

## 日々の需要変動に対応した輸送計画作成手法の提案

輸送情報技術研究部 運転システム研究室

室長 坂口 隆

### 1. はじめに

列車ダイヤは鉄道の商品であり、より良い商品を鉄道利用者に安く提供するために、鉄道事業者は利用者の輸送需要を把握し、輸送需要に合った列車運行計画、経済的で効率の良い車両・乗務員運用計画を立てる努力を続けている。しかし、鉄道の利用者数は曜日波動、季節波動だけでなく天候やイベント開催などの要因によっても大きく変動するのに対し、輸送計画の作成には膨大な時間を要するため、輸送需要の急激な変化に対して柔軟な対応を行うことは難しいのが実態である。一方、近年の情報技術の発達に伴い、コンピュータによる需要予測<sup>1)</sup>、シミュレーション技術、計画作成技術などの発展は著しいものがある。そこで、本研究では、最新の情報技術を活用することを前提に、日々の輸送需要の変動に対応して柔軟な輸送力の調整を行うための、新しい輸送計画の枠組みを提案し、それを実現する輸送計画作成手法を開発した。

### 2. 基本計画にもとづく輸送計画の課題

現在の輸送計画は平日と休日のダイヤの違いはあるものの、毎日同じダイヤに従って列車を運行する定期運行を前提として、次のように構成されている。

- (1) 基本計画：ダイヤ改正時に作成される基本となる輸送計画。
- (2) 四半期等実施計画：定期的に作成され、季節的な需要波動やイベント、修学旅行等の団体輸送を勘案して、基本輸送計画に加えて運転する臨時列車と、それに伴って時刻変更や運転休止となる定期列車を決める輸送計画。
- (3) 日々の実施計画：臨時の試運転列車の運転、工事等に伴う運転手続きなど、上記の実施計画に対する日々の変更を計画するもの。事業者や路線によっては、突発的な需要に応じた列車の増発や車両増結を行う場合もある。

つまり、あくまでも基本輸送計画がベースにあり、実施輸送計画はそれに対する追加・変更という考え方にもとづいて業務が行なわれている。このような構造は、輸送計画の追加変更部分のみを伝えればよい、定常的な運行と異なる部分の把握が容易であることなどから、情報伝達の誤りや運転事故を防止するメリットがある。また、特定の路線の特定の時間帯を毎日利用する旅客にとっては、実施計画による変更の影響は僅かであり、慣れることで利用しやすくなるといったメリットがある。その反面、需要変動に対して十分対応できないため、車両や乗務員のリソースを柔軟に活用できないといったデメリットがある。

### 3. 目指す輸送形態

現行の基本計画では、あらかじめ毎日運行することを保証する定期列車の他に、団体需要や利用者増に備えて、運転日が未定の臨時列車（予定臨列車）を策定する。このような列車を、列車ダイヤ図上は点線や薄い色で描くことから、俗に影スジと呼ぶ。本研究が目指す輸送形態では、列車の定時性の確保と利用者への案内の観点から、定期列車と影スジを事前に策定しておくという従来の基本計画の枠組みを踏襲しつつも、通年の平均的な輸送需要にもとづいて定期列車を設

定するのではなく、定期列車を案内上必要最小限の本数とし、その分、影スジを多く設定する。このようにしておいて、日々の運転計画では、輸送需要に応じて影スジのひとつひとつを運行するか否か、どの区間を何両で運行するか、を1日単位で決定する。また、このように柔軟に列車を運行するためには、車両・乗務員運用にも柔軟性が必要であり、現行のような基本車両運用計画や基本乗務員運用計画に拠らずに、日々の運転計画にもとづいて日々異なる車両・乗務員運用計画を作成する。

なお、都市圏通勤輸送など、慢性的に輸送力が飽和している路線には、本研究が目指す輸送形態のニーズが無いと考え、輸送対象は、新幹線のような需要波動の比較的大きな都市間輸送を想定し、旅客は着席にて旅行するものと仮定する。

#### 4. 輸送計画の流れ

##### 4.1 列車計画と車両運用計画の流れ

次に、提案する輸送形態を実現するための、列車計画および車両運用計画の流れを、図1を用いて説明する。ある日において、D-1日の列車ダイヤと車両行路は既に確定している。また、その翌日(D)に仕業検査を実施する車両については、検査実施に至るまでの車両行路が確定している。この条件の下で、D日とD+1日の推定需要をもとに、この2日間の列車ダイヤと車両行路を作成する。そのうちD日の

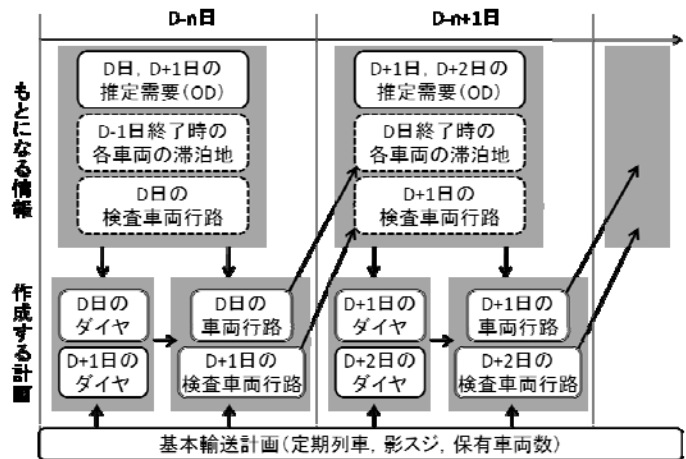


図1 列車計画，車両運用計画の流れ

ダイヤおよび車両行路とD+1日に仕業検査を実施する車両の行路を確定する。このような流れとした狙いは、1日のダイヤを作成するとき、その翌日の需要とダイヤを考慮して車両の滞泊地を決めることで、逆に車両の滞泊地が制約となってダイヤの柔軟性が損なわれてしまうのを防ぐことと、仕業検査を実施しなければならない車両が期日までに確実に検査実施箇所へ到達できるようにすることである。

なお、D日の計画を確定させる日(D-n)は、関係箇所への周知等に係る時間を考慮し、現行のように2週間程度前(n=14)としてもよいし、将来的に情報インフラ等の整備によって計画から実施までの期間が短縮できる場合には、直前(例えばn=1)でもよい。ただし、その時点で推定した輸送需要をもとに列車計画を立てることになるので、策定のタイミングが実施日に近いほど推定の精度が高くなり、需要に対応した輸送計画が期待できる。なお、以下で紹介するアルゴリズムの開発と評価実験にあたっては、輸送需要の表現はOD(発着地別利用者数)の形式とし、ODの分解能は10分から1時間程度の時間帯別であるものと仮定した。

##### 4.2 乗務員運用計画の流れ

上述の列車計画を実現するためには、ダイヤに応じて乗務員運用を決める必要がある。しかしその一方で、乗務員の勤務上、ダイヤの確定より早いタイミングで勤務を確定させる必要がある。この問題に対し、図2に示す業務フローによる乗務員運用計画を提案する。ここで、乗務員シフトとは、“8~9時出勤 18~19時

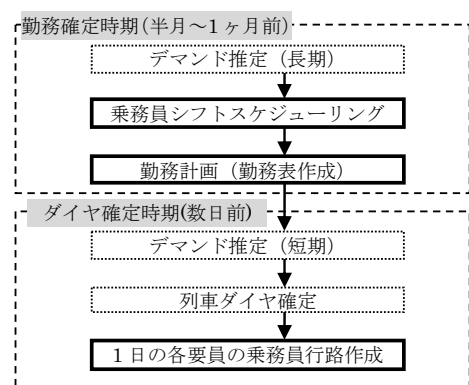


図2 乗務員運用計画の流れ

退勤”のように勤務を出退勤時間帯によって分けしたものであり、乗務員シフトスケジューリングでは対象期間の輸送需要推定（デマンド推定）にもとづいて日々の乗務員シフトごとの要員数を決め、その結果にもとづいて勤務表を作成する。各勤務の中身である乗務員行路は列車ダイヤが確定した後に、各乗務員シフトの要員数に合うように作成するが、直前の輸送需要の変化を受けて、要員数を増やさなければすべての列車に乗務員を充当できない場合は、現行と同様に予備乗務員を充てるなどして対処する。

## 5. 輸送需要に対応した輸送計画の作成アルゴリズム

本研究では、上で述べた各計画を作成するアルゴリズムを開発した。ここではその概要を紹介する。

### 5.1 列車計画作成アルゴリズム

列車計画では、各駅の滞泊車両数や入出車両数などの制約条件のもとで、

- ・ 推定ODに従って発生すると仮定した旅客の総待ち時間（乗換時間を含む）、
- ・ 運転する各列車の空席数、
- ・ 列車本数、

などを総合的に最小化するように、影スジを含むすべての列車・駅間の中で運転する列車およびその運転区間ごとの編成数を決定する。このように定義された列車計画問題をネットワークフロー問題というグラフ理論のモデルに定式化し、汎用の数理計画ソルバーを用いて解くアルゴリズムを開発した。図3は列車計画の作成結果を表している。人の数が各列車の輸送需要を表し、青線が定期列車、橙線が臨時列車、点線が運転されなかった影スジを表す。また、列車の線の数は連結する編成数を表す。

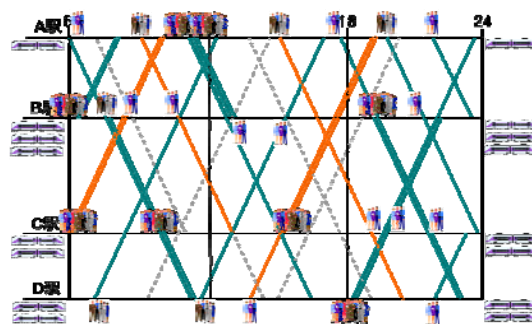


図3 列車計画の作成イメージ

### 5.2 車両運用計画作成アルゴリズム

車両運用計画作成アルゴリズムは、列車計画作成アルゴリズムの結果に対して、分割・併合作業や編成逆転の発生回数が最小となるように、各車両の折返しの候補の中から最適な組み合わせを求める。この問題も上記と同じくネットワークフロー問題として定式化し、数理計画ソルバーを用いて解く。

### 5.3 乗務員シフトスケジューリングアルゴリズム

次の2段階から構成される、乗務員シフトスケジューリング作成方法を開発した。

第1段階：分析用に用意したODから列車ダイヤ、車両運用、乗務員行路の順に作成し、OD（入力）に対する各乗務員シフトの要員数（出力）を求める。

第2段階：上記の入力と出力のペアを大量に用意し、回帰分析によりODから個々の乗務員シフトの要員数の推定式を求める。ここでは、乗務員の不足発生リスクを軽減するよう制約条件を付加した回帰分析の方法として、混合整数計画問題に定式化して解く方法<sup>2)</sup>を採用した。

## 6. 評価実験

実在する路線をもとに作成した仮想的な都市間輸送路線とODを用いて、列車計画・車両運用計画作成から乗務員運用計画作成までの評価実験を行った。輸送需要に対する列車計画の適応度評価には、鉄道総研

の列車運行・旅客流動シミュレータを用いた。このシミュレーションソフトは、列車ダイヤと旅客の発生確率を与え、列車の運行と利用者一人一人の発駅から着駅までの行動を模擬し、各利用者の評価を数値化し集計することによって輸送計画を評価するものである。シ

表 1 列車計画の評価結果

OD 規模	列車ダイヤ	利用者視点				事業者視点		
		平均待ち時間	列車キロ (km)	平均不効用値 (※1)	平均満足度 (※2)	列車本数	平均乗車率	総車両キロ (km) (※3)
繁忙期	固定	15 分	146,000	7581	3.1	302 本	63%	407,000
	提案手法	13 分	178,000	7372	3.2	360 本	73%	308,000
閑散期	固定	13 分	146,000	7363	3.2	302 本	52%	407,000
	提案手法	16 分	140,000	7700	3.1	291 本	72%	258,000

固定：定期列車 250 本+影スジのうち 52 本を毎日運行、編成数も固定。  
 提案手法：定期列車+影スジ 188 本の中から需要に応じて運行する列車を決定  
 ※1 不効用値の数値は小さいほうが良い。 ※2 満足度の点数は 7 点が最高。  
 ※3 1 編成両数を 1 両として計算した。

ミュレータに列車計画と推定ODに誤差を加味した旅客発生率を与え、観測される旅客の待ち時間、不効用値、満足度<sup>3)</sup>により評価した。不効用値とは利用者の乗車時間・ホーム待ち時間・乗り

表 2 乗務員運用計画のシミュレーション結果

OD 規模	勤務計画時の区所平均要員数	行路作成時の区所平均要員数	平均不足数	要員数的中率
閑散期	103.14	105.00	1.86	93%
繁忙期	129.55	131.00	1.45	94%

換えのそれぞれの負担を数値化し、加重和をとったものである。実験結果を表 1 に示す。固定ダイヤと比較して、繁忙期は利用者増に伴って列車本数が増え、待ち時間、不効用値が減少し、満足度が向上した。閑散期は利用者減に伴って列車本数が減少し、待ち時間が増加、よって利用者観点では固定ダイヤに若干劣るものの、固定ダイヤに比べて大幅なコスト削減が得られた。

乗務員運用計画作成の実験では、提案手法により求めた計算式（推定式）により表 1 の繁忙期と閑散期の日々の乗務員シフト要員数を決定し、それにしたがって乗務員行路を作成した。行路作成には、文献4)のアルゴリズムを要員数の制約条件を考慮するよう拡張したものを用いた。実験の結果を表 2 に示す。乗務員シフトごとにみると的中率は高いが、区所全体で見ると慢性的に乗務員が不足し、常時2名の予備乗務員を行路確定までの間必要とする結果となった。

## 7. まとめ

輸送需要の推定にもとづいて列車を柔軟に設定する輸送計画の作成手法を提案し、評価実験の結果、旅客の利便性と運用効率の両面で有効である可能性が示された。今後は個々の開発手法の活用などを検討し、柔軟で利便性の高い輸送計画の実現の可能性を高めていく所存である。

## 参考文献

- [1] 杉山陽一他：改札通過データを用いた旅客流動のリアルタイム推定手法., 鉄道総研報告, Vol.23, No.8, pp.11-16, 2009
- [2] 高野祐一他：最小絶対値回帰分析を利用した中古車落札金額予測モデルの構築. オペレーションズ・リサーチ: Vol.54, No.2, pp.81- 90, 2009
- [3] 村越暁子他：列車ダイヤに対する顧客満足度の予測, 鉄道総研報告, Vol.22, No7, pp.49-54, 2008
- [4] 加藤怜他：乗務員基地最適配置決定アルゴリズム, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2009 年秋季研究発表会アブストラクト集, pp.239-240,2009