方式の提案が今後の課題である。

参考文献

- 1) 中神 匡人, 町田 一善, 杉浦 芳光, 菌田 秀樹, 白木 直樹, 大村 哲郎:「世界初のハイブリッド営業車両の開発」、鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, Vol. 14, pp. 127-130 (2007)
- 2) H. IHARA, H. KAKINUMA, I. SATO, T. INABA, K. ANADA, M. MORIMOTO, Tetsuya ODA, S. KOBAYASHI, T. ONO, and R. KARASAWA: "Development of Motor-Assisted Hybrid Traction System", World Congress on Railway Research (WCRR), R.2.2.3.4 (2008)
- 3) 松岡 英二郎, 乾 正幸, 森田 剛, 鈴木 英一:「ハイブリッド車両の開発」、鉄道技術連合シンポジウム, Vol. 9, pp. 219-220 (2000)
- 4) 小川 知行, 中村 英男, 近藤 稔, 山下 修, 大塚 洋功, 御木 孝亮:「ディーゼルハイブリッド車両のシステム構成に関するシミュレーション検討」、電気学会交通・電気鉄道/I T S 合同研究会, TER-09-067 (2009)