

シリーズハイブリッド車両に対応した運転曲線作成システムの開発

輸送情報技術研究部 運転システム
主任研究員 山下 修

1. はじめに

シリーズハイブリッド車両は、車上にバッテリーを搭載し、エンジンで発電した電力とバッテリーに蓄えた電力を用いてモータを駆動する車両である。制動時の回生電力をバッテリーに蓄え、力行時に活用できることから省エネ効果が高く、環境負荷の軽減にも有効である。しかし、シリーズハイブリッド車両は従来の車両とは異なり、バッテリーの充電量によって引張力が変化するという特性があることから、運転曲線を作成するためには、列車速度から引張力を取得するこれまでの方法とは異なるアプローチが必要となる。

今回、この課題を解決した運転曲線作成システムを開発したので、以下その概要について報告する。

2. 運転曲線図とシリーズハイブリッド車両

2.1 運転曲線図

運転曲線図¹⁾(図1)は列車が駅間を走行するときの標準の所要時間を算出するために作成される図である。横軸は距離を、縦軸は時間と速度を表わす。図上には駅の位置や曲線区間、下りこう配、トンネル、分岐器、信号などの線路上の条件や設備およびそれらによる制限速度を表記する。列車がそれら条件の中、速度制限を超えないよう、かつ車両の性能を充分活かして走行した場合の速度や時間の

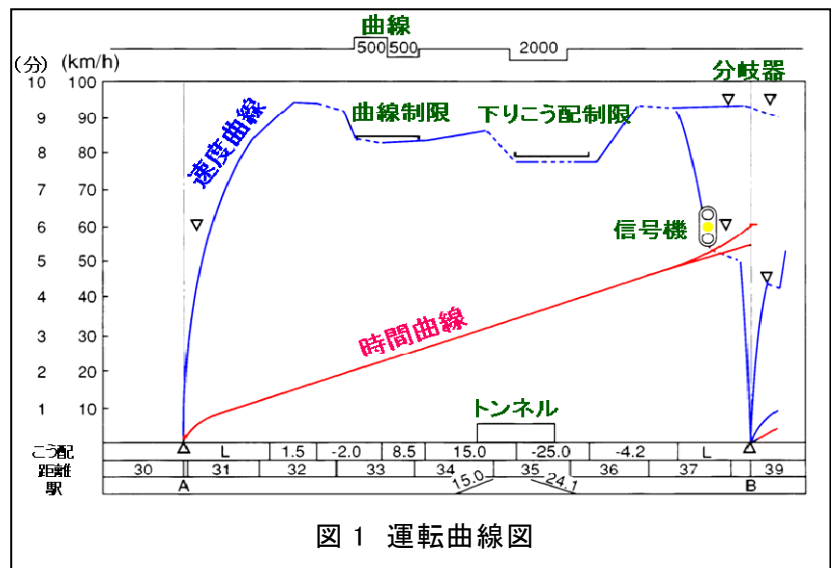


図1 運転曲線図

間の変化を、それぞれ速度曲線と時間曲線で表す。通常この2本の曲線を総称して運転曲線という。

2.2 運転曲線図の作成

運転曲線図は、いわば実際の列車の走行を図上でシミュレートしたものといえる。従来の車両では以下の手法により運転曲線図を作成する。①運転方法(力行・惰行・ブレーキ)を決定する。②力行の場合、力行ノッチおよび速度に対応した引張力を得る。③これに速度に起因する

走行抵抗および線路上のこう配や曲線などの影響を考慮することで、列車の挙動（加速/減速）を求める。④その結果を図上にプロットする。この①～④の操作を出発駅から終着駅まで、速度制限を超えないよう、また列車の性能を十分発揮するように運転方法を設定しながら順次行う。コンピュータによる運転曲線作成システムにおいても基本的な考え方は同じである。

2.3 シリーズハイブリッド車両の特徴と課題

シリーズハイブリッド車両は、車上にバッテリーを搭載し、ディーゼルエンジンで発電した電力に加えバッテリーからのアシスト電力によりモータを駆動する車両である。制動時には、運動エネルギーを回生電力としてバッテリーに回収し、次の力行時に活用される。そのためエネルギー効率がよく環境負荷の低減にも効果がある。また非電化区間をモータ駆動で走行するため気動車と比較して中速域での加速特性に優れているという特徴を持つ。

しかし、シリーズハイブリッド車両では、バッテリー充電状態（SOC：State of Charge）が低下するとモータへ供給されるアシスト電力が不足するため、引張力が低下し（図2）、その結果、列車の加速力は低減される。SOCに影響を与える因子には、車両機器（モータ、発電機など）、走行線路状況（こう配や曲線位置）および運転（力行、惰行、ブレーキ）方法などがあるが、実際にはそれらが互いに関連しあって動作している。従って従来の運転曲線作成手法ではシリーズハイブリッド車両の運転曲線図を作成することは難しい。

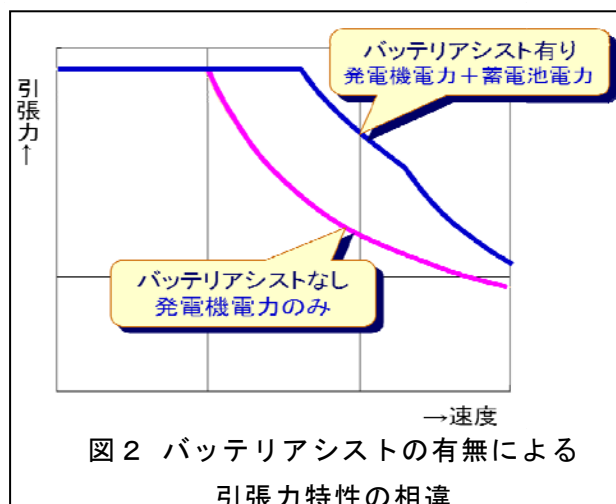


図2 バッテリアシストの有無による引張力特性の相違

2.4 本システムの基本的考え方

本システムは、SOCを常に把握し、それに見合った引張力をもとに運転曲線計算を実行するものである。そのために、列車走行時の発電用エンジンの動作モード、発電機の発電電力、モータによる消費電力、ブレーキ時の回生電力など、個々の電力機器の動作レベルのシミュレーションを実行し、このときのバッテリーの充放電電力をもとにSOCを算出している。

本システムの全体構成を図3に示す。本システムは運転曲線計算部と主回路モデル部により構成されている。システムの動作上、実際の運転に近い運転曲線計算が必要となることから、運転曲線計算部には、すでに鉄道総研で開発した運転曲線作成システム「SPEEDY」

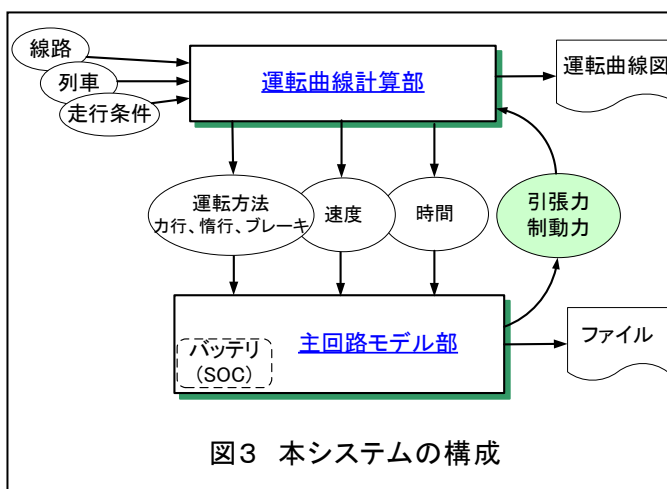


図3 本システムの構成

2) 3) のアルゴリズムを利用している。

主回路モデル部（図4）は、発電機・コンバータ・インバータ・モータなど主回路を構成する機器のエネルギー計算を行なう部分である。ここでは、運転曲線計算部から受け取った運転方法および速度・時間のデータをもとに、主回路を構成する個々の機器についてそれぞれエネルギー計算を行ない最終的にバッテリーの充電状態（SOC）を算出する。この SOC の値をもとに引張力・制動力を求め、これを運転曲線計算部にフィードバックを行う構成となっている。

なお、図中、エンジン動作モード判定部は、バッテリーの SOC をその動作範囲に維持するために、列車速度やバッテリー自身の SOC などをもとに発電用エンジンの動作を決定する部分である。

本システムの入力項目には、走行する線区の地理的条件である線路データ、および列車長・列車重量などの車両データ、主回路機器に関する特性データ、また駅の通過・停車、使用番線、現示信号などを指定するための走行条件がある（表1）。計算結果は、運転曲線図として出力するとともに、列車走行中における各機器の詳細な情報についてもファイル出力している（表2）。

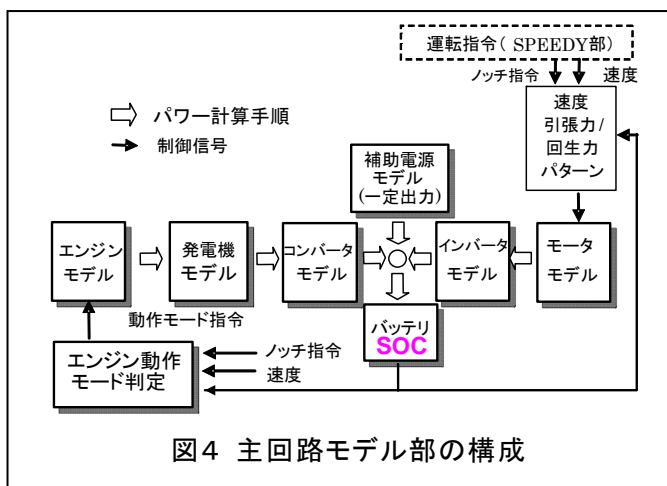


図4 主回路モデル部の構成

表1 主な入力データ項目

名称	内容
線路データ	駅、番線、曲線、こう配、トンネル、信号、特殊制限
車両データ	編成両数、編成長、車両重量、乗車定員数、乗車率
機器パラメータ	バッテリー容量、SOC 下限設定値、SOC 上限設定値、エンジン特性、モータ特性、機器損失、SIV 電力
走行条件	走行区間、駅停車・通過、使用番線、停車時間、現示信号、駅間最高速度、曲線通過条件

表2 主な出力データ項目

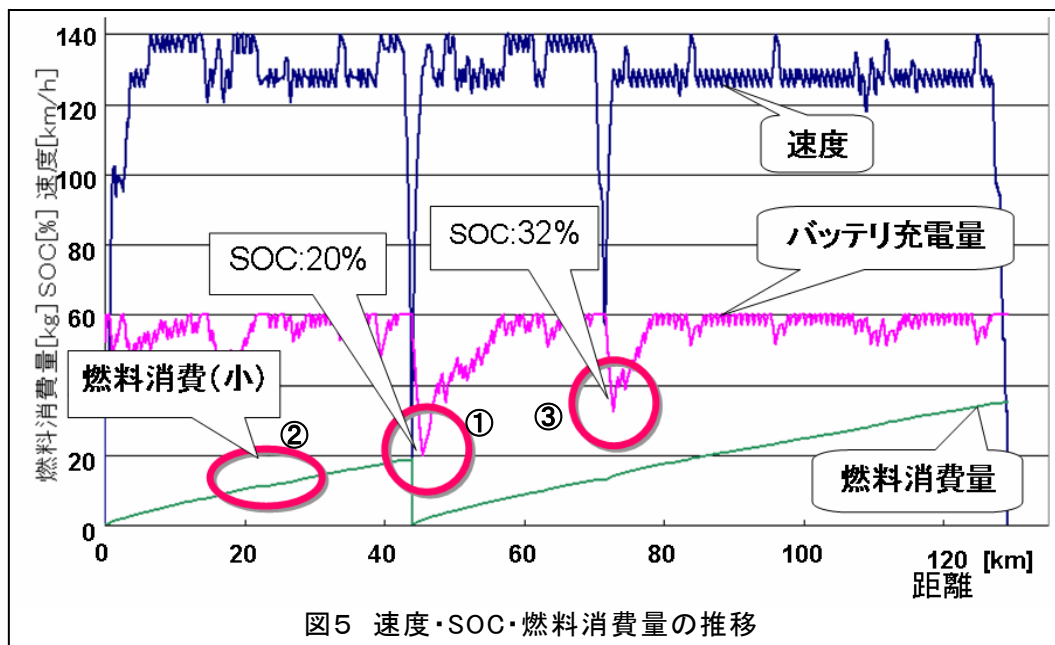
名称	内容
出力図表	運転曲線図、総括表
ファイル出力	走行距離、速度、経過時間、制限速度、引張力、減速度、踏面引張力、エンジンモード、エンジン出力、バッテリー充電電力、バッテリー放電電力、燃料消費量、SOC

3. 走行シミュレーション結果

図5に、本システムで実行したシミュレーション結果の一例を示す。ここで、44 km 付近(①)と72km 付近(②)の2箇所大きく減速している箇所が見られるが、駅停車によるものと、分岐器による60km/hの速度制限によるものである。この図から以下の知見を得ることができる。

- 充電状態(SOC)は、44 km 付近(①)の停車の後での出発時の力行運転のために低下し、充電状態(SOC)下限値である20%にまで達している。従って、ここでは所定の引張力が得られない状態となっている。バッテリーからのアシストが得られない状態はその後しばらく継続し、この間運転時間が延びている。77km 付近(②)についてもSOCの低下は見られるものの、SOCの

- 20km 付近(②)では燃料消費曲線の傾きが緩やかであり、燃料消費率が少ないことが見てとれる。その理由については、この区間は下りこう配のために惰行運転で加速するという状況に加え、充電状態(SOC)が上限付近でありこれ以上の発電は不要であることから、発電用エンジンの動作モードがアイドリングに移行したものであった。



4. まとめ

これまでの車両性能検討は、車両の引張り特性から、性能（到達時分）を評価していたが、シリーズハイブリッド車両の場合は、走行線区の線形や走行時の運転方法および主回路機器との相互関係により蓄電量が変化し、それにより列車性能が変化し得るという特性のため、実路線を走行する際の列車の挙動を把握する手法がなかった。今回開発したシステムは、実際の線区走行の状況を反映した走行時間・省エネ性能の評価、動力機器諸元などの検討を行うことが可能であり、今後のシリーズハイブリッド車両の動力機器の設計に欠かせないシステムであると考えられる。さらに、運転方法や機能等の改善を図り、より実用性を高める予定である。

参考文献

- 1) 運転理論研究会編著：運転理論（改訂版）（社）日本鉄道運転協会
- 2) 稲田伸一、古賀澄夫：運転曲線計算システムの開発、鉄道技術研究報告 No.932 1974
- 3) 山下修：運転曲線図と運転曲線作成システム「Speedy」運転協会誌 2006年3月号