

# 列車運行管理の高度化を支える シミュレーション技術

立石大輔\*  
田中雅也\*  
古林三郎\*

Simulation Technologies for Advanced Train Supervision

Daisuke Tateishi, Masaya Tanaka, Saburo Kobayashi

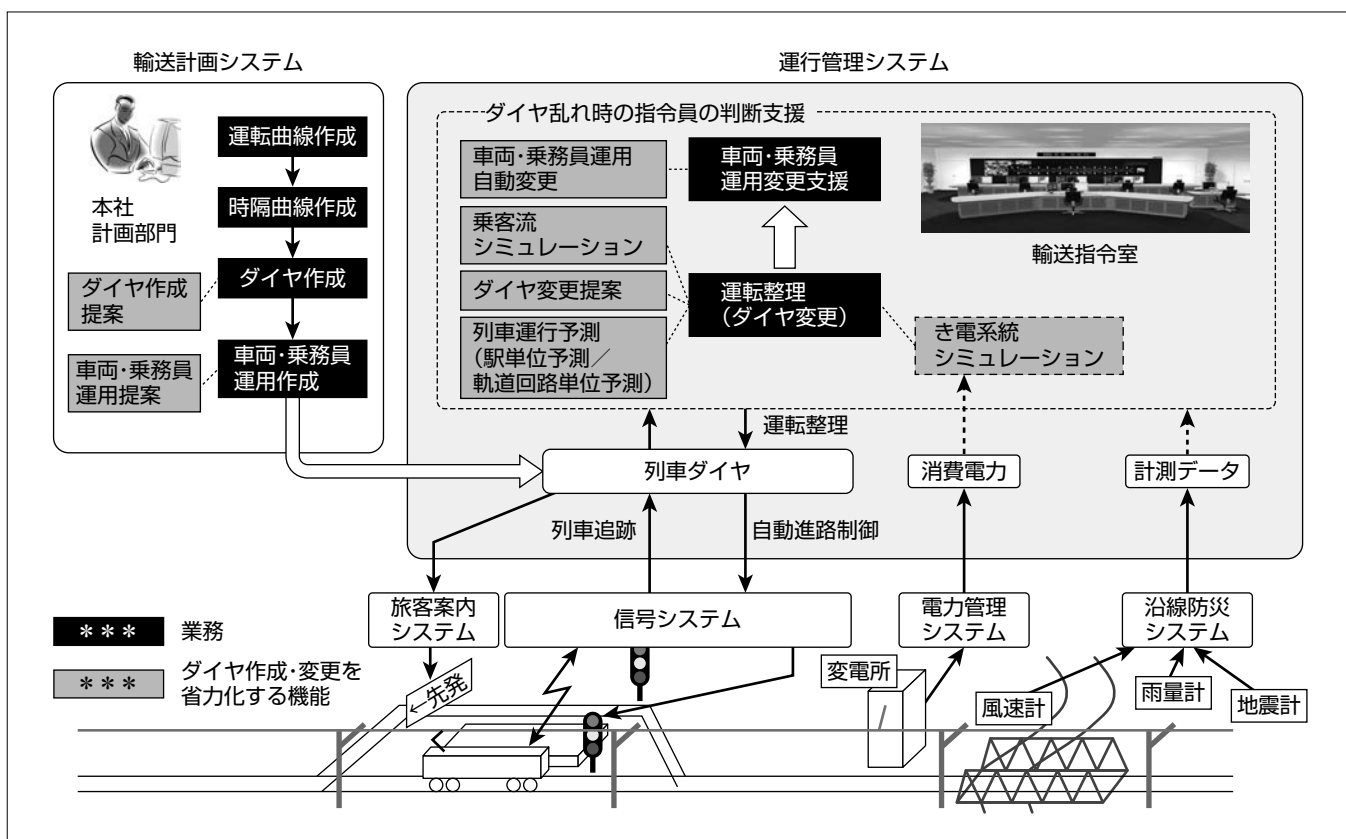
## 要 旨

列車運行管理システムは、列車の位置を把握するとともに、運行計画(以下“ダイヤ”という。)に基づいて信号機を自動制御し、列車の運行をコントロールするシステムである。

1990年代、ワークステーションの普及によって、ダイヤをダイヤ図形式で入力し、関連する帳票を作成する輸送計画システムが開発され、ダイヤの電子データを基に、信号機の自動制御を行う現在の運行管理システムの形態が確立された。これに、気象情報を収集する沿線防災システム、電車への電力の供給状況を監視する電力管理システム、列車のダイヤを旅客に伝える旅客案内システムを組み合わせ、安定輸送の実現に大いに貢献している。

東京・大阪の大都市圏の通勤路線では、これまで、路線単位で独立して運行する路線が多かったが、近年、幹線同士を接続する新ルート建設が行われた結果、様々な先行の列車がお互いに乗り入れて複雑な運行を行う路線が増加している。このため、ある路線での遅延が、他の路線に影響するケースが増え、輸送計画業務及び運行乱れ時に列車の運行を調整する運転整理業務の難易度が高まってきている。

三菱電機では、列車の運行や乗客の行動をシミュレーションする技術を応用して、ダイヤの作成・変更を省力化する様々な機能を開発し、輸送計画部門の業務、輸送指令室の運転整理業務を支援している。



## 列車運行管理の業務フローとシミュレーション技術

列車運行管理の業務は、①列車のダイヤを作成する輸送計画業務、②現在の列車運行状況と、列車追跡・自動進路制御機能の動作を監視し、列車運行乱れ時にダイヤを調整する運転整理業務の2つに大別される。列車運行管理を支援する要素技術を各業務にマッピングした全体像を示す。

1. ま え が き

列車の運行管理におけるシミュレーション技術は、まずは輸送計画システムで、ダイヤ作成提案機能、車両・乗務員運用提案機能として応用された。これらは、ベテラン社員の計画作成プロセスを分析し、手数が多工程をアルゴリズム化して省力化したものであった。

一方、運行管理システムでは、運行乱れ時に行う運転整理案の検討の支援が求められたため、ダイヤ作成提案手法を応用して列車運行予測機能を開発した。そして現在は、指令員が整理案を評価・選択するノウハウを取り込み、車両・乗務員運用自動変更や乗客流シミュレーションの機能を追加し、発展を続けている。

本稿では、列車運行管理におけるシミュレーション技術の発展と今後の展望について述べる。

2. ダイヤ・運用計画作成の提案機能

2.1 ダイヤ作成提案

鉄道事業者では、線路や車両等のハードウェアに対して、ソフトウェアに相当するものがいわゆるダイヤである。

輸送計画の根幹となる“ダイヤグラム”は、横軸に時間を、縦軸に距離をとって1日の列車運行を表した図表である。かつてダイヤグラムは、時間帯ごとの旅客需要と設備の制約を勘案して、紙と鉛筆で試行錯誤しながら作成していた。これがCAD化されただけでも省力化の効果はあるが、大量の到着発時刻のデータを入力する手間が残る。そこで、図1のように、列車の運転本数・運行区間・始発時刻といった初期条件を入力することで、設備制約を考慮したダイヤを自動作成する機能を1990年代に開発した<sup>(1)</sup>。これによって、輸送計画部門の担当者は初期条件を何パターンか用意し、それぞれに対してこの機能が提案する結果を見比べて、最良と思うダイヤを選択するだけでダイヤを作成できるようになった。初期条件のパターンは、輸送計画部門の担当者が用意する必要があるため、“半自動”の機能である。

2.2 車両・乗務員運用提案

個々の列車の時刻が定まれば、それに対して、車両・乗務員のやりくりを定める必要がある。車両運用と乗務員運用は一見似ており、列車が終点に到達したら別の列車に乗り継ぎを繰り返して終電まで走行する(乗務員の場合は1日の就労可能時間まで乗務する)のが基本であるが、乗務員運用の方が制約が多い。

乗務員運用の例を図2に示す。2時間に1回程度は休憩を入れるため、車両は直通するが、乗務員をH駅で交代している列車が存在する。また、図中の1番の乗務員は、日勤であれば6～7時間程度乗務し、11～12時頃乗務終了でも構わないが、そうすると列車本数が増加する朝のラッシュ時(7～9時)だけ乗務する乗務員が発生し、勤務時間

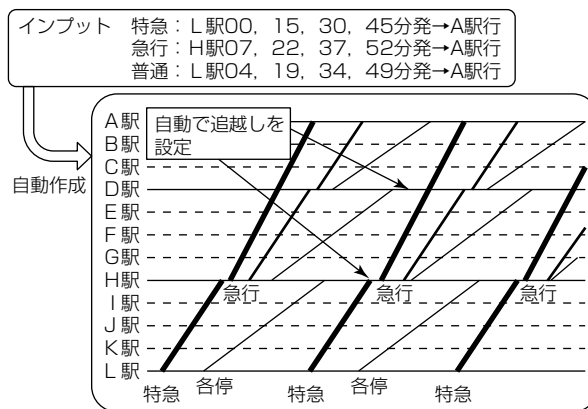


図1. ダイヤ自動作成の例

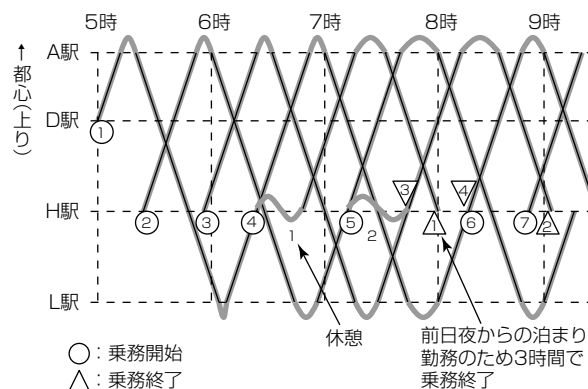


図2. 乗務員運用の例

が不公平になる。このため、始発列車を担当する乗務員は、前日夜に3時間程度、次の日の朝に3時間程度乗務する泊まり勤務とすることも行われる。

このような制約を考慮して、乗り継ぎ列車を自動で検索し、車両・乗務員運用を作成する機能を開発した<sup>(2)</sup>。これも、乗務開始時刻などの初期条件は輸送計画部門の担当者が手入力し、対応する車両・乗務員運用を生成する半自動の機能である。ダイヤ作成提案とともに、今では一般的な機能となっている。

3. ダイヤ乱れ時の指令員の判断支援

3.1 運転整理支援

3.1.1 駅単位予測とダイヤ自動変更提案

計画部門で、ダイヤや車両・乗務員運用の作成を支援する輸送計画システムに対し、輸送指令室で日々の列車運行をつかさどるのが運行管理システムである。そのオペレータ(指令員)は、車両故障、事故、大雨など列車の運転見合せが発生すると、各列車への運転見合せの指示に引き続き、“運転整理”と呼ばれる作業に入る。運転整理は、運転再開時刻の見当をつけた上で、再開後にいかに通常運行に戻すかを検討する作業である。その方法は、運転見合せ範囲にかかる列車を紙のダイヤグラム上で後方に移動し、その列車と接続待ちの列車を後方に移動する作業の繰り返しであ

る。しかし、運転再開見込み時刻は目まぐるしく変わることが多く、そのたびに整理案が書き直しとなる。場合によっては、運転再開までに整理案が間に合わず、通常運行への復帰がままならない事態に陥ることもあった。

紙のダイヤグラム上で検討する方法は、輸送計画でのダイヤ作成とほぼ同じである。そこで、運転見合せ時点での各列車の位置を初期値として、運転再開後のダイヤを自動計算することによって、指令員の運転整理案の検討を迅速化する列車運行予測機能を開発した。駅の着発単位で計算するため、「駅単位予測」と呼ばれている。

列車運行予測機能を用いた運転整理の流れを図3に示す。乗務員からの列車非常停止の一報を受けた指令員が、端末に遅延発生列車と運転再開見込み時刻を入力すると、計画ダイヤ上での順序を守った上で後続列車が順次遅れていく予測結果を表示する。このとき、遅れている各停の後追いとなり徐行運転を強いられる特急列車に、赤丸(警報マーク)が表示される(図3(b))。この警報マークをクリックすると、特急と各停の順序変更を行った予測結果を表示する(図3(c))。

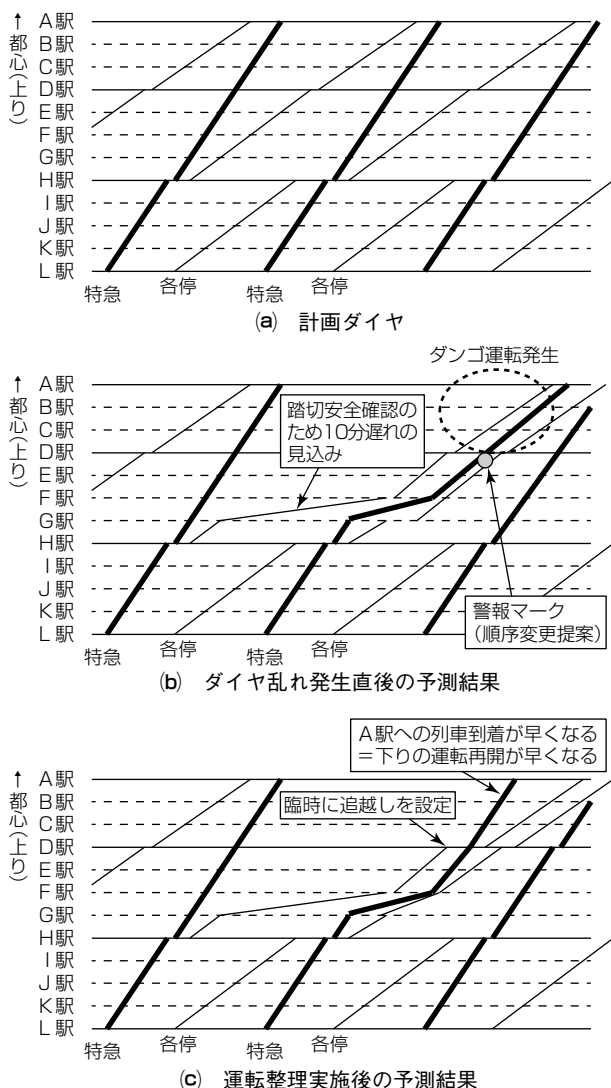


図3. 列車運行予測(駅単位予測)と運転整理提案

### 3.1.2 軌道回路単位予測

駅単位予測は、運転整理の迅速化に役立ったが、指令員が列車運行予測に慣れると、今度は、予測結果と運行実績の差が大きいという指摘が出るようになった。駅単位予測は、ダイヤ作成の技術をベースにしているため、一旦出発した列車は線路がすいている限りは、次駅まで計画の駅間走行時間で走行する前提である(図4(a))。しかし、列車運行が乱れて列車の間隔が短くなると、駅の手前で信号待ちが発生するため所要時間が長くなり、さらに、後続列車の信号待ちを誘発するという悪循環に陥ることがある(図4(b))。このため、駅単位予測では、実際よりも早く到着する予測となることが多い。

そこで、計算機内で数秒ごとに列車の位置・速度、連動装置や自動進路制御機能の振る舞いを計算し、未来の列車運行をシミュレートすることによって抜本的解決を図った。これを、「軌道回路単位予測」と呼ぶ。駅単位予測は、数分ごとに駅を通過するイベントを処理すればよいが、軌道回路単位予測は、数秒ごとに列車の位置等を計算するので、格段に計算量が増大する。しかし、計算機の高高速化もあり、現在では100列車超の動きを1時間先まで数秒でシミュレーションできるようになった。高精度な予測が必要な範囲は、現在時刻から30分~1時間程度でよいとため、1時間先以降は駅単位予測に切り替えるハイブリッド型としている。

### 3.1.3 乗客流シミュレーションによるダイヤの評価

ここまでのダイヤ作成提案や列車運行予測は、いずれも、列車本数などのダイヤの大枠は人間が決め、計算機はその枠内でシミュレーションするものであった。更に一歩進めて計画ダイヤ作成や運転整理を全自動化するためには、何が「良いダイヤ」か評価する手法が必要になる。

ベテランのダイヤ作成担当者や指令員は、時間帯ごとにこういった利用が多いかを考慮しながら、特定の列車に乗客が偏らないよう、或いは特定の駅に乗客が滞留しないようダイヤを調整している。この過程を可視化するのが、乗客流シミュレーションである。

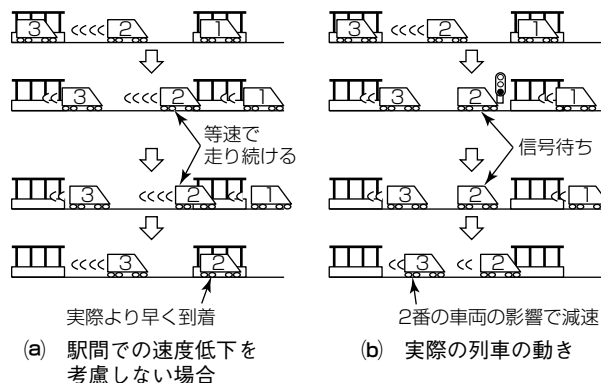
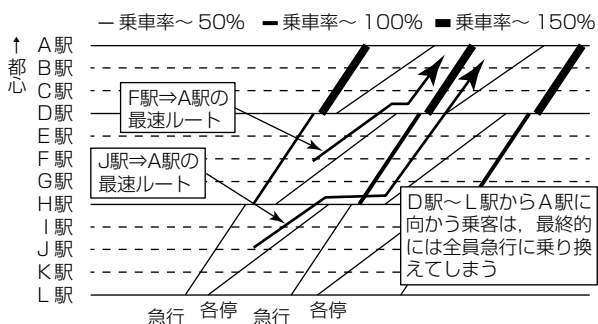
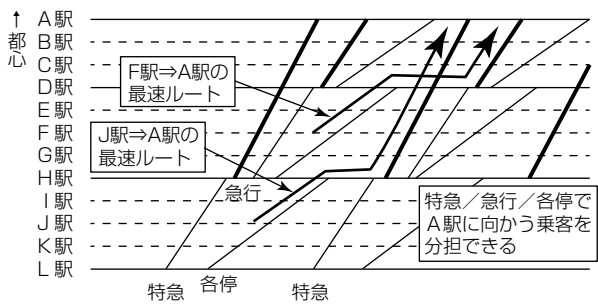


図4. 駅単位予測の制約と軌道回路単位予測の必要性



(a) 特定の列車に乗客が集中する例



(b) 乗客を分散させた例

図5. 乗客流シミュレーション

今日、ICカード乗車券の普及によって、時間帯ごとに、発駅/着駅の組合せごとの利用者数(OD(Origin-Destination)データ)を詳細に取れるようになった。一方、都市近郊鉄道では、乗客が列車を選ぶ基準は、次の2パターンに大別されるといわれている。

パターン1：いつでも最速経路を選択する

パターン2：急行列車の混雑度が上昇すると、多少時間がかかっても混雑度が低い各停を選択する

そこで、与えられたダイヤに対してこれら2パターンの経路を検索し、ODデータに当てはめて、各経路・各列車の利用人数を求める乗客流シミュレーション機能を開発した。

図5に、乗客流シミュレーションの実施例を示す。図の(a)では、D駅～L駅からA駅に向かう乗客が全て急行に乗車するため乗車率が高くなっているが、図の(b)では、H駅～L駅からA駅に向かう乗客は特急を利用するため、列車間の混雑度のばらつきを抑えることができている。

### 3.2 車両・乗務員運用自動変更

運転整理によってダイヤを修正すると、それに応じて車両・乗務員運用も見直しが必要になる。しかし、2.2節で述べた乗務員運用作成の手法は、計画段階用のため、前回の運用割当て結果は考慮していない。このため、そのまま運用変更に適しようとする、軽微な運行乱れに対して、乗務員全員の運用が変わってしまうような運用変更案を作成する可能性がある。

そこで、運用変更の支援用に、計画時点での運用からの変更を少なくすることを重視した運用整理アルゴリズムを開発した<sup>(3)</sup>。列車の遅延や運休などによって、計画通り乗

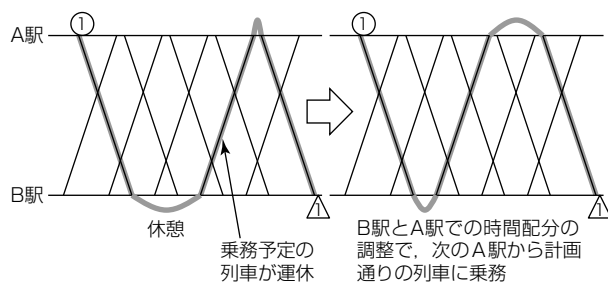


図6. 乗務員運用変更の例

り継ぎができなくなった時刻以降の運用を一旦消去し、再作成するときに、計画時点で担当予定であった列車へ優先的に乗り継ぐようにしている。ただし、乗り継ぎ待ち時間が最短の列車を選択しない箇所が増え、予備の乗務員が大量に必要な場合は、再計算し、現実的な運用整理案を提示する(図6)。

### 3.3 き電系統シミュレーション

電気鉄道には、車両が加速するときは電力を消費するが、ブレーキをかけるときは発電するというように、使用電力の変動が激しいという特性がある。このため、加速中の列車の近傍で別の列車がブレーキをかけると省エネルギーになるが、運転見合せ発生によって停車させた列車を一齐に出発させると、変電所の容量オーバーとなる可能性がある。そこで、列車運行予測結果を基に変電所の負荷分担を求め、変電所の容量オーバーのおそれがある場合には警報を出す機能を開発している。

## 4. むすび

輸送計画作成及び輸送指令室の指令員向けの支援機能について述べた。今後は、これらを更に強化して、鉄道の安定輸送に貢献していく。

また、信号システム分野で進行している技術革新(CBTC(Communication-Based Train Control)などの無線技術を応用した信号システム)に対応した運行管理システム、省エネルギーを考慮した輸送計画/運転整理支援の開発にも取り組んでいく。

### 参考文献

- (1) 北川英裕美, ほか: 多様な路線形態を対象とした列車ダイヤ作成支援システム-DIAPLAN-II-, 電気学会論文誌D, 116, No.8, 874~882 (1996)
- (2) 中桐慶之, ほか: 時刻改正支援システムの開発~乗務員行路シミュレーション機能を備えた支援システム~, 第37回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, 29~32 (2000)
- (3) 片岡健司, ほか: 乗務員運用整理支援システムの検証試験, 第43回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, No.407 (2006)