

# 運転曲線レベルで再現可能な 列車運行シミュレーション

武内 陽子\* 坂口 隆\* 熊澤 一将\*  
國松 武俊\* 佐藤 圭介\*

**A Train Operation Simulation System  
Based on a Detailed Model of Train Running Performance**

Yoko TAKEUCHI Takashi SAKAGUCHI Kazumasa KUMAZAWA  
Taketoshi KUNIMATSU Keisuke SATO

The aim of this research is developing a simulation system that can estimate train operations more accurately. For this purpose, this simulation system needs to be equipped with three functions: (1) increasing dwell time caused from passengers' congestion, (2) calculating running time under actual running conditions including signal changes, (3) simulating various driving ways. We explain functions and features of the developed simulation system and overview of the calculation method for running time. In addition, we introduce results of some case studies and an energy consumption calculation method using the results.

キーワード：シミュレーション，列車運行，列車ダイヤ，運転曲線，消費電力

## 1. はじめに

鉄道において、運転設備の設計や駅間の運転時分の査定にはシミュレーション技術が用いられており、運行計画の実施可能性が確実に担保されるような安全側の結果が採用されている。一方で、近年は、査定のための安全側の評価だけではなく、より現実に近い結果を模擬できるような高精度なシミュレーションが求められてきている。その背景として、定時性の更なる向上に対する旅客ニーズの高まりや、電力不足による省エネルギーへの関心等が挙げられる。

本研究の目的は、より精緻な列車運行予測が可能なシミュレータを開発することである。具体的には、既開発の列車運行・旅客行動シミュレータ<sup>1)</sup>に対して、駅間走行を運転曲線レベルで再現可能な機能を追加した。また、シミュレーション結果の活用例としてエネルギー計算ツール作成し、列車ダイヤ全体での力行時の消費電力量を計算可能とした。

以下、2章では開発したシミュレーションの機能と特徴、3章では駅間走行時分計算手法の概要、4章ではシミュレーション結果の紹介、5章ではまとめと今後の課題を述べる。

## 2. 列車運行シミュレーションの機能と特徴

混雑による遅れの増加や先行列車からの遅延伝播の影響を考慮し、列車運行と旅客行動とを推定できるシミュレーションツールとしては、鉄道総研で開発済の列車運行・旅客行動シミュレータ<sup>1)</sup>がある。本開発においては、この列車運行・旅客行動シミュレータ作成時のノウハウを活用して、先行列車の位置による信号現示を考慮し駅間走行を運転曲線レベルで精緻に計算する機能を追加した。また、停車時分の推定、駅間走行時分の推定、旅客行動の推定それぞれが独立するような構成とし、各推定プログラム個別に機能拡張や機能追加を実施することで効率的な開発を行うことが可能な構成とした。シミュレータの全体構成を図1に示す。シミュレータの機能および特徴をまとめると以下の通りである。

### (1) 旅客行動の推定

- (a) 旅客1人1人の詳細な行動（利用列車，乗換，到着時刻等）を推定して履歴を出力
- (b) 様々な列車選択行動（最速経路，乗換が少ない経路，混雑が少ない経路等）を表現可能

### (2) 列車運行（遅延）の推定

- (a) 増延現象（一度遅れだした列車に旅客が集中してさらに遅れる現象）が再現可能
- (b) 列車群を予測し後続列車への遅延伝播が再現可能

### (3) 運転曲線レベルでの駅間走行時分の計算

\* 信号・情報技術研究部 運転システム研究室

特集：信号通信・運輸

- (a) 前詰での運転の模擬 (3.1 節参照)
- (b) 計画ダイヤの時刻に合わせた運転の模擬 (3.2 節参照)

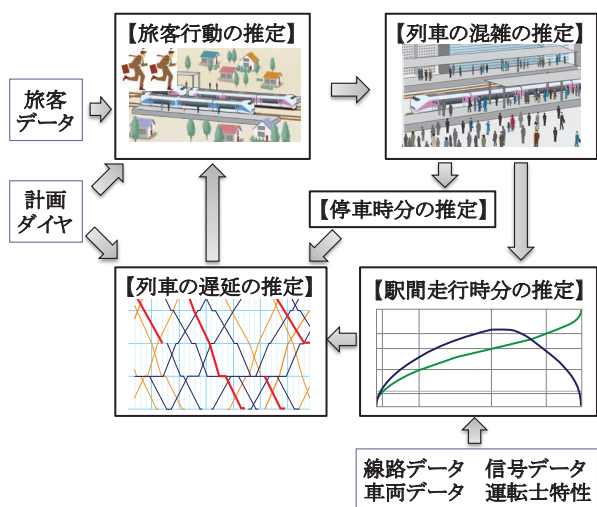


図1 シミュレータの全体構成

### 3. 運転曲線レベルでの駅間走行時分計算手法

#### 3.1 基本的な考え方

駅間走行を運転曲線レベルでの再現するプログラムを実装するにあたり、効率的な開発および信頼性の高いシステムを構築するため、鉄道総研で開発済の運転曲線作成システム Speedy<sup>2)</sup> のノウハウを利用して信号条件の変化に対応して動的に運転曲線を修正する手法を採用した。Speedy は、基準運転時分と呼ばれる各停車場間を走行するために最低限必要とされる時間を計算するためのシステムである。駅間の距離だけではなく勾配、カーブ、車両の性能等の条件を考慮して計算され、与えられた静的な信号現示に従ってその駅間を最速運転した場合の運転曲線を計算し、その結果を各路線で決まっている列車ダイヤ作成の最小単位 (5 秒, 10 秒, 15 秒等) にまとめた結果を出力する。実際の運行においては、信号現示は先行列車の位置によって決定されるため、信号現示の時間的な遷移を計算するプログラムを実装し、その結果を信号現示による速度制限へと変換すれば、動的な運転曲線を計算することが可能となる。以下では、駅間走行時分推定部を「Run-curve Generator (RG)」と呼ぶ。駅間走行時分推定手順の具体例を図2および図3に示す。まず、各列車の駅での出発時刻において、信号現示データを基に速度制限  $L_0$  を作成して RG を呼び出して運転曲線  $R_0$  を計算させ、その運転曲線の通りに走行させる (図2)。信号現示の時間的な遷移が修正された時刻  $t_1$  において、再度、速度制限  $L_1$  を作成して RG を呼び出して時刻  $t_1$  以降の運転曲線  $R_1$  を再計算する (図3)。図3は先行列車の駅2での停車時分が (A) (B) (C) の順

で長くなっていった場合の計算例であり、先行列車との距離が短い場合には、(B) のように駅間で減速したり、(C) のように機外停止したりすることが再現可能であることがわかる。RG による駅間走行時分推定結果の具体例を図4に示す。

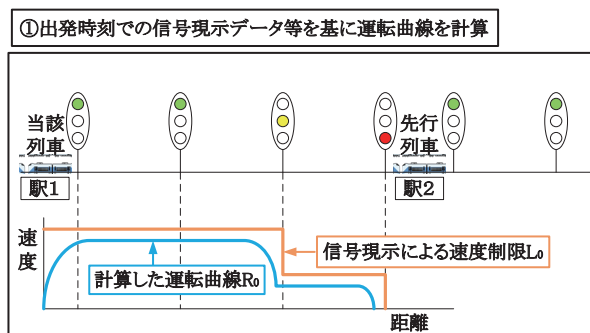
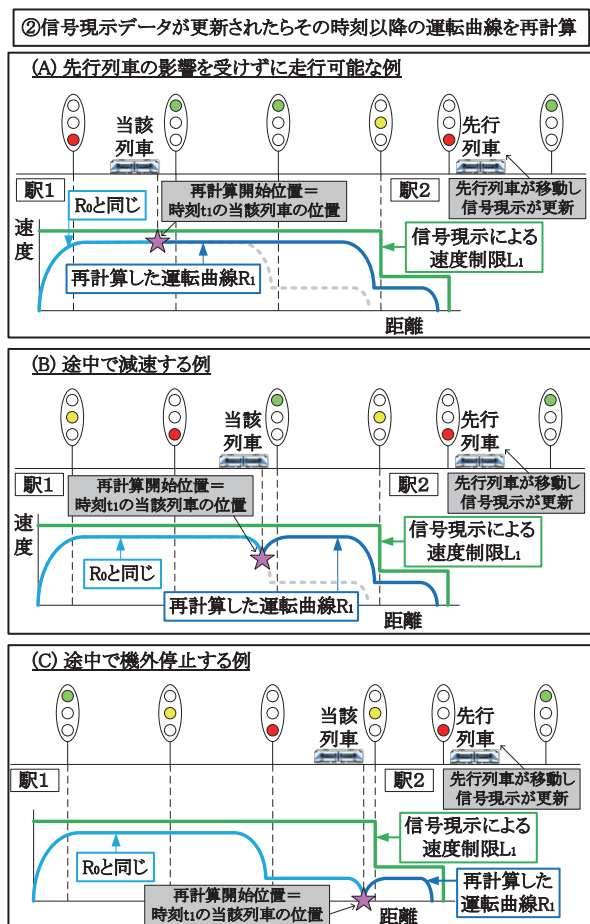


図2 駅間走行時分推定手順①の具体例



- (A) 先行列車の駅2の停車時分が短く、当該列車が先行列車の影響を受けずに走行可能な場合
- (B) 先行列車の駅2の停車時分が長く、当該列車が途中で減速する場合
- (C) 先行列車の駅2の停車時分が非常に長く、当該列車が途中で機外停止する場合

図3 駅間走行時分推定手順②の具体例

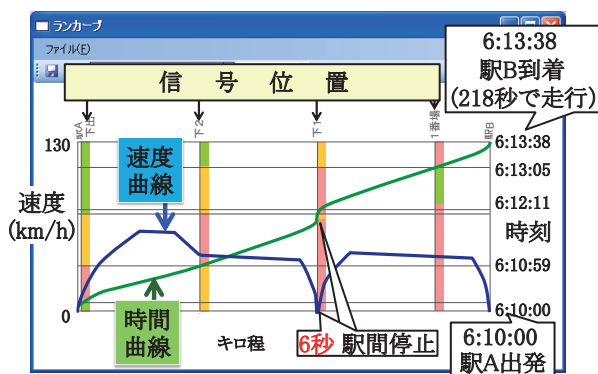


図4 駅間走行時分推定結果の具体例

3.2 より現実に近い列車運行計算のための工夫

列車運行をより現実に近づけるためにRGを改良し、計画で定められた駅間走行時分が最速での駅間走行時分より長い場合には、運転方法を変えて計画での駅間走行時分に近づけるロジックを作成してプログラム実装した。

3.1節で構築したRGによる駅間走行時分は、与えられた速度制限の制約の中で最も早い速度で走行した場合の運転方法を推定するものである。列車ダイヤ上での駅間走行時分が最速運転時分と同じ場合の運転方法は一意に決まるため、3.1節の考え方で現実に近い運転方法となるが、一方で、ダイヤ上での駅間走行時分に余裕がある場合には、その余裕を消化するための方法が多数あり様々な運転方法が存在するが、本開発においては、最高速度を下げて余裕時分を消化する運転方法を実装した。以下では、この余裕調整方法を「調整ロジック」と呼ぶこととする。

調整ロジックにおける最高速度の下げ幅の計算方法の概略を説明する。最高速度の下げ幅と駅間走行時分の増加量は、車両性能や勾配・曲線等の線路形状に依存するために一般的な関係を求めることはできない。そこで、試算する上での仮定をおき、基本的な考え方に従って、目標とする最高速度の下げ幅になるべく近いと推定できる値を解析的に計算する方法を構築した。基本的な考え方を図5に示す。

【試算する上での仮定】

- (1) 信号現示の変化の影響を受けなくなってから最高速度低下の調整を実施する
- (2) 最高速度を超えない部分の運転方法は3.1節での運転曲線と同じとする

【基本的な考え方】

- (1) 面積U = 面積TとなるようなS'を計算する(図5参照)

調整ロジックによる駅間走行時分推定結果の例を図6に示す。左側は調整ロジックを使用せずに最速で運転す

るよう指定して計算した結果で76秒での駅間走行時分となるのに対して、右側は調整ロジックを用いて85秒で走行するよう指定して計算した結果であり、最高速度を低下させて結果として86秒での駅間走行時分となっている。

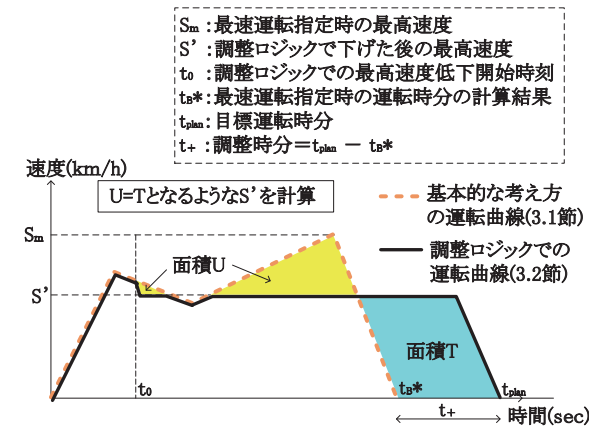


図5 調整ロジックの考え方

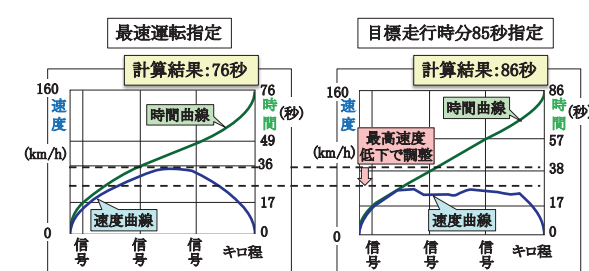


図6 最速運転指定時と目標走行時分指定時の計算結果  
※ 右縦軸は各信号を通過した時点での経過秒数

4. シミュレーション結果の紹介

4.1 駅間走行時分を精緻に計算する効果

開発したシミュレータを用いて簡易な線区における列車運行予測を計算し、駅間走行時分を精緻に計算する効果を考察した。

列車ダイヤと線区は図7および図8の通りである。駅が3つの簡易な線区であり、駅Bには渡り線が設置されており、曲線やこう配がある。列車1は列車2へ、列車3は列車4へと駅Bの渡り線を通って折り返し、列車5は駅Aから駅Cまで下り本線を走行する。車両形式は運用列車毎に全て異なるとする。

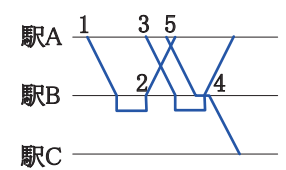


図7 列車ダイヤ

特集：信号通信・運輸

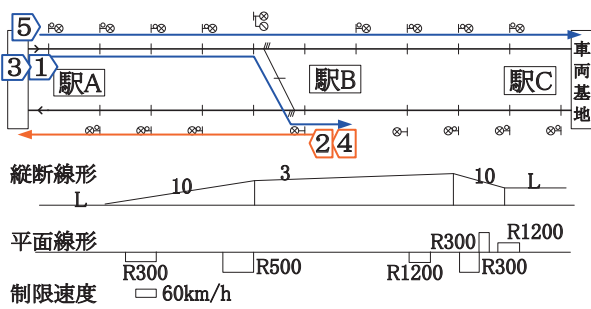


図8 配線，縦断線形，平面線形，制限速度

遅延発生時に列車間隔が詰まってだんご運転状態になり駅間での減速や機外停止が発生する可能性がある場合には、運行管理者が後続列車の出発を駅で抑止する手配を実施することがある。これは、先行列車の影響を受けない列車間隔を保ちながら運転することが遅延増加を防ぐ有効な方法であることがわかっているからである。イメージを図9に示す。

このような事例を実際に模擬して、抑止の効果を検証するため、既開発のシミュレータ<sup>1)</sup>と開発したシミュレータにおいて遅延を発生させ、後続列車を所定で出発させた場合と抑止した場合との結果を比較した。

具体的には、列車2の駅B出発が150秒遅延した場合を設定した。図10のように、列車2が駅B上本ホームを占有しているために列車3は渡り線に入れずに遅延し、列車3の遅延が大きくなれば、更に列車5へも遅延が伝播する。この場合の実績ダイヤは図11の通りとなり、列車3と列車5は駅A～駅Bでだんご運転状態となる。

この遅延時において、列車5の駅Aの出発が所定の場合、および、30秒抑止した場合の運行結果を比較した。駅間走行時分および到着時刻の比較を表1に示す。文献1)のシミュレータでは列車5を抑止した効果を計算することはできなかったが、開発したシミュレータでは、抑止した場合の駅間走行時分が51秒早くなり、駅Bへの到着時刻も21秒早かった。開発したシミュレータでの列車5の駅A～Bでの運転曲線を図12および図13に示す。所定出発の場合には駅間で信号現示による速度制限を受けて減速した走行となっているのに対して(図12)、抑止した場合には先行列車の信号現示の影響を受けずに走行できていることがわかる(図13)。

このように、開発したシミュレータを用いることにより、遅延が発生した場合の実際の運行管理で実施する抑止手配での遅延回復効果を再現することができ、適切な列車抑止方法への検討等に利用することが可能になると考えている。

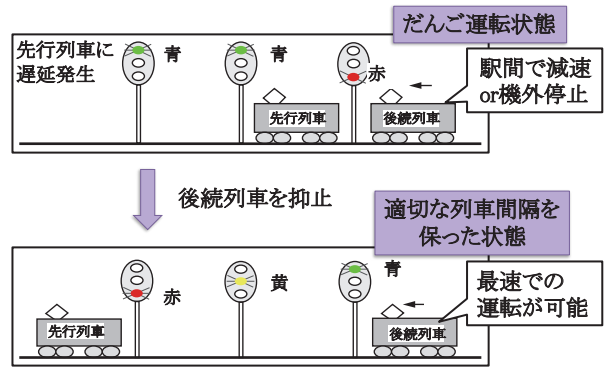
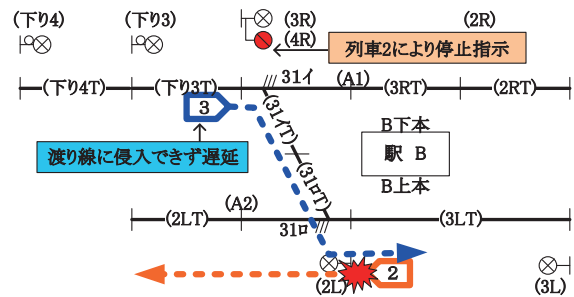


図9 だんご運転状態における後続列車抑止の例

【列車2の遅延が列車3に伝播】



【列車3の遅延が列車5に伝播】

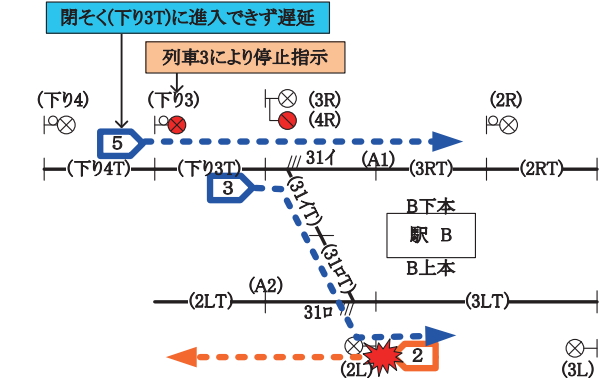


図10 列車2の遅延が列車3と列車5へ伝播する様子

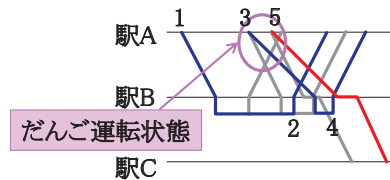


図11 だんご運転状態の実績ダイヤ

表1 列車5の駅A～Bの駅間走行時分の比較

	シミュレータ	駅A 出発時刻	駅B 到着時刻	駅間 走行時分
所定 出発	本開発	6:10:00	6:13:18	198秒
	既開発 <sup>1)</sup>	6:10:00	6:13:40	220秒
30秒 抑止	本開発	6:10:30	6:12:57	147秒
	既開発 <sup>1)</sup>	6:10:30	6:14:10	220秒

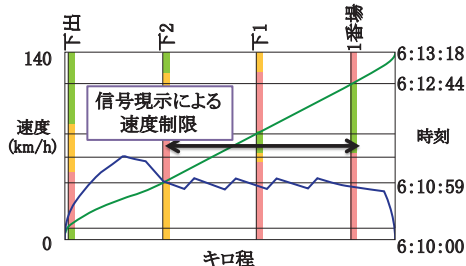


図 12 所定出発の場合の列車 5 の駅 A-B の運転曲線

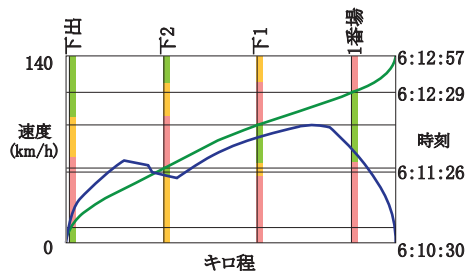


図 13 30 秒抑止の場合の列車 5 の駅 A-B の運転曲線

#### 4.2 実規模データによるケーススタディ

計算例として実規模データによる 1 日分の列車運行計算を実施した。計算時間は 17 分 30 秒であった (PC は Core i3-2100 CPU @ 3.10GHz, 実装メモリ 2GB を使用)。計算結果の一部を図 14 に示す。

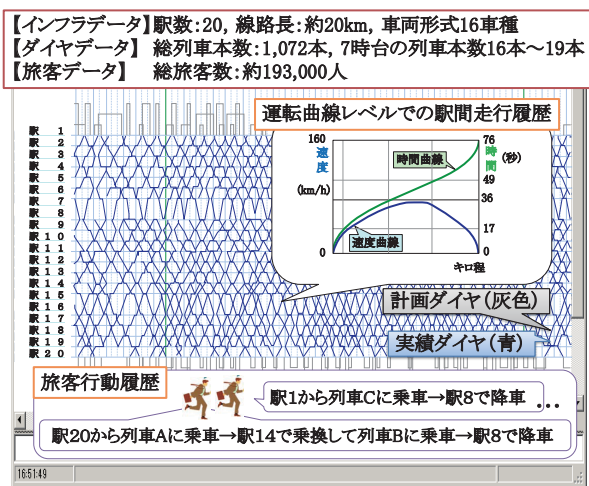


図 14 1 日分の列車ダイヤの結果例 (一部)

#### 4.3 シミュレーションの活用事例

開発したシミュレータでの計算結果の活用事例として、シミュレータから出力される運転曲線レベルでの駅間の運転方法結果を用いて消費エネルギー量を計算するツールを作成した。本章では、ツールでの計算方法の概要およびケーススタディによる比較事例を紹介する。

#### 4.3.1 消費エネルギー計算ツールの開発

本ツールは、列車毎の力行時における各時刻での引張力と速度から消費電力量を計算し、全列車分を時刻毎に合計して消費電力量を計算する。なお、回生電力は考慮していない。消費電力の最小計算単位は運転曲線データの 2 点間とし (図 15 参照)、電力量計算は式 (1) および式 (2) とする。式 (1) および式 (2) においては、 $W$ : 電力量 [kWh],  $V$ : 2 点間の平均速度 [km/h],  $T$ : 区間開始時点の引張力 [N],  $P$ : 電力 [kW],  $P_{aux}$ : 補機電力 [kW],  $\Delta t$ : 2 点間の時間差 [秒] である。

計算例として、図 6 の最速運転指定時と目標走行時分指定時での駅間での消費電力量計算結果 (補機電力: 2.5kW) を図 16 に示す。もう 1 つの計算例として、図 14 の 1 日分の列車ダイヤの計算結果を用いた全列車の 30 分あたりの消費電力量計算結果 (補機電力: 0kW) を図 17 に示す。朝ラッシュと夕ラッシュに電力消費量が多くなっていることが確認できる。

$$P = \frac{(V \times T)}{1000 \times 3.6} \quad (1)$$

$$W = \frac{1}{3600} \int (P + P_{aux}) dt = \frac{1}{3600} \left[ \frac{(V \times T)}{1000 \times 3.6} + P_{aux} \right] \Delta t \quad (2)$$

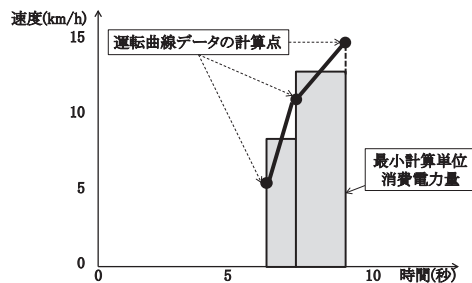


図 15 最小計算単位の消費電力量

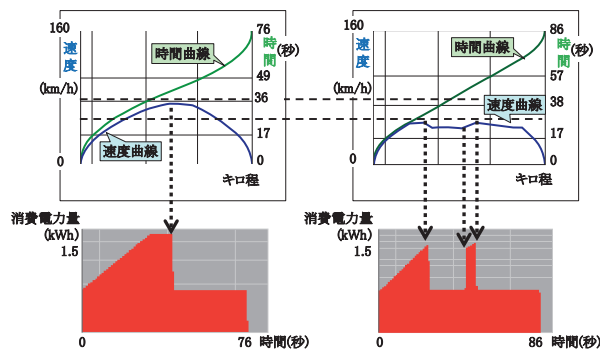


図 16 消費エネルギー計算ツールによる 1 列車の計算例 (図 6 の計算結果を利用)

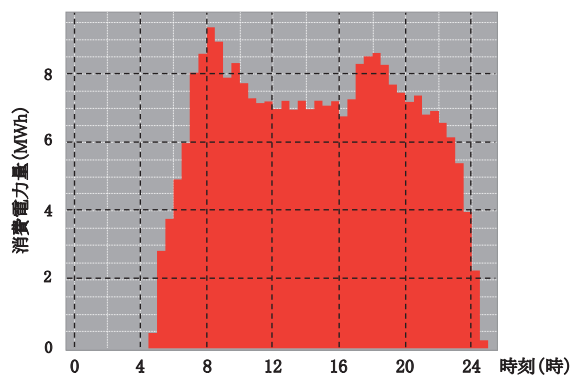


図 17 消費エネルギー計算ツールによる全列車の計算例  
(図 14 の計算結果を利用)

### 4.3.2 消費エネルギーの比較事例

4.2 節で使用した線区データおよび昼時間帯約 1 時間分の下り列車のパターンダイヤを基にして 2 つの節電ダイヤ案を作成し、開発したシミュレータおよびエネルギー計算ツールを利用して評価指標を算出して結果を比較した。

節電ダイヤ案として、列車本数の多い駅 8 ～ 駅 14 での列車本数を間引いて駅間走行時分を少し短縮させたダイヤ案①、および、列車本数は変えずに駅間走行時分を増加させたダイヤ案②を作成した。基となるダイヤと作成したダイヤ案①②を図 18 に示す。

シミュレータと計算ツールによる消費電力量計算結果を表 2 に示す。なお、ダイヤ案②は、3.2 節の調整ロジックを用いた結果である。表 2 より、消費エネルギー削減効果はダイヤ案②の方が、瞬時最大電力削減効果はダイヤ案①の方が優れていることがわかる。

ここで、旅客の視点に立ち、速達性についても考察する。ダイヤ案①の駅 11 における平均待ち時分の増加は 37 秒である一方で、ダイヤ案②の駅 1 ～ 駅 20 までの所要時分の増加は 3 分 35 秒である。このことから、速達性ではダイヤ案①の方が優れていると考えられる。

すなわち、所要時間を重視するならダイヤ案①を選択する、消費エネルギーを重視するならダイヤ案②を選択する、といった考察が可能であると考えられる。

表 2 消費エネルギーおよび瞬時最大電力の比較  
(基となるダイヤの評価値を 1 とした場合の割合)

	消費エネルギー	瞬時最大電力
基となるダイヤ	1.00	1.00
ダイヤ案①	0.91	0.87
ダイヤ案②	0.62	0.92

※消費エネルギー：補機電力 0kW で計算  
瞬時最大電力：補機電力 0kW で計算、1 秒単位での電力量の最大値

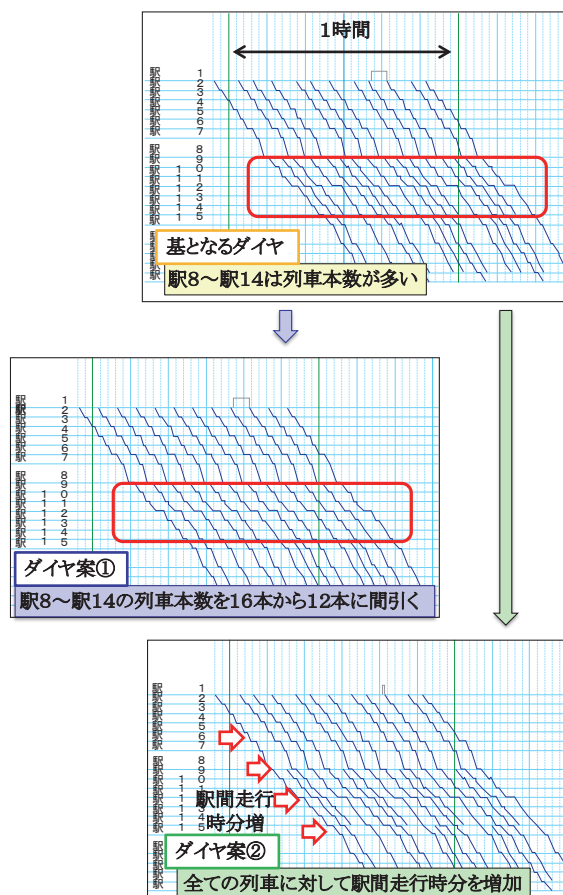


図 18 基となるダイヤとダイヤ案①およびダイヤ案②

## 5. おわりに

本研究では、運転曲線レベルでの駅間走行時分計算が可能な列車運行・旅客行動シミュレータを開発した。また、各列車の各時刻での消費電力量を計算して集計してグラフ表示する機能を持つ消費エネルギー計算ツールを開発した。そして、これらの開発成果のシミュレーション結果例を紹介した。

今後は、回生電力を考慮する等の機能を追加した消費エネルギー計算ツールの開発や、更なるケーススタディによる分析結果の深度化が必要であると考えている。

なお、本研究は、国土交通省からの技術開発費補助金を受けて実施している。

## 文献

- 1) 國松武俊, 平井力, 富井規雄: マイクロシミュレーションを用いた利用者の視点による列車ダイヤ評価手法, 電気学会論文誌 130 巻 4 号, pp.459-467, 2010
- 2) 山下修: 特集 鉄道総研 運転曲線図と運転曲線作成システム「SPEEDY」, 運転協会誌 48 巻 3 号, pp.1-4, 2006