

北米の鉄道車両運用計画とその数理モデル

—日本の車両運用計画との比較の観点から—

Rolling Stock Scheduling in North America and its Mathematical Models: from the Viewpoint of Comparison with Rolling Stock Scheduling in Japan

今 泉 淳

1. はじめに
2. 本研究の意図と構成
 - (1) 本研究の意図
 - (2) 本研究の構成
3. 日本の車両運用の原則
4. 北米の車両運用と数理モデル
 - (1) 対象の事例の概論
 - (2) 機関車の運用計画
 - (3) 客車列車の運用計画
5. 北米の車両運用から見た日本の車両運用
 - (1) 車両運用の前提となる時刻表
 - (2) 機関車の運用
 - (3) 客車の運用
 - (4) まとめ
6. 総括
7. おわりに

1. はじめに

鉄道会社が顧客にサービスを提供する上で不可欠なのが車両であり、車両は有限資源であるため使用スケジュールを定めることは鉄道会社にとって重要な実務の一つである。日本では車両の使用スケジュールを「車両運用計画」と呼ぶが、外国の鉄道会社にも車両の使用スケジュールとその立案作業は存在する。しかしその内容は国や会社により異なり、方法や数理モデルもさまざまである。

本研究は、日本の車両用計画立案のための数理モデルに関する研究の概観をした今泉（2017）に引き続き、海外、特に北米の車両運用計画立案問題そのものやそれに対する方法・解決アプローチの整理を目指しつつ、日本の同種の問題との対応関係や違いに関して論じる。

2. 本研究の意図と構成

(1) 本研究の意図

本研究の背景として、

- 鉄道の各種場面の日本と諸外国との違いに関して部分的あるいは漠然とした指摘は過去あったものの、車両運用やその計画に関する明確な比較・検討を行った文献は筆者の知る限り存在しないこと
- 研究者がその論文内で関連する研究として認識していながら、計画立案上の本質的な問題点やその背景となる考え方の違いまで踏み込んで述べた例は僅少と考えられること
- 論文タイトルやキーワードが共有されていても、実際の問題そのものが大きく異なることがしばしばあること
- 限定的でも複数の国・会社の車両運用の考え方や運用計画立案の数理モデルを統一的視点から概観することに一定の意義があると考えること

などがある。

そこで本研究は、文献を通じて把握できる範囲で、外国の車両運用や計画立案の考え方、計画立案の数理モデルを把握・整理するとともに、日本のそれらとの違いを浮き彫りにすることも狙いとする。具体的には、車両運用のやり方、車両運用計画とその周囲の計画との関係や計画の作成手順、車両運用計画立案問題とそのため数理モデル・解法などの整理・日本のやり方との比較を目指し、転用可能な方法の発掘の手掛かりを与えることも視野に入れる。

また、本研究では北米（アメリカ合衆国・カナダ）のそれに着目する。それは、研究量から見て北米と欧州のそれらが重要であるとともに、国土の広さや鉄道の交通機関としての位置づけや運用形態から見た場合にも北米と欧州の間にも違いがあり、それゆえ一定の限定をした方が得策と考えるからである。

(2) 本研究の構成

本研究の構成は以下の通りである。まず日本の車両運用の原則に関して述べる。次いで北米の車両運用計画立案問題とその数理モデルを概説する。そして、北米の車両運用と日本の車両運用の考え方との差異、その背景にある種々の事柄を説明する。最後に総括を行う。

以下では日本の鉄道事業者が用いる用語や概念に基づき記述をするが、この種の用語に関して厳密な定義がないものや慣例的な使用方法に基づく用語があることを予め断るものである。また、個々の研究は対象の問題に対して解法の提案を行っているが、本論文の趣旨に照らし合わせて、それら解法の技術的な詳細には過度に立ち入らない。さらに、計画立案の実務に関して、各論文に全てが記載されているわけではないことや、記載内容をもって当該国全体の問題・やり方とは必ずしもみなせないこと、当該論文が発表された時期のものであること、などに留意すべきである。加えて、運用の考え方・やり方はあくまでも論文を通じて知ることができる範囲に限られ、研究に現れる問題が現実の一部を省略したものかもしれないことを強調しておく。

3. 日本の車両運用の原則

日本の車両運用計画については今泉（2017）がすでに言及しているが、そのやり方・条件に関してごく簡単に述べる。

旧国鉄や JR でも使われている方法の一つとしての車両運用計画は、一日単位の「仕業」（もしくは「行路」とその遂行順序である「交番」から成り、交番を構成する仕業数分だけの車両（ここではまとめて使われる複数車両からなる「編成」も「車両」と表現する）が同時に使用されるとともに、各車両は交番に示された順序で仕業を遂行するローテーションで使用される。その結果、各車両は仕業数分の日数を周期とする計画に従うことになる。仕業数が多い場合は周期が一ヶ月以上に及ぶ場合もある。

交番内には一定時間・日数内に施行を要する仕業検査（さらにはより長い間隔・走行距離毎に行う別の検査）を組み込み、各車両が交番にしたがう限り検査の期限が自動的に守られ、同時に各車両の使用の平準化が実現される。これは、複数ある同一形式・構成の車両のうち特定のものの使用頻度が高くなることや累積走行距離が長くなるのを防ぐ意図がある。

現実的には、これら交番・仕業に沿った運用がなされるものの、各種の都合により交番通りの車両運用を行わないこと含めて「車両割当計画」（鉄道総研 運転システム研究室，2005）と呼ばれる実務が生じる。これは、同一型式・構成の複数ある車両中のどの車両をどの仕業に割り振るかと共に、何らかの理由により交番通りには車両を使わず仕業に対する個々の車両の割り振りを変更することを含む。

なお、国や会社、運用方策に依存せず、計画立案で考慮すべき共通事項として、

- ・ 定期的な保守・点検・検査（以下ではこれらを同義に用いる）
- ・ 折り返し・他列車への充当までに要する時間（間合い時間）
- ・ 需要に対応する輸送力（座席数）の確保・そのための編成長（車両数）
- ・ 機関車が牽引する列車における機関車（両数・牽引力）の充当

等がある。

4. 北米の車両運用と数理モデル

(1) 対象の事例の概論

アメリカ合衆国やカナダは国土が広く、主として国内の旅客の長距離の移動手段としては航空が鉄道以上に大きな役割を果たす一方、貨物の鉄道への依存の度合いが高い部分もある。

ここで採りあげる研究・事例はいずれも機関車により客車や貨車を牽引する場合を扱っている。機関車は列車を動かす動力源であり、必要に応じて機関車のみを切り離して他の客車・貨車群を牽引することも可能で、一般に「動力集中方式」と呼ばれる。

その機関車は客車や貨車に比べて高価でありその両数が限られ、効率的な使用が求められることは言うまでもない。一方、機関車には牽引能力がありそれを超

えた列車の運行は不可能である。よって、列車の性格や重量に応じた機関車を割り当てることが不可欠となる。そこで問題になるのは旅客数や貨物の量の日々や月、季節による変化、すなわち需要の波動・変動であり、それに対応する必要がある。

客車や貨車は原則として一両単位の増解結を前提にした編成の組成が可能である。また、機関車に比べてはるかに安価なため、最大需要時を想定した両数を用意して需要の増減に対応した輸送力の調整が可能である。

このような背景のもとで、北米では機関車の運用計画や客車の運用計画の立案問題に対する数理モデルが提案されており、以下に順を追って詳細を紹介する。

(2) 機関車の運用計画

(2-1) 機関車の運用の前提

列車に対して機関車の割り当てを扱う研究がいくつかある。以下の例では、複数の機関車を組み合わせた consist (例えば Ziarati, Soumis, Desrosiers, Gélinas, & Saintonge, 1997) と呼ばれる機関車群を構成し、これを各列車の牽引に充てる。問題の前提・特徴として、列車のトン数など列車側の条件を満たすよう機関車群をあてがう必要がある、機関車の種類は複数で形式により性能が異なる、列車数や機関車数が極めて多い、などが挙げられる。

(2-2) 具体的な研究とそのモデル

Ziarati, Soumis, Desrosiers, Gélinas, and Saintonge (1997)、Ziarati, Soumis, Desrosiers, and Solomon (1999)、Rouillon, Desaulniers, and Soumis (2006) は、いずれも Canadian National Railway (以下 CN) の機関車の列車への割り当て問題 (assignment problem) を扱う。「割り当て」とは時刻表に示される各列車に機関車 (群) consist をあてがうことを指し、日本の「車両割当」と概念的に別である。

Ziarati et al. (1997) や Rouillon et al. (2006) によれば、機関車の列車への割り当ての計画・スケジューリングには、計画問題 (planning problem) と実施問題 (operational problem) があり、前者が典型的な週に対して周期的なスケジュールを、後者は具体的な日付を前提により細かいスケジュールを与える。

計画問題は典型的な週を対象に、保守 (maintenance) は考慮せず、現有機材 (機関車) で週のスケジュールが実行可能か否かの判定に用いられる。すなわち、時刻表も週単位でおおむね反復されるものと考えられる。

実施問題は、Ziarati et al. (1997) によれば実施的戦略 (operational strategic) レベルと、24 時間を対象とする実施的戦術 (operational tactical) レベルに分かれる。前者は機関車を形式レベルで認識する充当パターンの決定、後者は前者の決定を維持しつつ個々の機関車までを認識した 24 時間内の具体的な割り当てでより細かい。Ziarati et al. (1997)、Ziarati et al. (1999) はいずれも戦略レベルの問題を扱う。

Zairati et al. (1997) の問題は、計画期間内の各列車 (論文内では train segment. 機関車を付け替え可能な二駅間に対応) に対して必要な牽引力を与えるように

consist を割り当てるが、形式ごとの機関車の能力の違いがあるため組合せ的要素が発生する。もちろん必要な牽引力を上回る割り当て（無駄）はできるだけ避けたい。一方、各列車に対する必要牽引力に対する無駄の最小化を重視すると、ある列車の到着地から別の列車に機関車が使われる際に、これら相前後する列車で必要な牽引力が必ずしも同一ではないがゆえに場合によっては列車に割り当てられていても無動力で移動することが生じる。そのため、牽引力の無駄と無動力移動のトレードオフを図ることが課題になると Zairati et al. (1997) は述べている。また、この問題では機関車の検査に関する決定も行う。

この種の問題に対するモデル化としては、多品種流のネットワークフローモデルによって時空間ネットワーク (time-space network) を構成することで共通する。そして Zairati et al. (1997) は、要求を満たすための機関車がない場合でも数理計画問題の実行可能性を保証するよう、「各列車のリソース(機関車数、馬力、牽引トン数) 要求量」と「割り当てリソース量と要求量に対する不足量の和」を等式制約で表現し、要求量に対する不足を最小化する定式化の上でヒューリスティックな分枝価格法を適用した。

数値実験は、計画期間 1 週間、機関車の形式数 26、機関車の両数 1249、列車数 1988 の CN のデータに基づくインスタンスで行っているが、整数計画問題として規模が大きいため、問題を相互に重複する計画期間が数日単位の問題に分割し、ローリングスケジューリングにより対処している。なお、機関車の両数 1249 は、JR 貨物が保有する機関車数が入換用も含めて 560 両 (2021 年 1 月 27 日現在。公益社団法人貨物鉄道協会 (2021)) であることを考えると問題規模が大きい。

また、Zairati et al. (1999) は Zairati et al. (1997) の問題を対象としつつ、Zairati et al. (1997) の定式化の等式制約を左びらき不等号 (\geq) 制約で置き換え、リソースの要求量以上の割り当てを条件とする定式化として分枝カット法で解法面の強化をした。Rouillon et al. (2006) も Zairati et al. (1997) の問題を対象とし、Zairati et al. (1997) の解法面の改良を図っている。

一方、Ahuja, Liu, Orlin, Sharma, and Shughart (2005) は、アメリカ合衆国の鉄道会社 CSX Transportation の問題を扱う。この問題も Zairati et al. (1997) と同様、機関車に複数の形式 (AC44 や AC60 など) を例とする) がある前提で、列車に対して複数の機関車からなる **consist** を割り当てることで共通する。このような問題は、Ahuja et al. (2005) の分類視点である、メンテナンスや燃料補給を考慮しない **planning** 段階とそれらを考慮する **operational** 段階のそれぞれで生じ得るが、この研究では前者を対象とする。

解法にも関係するが、この問題の特徴の一つとして、毎日運行される列車がある一方、週一回しか運行されない列車もある点が挙げられる。その上、発着地間の距離はかなり離れており数日を要する列車も多数である。このような前提下で、各列車が必要とする牽引力、速度要件を満たすような **consist** を割り当てて、反復可能な一週間のスケジュールを作るのが目的である。

さらに、Ahuja et al. (2005) によれば、その **consist** はできる限り列車間、さらには週内で崩さないことが望ましいとされる。特に、週内の異なる曜日に同一

スケジュールで運行される列車に同じ consist が割り当てられる解 (consistent な解・consistency) が望まれる。しかし特定駅での到着列車による総機関車数と出発数による総機関車数が釣り合わない可能性があるため、機関車が多い駅から少ない駅に移動させる必要がある。そのためには deadhead (回送、時刻表にある列車に無動力で併結) や light travel (時刻表の列車に拠らず、より短時間で機関車を移動可能) が必要になるが、light travel は乗務員をあてがう必要がある。また consist を崩すことを consist busting を呼ぶが、それはそのための手間を要することや、consist 内の特定機関車を他の列車にあてがう状況ではそれに接続する先行列車の遅延の影響を受けるため、それそのものをできるだけ避けたい。さらに、各列車に対しては最低 1 両の機関車は必要であるが、列車運行中の機関車の故障の観点から 1 両のみの割り当てでも望ましくない。

このような問題を一週間 (7 日) の時空間ネットワークとしてモデル化、機関車の形式を品種とする多品種流ネットワークとして表現し、混合整数計画問題として定式化するところまでは数理計画アプローチとして他の研究とも共通する。ただし、問題の大規模化を避けるために consistency は考慮していない。

一方、この問題も大規模化が不可避であり、その対策も Ahuja et al. (2005) の特徴的な部分である。それは、まず問題の大規模化を避けるために consistency を考慮しない定式化を解いたところ連続緩和問題ですら最適解が得られず、ここで consistency と問題規模の両者に対処する必要性が生じたという。そこでは、週 7 日中、i) p 日以上運行される列車は「毎日運行される」、ii) p 日未満の列車は「全く運行されない」と仮定し、そのようにしてできる「1 日単位の問題」を解き、それを 7 日単位の計画に修正するアプローチをとる。すなわち、運行されないにも関わらず運行されると仮定された列車に割り当てられた機関車を、その逆の列車に割り当てるアイデアである。ただし、1 日単位の問題にしても概ね 15 分程度で精度の良い解は得られるものの最適ではなくそれ以上の計算で大きな改善が見込めないため、商用パッケージの CPLEX による求解は 15 分で終了し以後近傍探索で解の改善を図ったという。

(3) 客車列車の運用計画

(3-1) 客車の運用計画の前提

カナダの研究グループによる旅客列車の車両運用計画を扱う一連の研究が対象にする計画内容やその立案の考え方を Cordeau, Soumis, and Desrosiers (2000)、Cordeau, Desaulniers, Lingaya, Soumis, and Desrosiers (2001a)、Cordeau, Soumis, and Desrosiers (2001b)、Lingaya, Cordeau, Desaulniers, Desrosiers, and Soumis (2002) などを参考に示す。なお、これらには編成内の客車のみならずそれを牽引する機関車の運用も併せて決定する数理モデルを含むが、定式化の上では車両のタイプの違いとして扱われ、編成全体の組成内容を決定する意味で前節の機関車のみの運用計画とは異なる側面を持つ。

客車列車は、複数の客車から組成され機関車が牽引する。客車はそれぞれ用途や旅客定員などがあり、列車の性格や輸送力の観点から列車を構成する客車の種

類や両数が決定される。もちろん、機関車はそれを牽引するのに十分な性能が求められる。一方、列車が目的地に到着したならば各車両は別の列車に充当されるが、到着した編成の構成のままではなく、他の到着列車の客車も含めて到着駅で別の編成として仕立てて（switching、組み替え）他の列車に充当することもある。switching は手間・時間が必要であり、先行列車の着時刻と後続列車の発時刻の間に行わなければいけない。また、着・発列車の組によっては駅で編成内容は変わらなくても全体の向きを逆にする必要があり、その場合もその作業に時間を要する。

Cordeau et al. (2000) によれば、時刻表は数ヶ月単位で改訂され、その都度、機材（車両）の使用計画を考える必要がある。一方、機関車と客車によって編成（train consist）を組成しそれを列車に充当するが、編成は一般に複数両数の 1 等車・2 等車と 1~2 両の機関車からなり、食堂車や荷物車が連結されることもある。複数の形式の機関車や客車が利用可能な場合は、それらで編成を組成可能か否かに留意する必要があるとともに、その編成の運行のための最高速度は編成内でそれが最も低いものから制約を受ける。

また、Lingaya et al. (2002) によれば、VIA Rail Canada の計画立案プロセスは下記の 3 フェーズからなるという。

第 1 フェーズ 当該季節に対する週単位の列車スケジュールが与えられた前提で、保守やその他実施上の特定段階までの条件を満たすと同時に、各列車に対する客車数の要求を満たすような、機関車と客車に対する週単位の最小費用の「サイクル」を求める。サイクルとは、保守施設から始まりまたそこで終わる、一連の列車の順序である。客車の所要数は、過去の実績を加味したその季節の最大の旅客需要に相当する。このフェーズは当該季節の数ヶ月前に行われる。

第 2 フェーズ 列車スケジュールが、休日やその他により変更されるため週によって異なる、あるいは需要の増減によりスケジュールの変更が行われることに対応して、前フェーズで求めたサイクルにそれらを反映する。前フェーズと基本的に類似する問題だが、実際の日付を考慮したスケジュールを考える点が違いである。本フェーズは実施の一ヶ月前に立案する。

第 3 フェーズ チケットの売れ行きを加味して上で予測需要を修正する。需要の上方修正に対して即座に客車数を増やすことができれば、その分のチケットを売ること可能になる。その際、既に修正済みの計画を変更することなく、また修正を受け入れて変更をしても利益が損なわれない場合にのみ、その修正を行うことになる。本フェーズは日々行うものであり、翌日から開始する概ね一週間の期間を対象とする。機関車と乗務員のスケジュールはすでに固定されているため、客車のスケジュール（サイクル）のみを対象とする。

すなわち、時刻表上の列車設定は季節変動を考慮し、それに対応しつつ、一方で実際の列車運転の日時まで計画を徐々に具体化・詳細化・修正するやり方であると要約できる。

(3-2) 具体的な研究とそのモデル

Cordeau らの研究グループはすでに挙げたようにいくつかの研究を発表して

いる。Cordeau et al. (2000) が最も一般的な枠組み、Cordeau et al. (2001a) は VIA Rail Canada を前提にした研究・モデル、Cordeau et al. (2001b) は Cordeau et al. (2000) の問題面に対する拡張であり、これらはいずれも前述の VIA の計画立案の第 1 フェーズの問題に相当するといえる。また、Lingaya et al. (2002) は実施段階の問題を扱い、これは計画立案の第 3 フェーズの問題である。

Cordeau et al. (2000) は、特定の時期の週単位の時刻表に対して、利用できる車両に対する最小費用の使用計画を立案する。これは、機関車と客車の両方の列車への割り当てを同時に決定するモデルとしては初期のもので、彼らのアプローチとしてもプロトタイプのだったとも考えられ、一般的枠組みを指向していると考えられる。それゆえ検査などは考慮していない。

そこでは、機関車 1 形式、客車数形式からなる編成タイプ (consist type) と、発着駅、必要資源、および使用される編成タイプの速度に依存する可能な発着時刻の組から定義される列車レグ (train leg)、およびその可能な順序である列車順序 (train sequence) を考え、それに基づき、車両形式 (equipment type) 毎にネットワークを考える。そして、時刻表上の同一列車でも日によって旅客需要が同一でないことに対応できるよう編成内容を変えられることが前提としてあり、「どの編成タイプを選択するか」という決定変数があることが定式化や意思決定の特徴の一つといえる。

その上で車両形式を品種とする多品種ネットワークモデルで時空間ネットワークを構成し、ある編成タイプで運行しえる列車順序のどれを採用するかを 0-1 変数、選択した編成タイプ・列車順序により各列車レグが必ず一回カバーされる制約、ネットワークの枝ごとに上記の編成・列車順序を採用した場合にカバーされる枝の (車両形式を考慮した) 流量 (特定形式車両の数) の上下制限制約、各点の (車両形式毎の) 流量保存制約などで定式化を構成する。解法は、編成タイプ・列車順序の割り当てを仮に決めれば車両形式ごとのネットワーク流子問題に分解できることに着目し、Benders 分解法を採用する。

この Cordeau et al. (2000) は一般的枠組みと考えられるため、数値実験は VIA Rail Canada の Québec-Windsor corridor 地区の約 300 列車のデータで行っているものの汎用的モデルとしての色彩を帯びる。

列車レグ、車両形式、編成タイプなどの考え方・用語は、第 1 フェーズの問題としてその要素や車両運用の原則が基本的に同一である Cordeau の研究グループの後続の研究にも引き継がれている。Cordeau et al. (2001b) は、Cordeau et al. (2000) のモデル・定式化に対して、検査の考慮、switching への罰金、機関車・客車の代用可能性の三点を考慮した拡張と位置付けられる。

一方、Cordeau et al. (2001a) は、Cordeau et al. (2001b) と同種だが VIA Rail Canada に特化しさらに細かい条件も含む問題を扱う。モデル化では、検査周期日数よりも長くとした計画期間を考え周期的な時空間ネットワークを構成するが、規定の日数以内に検査を受ける場所に戻ることを表現するサブネットワークを考えることで検査期限を守る条件を表現する。また、Cordeau et al. (2001b) に対してより細かい状況を表現する必要性からネットワークのノードの種類が多

い。そのネットワーク表現に基づくその定式化は、Cordeau et al. (2000) とは違い、そのような各サブネットワークに対して、可能なパス（検査終了後、列車を担当して規定の日数以内に検査場所に戻るまでの一連の列車担当に相当）全てが手元にある前提で、そのパスへの流量に対応する整数変数を設定し、それらパスに流した際に「各列車レグで必要な各車両形式の最低車両数を満たす」「そのパス・列車順序の採用の結果として機関車の牽引力を満足する」などの条件を制約式として定式化する。

当然それぞれの日・車両形式で実行可能なパスは多数あり、これらを予め列挙するのは現実的でない。そこで、定式化された整数計画問題をヒューリスティックな分枝限定法で解くが、連続緩和問題を解く際にはパスを必要に応じて見つける列生成法を適用する。分枝限定法のヒューリスティックは、バックトラック確率を限定した深さ優先探索によるものである。この解法は実際に VIA Rail Canada で実装され使われているという。

それらに対して Lingaya et al. (2002) は、VIA の前述の計画立案の最後の第 3 フェーズを対象にする。この段階では実際の実施を想定するため、編成内の各客車の位置を考え、それによって switching の手間をより細かく陽に考慮する。一方、機関車に関しては上位の計画に従う前提であり、このフェーズでは意思決定の対象外である。

一般に、列車が終着駅に到着したならばそれらの車両を別の列車に充当するが、その編成を崩して別の編成を組成する場合、その手間は到着列車の編成のどこにどの車両が連結されているかで異なる。また、列車が終着駅に到着して編成をそのまま別列車に充当する場合でも、後続の列車によっては編成全体の向きを転換する必要が生じる可能性がある。その際は「wye」（日本では「三角線・デルタ線」と呼ばれる Y 字型の配線設備を要し、これがある駅でのみその作業を行える。加えて、各客車は出入台をいずれかのエンドに有し、出入台を編成内で均等間隔にするために出入台のあるエンドを編成全体で揃えたいが、終着駅到着後に編成をばらして別の列車のための編成を組成する場合にこの理由から客車の方向転換が必要となる場合がある。なお、Cordeau et al. (2000) でも編成の向きに関する言及はあるものの、ネットワーク表現に部分的に反映するだけであり、上位の計画段階では暗に考慮する大前提であるとともに、後述する細部までを陽に考慮はしていない結果と考える。

モデル化に多品種流ネットワークによる時空間ネットワークを用いるのは他の計画立案モデルと共通するほか、定期検査（周期・期限は日数ベース）と客車の編成内での連結位置を考えることで switching の手間（時間）を反映した上で、編成の方向転換を問題内で明示的に考慮し、それにより生じる「wye が短く機関車のみ方向転換可能な駅」の条件、さらには客車の向きや検査の限度距離など、現実に存在する細かい条件も考慮可能であるとする。また解法は未分枝頂点の評価を列生成で行う分枝限定法であるが、バックトラックを許さないヒューリスティック解法である。

5. 北米の車両運用から見た日本の車両運用

前章で見てきたように、あれらの運用計画内に交番の概念がないことは明白である。それだけでも日本とは大きな違いであるが、詳細な比較のために日本の車両運用に関して第3章よりも深く述べる。これ以降、機関車と牽引される客車に分け車両運用の考え方を説明するが、現在の JR では客車列車はほぼなく、機関車の大規模運用も JR 貨物に限られる。そこで客車列車が多数設定されていた頃の状況も含めて対象とする。

(1) 車両運用の前提となる時刻表

時刻表（ダイヤ）は列車運行のための根幹の計画であり、国鉄や JR のダイヤはおおむね数年に一度に改正し、改正の間は基本的に同一のダイヤにより運行を行う。原則毎日運転する列車（定期列車）のダイヤやこれに対応する車両運用計画を「基本計画」と呼ぶが、ダイヤ改正時には、定期列車と時期・日時を限定して運転する列車（季節列車・臨時列車）の両者のダイヤを作成しいずれも市販の時刻表を通じて旅客に告知し、後者はその時期・日時に関しても予告する。

(2) 機関車の運用

ダイヤに定められている列車に対して、牽引する客車や貨車の両数に応じて機関車の両数や形式を変えることは基本的にない。客車列車はその客車が一両単位で増解結可能だが、一般に旅客需要の波動には列車のそのものの輸送力（客車の両数）を変えることは原則としてせず列車の運転本数の増減（季節列車・臨時列車の運転）により対応する。貨物列車も、設定された列車の最大輸送力内で輸送量を増減することはできるものの、当初の想定輸送力を超えた場合の機関車の増結はなく、輸送力の調整は運転列車の本数の増減によって行うのが一般的である。これらは、機関車の運用が基本計画で固定されていることと、機関車を増結して理論上は牽引力を増せるにしてもそれとは別の制約があることも関係する。

具体的には、JR や国鉄時代の機関車運用は、旅客列車・貨物列車いずれも需要を考慮の上で列車の始発駅・終着駅を設定し、それらを結ぶ区間の性格（勾配など）や到達時分、編成両数などを勘案し、所要の性能をもつ機関車を各列車に充当した。

旅客列車の場合は、ダイヤ改正時毎に変更されえる編成内容（座席・寝台の別、等級や両数、食堂車の有無、荷物車や郵便車の有無・両数）は、旅客案内や座席指定の都合から市販の時刻表に号車も含めて示される。貨物列車の場合は波動の影響から、最大輸送力以下で、コンテナ貨物列車の場合は貨物の内容（トン数）が、車扱貨物列車の場合は編成内容（どんな貨車を何両連結するか）が変わり得る。

しかしいずれの場合でもダイヤ上の各列車に対する機関車の割り当てはその性能に基づく概ね固定的なもので、それゆえ日によって機関車を別形式にする・機関車を増結することは原則として行わない。換言すれば、最大の輸送力を想定して機関車の形式・両数などを選定し、それを変えないことを原則に車両運用やダ

イヤが作られているともいえる。

列車に対して複数の機関車を必要に応じて割り当てることはあったが、それは急勾配区間や高速運転を必要とする列車や区間で連結される補助機関車に限られ、しかも各列車に対してどの駅でどの形式の機関車を連結・解放するかは基本計画で定める（例えば『鉄道ダイヤ情報』（交通新聞社, 1990,1996）等に掲載の機関車運用表参照）。

このようなことから、波動に対応した列車編成の大きな変化やそれに対応した機関車運用計画の大幅な変更の概念はなく、波動には定常的な機関車運用に対する一時的な運用の追加・変更などで対応するのが一般的である。また、複数の機関車の組み合わせで列車を牽引する場合でも各機関車が基本計画のそれぞれの交番に従うことを基本にすることから、運用内でその都度併結される機関車の形式（例えば ED78、EF71 など）は運用計画上常に同じであり、それぞれが従う交番内の仕業の順序に対してどの番号機（ED78-1、ED78-2 など）が充てられるかに依存してその組み合わせが異なるだけである。このような背景から、北米のような機関車の割り当て・スケジューリングは日本では状況としてそもそも起こりにくい。

なお機関車の運用では、列車の速度や重量、勾配の有無のほか、ブレーキ関係の装備、軸重、蒸気機関車の場合は石炭や水の補給、電気機関車の場合は直流・交流の別（東北・北海道、北陸、九州は交流）や客車への暖房供給方式などが考慮され、これらを踏まえた機関車の配置を前提にして運用計画を策定する。

(3) 客車の運用

国鉄時代でも 20 系客車以降の新系列客車とそれより前の一般の客車では多少の相違はあるものの、予め定めた列車の順序に従い車両を運用するのは共通で、それは機関車とも同じである。一般に、長距離列車の場合、同一内容の編成を用いる上下の組の列車（例えば優等列車の場合は愛称等が同一の上下の列車）に対して充当する客車群から組成した編成を充て、線区によっては分割・併合を多用した（具体例は三宅・寺本（2011）に掲載の時刻表の主要旅客列車編成等）。また、ローカル列車の場合は複雑な運用もあった（国鉄時代末期に関しては例えば、『復刻版国鉄客車ガイド』（ジェー・アール・アール, 2013）に掲載の運用表）。

そこでは、1 両から 10 両超の列車編成の、始発地近隣の所属車両基地からの出発から一連の列車担当を終了して基地に帰着するまでの「1 運用」（青田, 2020）が交番に相当するとみなせる。また、旧国鉄の荷物列車の場合は編成内の各車両（郵便車・荷物車）は運用が別々だったが（例えば勝部（2020a, 2020b）や、ジェー・アール・アール（2013）に掲載の荷物車・郵便車の運用表等参照）、これも予め立案された車両運用計画に従ったものである。総じて、その都度の旅客や荷物の需要波動に対応しての編成の大幅な変更は、一時的な増車を除いて原則的になかったと考える。

一方、カナダの客車列車の運用例と比較すると、以下のような違いがある。
編成の組み替え 編成単位での充当対象列車が運用計画で定められているため、

列車の終着駅到着後の編成の組み替えは原則的にない。もちろん編成内の特定車両の都合による車両交換や、共通運用の関係で生じる場合はあるものの（例えば昭和 31 年 12 月改正時の「おいらせ」「みちのく」（三宅・寺本, 2011）が一例）、前者は基本計画の想定外、後者は運用としては例外に属する。

編成の向き 列車が終着駅に到着した後に、その編成を反対方向（下りに対して上り）の列車に充当する際、到着した編成に対する機関車の位置を反対側に変えた上で客車編成の物理的な向きを変えずにそのまま反対方向の列車に当てるのが普通である。編成全体の方向を転換するのは一時期に限られた列車（客車時代の「つばめ」「はと」「かもめ」「はつかり」等（具体的内容は三宅（2002））に存在する程度である。またその場合も、方向転換の時間も含めてダイヤや車両運用などの基本計画を定める。

車両の向き まず各線ごとの「基準駅」に向かって、編成内の郵便車・荷物車、各等座席車・寝台車の位置を定め、列車にかかわらず編成内の客車の連結位置が概ね一定になるようにした（日本国有鉄道, 1958a, 1958b）。その上で、列車編成内の各客車の向きは、「客車の定位」により、客車の種類（1・2・3等の座席車、1・2等の寝台車、食堂車、緩急車等）毎に基準駅に対する向きを定めた（日本国有鉄道, 1958c）。さらに、特急用車両や優等車両（旧 1 等車や旧特別 2 等車、グリーン車）、寝台車両は片デッキ車両（出入台が片側のみ）であったがいずれも編成内で位置を固定して連結され、旧 2 等車・普通車は一般に両デッキ車両であったため出入台に関する考慮をする必要はなかった。

この他、客車の運用上の制約として客車の重量は当然として、客車の形式によってはブレーキ関係などで牽引できる機関車や併結できる客車に制限が生じるほか、一般の客車では暖房の種類（蒸気・電気の別が運用範囲や機関車の選定の制約となり得る）、編成最後尾への緩急車の連結などがあるが、いずれも基本計画で考慮される。

総じて、日本の客車の運用計画はダイヤ作成時点のそれがベースとなり、それを反復することを原則とする。その際、運用上の種々の制約は概ね基本計画策定の際に考慮され、実施段階でそのような制約を考慮する必要のある計画策定場面は基本的にないと考えられる。これらを総合すれば、カナダのそれとは相当の違いがあると論じられる。

(4) まとめ

日本では、ダイヤ改正の際に設定された列車に対して、固定的な運用を作成しそれを変更することは原則ない。その結果として、それより下位でその都度発生する意思決定として、仕業に対しての車両割当計画の立案や臨時列車や季節列車に対する予備車両や間合いの活用などによる車両運用計画の作成が主であるといえるが、これらはいずれも基本計画を守ることを前提としたより細かい変更やその外の変更であると見なせる。

6. 総括

ここまで見てきたように、北米の車両運用は日本のそれと相当の違いがある。本章ではこれら違いに関して車両運用に限定せず広く範囲をとり総括する。

計画立案の考え方や車両を運用する前提の違い 主として需要の変動・波動への対応方法、車両の使いまわし方の原則の国や鉄道会社による違いが、それぞれのための計画立案モデルが必要になる原因となっている。同じ機関車と客車・貨車の関係であっても、北米と日本とでは相当の違いがある。また、例えば日本の定期列車は原則毎日運行を前提とすることから、例えば特定駅でみた場合の着列車による車両数と発列車による車両数が不均衡であることは基本的にないが（ある場合でも基本計画で回送が設定される）、北米の機関車の例では必ずしもその限りではない。これは明示的に書かれてない限り気づきにくい点で、スケジュール作成の観点からは大きな違いである。

用語や概念の問題 車両運用の考え方が違うことに起因して対応の用語・概念がない場合も見受けられる。例えばアメリカの貨物列車で牽引する機関車群を *consist* と呼んでいたが、日本にこれに対応する概念や用語は筆者の知る限りない。日本の場合、複数の機関車の充当も通常二両（重連）、多くても蒸気機関車の時代の三両（三重連）であり、しかも各機関車が別々の運用に従うことがほとんどである。また、同一列車を牽引するこれら機関車もそれぞれ「本務機関車」「補助機関車」のように呼ばれるが、機関車群に対する用語はないと考える。

計画立案の頻度やその内容の粒度 日本の場合、交番が「同じ列車ダイヤの反復」を基本にして作られている。そこでは、土日曜や休日、季節波動によるダイヤの一部差異はあるものの、前者は土日休日の運用が平日のそれと辻褃が合うように作成され、後者は季節列車と臨時列車の運転で対応する。また、「実施計画」は季節列車や臨時列車などを中心にその都度の計画策定として行うが、それは運転区間の変更や臨時の仕業の挿入が主であり、定常的な車両運用に対する差分であるといえる。一方北米では、列車が反復的に運行されていても各列車の頻度の違いの関係から「毎日の繰り返し」では必ずしもない。また、同一時刻の列車であってもその都度の列車内容によって機関車や客車の割り当てを必ずしも同一にはしない。その意味での意思決定の頻度が高く、またその内容も細かいといえる。さらに、Lingaya et al. (2002) のような実施段階の細部を反映した数理モデルは必然的に粒度が高くなる。

分解アプローチなどを用いた理論的手法の適用 複雑な問題を整数計画問題として定式化し、列車数や車両数の関係から大規模化しがちな問題に対して Benders 分解法や Dantzig-Wolfe 分解法（列生成法）といった理論的背景を持つ方法を下敷きにした解法の提案が目立つ。これは、理論の活用や高度な実装技術を背景とするものと推測する。

7. おわりに

本研究では北米の車両運用計画作成のための研究を通じて、計画立案プロセスや車両の運用方法の日本との違いにまで立ち入り、数理的アプローチのみならず

実際の運用方法やその計画立案の手順も含めて概観した。それらを通じて、北米と日本とでは車両運用の基本的な考え方に違いがあること示した。もちろん、北米・日本いずれの計画立案も組み合わせの側面があることは事実であるが、北米の車両運用計画に対して開発された数理モデルを日本の事例にそのまま転用するのが難しいのは明らかである。

しかし、日本の事例に対して実務に供し得る効率的な計画立案手法の開発を行うためには、これらの論文のモデル化やアプローチの部分的な転用可能性や、流用可能な場面の発掘も検討すべきである。その上で、これらの延長上に鉄道の計画立案に関する技術の発展を望むものである。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18K04619 の助成を受けたものです。

参考文献

- Ahuja, R. K. J., Liu, J., Orin, J. B., Sharma, D. & Shughart, L. A. (2005). Solving real-life locomotive-scheduling problems. *Transportation Science*, 39(4), 503–517.
- Cordeau, J.-F., Desaulniers, G., Lingaya, N., Soumis, F. & Desrosiers, J. (2001a). Simultaneous locomotive and car assignment at VIA Rail Canada. *Transportation Research Part B*, 35, 767–787.
- Cordeau, J.-F., Soumis, F., & Desrosiers, J. (2000). A Benders decomposition approach for the locomotive and car assignment problem. *Transportation Science*, 34(2), 133–149.
- Cordeau, J.-F., Soumis, F., & Desrosiers, J. (2001b). Simultaneous assignment of locomotives and cars to passenger trains. *Operations Research*, 49(4), 531–548.
- Lingaya, N., Cordeau, J.-F., Desaulniers, G., Desrosiers, J. & Soumis, F. (2002). Operational car assignment at VIA Rail Canada. *Transportation Research Part B*, 36, 755–778.
- Rouillon, S., Desaulniers, G. & Soumis, F. (2006). An extended branch-and-bound method for locomotive assignment. *Transportation Research Part B*, 40, 404–423.
- Ziarati, K., Soumis, F., Desrosiers, J., G elinas, S. & Saintonge, A. (1997). Locomotive assignment with heterogeneous consists at CN North America. *European Journal of Operational Research*, 97, 281–292.
- Ziarati, K., Soumis, F., Desrosiers, J. & Solomon, M. (1999). A branch-first, cut-second approach for locomotive assignment. *Management Science*, 45(8), 1156–1168.
- 青田隆道 (2020). 「国鉄客車 列車運用の興味」『鉄道ピクトリアル』70(1), 10–23, 鉄道図書刊行会.

- 今泉淳 (2017). 「日本の鉄道車両運用計画作成のための数理モデルに関する概観」
『経営論集』(東洋大学経営学部) 89,22-33, 2017.
- 勝部剛 (2020a). 「東海道・山陽筋の急行荷物列車」『ジェイ・トレイン』 77, 8-44, イカロス出版.
- 勝部剛 (2020b). 「東北～北海道の急行荷物列車」『ジェイ・トレイン』 79, 20-67.,
イカロス出版.
- 公益社団法人貨物鉄道協会 (2021). 『2021 貨物時刻表』社団法人貨物鉄道協会.
交通新聞社 (1990). 「保存版資料 EL 配置表・EL 運用図表」『鉄道ダイヤ情報』
19(1), 33-64, 交通新聞社.
- 交通新聞社 (1996). 「完全保存版 全国電気機関 ディーゼル機関車運用 図表」
『鉄道ダイヤ情報』 25(10), 25-56, 交通新聞社.
- (財) 鉄道総合技術研究所 運転システム研究室 (2005). 『鉄道のスケジューリング
アルゴリズム』 エヌ・ティー・エス.
- ジェー・アール・アール (2013). 『復刻版 国鉄客車ガイド』 交通新聞社.
- 日本国有鉄道 (編). 『鉄道辞典』 上巻 (1958a), 317. 日本国有鉄道.
- 日本国有鉄道 (編). 『鉄道辞典』 上巻 (1958b), 356-357. 日本国有鉄道.
- 日本国有鉄道 (編). 『鉄道辞典』 上巻 (1958b), 359-360. 日本国有鉄道.
- 三宅俊彦 (2002). 「スハ 44・スハフ 43 形 運転変遷史 サイドメモ 客車の転向
について」『鉄道ピクトリアル』 52(7), 52-53.
- 三宅俊彦・寺本光照 (2011). 『時刻表に見る < 国鉄・JR > 列車編成史』 JTB パ
ブリッシング.

(2021年10月14日受理)

