

# ディーゼルハイブリッド車両用 運転シミュレータの開発

中村 英男\* 近藤 稔\* 村上 浩一\*  
小川 知行\*\* 熊澤 一将\*\*\* 山下 修#

## Development of Train Simulator for Diesel-hybrid Railway Vehicles

Hideo NAKAMURA Minoru KONDO Kouichi MURAKAMI  
Tomoyuki OGAWA Kazumasa KUMAZAWA Osamu YAMASHITA

In developing a diesel-hybrid railway vehicle, it is necessary to evaluate the running performance, the effect of energy conservation and the effect of exhaust emission decrease of the vehicle. As an evaluation method, the authors have developed a train simulator for diesel-hybrid railway vehicles. The simulator enables one to calculate running time, energy consumption and exhaust emissions of various diesel-hybrid system configurations. This paper describes the characteristics of the simulator.

キーワード：ディーゼル車両，エネルギー消費，シミュレーション，ハイブリッド車両

### 1. はじめに

2006年の省エネ法改正により、一定規模以上の輸送能力を有する輸送事業者には、省エネルギー計画の策定やエネルギー使用量及び省エネルギー措置の実施状況の国交省大臣への報告などが義務付けられている。また、今のところ鉄道車両に対する国内の排気ガス規制は無いが、排気ガス低減への要求が高まりつつある。このような背景から、鉄道用ディーゼル車両の省エネルギー化、排気ガス対策などを目的として、ディーゼルハイブリッド車両（以下、ハイブリッド車両）が開発・導入されつつある<sup>1)~5)</sup>。ハイブリッド車両の開発に当たっては、ハイブリッド化の目的を満足し、使用線区・使用条件を考慮した機器構成と機器仕様を検討する必要がある。そのためには、様々な機器構成・機器仕様に対し、車両の走行性能、省エネルギー効果、排気ガス低減効果を精度良く把握し、評価する必要がある。その評価手法として、ハイブリッド車両の走行に伴う運転曲線の作成とエネルギー消費量、排気ガス排出量などの計算が可能な、ディーゼルハイブリッド車両用運転シミュレータ（以下、シミュレータ）を開発したので、その構成と機能に

ついて述べる。

### 2. ハイブリッド車両の機器構成

鉄道車両に適用可能と考えられるハイブリッド車両の機器構成を図1に示す。(b)～(e)の機器構成には、これまでに国内で提案されている機器構成<sup>1)~5)</sup>が全て含まれている。なお、図1においては、主に発電機として動作する電動機/発電機も「モータ」と称している。ハイブリッド方式は、(b) シリーズ式と(c)～(e) パラレル式に大別される。さらにパラレル式は、モータの位置により、(c) パラレル式（変速機モータ）、(d) パラレル式（エンジン直結モータ）、(e) パラレル式（台車内モータ）に分類される。各機器構成の特徴は以下のとおりである。

(b) シリーズ式は、電気式ディーゼル車両にバッテリーを付加した構成である。車両の駆動力は全てモータで負担する。

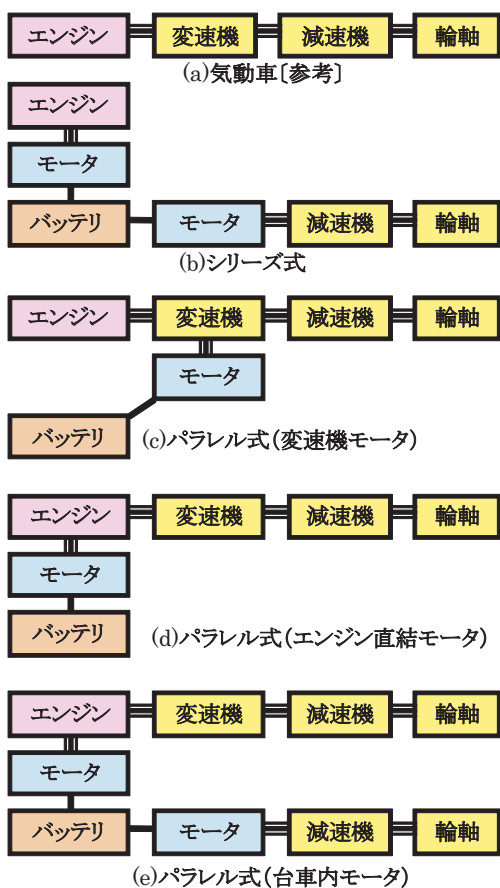
(c) パラレル式（変速機モータ）は、気動車の変速機にモータとバッテリーを付加した構成である。変速機の歯車装置やクラッチ等により、エンジンとモータを異なる回転速度とすることが可能である。

(d) パラレル式（エンジン直結モータ）は、気動車のエンジンに直結してモータとバッテリーを付加した構成である。エンジンとモータは常に同一回転速度で回転する。

(e) パラレル式（台車内モータ）は、気動車とシリーズ式を合体させた構成である。

\* 車両制御技術研究部（動力システム）  
\*\* 前 車両制御技術研究部（動力システム）  
（現 日本貨物鉄道株式会社）  
\*\*\* 輸送情報技術研究部（運転システム）  
# 前 輸送情報技術研究部（運転システム）  
（現 株式会社ニューメディア総研）

特集：車両技術



注：≡ は機械的結合，— は電気的結合を示す

図1 ハイブリッド車両の機器構成

3. シミュレータの特徴

開発したシミュレータの特徴を以下に示す。

- (1) 車両走行に伴う運転曲線の作成，および燃料消費量，SOC (State of Charge：充電状態)，排気ガス (NOx, CO, HC, PM等) 排出量などを計算することができる。
- (2) 図1に示す気動車，およびシリーズ式，パラレル式の全てのハイブリッド車両の機器構成に適用可能な汎用性を有する。
- (3) ユーザーインターフェース機能が充実しており，機器構成，機器仕様，および速度やSOCに応じて変化する機器の動作モード (動作状態) の設定などを容易に行うことができる。

4. シミュレータの構成と機能

4.1 シミュレータの基本構成

シミュレータの基本構成を図2に示す。シミュレータは，ユーザーインターフェース，運転曲線計算部，車両モデル計算部から構成される。

運転曲線計算部とそれに関するユーザーインター

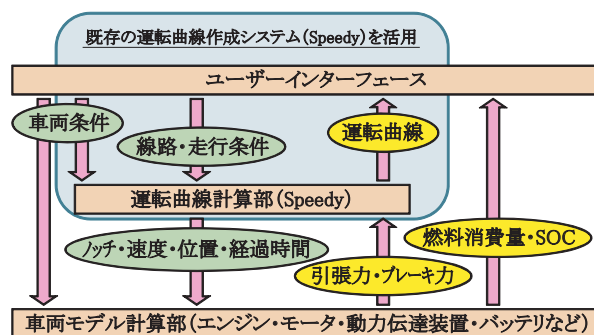


図2 シミュレータの基本構成

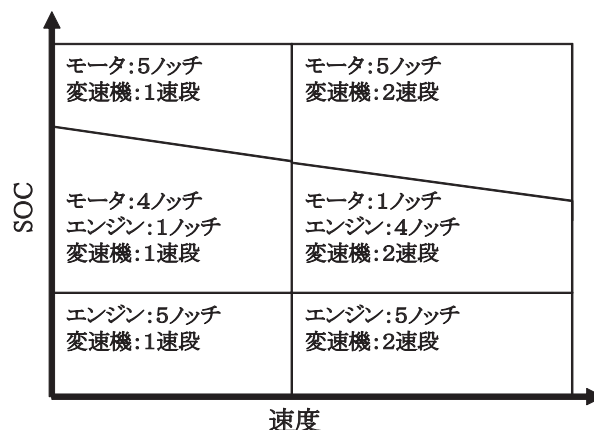


図3 動作モードの例 (運転ノッチ：5ノッチ)

フェースは，既存の運転曲線作成システム (Speedy)<sup>6)</sup> を基本としている。この運転曲線作成システムに対し，新たにハイブリッド車両の車両条件の入力に関するユーザーインターフェース，および引張力，燃料消費量，SOC等を計算する車両モデル計算部を付加することにより，シミュレータが構成されている。

既存の運転曲線作成システム (Speedy) では，予め設定した速度と引張力の関係を用いて運転曲線を作成する。一方，ハイブリッド車両の制御では，図3に示すように，エンジンノッチ，モータノッチ，変速機の数など，各機器の動作モード (動作状態) が速度とSOCに応じて変化する方式を採用している。そのため，ハイブリッド車両は，同じ速度であってもSOCによって引張力が異なる場合があり，予め速度と引張力の関係を設定することができない。本シミュレータでは，その制御方式に対応するため，図3に示すような動作モードを予め設定しておき，その動作モードに基づいて，運転曲線計算の刻み毎に速度と引張力の関係を計算する方式とした。なお，エンジンノッチ，モータノッチは，動作モードに従って各機器が出力するノッチであって，運転士が操作する運転ノッチとは異なる。

4.2 シミュレータの計算の流れ

シミュレータの計算の流れを以下に示す。

- ① ユーザーインターフェースから車両条件・線路条件・

走行条件を入力することにより、運転曲線計算部で運転曲線、車両モデル計算部で引張力、燃料消費量、SOC等を計算する。

- ② 車両モデル計算部は、運転曲線計算部から走行状態の情報として運転ノッチ、速度等を受取り、その走行状態とSOCに対応してエンジンノッチ、モータノッチ、変速機の速度段などの各機の動作モードを決定し、引張力を計算して運転曲線計算部に返す。
- ③ 運転曲線計算部は、車両モデル計算部から受取った引張力を用いて次の地点の速度・運転ノッチ等を計算する。これを逐次繰り返すことにより運転曲線を作成する。
- ④ 車両モデル計算部は、瞬時燃料消費量・SOC等を逐次計算し、瞬時燃料消費量を積算することにより最終的なトータルの燃料消費量を計算する。

### 4.3 車両モデル計算部の構成と機能

開発したシミュレータの核となる車両モデル計算部の構成と機能について以下に述べる。

#### 4.3.1 車両モデル計算部の構成

パラレル式（エンジン直結モータ：図1（d））を例に、車両モデル計算部の構成を図4に示す。車両モデル計算部は、動作モード判別部とエンジン、モータ、変速機などの各機器モデルから構成される。シミュレーションに必要な各機器の特性を表1に示す。各機器の特性は、後述の車両データの設定により入力する。表1の特性は機器構成やシミュレーションの目的により不要なものもある。例えば、構成機器に流体トルクコンバータ（以下、トルコン）が含まれない場合は、変速機の速比-トルコン入出力特性は不要である。力行時における動作モード判別部と各機器モデルの機能について以下に述べる。

表1 各機器の特性

機器	特性	
エンジン	ノッチ毎	回転速度-トルク・燃費・排気ガス特性
		回転速度-補機トルク特性
変速機	速度段毎	ギヤ比、ギヤ効率
		速比-トルコン入出力特性
モータ	ノッチ毎	回転速度-トルク・入力電力特性
バッテリー		容量、内部抵抗、充放電効率 SOC-開放電圧特性

#### 4.3.2 動作モード判別部

動作モード判別部は、運転曲線計算部から走行状態の情報として運転ノッチ・速度等を受取る。その走行状態とSOCから図3に示すような動作モードを判別し、動作モードに対応するエンジンモデルのエンジンノッチ、モータモデルのモータノッチ、変速機モデルの速度段の指令を各機器モデルに出力する。

#### 4.3.3 動力伝達装置モデル

まず、変速機モデルにトルコンを含まない直結段について説明する。変速機モデル、減速機モデル、輪軸モデルなどの動力伝達装置モデルは、式(1)、(2)により、車輪直径と減速機のギヤ比を用いて列車速度から変速機出力軸の回転速度を計算し、変速機の速度段に対応するギヤ比を用いてエンジン回転速度とモータ回転速度を計算する。また、エンジンモデルとモータモデルからエンジントルクとモータトルクを受取り、式(3)、(4)により、変速機のギヤ比・ギヤ効率を用いて変速機出力軸トルクを計算し、変速機出力軸トルクから減速機のギヤ比・ギヤ効率と車輪直径を用いて引張力を計算する。計算した引張力は、運転曲線計算部に出力する。

$$No = Gf \times (60 \times v / 3.6) / (\pi \times Dw) \tag{1}$$

$$Ne = Nm = Gt \times No \tag{2}$$

$$To = Gt \times Et \times (Te + Tm) \tag{3}$$

$$F = Gf \times Ef \times To / (Dw / 2) \tag{4}$$

ここで

$v$ ：列車速度 (km/h)

$Dw$ ：車輪直径 (m)

$Gf$ ：減速機ギヤ比

$Ef$ ：減速機ギヤ効率

$Gt$ ：変速機ギヤ比

$Et$ ：変速機ギヤ効率

$No$ ：変速機出力軸回転速度 (/min)

$To$ ：変速機出力軸トルク (N・m)

$Ne$ ：エンジン回転速度 (/min)

$Te$ ：エンジントルク (N・m)

$Nm$ ：モータ回転速度 (/min)

$Tm$ ：モータトルク (N・m)

$F$ ：引張力 (N)

変速機モデルは、トルコンを介して動力伝達する変速段に対応可能である。変速段の場合、式(2)、(3)により、エンジン・モータ回転速度を列車速度から単純に計算できない。そのため、図5に示すように、トルコン入出力

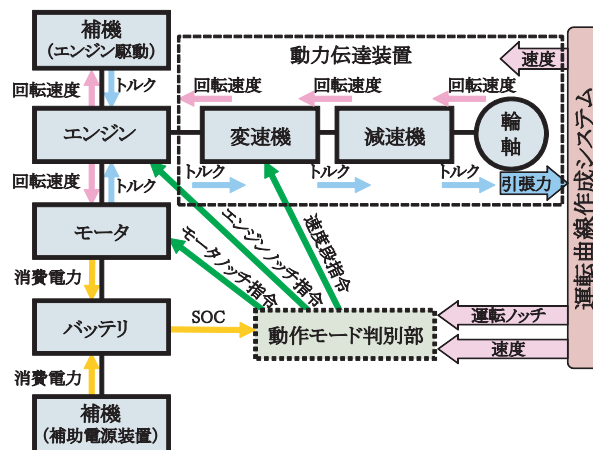


図4 車両モデル計算部の構成

特集：車両技術

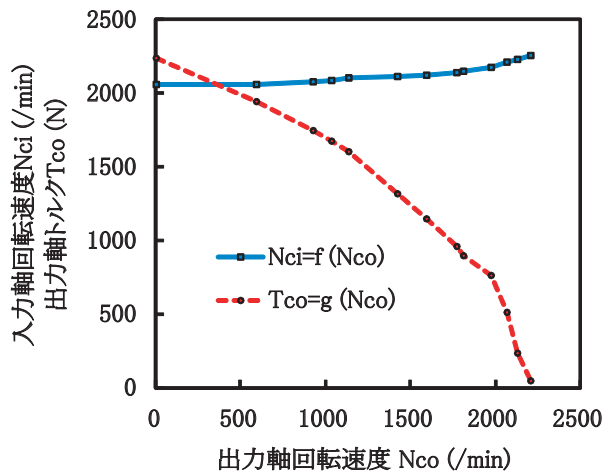


図5 トルコン動力伝達に関する内部データの例

特性とエンジン・モータのトルク特性から、トルコン出力軸回転速度とトルコン入力軸回転速度、およびトルコン出力軸トルクの関係の予めシミュレータの内部データとして計算しておく。この内部データを基に、式(5)、(6)により変速機出力軸回転速度からエンジン・モータ回転速度と変速機出力軸トルクを計算する。

$$N_e = N_m = N_{ci} = f(N_{co}), N_{co} = Gt \times N_o \quad (5)$$

$$T_o = Gt \times Et \times T_{co}, T_{co} = g(N_{co}) \quad (6)$$

ここで

$N_{ci}$  : トルコン入力軸回転速度 (/min)

$N_{co}$  : トルコン出力軸回転速度 (/min)

$T_{co}$  : トルコン出力軸トルク (N・m)

4.3.4 エンジンモデル

エンジンモデルは、エンジンノッチ毎の各エンジン回転速度に対応するエンジントルク、瞬時燃料消費量、排気ガス排出量の特性データを基に、入力されたエンジン回転速度からエンジントルク、瞬時燃料消費量、排気ガス排出量を計算する。瞬時燃料消費量とは、単位時間当たりの燃料消費量 (ℓ/h) である。排気ガスは、CO<sub>2</sub> (二酸化炭素)、NO<sub>x</sub> (窒素酸化物)、CO (一酸化炭素)、HC (炭化水素)、PM (粒子状物質)、黒煙に対応可能であり、濃度 (%) で示す黒煙以外の単位は、単位時間当たりの排出量 (kg/h) である。

また、エンジンモデルは、瞬時燃料消費量 (ℓ/h) と黒煙以外の排気ガス排出量 (kg/h) を積算して最終的なトータルの燃料消費量 (ℓ) と排気ガス排出量 (kg) を計算する。

4.3.5 モータモデル

モータモデルは、モータノッチ毎の各モータ回転速度に対応するモータトルクとモータ入力電力の特性データを基に、入力されたモータ回転速度からモータトルクとモータ消費電力を計算する。なお、モータトルク・モータ消費電力はモータの力行時を正としており、モータの回生時やシリーズ式の発電時などの場合は負の値をと

る。電力変換装置は、モータモデルと後述のバッテリーモデルに含めて考慮することができる。

4.3.6 補機モデル

補機モデルでは、エンジン駆動補機と補助電源装置を考慮することができる。エンジン駆動補機には、ラジエターファン、空気圧縮機などがある。エンジン駆動補機モデルは、エンジン回転速度に対応する補機トルクのデータを基に、入力されたエンジン回転速度から補機トルクを計算する。エンジン駆動補機を考慮する場合は、変速機モデルへの入力トルクは、エンジントルクから補機トルクを減算したものとなる。補助電源装置モデルは、空調装置や制御機器などに電力を供給する補助電源装置として走行状態と無関係に消費電力を一定値として計算する。

4.3.7 バッテリーモデル

バッテリーモデルは、図6に示すようなSOCに対する開放電圧特性データ、バッテリー容量、内部抵抗、放電電力からSOCを計算する。放電電力は、モータ消費電力と補機消費電力の合計である。放電電力と放電電流の関係式(7)から放電電流を求めると式(8)となる。式(8)～(10)によりSOCを計算する。

$$P = V \times I = (V_o - R \times I) \times I \quad (7)$$

$$I = \left( V_o - \sqrt{V_o^2 - 4 \times P \times R} \right) / (2 \times R) \quad (8)$$

$$\Delta SOC = -I \times \Delta t / B \quad (9)$$

$$SOC_n = SOC_{n-1} + \Delta SOC \quad (10)$$

ここで

$V$  : 放電電圧 (V)

$V_o$  : バッテリー開放電圧 (V)

$I$  : 放電電流 (A)

$P$  : 放電電力 (kW)

$R$  : バッテリー内部抵抗 (Ω)

$B$  : バッテリー容量 (A・h)

$\Delta SOC$  : SOC変化 (%)

$SOC_n$  : 今回SOC (%)

$SOC_{n-1}$  : 前回SOC (%)

$\Delta t$  : 経過時間 (h)

また、SOCに対する開放電圧特性データ、内部抵抗を

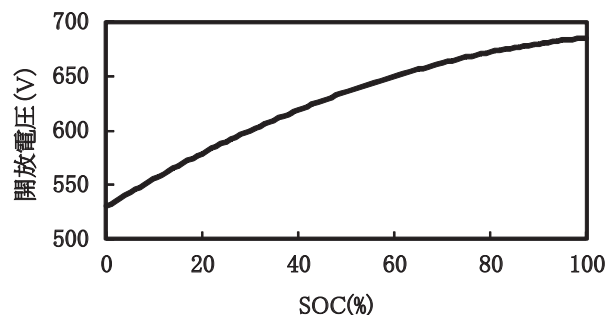


図6 SOCに対する開放電圧特性の例

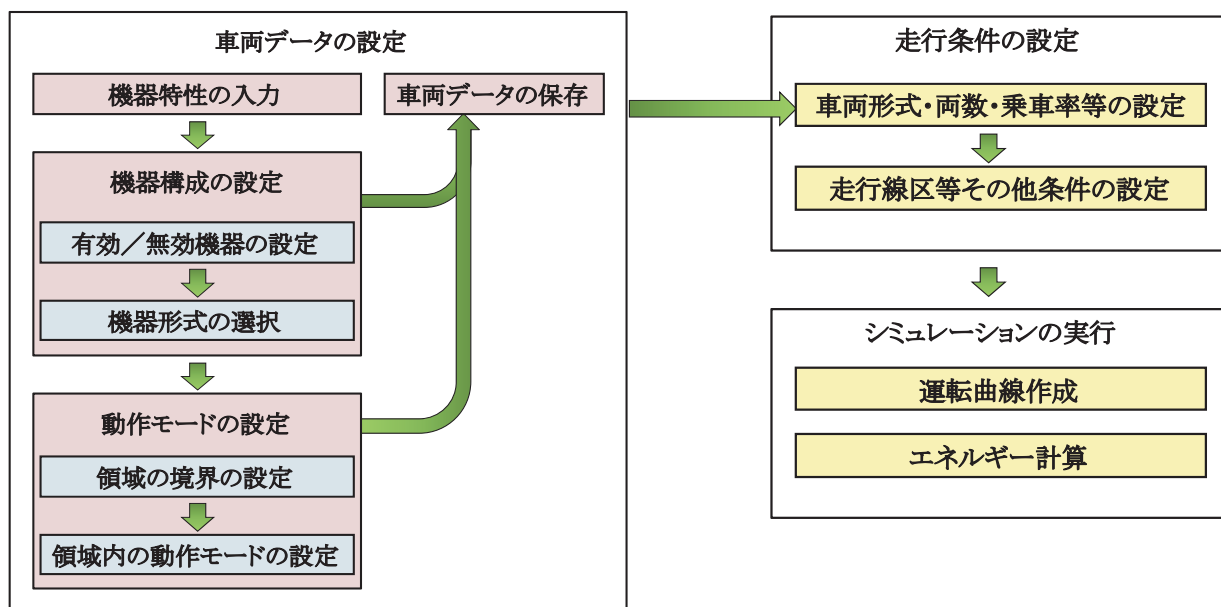


図7 シミュレータの操作手順

使用せず、簡易的にバッテリー容量、消費電力、一定の充放電効率からSOCを計算することもできる。SOCの計算式を式(11)～(13)に示す。

$$\Delta SOC = -P \times \Delta t / E / B' \quad [\text{放電} : P \geq 0] \quad (11)$$

$$\Delta SOC = -P \times \Delta t \times E / B' \quad [\text{充電} : P < 0] \quad (12)$$

$$SOC_n = SOC_{n-1} + \Delta SOC \quad (13)$$

ここで

$B'$  : バッテリー容量 (kW・h)

$E$  : 充放電効率

#### 4.3.8 シリーズ式などの場合

以上、パラレル式(エンジン直結モータ)の力行時を例に、動作モード判別部と各機器モデルの機能について説明したが、ブレーキ時においても力行時とほぼ同じである。また、シリーズ式の場合や、パラレル式であっても力行時・停車時など、エンジンとモータが輪軸と切離された状態の場合は、エンジン回転速度とモータ回転速度が列車速度と無関係な一定回転速度となるエンジンノッチとモータノッチを設定することにより、エンジントルクとモータトルクを計算することができる。

### 5. シミュレータの操作

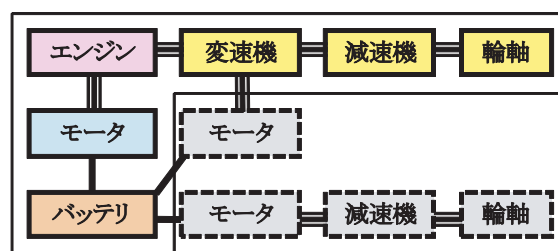
シミュレータの操作手順を図7に示す。ハイブリッド車両の機器構成や動作モードを設定するための車両データの設定・保存を行った後、対象の車両形式の選択と走行線区等その他条件の設定を行い、シミュレーションを実行する。車両データの設定には多くのデータを入力する必要がある。入力作業を容易にするため、ユーザインターフェース機能の充実を図っている。シミュレータの操作上特に重要な車両データの設定方法について以下に述べる。

機器特性の入力では、表1に示す機器特性を入力し、入力した機器特性に対して、機器形式の名称やエンジンノッチ、モータノッチ、変速機の速度段の名称を付けて保存する。

機器構成の設定では、図8に示すように異なる位置に配置された3種類のモータを有する「基本となる機器構成」の構成機器の一部を無効にすることで機器構成を設定する。この設定方法により、図1に示す全ての機器構成の設定が可能である。構成機器の機器形式は、一覧表から機器名称を選択することにより設定する。

動作モードの設定では、図3に示すような動作モードの領域、およびその領域内における動作モードを設定する。動作モードの領域の設定では、境界データを入力することにより任意の折線を境界線として作成し、領域を設定する。各領域内における動作モードの設定では、エンジンノッチ、モータノッチ、変速機の速度段の名称を一覧表から選択することにより設定する。領域と動作モードは、各力行ノッチ、各ブレーキノッチ、力行時、および停車時別に設定する。

シミュレーション結果は、運転曲線と主要な計算項目



注：実線枠が有効機器，点線枠が無効機器を表す

図8 機器構成の設定の概念図

[パラレル式(エンジン直結モータ)の機器構成を設定した例]

特集：車両技術

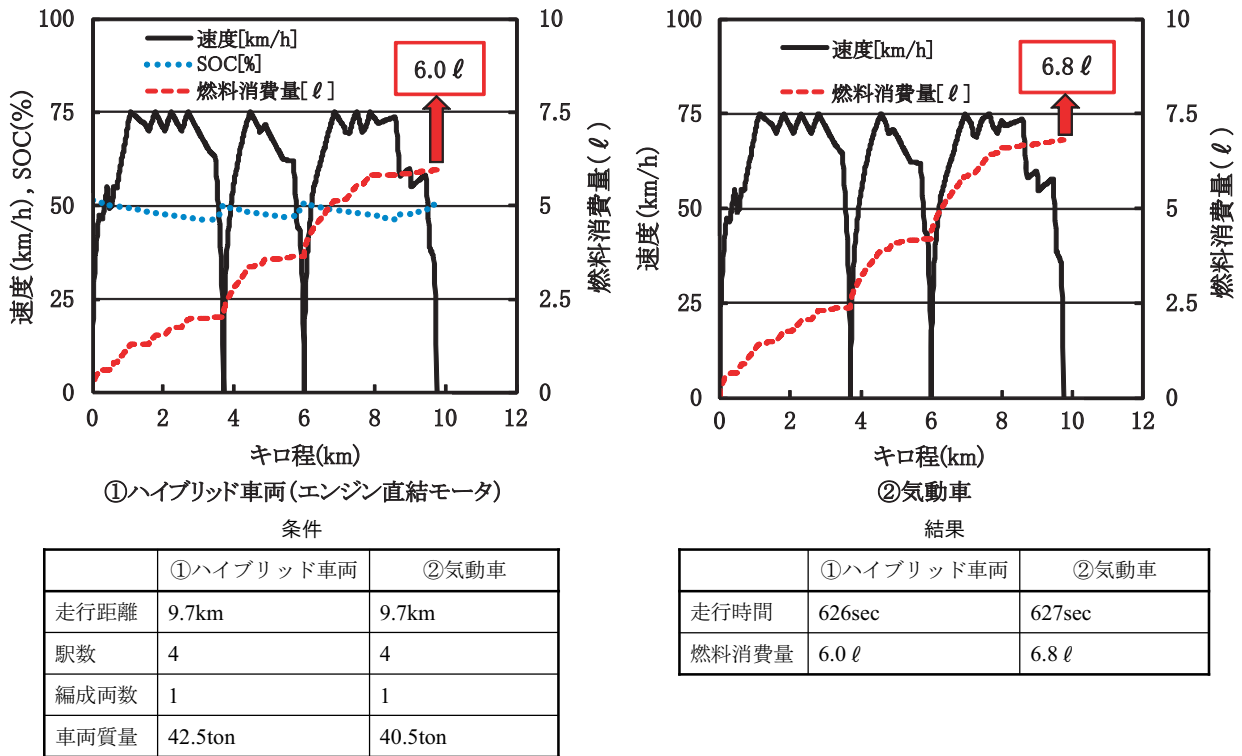


図9 シミュレーション結果の例

の結果を総括表として出力することができる。総括表の出力項目は、駅間毎及び総計の力行時間、ブレーキ時間、だ行時間、燃料消費量、排気ガス排出量、SOC増減量などである。また、全ての計算項目の計算刻み毎の結果はCSV形式で出力が可能であり、様々な形式でグラフ表示や解析が可能である。

6. シミュレーション結果の例

図9は、ハイブリッド車両(エンジン直結モータ)と気動車のシミュレーション結果の例を示す。条件は、バッテリー、モータ、電力変換装置等の質量増を考慮してハイブリッド車両の車両質量を気動車より2ton大きく設定し、両者の走行距離等の走行条件を同一とした。また、同じ条件で燃料消費量を比較するため、ハイブリッド車両のSOCが走行前後で同一となるよう初期SOCを設定した。燃料消費量はハイブリッド車両が6.0 l、気動車が6.8 lであり、両者の差から、ハイブリッド車両の省エネルギー効果を評価することができる。

7. まとめ

ディーゼルハイブリッド車両の走行に伴う運転曲線の作成とエネルギー消費量、排気ガス排出量などの計算が可能で、ディーゼルハイブリッド車両用運転シミュレータを開発した。本稿では、開発したシミュレータの構成

と機能について述べ、ハイブリッド車両の省エネルギー効果を評価するためのシミュレーション結果の例を示した。本シミュレータは、既にハイブリッド車両の開発に活用されている。本シミュレータの活用が、ディーゼル車両のさらなる環境負荷低減に寄与することを期待する。

なお、本シミュレータの操作画面の動画は、鉄道総研ホームページ ([http://www.rtri.or.jp/index\\_J.html](http://www.rtri.or.jp/index_J.html))で紹介しているので参照願いたい。

文献

- 1) 柿沼博彦, 井原禎之: 鉄道車両用モータ・アシスト式ハイブリッド駆動システムの開発, JREA, Vol.51, No.11, pp.53-56, 2008
- 2) 野元浩: JR東日本におけるハイブリッド技術の考え方, JREA, Vol.52, No.9, pp.11-14, 2009
- 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, J-Rail [No.00-50] 講演論文集2401, pp.219-220, 2000
- 4) 薬師寺健祐: JR西日本における技術開発, JREA, Vol.53, No.1, pp.42-44, 2010
- 5) 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, Vol.52, No.611, pp.25-28, 2010
- 6) 平野純一, 富井規雄, 山下修: 運転曲線作成システムSPEEDYの開発, RRR, Vol.49, No.5, pp.9-14, 1992