

# 鉄道のスケジューリングアルゴリズム —現状と今後の課題—

富井 規雄

鉄道においては、列車ダイヤに代表されるように、列車の時刻、車両・乗務員の運用計画等がすべて事前に定められ、それによって列車が運転される。最近では、これらのスケジュールは、コンピュータによる支援システムを用いて作成されるようになってきているが、作業効率のさらなる向上等を目指して、自動作成アルゴリズムが望まれるようになっている。本稿では、鉄道におけるスケジュールの作成について、現状の実態、自動作成アルゴリズムに関する研究動向、アルゴリズム開発にあたっての難しさ、今後さらに検討を必要とする課題等について述べる。

キーワード：鉄道、列車ダイヤ、車両運用計画、乗務員運用計画、構内作業計画、スケジューリングアルゴリズム、メタヒューリスティクス

## 1. 鉄道のスケジュール

鉄道は、あらかじめ定められたスケジュールに従って動く。事実、国土交通省令にも、「列車の運転は、…出発時刻、通過時刻、到着時刻等を定めて行わなければならない」とある<sup>1</sup>。よって、あらかじめ定められたダイヤに従って動かないものは、鉄道ではないということになる。すなわち、「スケジュールは、鉄道そのものである」と言い切ってしまうと過言ではないだろう。

では、そのスケジュールの具体的な中身はなんだろうか、あるいは、そのスケジュールは、誰がどうやって作っているのだろうか、自動化はされているのだろうか、されているとしたら、どのようなアルゴリズムが使われているのだろうか。そして、残された問題はないのだろうか。本稿では、次々と沸き起こるこのような疑問に対して解説を試みてみたい。

## 2. 鉄道のスケジュールとは

### 2.1 スケジュールの内容—四つのスケジュール

#### 【列車ダイヤ】

「ダイヤ」、あるいは、「列車ダイヤ」という言葉をお聞きになった方は多いだろう。ダイヤ改正などという言葉も広く使われる。ダイヤは、ダイアグラム（ダ

イヤ図）から来ているのだが、今では、交通機関の運行スケジュールの意味で使われている。事実、広辞苑（第5版）にも、「ダイヤが乱れる」という用例が掲載されている。

鉄道部内では、列車ダイヤは、列車計画のことをさす。ここで、列車計画とは、列車<sup>2</sup>1本1本に対して、各駅の着時刻・発時刻、番線などを定めたものを言う。JRの多くの線区では、列車ダイヤは、15秒単位で作られる。大都市近郊の線区では、10秒や5秒単位となる。列車ダイヤを図表の形式で表したものが、列車ダイヤ図（単にダイヤ図と呼ぶことも多い）である。その一部を図1に示しておこう（1枚のダイヤ図には、

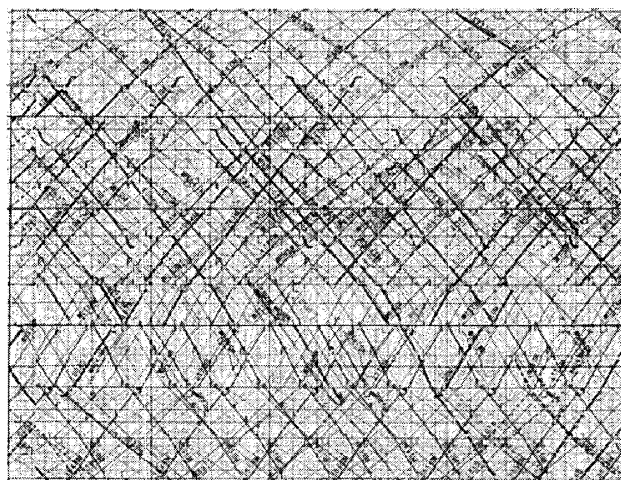


図1 列車ダイヤ図（一部）

とみい のりお

財団法人 鉄道総合技術研究所

〒185-8540 国分寺市光町 2-8-38

<sup>1</sup> 鉄道に関する技術上の基準を定める省令、第99条。

<sup>2</sup> 列車は「停車場外の線路を運転させる目的で組成された車両をいう」と定義されるが、駅と駅間の線路を走っている普通の電車のことだと思っていただいて差し支えない。

24時間分の列車ダイヤが含まれるが、図1では、そのうちの約1.5時間分を示している)。横軸が時間、縦軸が駅で、時間の経過にそって動く列車の軌跡を1本の直線で表している。鉄道における最重要な図表である。ちなみに、列車ダイヤを作る専門家をスジ屋と呼ぶが、これは、列車ダイヤ図の列車の線を「スジ」と呼ぶことに起因している。

### 【車両運用計画と乗務員運用計画】

さて、鉄道のスケジュールというとき、列車ダイヤがまず思い浮かぶのだが、列車ダイヤ(列車計画)だけで列車が動くわけではない。列車が動くためには、そこにリソースを割当てて必要がある。リソースとは、車両と乗務員(運転士と車掌)を指す。列車ダイヤは、列車の運転区間と運転時刻を決めただけの、いわば論理的なものだから、それを具現化するためには、物理的な存在、すなわち、車両と乗務員の運用計画を決める必要がある。例えば、ある運転士がある駅に列車Aを運転して着いたとして、では、次にその運転士は、どの列車を運転するのかなどを決めてやらねばならない。車両についても事情は同じである。このように、車両や乗務員の使用計画を定めたスケジュールのことを、それぞれ、**車両運用計画**、**乗務員運用計画**という。

### 【構内作業計画】

もう一つの計画が**構内作業計画**である。駅の中での編成の移動スケジュールのことをいう。例えば、図2のような配線の駅で、ある列車が1番線に到着したとして、その折返しの列車が3番線から発車するような計画だったとする。利用者の便を考えて、列車の発車ホームを方面別に統一したいというときには、このように到着番線と発車番線が異なることが多い(復習しておく、列車の番線は列車計画で定められるわけだし、どの列車で折り返すかは車両運用計画で決められている)。この駅では、列車は1番線から直接3番線に行くことはできない。1番線から、いったん下り引

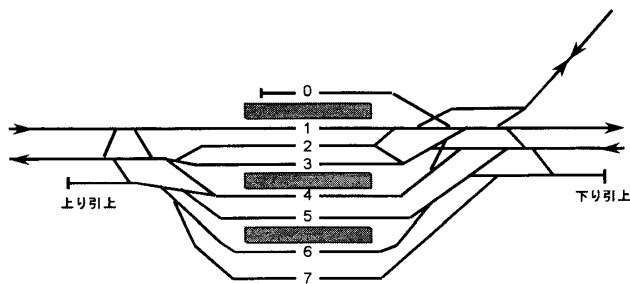


図2 駅の配線の例

上線に入れた後、3番線に移動させる。このような作業を「入換」という。構内作業計画とは、このような車両の入換、ならびに、分割・併合、車内点検、合図、清掃など、駅で行われる作業に関するスケジュールのことをいう。これは、駅ごとに作られることになる。

構内作業計画は、車両基地に対しても作る必要がある。これは、基地での、車両の入換、検査、清掃等のスケジュールを定める。

### 2.2 毎日違う列車ダイヤー基本計画と実施計画

列車ダイヤは毎日異なる、というとき驚かれるだろうか。今述べた四つの計画は、ダイヤ改正時に作られる。これを「**基本計画**」という。ダイヤ改正時に作った計画に基づいて、毎日毎日、列車が運行されるのが原則であるが、必ずしもそういう訳でもない。それは、臨時列車の存在による。需要が多い季節には、臨時列車を運転することがある<sup>3</sup>。あるいは、高校野球応援団のような個別の団体のためにその都度仕立てられる臨時列車もある。これらの列車を運転するために、基本計画の一部を変更せざるをえなくなるときがある。例えば、列車の時刻や番線を変更することがある。場合によっては、車両運用計画や乗務員運用計画についても、基本計画を変更することになる。もちろん、構内作業計画も同様である。

臨時列車の運転のパターンは、日々異なる。だから、少し大げさにいうと、列車ダイヤは、毎日異なるということになる。この日々の鉄道の運行計画のことを、「**実施計画**」という。

さて、ある日の列車は、その日の実施計画に従って運転されるのだが、時として事故や災害などによって列車ダイヤが乱されることがある。そのような場合には、一時的に列車ダイヤ(車両運用計画等を含む)の

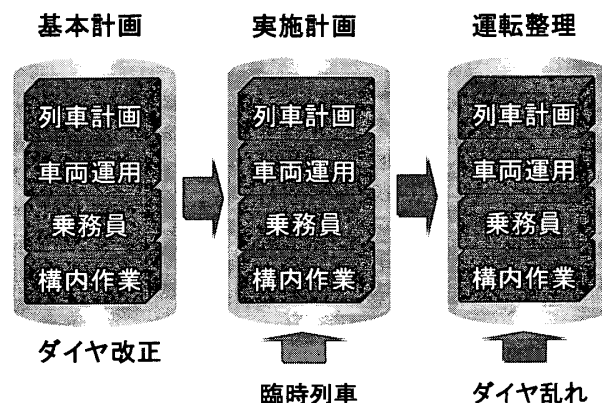


図3 鉄道のスケジュールの構造

<sup>3</sup> 厳密にいうと、こういう列車は「季節列車」と呼ぶ。

変更を行って、乱れた列車ダイヤをもとに戻す。この業務を運転整理という。

基本計画と実施計画、運転整理の関連を図3に示す。

### 3. 鉄道のスケジュールはどのように作られるか？

#### 3.1 コンピュータは使われているか？

今説明した四つの計画だが、現時点では、これらは、すべて人手で作られている。そんな馬鹿な！ と思いの方もおられるかもしれないが、残念ながら事実である。ただし、コンピュータが使われていない訳ではない。最近では、コンピュータを使って、これらのスケジュールを作ることが主流になりつつある。しかし、コンピュータはあくまでも人間を支援するにすぎない。意思決定を行うのは人間である。どの線区のごとこの間に、何本くらいの列車を運転しようとか、始発駅の発車時刻を何時にしようとか、そういったことは、すべて人間が決めて入力する。ディスプレイの上にダイヤ図を表示し、それを見ながら人間がダイヤを作っていく。コンピュータはある程度の自動作成機能（例えば、始発駅と終着駅の時刻を決めれば、あるルールに従って中間の駅の時刻を自動的に決めるなど）は、持っているが、それはとても「自動作成」といえるようなものではない。コンピュータは、その他、矛盾のチェック（例えば、列車が駅間で他の列車を追い越すような計画になっていないかなど）や、ダイヤ図などの帳票の出力を分担している。これは、列車ダイヤの例であったが、車両運用計画や乗務員運用計画、構内作業計画についても事情は変わらない。

その背景には、これらの計画の作成にあたっては、コンピュータにはまかせられない高度な判断業務が必要であるため、「意思決定は人間、単純作業はコンピュータ」という役割分担にしようという、インタラクティブシステム思想がある。

#### 3.2 インテリジェントなスケジューリングシステムへの期待

近年になって、高度な自動作成機能を持ったスケジューリングシステムへの期待が高まっている。その背景には、輸送計画の作成にかかる手間をなるべく少なくして、作業を効率化したいという事情（さらに、この背景には、ベテランの減少と経費の節減の要望がある）、それに、様々な条件のもとでの輸送計画を迅速に作る事ができれば、経営施策の策定に資することができる（例えば、車両の配置箇所や所属乗務員数を

変えた場合の輸送計画の検討など）という事情がある。

## 4. 車両運用計画作成アルゴリズム

### 4.1 車両運用計画とは

本稿では、鉄道の輸送計画の一つである車両運用計画、特に、ダイヤ改正時に作られる車両運用計画（基本車両運用計画）の自動作成アルゴリズムを例にとって、その構造、定式化の方法、考慮すべき点などについて述べてみようと思う。以下では、車両運用計画といったときには、基本車両運用計画を指す。

図4をご覧ください。これは、列車ダイヤである。これが車両運用計画作成問題の入力となる。図5が出力、すなわち、図4から作られた車両運用計画である。図4の列車ダイヤを実現可能とするための編成の使用順序を定めた計画ということになる。図5の1行が、ある編成の1日の動きを示している（「行路」と呼ぶ）。例えば、列車2で駅Bに到着した編成が列車1で折り返すことを示している。図5は、行路そのものの順序をも示している。これを「交番」と呼ぶ。図5の計画では、列車8で駅Bに到着した編成は、翌日は行路2の列車4に充当される。また、列車7で駅Cに到着した編成は、翌日は交番の最初にもどって、行路1の列車2に充当されることになる。

図5は、3行、すなわち、三つの行路から成り立っている。このことは、図5の車両運用計画を実現するためには、3本の編成が必要になることをも示している。

図5については、以上のことの他に、次の二つのことを説明しなければならない。一つは、検査の計画である。鉄道の車両は、一定の周期で検査を実施しなけ

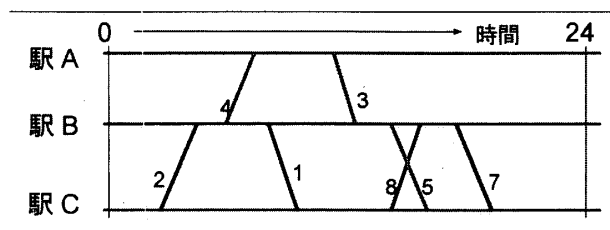


図4 列車ダイヤ（入力）

行路1	C — 2 — B 仕 — 1 — C — 8 — B
行路2	B — 4 — A — 3 — B — 5 — C
行路3	C — 回送 — B — 7 — C

図5 図4から作成した車両運用計画（出力）

ればならないと定められている。車両運用計画において考慮しなければならない検査には、**交番検査**と**仕業検査**がある。交番検査は、編成の走行距離が30,000 kmに達する前ごとなどに実施しなければならない。仕業検査は、主に外観を検査するもので、3日ごとなどに実施しなければならない<sup>4</sup>。交番検査や仕業検査は、どこでも実施できる訳ではない。たいていの場合、車両基地で実施することになる。また、それらの検査には、ある時間を要する(車種や両数によって異なるが、正味の時間は、前者で数時間、後者で数十分である)。このことは、すなわち、車両運用計画においては、検査の周期に達する前に、検査ができる場所に行く計画になっていなければならないこと、そして、そこでは、検査に要する時間が確保されていなければならないことを意味している(図5では、仕業検査だけを書いている。仕に○の字が仕業検査を表している)。

もう一つは、回送列車の存在である。図5を注意深く見ていただくと、図4には含まれていない列車が現れていることがわかる。それは、「回送」と書いてある列車だ。実は、図4の列車ダイヤそのままでは、車両運用計画は作れない。C駅に到着する列車の数(2本)とC駅から発車する列車の数(3本)が一致していないからだ。事情は、B駅についても同様である。このような場合、B駅とC駅の間に回送列車を設定して、到着列車の数と出発列車の数をあわせてやらなければならない。このような回送列車を設定することも、車両運用計画作成の一部である。

車両はきわめて高価なものである。種類にもよるが、1両1億円規模だと考えていただいてよい。10両編成なら、1編成10億円ということになる。よって、車両運用計画を作るときには、使う車両がなるべく少なくすむような計画が求められる。

なお、図5は、説明のためにきわめて単純な例をあげた。実際の車両運用計画は、数百本規模の列車を含むきわめて大規模な問題となる。実際の車両運用計画の一部を図6にあげる(図6は、図5とは異なって、ダイヤ図一車両運用ダイヤ図一の形式で描かれている)。

#### 4.2 TSP としての車両運用計画作成問題

図4の列車ダイヤに対して、列車をノードとし、任意の二つのノードの間にアークを設定したネットワー

<sup>4</sup> これは一つの例である。実際には、交番検査、仕業検査の周期は車種によって異なる。

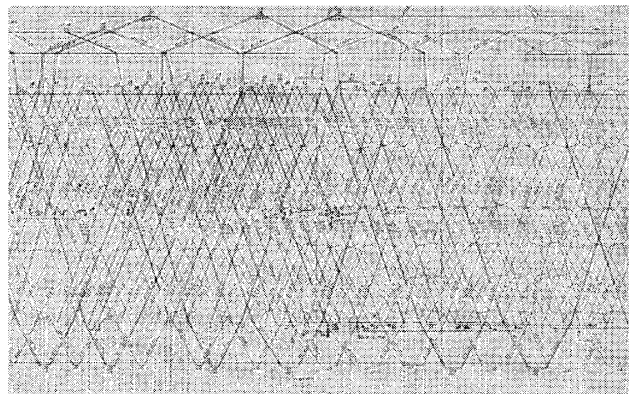


図6 実際の車両運用計画(一部)

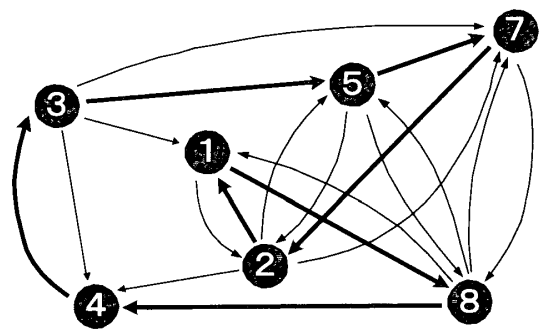


図7 車両運用計画ネットワーク

クを考える。アークには、アークの始点側の列車の到着時刻と終点側列車の始発時刻の間の時間差(間隔)を重みとして付す(マイナスになるときは、24時間を加える。これは、翌日の列車と接続することを意味する)。このようにして作成したネットワークを**車両運用計画ネットワーク**と呼ぶことにしよう(図4から作成した車両運用計画ネットワークを図7に示す。ただし、煩雑になるので、すべてのアークを書きではないし、アークの重みも省略している)。

さて、使用編成数をもっとも少ない車両運用計画は、入力として与えられた列車ダイヤから作成した車両運用計画ネットワーク上で、「すべてのノードを通り、かつ、アークの重みの和が最小であるような巡回路」(図7の太線)を見出すことによって得られる。言うまでもなく、これは、巡回セールスマン問題(TSP)である。すなわち、基本的には、車両運用計画作成問題は、巡回セールスマン問題と等価であるということになる。

#### 4.3 TSP よりも難しい!

TSPは組合せ最適化問題の中でも難しい問題とされている。しかし、車両運用計画作成問題はさらに難しい。その主な理由を次にあげよう。

- ・検査の考慮: 「重み最小の巡回路」だけでは、交

番検査・仕業検査の周期に関する制約を満たしていない。また、周期のほかにも、交番検査や仕業検査ができる時間帯が限られているという制約もある。例えば、通常、交番検査は夜間に実施することはできない。これは、検査を実施する要員の勤務時間に起因している。検査に関するこれらの制約を満たしながら、使用編成数最小の巡回路を作っていくことは簡単ではない。

- ・評価尺度：必要編成数が最小になることは最も重要な評価尺度であるが、それだけではない。例えば、回送列車は、車両運用の都合で、いわば仕方なく設定したものであるから、その本数・走行距離はなるべく少ない方がよい。また、検査の回数についても、制約を満たしている限り、少ない方がよいだろう。すなわち、車両運用計画作成問題は、いわゆる多目的最適化問題になる。

## 5. 鉄道のスケジューリングアルゴリズムの現状

### 5.1 鉄道のスケジューリング問題の難しさ

第4での議論から、ある程度ご理解いただけたと思うのだが、車両運用計画をはじめとする鉄道のスケジューリング問題の難しさを要約すると次のようになると思う。

- (1) 大規模な組合せ最適化問題になる。
- (2) 考慮しなければならない制約が多数存在し、かつ、複雑である。
- (3) ある程度迅速に解を生成することが求められる。
- (4) 評価尺度が多数存在する。
- (5) 評価尺度の間の優先度、優先順位等を明確にすることが難しく、しかも場合によって変わる。

もちろん、このうちのいくつかは、現実の問題を対象としているがゆえに発生する難しさであって、他の業種にも共通する問題であろう。

### 5.2 メタヒューリスティクスによる車両運用計画作成アルゴリズム

筆者らは、車両運用計画作成問題に対して、メタヒューリスティクスを用いたアルゴリズムを開発している[1]。そして、現実のダイヤデータを用いた実験の結果、人間の専門家が長い時間をかけて作成した車両運用計画と比較して、ほぼ遜色ない結果が得られることを確認している。

アルゴリズムの詳細は、文献[1]を参照していただきたいが、その骨子は、検査の制約を満たす巡回路を

まず見つけ、それを変形していくということにある。やはり、車両運用計画については、検査の制約が非常にきびしい。

アルゴリズムの枠組みとしては、メタヒューリスティクスの一種である確率的局所探索を用いている。筆者らがメタヒューリスティクスに注目している理由は、その処理速度にある。ここで対象としているのは、計画段階（すなわち、ダイヤ改正時）であるから、ある程度処理時間がかかっても差し支えないともいえる。完璧な結果が得られるのなら、一晩くらいかかっても実用上問題ないかもしれない。しかし、先ほどのような多様な評価尺度、それに、節6で述べるような残された問題を考慮すると、現時点では、ある程度人間が介入する必要があるのではないかと考えている。そのためには処理時間は短いにこしたことはない。つまり、コンピュータの作成結果を見て人間がある程度の条件を入力し、それをもとにコンピュータが計画の再作成を行うという枠組みが実用的ではないかという意味である。

### 5.3 鉄道のスケジューリングアルゴリズムの現状

節3で述べたように、現時点では、鉄道の輸送計画は人間主導で作られているが、研究としては、スケジュール作成の自動化に関する成果が数多く報告されているようになってきている。そのいくつかをご紹介します。

#### 【列車ダイヤ】

列車ダイヤの自動作成は容易ではない[2]。一つの理由は、経営方針に直結するからである。どの区間にどの程度の本数の列車を運転し、どの駅に快速列車を止めるのかなどを決めることは、競合路線との関係ともあいまって、高度な経営判断となる。評価尺度もあいまいである。何がよいダイヤかを明確に定義するのは難しい。また、対象範囲を限定しにくい問題になりがちだという問題もある。その主な理由は、接続にある。他線区との列車の接続を考えなければならない。場合によっては、他会社やバスなどの他交通機関との接続が問題になる場合もある。

#### 【乗務員運用計画】

列車ダイヤにくらべれば、車両運用計画や乗務員運用計画は、まだ見込みがある。乗務員運用計画は、車両運用計画と類似の構造を持っている。ただし、一つの行路（2日またがりの場合もある）の開始駅と終了駅が一致しなければならない（つまり、乗務員が出勤する場所と勤務終了後に帰ってくる場所が同じでなけ

ればならない) という制約がある。したがって、乗務員運用計画については、行路と交番を別々に作ることが多い。行路の案をまず作った後、在宅休養時間や休日等の制約を考慮して、行路の並び(交番)を作ろうという考え方になる。

行路の自動作成問題は、集合被覆問題(Set Covering Problem)として定式化することができる。すなわち、行路の案をあらかじめ多数生成しておき、その中からすべての列車を被覆できる行路の組合せを見出そうとする考え方である。複数の行路で被覆された列車については、乗務員が複数乗務することになりそうだが、そのうちの1名以外は、便乗(運転しないで移動するだけ)ということにすればよい。

乗務員運用計画は、生身の人間の勤務のスケジュールであるだけに、勤務時間(出勤から退勤までの時間、連続して運転する時間等)や休憩時間に関して、様々な制約がある。また、人間の勤務であるがゆえの配慮が求められる。例えば、深夜遅く到着した乗務員は、可能なら翌日は遅めに発車する列車に充当するなど、例によって、明確には記述しがたい条件に関する配慮が求められる。乗務員運用の作成にあたっては、この点が難しい。

乗務員運用計画については、文献[3~6]等の研究がなされている。海外においても多くの研究事例(文献[7]など)がある。なお、文献[6]は、交番の作成に関するものである。

#### 【構内作業計画】

構内作業計画については、基本的には、ある一つの駅や車両基地の内部だけに議論を絞ることができる。よって、列車ダイヤや車両・乗務員運用計画に比べると、比較的取り扱いやすい。これは、ある種の有限資源プロジェクトスケジューリング問題(Resource Constrained Project Scheduling Problem) [8]であると考えることができる。これについては、例えば、文献[9~12]などの研究が報告されている。

## 6. 今後の課題は?

節5で紹介したように、鉄道の輸送計画作成アルゴリズムの高度化については、近年多くの研究がなされてきている。しかし、より高度なアルゴリズムを開発するためには、まだ、取り組まなければならない課題があることも事実だろう。そのうちのいくつかについて述べてみようと思う。

### ・多様な評価尺度への対応

節5.1でも述べたように、鉄道のスケジューリング問題は多目的最適化問題になる。これに対する一つのアプローチは、各々の評価尺度に重みを乗じて加算したものをその解に対する評価値とするというものである。しかし、このアプローチでは、重みのつけ方をどうするのかなどの問題が残る。

### ・制約、前提条件、評価尺度のあいまいさ

鉄道に限らず、実世界の問題にはよくあることであると思われるが、制約や前提条件を明確にすることが必ずしも容易ではない。評価尺度についても同様である。「できれば〇〇であってほしいのだが…まあ、だめなら仕方がないけど」といったものが続出する。そして、これらの条件を割り切ってしまうと、例えば、乗務員運用計画の場合「血も涙もない運用計画」が作成されてしまうことになる[2]。

### ・制約を満たさない場合の扱い

例えば、乗務員の昼食のための休憩は、12時~2時ごろまでが望ましい。これは、制約であると考えることができる。すべての行路についてそれが満足できればよいが、そうもいかない場合がある。制約を満足できない行路を含む場合、その解にはペナルティをつけることになるだろう。では、そのペナルティはどのようにつけばよいのだろうか?

しかも、このような制約は昼食時間だけではない。考慮すべき制約が数十もあるとしたら、それら相互の関係を考慮してペナルティの付け方を決めることはできるだろうか[2]。

### ・わかりやすさへの配慮

作成された計画に沿って作業を行うのは人間である。となると、人間にとってわかりやすい計画になっていることが求められる。例えば、ダイヤ改正とはいっても、小規模な変更であれば、乗務員運用計画などは、ダイヤ改正前となるべく同じものにしたという要望がある。慣れ親しんだ計画に沿って作業した方が、取り扱いの誤りなどが防止できると考えられるからというのがその理由である。

### ・問題の範囲を限定することが難しい

先ほど車両運用計画の入力としては、図4のような列車ダイヤ(列車計画)が与えられると述べた。しかし、厳密にいうと、これは必ずしも正しくな

い。車両運用計画は、車種ごとに作られる。となると、その車種の編成を充当するはずの列車だけを選び出したものを、入力となる列車ダイヤとすることになる。しかし、列車によっては、A車種でもB車種でもよいという場合も存在する(例えば、以前の東海道新幹線のダイヤで、一部の「ひかり」に「のぞみ」の編成が使われていたように)。このような場合、A車種とB車種の車両運用計画をまとめて作るという方策もあるが、それでは問題の規模が大きくなりすぎるし、また、A車種とB車種を完全に混ぜて作ってよいわけでもないという難しさもある(「ひかり」に「のぞみ」の編成を使ってもよいが、その逆は不可である)。

これらの課題の中には、純粋なアルゴリズムの研究の範囲を超えるものが存在することも事実だと思う。また、研究者サイドだけでは解決できないものもあろう。アルゴリズムの研究成果を真に有用なものにするためには、ユーザとも連携して、これらの課題に粘り強く取り組んでいくことが必要であると考えられる。

## 7. おわりに

本稿では、鉄道におけるスケジューリング問題について、現状の作業の実態、研究の動向、残された課題等について述べた。本稿を読んで、鉄道のスケジューリング問題に関心を持っていただける読者が増えれば、筆者にとって望外の幸である。

ただし、鉄道業務に関わる人間の全員が輸送計画の自動作成にもろ手を挙げて賛成しているわけではないことも付記しておかなければならないだろう。自動化機能を導入することには異論もある。「自動化が進めば、専門家としての知識が乏しくなり、コンピュータの出力を無批判に受け入れてしまうことになるのではないか」「開発コストやデータの準備等にかかるコストを考慮するとペイするのか」等が主な反論である。いずれも、あながち的を射ていないこともない。自動化機能を考えるにあたって、このような意見があることを意識しておく必要がある。

なお、紙面の都合により、本稿では、計画作成段階に焦点をあてた。もう一つの重要なトピックとして、計画の実行段階の業務、すなわち、ダイヤ乱れに対応して行われる再スケジューリング(運転整理)がある。これについては、例えば、文献[2, 13, 14]などをご

覧いただきたい。

## 参考文献

- [1] 趙鵬, 富井規雄, 福村直登, 坂口隆: 「確率的局所探索に基づく鉄道車両運用計画アルゴリズム」, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-01-54, 2001.
- [2] 富井規雄編: 「鉄道システムへのいざない」, 共立出版, 2001.
- [3] 松田雅史, 小川健一, 森戸晋, 新井裕明: 「乗務員基地を考慮した乗務員スケジューリング問題への列生成アプローチ」, 統計数理研究所共同研究レポート161 最適化: モデリングとアルゴリズム16, 2003.
- [4] 今泉淳, 鷺見亮, 齊藤秀和: 「鉄道乗務員運用計画へのバックトラック法による行路候補列挙と集合被覆問題の近似解法」, 統計数理研究所共同研究レポート(2004発行予定).
- [5] 竹田真也, 一階良知, 片岡健司, 藤田憲久: 「状態選択法と条件緩和探索法による知識型乗務員運用計画方式」, 電学論C, Vol. 119, No. 11, 1999.
- [6] 坂口隆: 「制約論理プログラミングの探索手法と対話型スケジューリング」, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 47, No. 1, 2002.
- [7] Caprara, A., M. Fischetti et al.: "Solution of Large-Scale railway Crew Planning Problems: the Italian Experience", in N. H. M. Wilson ed., *Computer-Aided Transit Scheduling*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Springer, 1999.
- [8] 鍋島一郎: 「スケジューリング理論」, 森北出版, 1974.
- [9] 富井規雄, 周利剣, 福村直登: 「確率的局所探索とPERTを組み合わせた駅構内入換計画作成アルゴリズム」, 電学論, Vol. 119-C, No. 3, 1999.
- [10] 富井規雄, 周利剣: 「事例ベース推論を応用した鉄道駅構内入換作業スケジューリングアルゴリズム」, 電学論, Vol. 122-C, No. 6, 2002.
- [11] 富井規雄, 周利剣: 「要員割当を考慮した鉄道駅構内作業計画スケジューリングアルゴリズム」, スケジューリングシンポジウム2001, 2001.
- [12] 佐藤達広, 江口俊宏, 村田智洋: 「GA・ヒューリスティック融合スケジューリング方式一車両転線計画の作成」, 情報処理学会 人工生命とその応用シンポジウム, 1997.
- [13] 富井規雄: 「ダイヤの乱れを克服する一鉄道の運行管理システムの現状と今後」, 情報処理, Vol. 44, No. 8, 2003.
- [14] 富井規雄: 「定時運行の科学」, 成山堂書店, 近刊.