

鉄道の運行計画作成の 高度化に向けて —現状と課題—

富井規雄 (千葉工業大学 情報科学部)
今泉 淳 (東洋大学 経営学部)
加藤 怜 ((公財) 鉄道総合技術研究所)



鉄道の運行計画

鉄道は、運行の計画を事前に公知した上で列車を運行することに特徴がある。その運行の計画の中心となる計画が列車計画、いわゆる列車ダイヤである。列車1本ごとに、それが通る駅の到着時刻と発車時刻、番線などを定める。列車ダイヤを図にしたものが列車ダイヤ図である。図-1に列車ダイヤ図の模式図(24時間分と想定)を示す。数字は、列車を一意に識別するためにつけられた番号(列車番号)である。

しかし、列車ダイヤを定めただけで列車が運転できるわけではない。リソース、具体的には、車両と乗務員の使用計画をあわせて作っておく必要がある。たとえば、列車にはどのような種類の編成^{☆1}を使用するのかとか(特急列車には特急用の編成、通勤電車には通勤用の編成を使うなど)、列車が終着駅に着いた後、その列車の編成は次にどの列車に割り当てられるのかとか、あるいは、その列車はどの乗務員(運転士と車掌)が担当するのかとか、乗務員は、その列車を担当したあと、次にどの列車を担当するのかなどの計画をあわせて作っておく必要がある。1日数本しか列車が走らないという路線ならともかく、列車が頻繁に走る路線で、日々こういう計画を作ろうとすると、時間がかかったり、間違いが発生したりで混乱する。そのために、編成や乗務員のスケジュールを事前に(具体的には、ダイヤ改正時に、列車ダイヤとあわせて)作成しておく。これらの計画を、それぞれ、車両運用計画、乗務員運用計画と呼

^{☆1} ひとまとまりに連結された車両のこと。

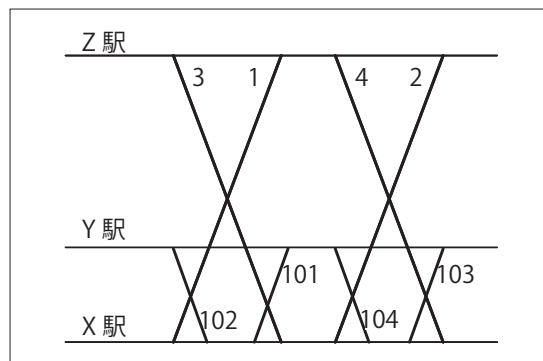


図-1 列車ダイヤ図の例(模式図)

ぶ。すなわち、鉄道の運行計画は、列車計画、車両運用計画、乗務員運用計画の3つの計画が揃って完成する。なお、以下では、車両運用計画と乗務員運用計画をまとめて「運用計画」ということがあるので、注意をお願いしたい。

車両運用計画

◆ 車両運用計画とは—行路と交番

車両運用計画は、行路(こうろ)と交番(こうばん)からなる。

- 行路は、ある編成の1日の使用計画、すなわち、ある日にある編成がどの列車(通常は複数)に割り当てられるかを示す。それに加えて、検査と清掃の計画(どの種類の検査・清掃をどの場所で実施するか—詳細は次に述べる)も定めておく。
- 交番は、ある行路に割り当てられた編成が、その次の日にどの行路に割り当てられる計画であるのかを示す。

図-2は、図-1の列車ダイヤに対する車両運用

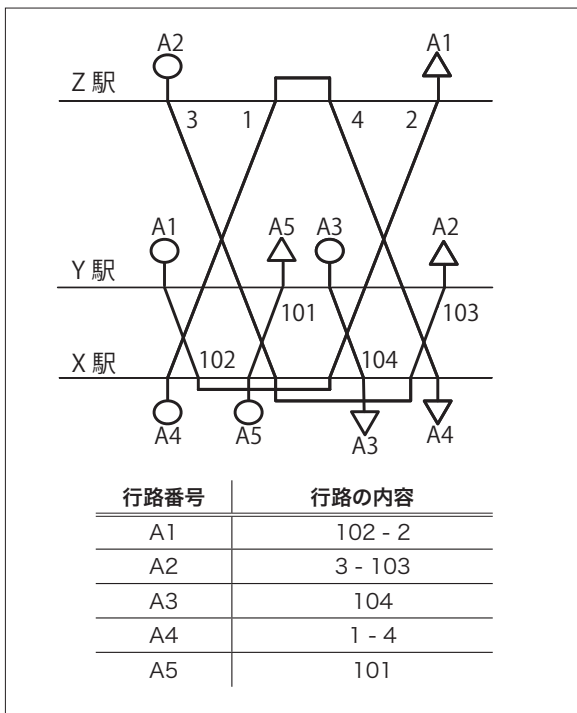


図-2 図-1 に対する車両運用計画の例

計画の一例である。Y 駅に車両基地（図-3）が隣接していると想定している。上が行路をダイヤ図形式で表したもの（A1～A5 は、行路番号を表す）で、下が交番である。○は行路の開始、△は行路の終了を意味する。たとえば、行路 A1 では、編成は、102 列車、2 列車の順に割り当てられることを示している。

また、この交番では、行路 A1 に割り当てられた編成は、翌日は行路 A2、さらにその翌日は行路 A3 に割り当てられる。そして、行路 A5 に割り当てられた編成は、翌日は行路 A1 に割り当てられる。したがって、交番における k 番目の行路の最後の列車の終着駅と、 $k+1$ 番目の行路の最初の列車の始発駅は同じになっていなければならない。故障など特段の事情がないかぎり、交番に従って日々、編成の充当が行われる。

さらに、このことから、この車両運用計画を実現するために、都合 5 本の編成を使用していることも分かる。

図-2 は、図-1 の列車ダイヤに対する車両運用計画の一例であって、ほかにもさまざまな可能性があり得る。それらに対して、次に述べる条件と評価尺



図-3 車両基地—検査や清掃を行う

度を考慮して、望ましい車両運用計画を作成することになる。

◆ 検査と清掃—一定の周期で検査と清掃を

鉄道の車両は、定期的に検査を行わなければならない。検査としては、数日に 1 回行われる仕業検査、3 カ月ごと等に行われる交番検査がある（周期は、車種等に応じて厳密に定められている。また、名称は会社によって異なる）。検査は非常に重要であって、決められた周期内に検査を行わなければ、その車両を走らせることはできない。さらに、種々の清掃も必要である（車内の掃除、車両の外側の洗浄、汚物の処理など）。車両運用計画には、検査と清掃に要する時間とそれを実施する場所を組み入れておく必要がある。たとえば、図-2 の車両運用計画では、101 列車で車両基地に戻ってきた後、その編成は、翌朝の 102 列車まで使用されない計画となっているが、これは、その間に検査と清掃が行われることを想定してのことである。

◆ 車両運用計画の評価尺度—どうい計画がよいのか？

車両運用計画においては、編成の種別（特急、普通など）、性能（最高速度など）、両数等の点で、列車に対して適切な種類の編成が充当される計画になっていること、適切な周期で検査・清掃が行われる計画になっていることはもちろんであるが、使用する編成の数になるべく少なくて済む計画が望まれる。

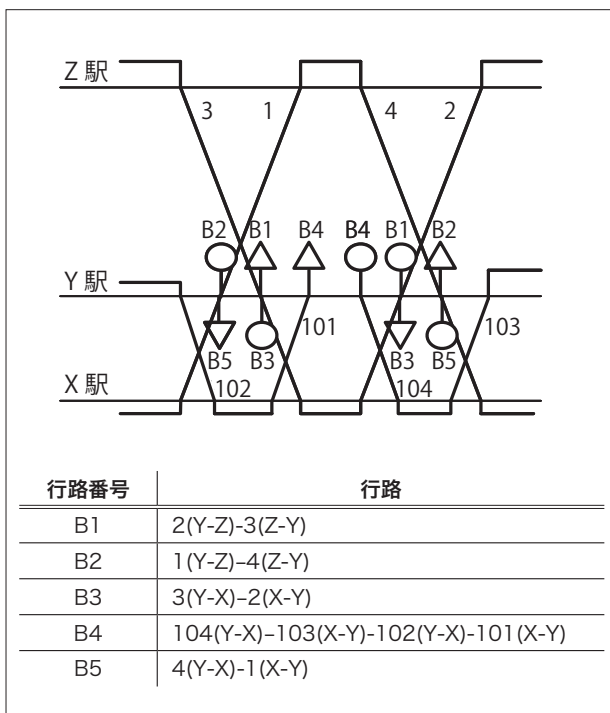


図-4 図-1 に対する乗務員運用計画の例

乗務員運用計画

◆ 乗務員運用計画とは—行路と交番

1本の列車には、(通常)1人の運転士と1人の車掌が乗り組む。乗務員の勤務に関しては、後ほど述べるようなさまざまな条件がある。運転士と車掌では、この条件が少し異なることから、通常は、勤務スケジュールも異なる。したがって、たとえば、ある列車においてペアを組んでいた運転士と車掌は、次に担当する列車においてもペアを組んでいるとは限らない。

乗務員運用計画の基本的な構造は、車両運用計画と類似している。すなわち、行路と交番からなる。図-1の列車ダイヤに対する乗務員運用計画の例を図-4に示す。図-2と同様に、上が行路をダイヤ図形式で表したもので、下が交番である。なお、2(Y-Z)は、2列車のY駅からZ駅の間を乗務することを意味している。ほかも同様である。

車両運用計画との相違としては、ある行路の開始・終了の場所が、かならずその乗務員の所属する基地であること(その基地に出勤し、そこから退勤する。出退勤時に図-5に示すように点呼を受けるため



図-5 運転士の点呼の風景

ある。図-4では、駅Yに隣接して乗務員の基地があると想定している)、行路は1日の場合と2日にまたがる場合があることなどがある。また、必要に応じて、乗務せずに列車で移動すること(便乗)もあり得る。

交番の考え方は、車両運用計画と同じである。ただし、乗務員運用計画の場合、交番は、乗務員の生活設計と密接に関連する。これに関連して、交番の周期を7の倍数(14や28)とする会社(この場合、休日の曜日が固定されることになる。この方が生活設計がしやすいという考え方)、あえて7の倍数とはしない会社(休日の曜日が変動する方が公平であるという考え方)の両方が存在する。

◆ 乗務以外にもやるべきことが

運転士の場合、列車を運転すること、車掌の場合、列車に乗り組んで勤務することを、それぞれ乗務という。乗務以外にも乗務員が担当する業務がある。運転士の場合、看視(停車中の車両に乗り込んで看視していること)、入換(車両基地・駅の中で、車両を移動させること)、出庫・入庫(出庫は、車両基地等から点検・準備の後、車両を出してくること。入庫はその反対)などがある。乗務員運用計画を作成する際には、これら、乗務以外の業務も対象とし、また、業務の間の移動時間も考慮しなければならない。

◆ 乗務員運用計画作成時の条件と評価尺度

乗務員運用計画は、それに従って人が勤務するも

のであるため、さまざまな条件が考慮される。

たとえば、行路については、

- 1行路での拘束時間の上限
- 1行路内での労働時間の上限
- 継続して乗務する時間・距離の上限
- 休憩時間、食事時間、仮眠時間の下限

また、交番については、

- 休日の数、位置
- 在宅での休養時間の下限
- 深夜乗務を含む行路が一定数以上連続しないことなどを考慮する。

その上で、必要となる乗務員の数や乗務効率（無駄な待機時間がないなど）、望ましい条件からの乖離の度合い（たとえば、食事はやはりそれなりの時間に取りたいなど）、ある基地において複数の交番が存在する場合には、交番間の作業内容・労働時間等の公平性などを考慮する(文献1), 2)などを参照)。

コンピュータによる支援

現時点では、列車ダイヤや車両・乗務員運用計画などの鉄道の運行計画の作成には、多大な労力と時間を要している。多くの会社で、コンピュータを使って作られている(図-6)ものの、現状では、いわゆる「自動作成」といった機能が実現されているわけではない。人間が主体となってダイヤや行路等を入力し、コンピュータは、各種の計算(走行距離、労働時間等)や、それに基づく各種のチェック(計画に矛盾はないか、上下限値を超えていないかなど)を行う。その際に、人間の作成業務を支援する機能を持つものが多い。

たとえば、乗務員の行路作成時に、ある列車の次に担当する列車を入力する際には、条件に合致する列車のみを表示して、ユーザはそのなかから望む列車を選択するという手順とするなど、なるべく入力の手間を省くための工夫がこらされている。ただし、「考える」のは人間であり、その部分の支援があれば、さらに運行計画の作成を効率化できることは間違いない。

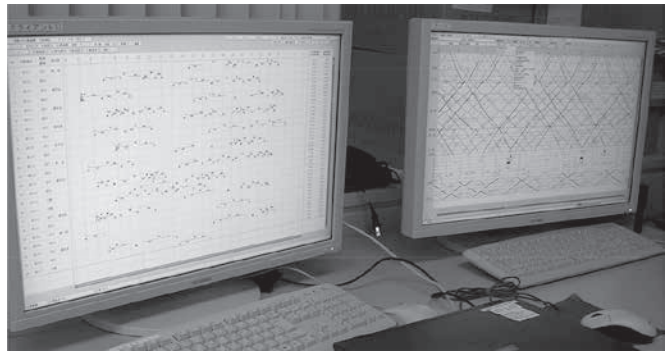


図-6 運行計画作成システム—左が乗務員運用計画作成システム、右が列車ダイヤ作成システム

運用計画自動作成への期待

コンピュータの支援によって運行計画作成業務を効率化するためには、いわゆる自動作成アルゴリズムの実現が期待される。

列車ダイヤについては、自動作成は、一般には非常に難しいと考えられている。その理由としては、5秒刻みで時刻を決める必要があること、相互直通運転や路線をまたがって運転される列車の存在・路線内や他路線・他会社との列車との接続などを考慮しなければならないなど、複雑で大規模な問題であること、また、利用者の利便性を考慮することが必要であるが、それを表現する評価関数を定めることが難しいことなどが挙げられる。自動作成機能を下敷きにした支援システム—人間が条件を指定し、それに基づいてコンピュータが列車の時刻を決める—などといった実現形態はあり得ると考えられるが(事実、オランダでは、このような列車ダイヤ作成システムが実用的に用いられている)、その場合でも、意思決定の主体が人間であることは変わらない。

一方、車両運用計画、乗務員運用計画を作成する際には、列車ダイヤが所与であるとすれば、乗客の利便性等を直接考慮する必要はなく、(基本的には)会社内部の事情だけを考慮すれば事足りる。よって、より高度な機能を持つ自動作成アルゴリズム構築の実現可能性が高いと考えられる。

車両運用計画や乗務員運用計画の自動作成アルゴリズムが実現できれば、ダイヤ改正時の運用計画作

成作業の効率化だけでなく、

- さまざまな施策（列車ダイヤの抜本的改良、新線の開業、車両・乗務員基地の場所の変更等）の効果に関する事前シミュレーションを実施する（囲み記事を参照されたい）。
- 現在よりも、頻繁にダイヤの変更を行って、ニーズにあった輸送サービスを臨機応変に提供し、利便性と効率を向上する。

などの点でも有用であると考えられる。ちなみに、2011年3月11日の東日本大震災後には、計画停電等の影響で、鉄道会社は長期間にわたって日々ダイヤの作り直しを余儀なくされた³⁾。その際の運行計画は人手主体で作成されたわけであるが、自動作成機能を含む高度な支援システムがあれば、それらの作業はより円滑に進められたはずである。

運用計画作成の高度化への取り組み

◆ 乗務員運用計画と車両運用計画の手順の違い

車両運用計画も乗務員運用計画もみかけは類似している。しかし、それぞれが守らなければいけない条件や制約の性格上、計画立案に対する数理的な考え方やモデルは異なる。

まず乗務員であるが、乗務員の行路は、基地から仕事を開始してその基地に戻って仕事を終える。前述のように、行路の中で守るべき条件があるとともに、交番でも種々の条件を満たす必要がある。これらを同時に考慮して、一気に行路と交番を作るのは大変なので、通常、まず全列車をカバーする行路の集合（以下、「行路群」）を作った上で、その行路群の中での行路の順番を決める、という2段階のプロセスで交番を作るのが、実務作業でも数理的アプローチでも一般的である。これは、乗務員の場合は1日もしくは2日で必ず基地に戻るため、それらを並べれば自然に交番ができるという性質に依拠しているといえる。

次に車両であるが、これも乗務員と同様に所属の基地という概念がある。車両は乗務員と違い、定期的な検査を受ける必要があるものの、検査の内容に

よっては出先で施工可能な場合もあり、必ずしも所属基地に戻らなくてよい。また、乗務員のように、1日や2日で基地に戻らなければならない制約はない。一方で、1日単位で見た場合、その日の行路の開始地や終了地は（所属、所属以外の）基地のみならず、線区の末端の駅、あるいは途中の始発地、終着地など複数あり得る。そのような場所それぞれで「行路の終了数＝行路の開始数」という関係が成立していない場合、特に前者よりも後者が多い場合は「その駅についての車両数では翌日の行路が開始できない」ことを意味するので、そのつじつま合わせのため「回送列車」を設定する必要がある（つまり、入力である列車ダイヤに、車両運用計画の都合で、回送列車を加える必要がある）。このようなことから、「行路を作って、それらを並べる」アプローチがうまくいくかどうかは問題（線区のダイヤ）次第ということになる。

◆ 乗務員運用計画作成アルゴリズムの考え方

行路と交番の2段階で作成するので、まず行路について説明しよう。

行路群を作る問題（これ以降「行路作成問題」と呼ぶ）に対する研究は、航空分野などからの応用があり、研究例は非常に多い。その中で数理計画に基づくアプローチによる場合は、「集合被覆問題」「集合分割問題」として表現するのが一般的である。ここでは、前者によるモデル化を説明しよう。

一般に行路は、その守るべき条件（規程や労働協約）のみが与えられていて、それらを守るように作るべきものである。その条件は、すでに述べたとおりである。ここでは、その行路の「候補」がすでに十分な数だけ列挙されていて、「どれを選ぶべきかを決めればよい」状況にあるとしよう。ここで行路作成問題は、「与えられた行路の候補から、必要な行路をうまく選ぶことによって、全列車をカバーしつつ、かつ、できるだけコスト総和を小さくする」問題と言い換えることができる。「コスト」と抽象的に書いたのは、それをどう選ぶかに余地があるためであるが、ここでは「当該の行路の所要暦日数」

としておこう。すなわち、1日で終われば「1」、2日にまたがれば「2」となる。

ここで「列車」と書いたが、実際には、各列車に対する乗務員の仕事は、leg^{☆2}と呼ばれる乗務員の最小遂行単位に分割されている。たとえば、東海道新幹線でいえば、東京発と新大阪着の特定列車（「のぞみ〇号」など）を「東京と名古屋」「名古屋と新大阪」のように、乗継可能な駅で分割したもの、それぞれがlegとなる。すなわち、行路（の候補）はlegの遂行順位を示したものとなる。

行路の候補が所与ならば、この問題は、行路を「列」、legを「行」として行路候補を0-1縦ベクトルで表現し、すべての行路候補を係数行列とするような「集合被覆問題」として表現できる。

もう少し詳細に説明しよう。Mをlegの集合、Nを行路の集合、 a_{ij} を「行路jがleg iを含む場合1、さもなければ0」となる定数、 c_j を「行路jのコスト」、 x_j を「行路jを採用するとき1、さもなければ0」となる0-1変数とすると、集合被覆問題として以下のように定式化できる。

$$\text{最小化 } \sum_{j \in N} c_j x_j$$

$$\text{制約条件 } \sum_{j \in N} a_{ij} x_j \geq 1, i \in M$$

$$x_j \in \{0, 1\}, j \in N$$

制約条件の不等式は「各legには絶対に1人以上の乗務員が割り当てられねばならない」ということを意味する（結果的に2人以上が割り当てられたときには、1人以外は、便乗とすればよい）。その各行（leg）を最低でも1列（1行路・1人）でカバーしつつ、選んだ行路のコスト総和（ここで述べたコストによれば、これは総行路日数、すなわち、必要な乗務員の数となる）をできる限り小さくするようにする問題となる。

☆2 海外の文献では、ほかに、trip, task などという単語も使われる。ここでは、比較的一般的であると思われるlegを使う。

	B 1	B 2	B 3	B 4	B 5	B 6	B 7	B 8	B 9
1 列車 (X-Y)					1			1	
1 列車 (Y-Z)		1							
3 列車 (Z-Y)	1								
3 列車 (Y-X)			1					1	1
2 列車 (X-Y)			1					1	
2 列車 (Y-Z)	1								
4 列車 (Z-Y)		1							
4 列車 (Y-X)					1			1	
102 列車 (Y-X)				1		1			
101 列車 (X-Y)				1		1			
104 列車 (Y-X)				1			1		
103 列車 (X-Y)				1			1		1
コスト	2	1	1	2	2	1	1	2	1

図-7 集合被覆問題としての乗務員運用計画作成問題

図-7に、不等式制約の左辺の係数の具体例を示した。各列で「1」が書かれているのは、その行路が当該legを含むことを意味している（空欄には「0」が書かれていると考えられたい）。集合被覆問題とは、このような候補列をうまく組み合わせ、選んだ結果の列群によって各行が少なくとも1回はカバーされるようにする問題である。ちなみに、図-7において白黒を反転した文字の列を選ぶと、すべての行をカバーすることができる。これが図-4の乗務員運用計画に対応する解である。

集合被覆問題は、整数計画問題として比較的単純な構造をしているが、問題規模にもよるものの、最適解を求めることはそれほど容易ではない。その度合いは、ダイヤの稠密さ、すなわち列車本数や、乗継可能駅の数などによって支配される。

列車本数が多ければ、当然legの数（Mの要素数）も多くなり、最終的に必要となる行路数が多くなることは明らかで、その「候補」数（Nの要素数）も多くなる。このことは、集合被覆問題の変数（ここでは0-1変数）の個数の増大を招く。列車本数が同一でも、乗継可能駅が増えれば、一列車の分割によりlegの数が多くなり、その結果、問題の行数の増加につながる。

一般に整数計画問題で0-1変数（あるいは問題の列数）が多くなることは、実務的な意味で問題が

難しくなることを意味するため、その結果として最適化が難しくなる。この種の問題に対して「最適性の保証」すなわち「これよりも良い答はない」ことを保証する方法として分枝限定法が知られているが、変数が多い問題は、計算終了までに膨大な計算量を要することがしばしばである。

列車本数が多い線区では行路の候補数が数十万に達する。仮に、各候補ごとに採否を決める「全列挙」によるとすると、 N 個の候補に対し「候補の採否」の組合せの数は 2^N となる。全legを少なくとも1回カパーし、かつ、コスト総和が最小になる「行路の候補の採否」をこの全列挙によって見つけるのは、 N が大きくなればなるほど事実上不可能となる。したがって、行数や変数の数から発生する計算上の問題をどのように解決するかが基本的な課題となる。

ここでは深入りしないが、集合被覆問題を解くという意味での方向性は、1) 列数が膨大な問題を直接相手にする（具体的には、近似解法やヒューリスティック解法を用いる）、2) 陽に列を列挙することをあきらめ、行路の規則を元に、アルゴリズムの実行過程で動的に列を生成する方法（列生成法）を用いる、などのアプローチが数理計画分野ではよく採られる。1) では、ラグランジュ緩和を基調とするアプローチがしばしば見られる。2) では、行路に対応する列を生成する問題を解き、必要な列をその都度生成する方法であり、大規模問題の分割アプローチとして一般的に有効な方法とされている。

もちろんこれ以外にも、集合被覆問題による・よらないにかかわらず、局所探索法や遺伝的アルゴリズムなどに代表されるメタ解法によるアプローチも一般論としては考えられよう。この場合、近傍の定義や遺伝子の表現をどのようにするかなどが鍵であろうと考える。

なお、ここでは基地の数などに触れずに説明してきたが、「最適化や計算の結果を、そのまま受け入れる」という前提では、基地が1つの場合と複数の場合とで定式化に基本的な違いはない。すなわち、計算の結果に従う前提であれば、集合被覆問題に追加する制約は特にない。しかし、基地ごとに

乗務員数の上限がある場合は、それに対応した制約を追加する必要がある。

次に交番に関して説明しよう。基本的には「行路を並べる」問題であり、行路作成問題の答をインプットとする。具体的には、特定の基地から開始・またそこに戻るような行路群が与えられたならば（よって、交番を作る問題は基地ごとに独立した問題になる）、その中の行路を並べた結果の所要の日数がすなわちその交番を実行するのに必要な乗務員数であるため、その日数をできるだけ短くしたい。

行路を並べただけでは休日が多くなり労働上問題がある。そこで、仕事をしない休日を意図的に挿入する必要もある。また、前日の勤務の終了が夜遅い時間であったのにもかかわらず翌日の出勤時刻を早朝にする、などのことも許されない。このように、交番を作成する際には、隣接する行路間にいるような条件や制約があり、これらを満たす必要があるほか、休日に関する条件などが複雑に絡み合う。同じ交番であっても車両の交番との大きな違いであると言えよう。また、当該基地に割り当てられた行路の数が多い場合は、前述のように、これを複数の交番（それぞれを、交番組という）に分けることもあり、このようなケースでは交番組間でのバランスなどを考慮する必要もある。

行路から交番を作成する問題は、日本では比較的最近になってから数理的アプローチが試み始められた（乗務員交番に限らず、行路作成や、車両運用に関しても似たような事情がある）こともあり、定番的なモデル化や定式化は今のところない。

◆ 車両の運用計画の作成

車両運用計画の場合、「1日単位の行路を並べて、その結果として交番を作る」という形を取るのではなく、所与のダイヤを入力として一気に交番を構築するような考え方が一般的である。そもそも、当該のダイヤに示された列車に充当される車両型式の保有編成数を超えて、同時に運行することは物理的に無理であるため、「ダイヤ所与」の条件下では、保有編成数の上限をクリアする答（交番）を見つける

ことが絶対条件である。

ただし、「卵が先か鶏が先か」の話ではないが、保有する数以上の編成を必要とする列車ダイヤは元々絵に描いた餅であるため、ダイヤ作成担当者は、当然、保有する車両編成数を考えた上でダイヤを作成しているし、郊外から都心へ向かって走る路線の場合、都心側のターミナルでは発着列車数やホームの本数から、折返し列車（要するに運用の一部）が必然的に定まる部分もある。

しかし、ダイヤ作成担当者がすべての条件を把握しているわけではなく、ある程度から先は運用計画作成担当者に任される。そこでは、終着駅で次のどの列車につながるか、車庫が隣接している駅なら車庫に入れるかどうか、また仕業検査をいつどこで実施するか、これらを守るような車両運用を考えることになる。

このような問題をどのように数理モデル化するかについてはいろいろな可能性があり、「これ」といった決定版的な定式化やモデルがあるわけではない。

その中で、直観的で分かりやすいモデルとして、「列車」を「ノード」、接続可能な列車間を「アーク」で結び、アークの重みとしてそれが結んでいるノードに対応する2つの列車の到着時刻と発車時刻の差（これを「間合い時間」などと呼ぶ）を設定し（回送が必要な場合は、これにも適当な重みを設定し）、すべてのノードを一度だけ迎える最短の「巡回路」を求めるような考え方がある。

この表現だけからは、この問題が「巡回セールスマン問題」（TSP-Traveling Salesperson Problem）のように見えるかもしれないが、車両運用のモデル化としてTSPでは不十分である。具体的には、「一定間隔（日にち）以内で検査を受ける」という条件が付加されている分、さらに難しい問題となる。仕業検査については、それを施行する場所についても自由度があるし、また、この「以内」を守るにしても、検査期限にまだ余裕がある時点で検査を施工すると、もちろん法令的には問題ないが、次の検査がその分早まるため、その結果として全体の検査の回数が増えるという問題も生じる。すなわち、

検査期限をぎりぎり守りつつ、保有する編成数以内で、列車に対応するノードを厳密に一度訪問するような巡回路を求めることが必要となる。

TSPであれば、さまざまな研究の蓄積がありこれらを利用できる。しかし、車両運用の作成の問題は、それにわずかな（しかし、それが大きな違いを生む）制約・条件が付加されているため、そのような利用できる方法がほとんどなく、ゼロから解法を構築する必要があるという難しさがある。

◆ 実用化に向けての課題

◆ 現実の問題は、さらに複雑

実は、現実の問題には、ここまで述べた以上に複雑な事情がある。そのいくつかを紹介しよう。

複数の種類の編成が存在する場合への対応

複数の種類（形式という）の編成が存在する場合、原則としては、形式ごとに車両運用計画を作成する。しかし、それらの形式が複数の種類の列車で共通に使用される場合には問題が複雑になる。たとえば、編成として形式Aと形式Bが存在し、列車として急行と普通が存在するとして、急行には必ず形式Aを使用する必要があるが、普通には形式A、形式Bのどちらを使用してもよいという場合があり得る。このような場合、基本的には、形式A、形式Bの車両運用を一括して作らざるを得ないことになり、問題の規模が大きくなる。また、それぞれの形式の数の制約や、この列車にはできればこの形式を使いたいなどの（ややあいまいな）要望があることもあり、問題が複雑になる。

さまざまな制約への対応

実務上は、ここまで述べた以外の制約を考慮しなければならないことも多い。たとえば、車両運用計画の場合、夜に編成を収容する車両基地のスペース（留置線の数）を考慮する必要がある。乗務員運用計画の場合、仮眠をとる場所のベッドの数が制約となる。また、乗務員基地ごとに、乗務可能な車両の形式や路線の範囲が定められていることがあり、当然、これらを考慮した計画としなければならない。

運用計画自動作成技術の 乗務員基地配置問題への活用



運用計画の自動作成アルゴリズムは、定期的(通常、1～数年おき)に実施されるダイヤ改正のたびに適用することを想定しているが、一方で中長期的なスパンを対象とした検討や、より上位の意思決定にも幅広く活用が可能という利点もある。すなわち、自動作成アルゴリズムがあれば、現状における前提条件を変えたときの運用をシミュレーションすることが可能になる。これは、ダイヤや運用に関する輸送施策の実施可否や、その有効性を検証したいとき、非常に有効な手段となる。

ここでは、より上位の意思決定に寄与する研究の例として、乗務員基地配置への応用を紹介する。近年、多くの鉄道事業者において、乗務員基地の配置個所(駅や車両基地など)について検討がなされるようになった。これは、乗務員基地は行路の起点・終点であることから、乗務員運用の効率

性を決める重要な要素の1つとなるが、社会情勢に合わせて列車ダイヤが変化していく中、現状の乗務員基地が必ずしも適切な個所に配置されていないのではないかと考えられるようになったからである。

たとえば、図-4の例ではY駅に基地が配置されているが、新たにX駅に基地を新設することにより必要となる乗務員数を減らせるのであれば、基地の新設は有効な方策となり得る。しかし、本当に乗務員数を減らせるのかどうかを分析するには、X駅に基地を配置することを仮定した上で運用を作成する必要がある。現状の手作業に依存している中ではこのような検討を十分に行うことは難しい。

このような課題に対し、文献1)では乗務員運用計画の自動作成手法を応用することで、乗務員

評価尺度の問題

「制約」とは言っても、絶対に守らなければならない制約だけではなく、「できればこうしたい」といったものも数多く存在する。それらについては、望ましい値からの乖離の度合いを評価尺度の中で考慮することになり、問題はさらに複雑になる。たとえば、食事のための休憩時間がどの程度確保されているか、行路間で乗務する列車の種別が偏っていないか、便乗が多くないかなどについても考慮することが求められる。

実行時への配慮

列車を運転した時の状況を考慮しておくことも重要である。たとえば、駅での折り返しを車両運用計画と乗務員運用計画とで同じにしておく(つまり、

乗務してきた編成の折り返しの列車も担当する)ことが望ましいとされることがある。こうすれば、ダイヤが乱れたときにしばしば発生する「車両があっても乗務員がいない」という状況を未然に防止することができるからである。また、列車に大きな遅れが生じたときによく行われる、途中駅での折り返し運転がやりやすい車両運用計画にするなどのことを考慮することもある。

今後の展望

現実の車両・乗務員運用計画において考慮すべきことは非常に多い。必要となる編成数や乗務員数を抑えつつ、いかにこれらの項目を考慮できるアルゴ

基地の配置個所について、運用の効率性の観点から望ましい個所を提案する手法を示している。前提として、基地の候補駅が挙げられているものとする。その上で、所与の列車ダイヤに対し最適な基地の配置駅を決めると同時に乗務員運用を自動作成する。これにより、配置個所の妥当性を具体的な運用を見ながら検証できるのが特徴である。

この問題の整数計画問題としての定式化を示す。基地配置の候補駅の集合を K 、候補駅 k に属する行路の集合を N^k 、leg の集合を M とおく。 a_{ij}^k を候補駅 k に属する行路 j が leg i を含む場合 1、さもなければ 0 となる定数、 c_j^k を候補駅 k に属する行路 j のコスト、 d^k を候補駅 k の基地配置コストとする。その上で、 x_j^k を、候補駅 k に属する行路 j を採用するのであれば 1、さもなければ 0 とする 0-1 変数、 y^k を、候補駅 k に基地を配置するならば 1、さもなければ 0 とする 0-1 変数とする。制約条件として、全 leg の被覆は、

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N^k} a_{ij}^k x_j^k \geq 1, \forall i \in M.$$

と表現できる。また、

$$S y^k - \sum_{j \in N^k} x_j^k \geq 0, \forall k \in K.$$

を追加制約とする。 S は十分大きな数値であり、この式は配置しない基地の行路は採用してはいけないことを意味する。目的関数は行路コストと基地配置コストの総和とし、その最小化を図る。

$$\text{最小化 } \sum_{k \in K} \sum_{j \in N^k} c_j^k x_j^k + \sum_{k \in K} d^k y^k.$$

解法については通常の乗務員運用計画作成と同様の手法が適用でき、特に列生成法により各候補駅について有効な行路を逐次生成していく手法が有効である。

この整数計画問題を解くことで、総コストが最小となる基地配置駅を求め、同時に乗務員運用計画を作成でき、所与の列車ダイヤに対して、望ましい基地配置を提案することができる。これにより、基地配置というより上位の意思決定に対して、有益な示唆を与えることが期待できる。

参考文献

- 1) 加藤 伶 他：乗務員基地配置駅決定アルゴリズムの開発，鉄道総研報告，Vol.24, No.10 (2010)。

リズムを構築するかが課題となる。

一方で、たとえすべての項目を考慮できたとしても、作成に多大な時間を要しては自動作成の意味がない。実用に耐え得る運用を、いかに実用的な時間で作成するかが課題となる。

鉄道会社における現状の作業形態を見ると、最初に作成した案がそのまま実際の計画として採用されることはまずなく、車両基地、乗務員基地などとの調整を行い、計画の修正を何度も繰り返すことによって計画を作成している。よって、自動作成アルゴリズムについても「完璧な運用計画」を求める必要はなく、まずは、ある程度許容できるレベルの計画を、なるべく早く作成できるようにすることから考えていくべきであろう。

参考文献

- 1) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道のスケジューリングアルゴリズム，NTS 出版 (2006)。
- 2) 運転計画・運行管理，鉄道技術ポケットブック第 5 編，オーム社 (2012)。
- 3) 富井規雄 編：「無計画停電」と列車の運転，鉄道ダイヤの作り方第 7 章，オーム社 (2012)。

(2013 年 9 月 4 日受付)

富井 規雄 (正会員) | tomii@cs.it-chiba.ac.jp

国鉄、(財) 鉄道総合技術研究所を経て、千葉工業大学情報科学部教授。運輸安全委員会委員 (非常勤)。著書として、「鉄道ダイヤ回復の技術」、「鉄道ダイヤのつくりかた」など。京都大学博士 (情報学)。

今泉 淳 | jun@toyo.jp

1989 年早稲田大学卒業。現在東洋大学経営学部教授。博士 (工学)。生産や鉄道における各種スケジューリングに関する研究に従事。

加藤 伶 | kato.satoshi.58@rtri.or.jp

(公財) 鉄道総合技術研究所。鉄道の輸送計画・運用計画に関する研究開発に従事。