

# 熟練者に迫る鉄道車両運用スケジューラ

Railway Rolling Stock Allocation Scheduler Comparable to Experts

大槻 知史

愛須 英之

安本 高典

中島 正貴

■ OTSUKI Tomoshi

■ AISU Hideyuki

■ YASUMOTO Takanori

■ NAKAJIMA Masayoshi

現在多くの鉄道事業者では、経験豊富な熟練者が、数日間から数週間といった時間を割いて一定期間の車両運用の基本計画を作成し、また、ダイヤ乱れが発生するたびに計画を修正している。

東芝は、この車両運用計画作成の自動化を目的としてスケジューラを東京地下鉄(株)と共同で開発した。このスケジューラは、数秒から数十秒で解を求めることができる独自の組合せ探索エンジンと、柔軟な制約条件を表現することが可能な仕組みを持ち、熟練者のレベルに迫る計画を高速に作成できる。結果を判定する評価関数の設計自由度が高いため、多くの鉄道事業者への適用が期待できる。

In many railway companies recently, experts have been devoting considerable time and effort to the creation of rolling stock allocation plans for certain periods and to the modification of such plans whenever railway disruptions occur.

In cooperation with Tokyo Metro Co., Ltd., Toshiba has developed a scheduler to automatically create rolling stock allocation plans comparable to those produced by experts. This scheduler makes use of our proprietary high-speed combinatorial search engine and flexible constraint expression to immediately generate an optimal plan. Moreover, an evaluation function to determine results expands the flexibility of design. Thanks to these features, our approach is expected to be applicable to a large number of railway companies.

## 1 まえがき

鉄道における計画業務には、よく知られたダイヤ作成のほかにも、ダイヤ上に乗務員と車両をそれぞれ割り当てる乗務員運用計画と車両運用計画や、車両の保守点検を行うための構内作業計画などがある。

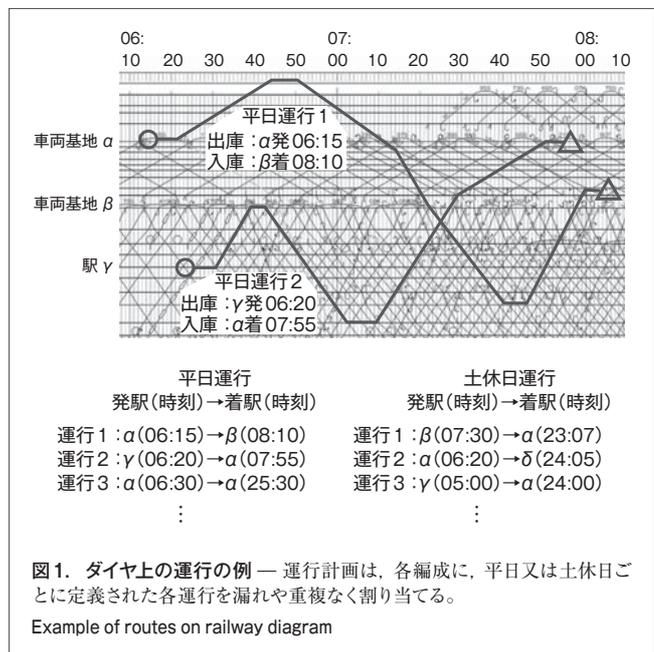
これらのうち車両運用計画業務は、現場の熟練者が脈々と蓄積し、受け継いできたノウハウを駆使して行うことが多いが、関係部署との調整などに膨大な時間を要しているのが実情である。また、車両運用計画は、ダイヤ乱れなどの突発的な外的要因により変更を余儀なくされることが多く、限られた数時間のうちに翌日の計画への影響を軽減、回避しなければならないなど、たいへんな重圧のなかで迅速な計画修正を迫られる場合がある。

東芝は、東京地下鉄(株)と共同でこれら計画業務の自動化に向けた研究に取り組み、従来は膨大な時間を要していた作業の多くを自動化し、日常の業務効率を大きく改善することができる車両運用スケジューラを開発した。

ここでは、車両運用スケジューラのアルゴリズムの特長と実用評価の結果について述べる。

## 2 車両運用計画の概要

車両運用スケジューラが作成する車両運用計画とは、個々



の車両(以下、編成と呼ぶ)に対し、ダイヤ上のどの一連の走行経路(以下、運行と呼ぶ)を割り当てるかの計画(以下、運行計画と呼ぶ)や、車庫に入庫している間に各種の検査や清掃などの作業を割り当てる計画(以下、それぞれを検査計画、清掃計画と呼ぶ)において、時間、場所、作業人員などのすべての条件が成立する組合せを総合的に計画することである。ここ

では、これらのうち運行計画の概要について述べる。

図1は、縦軸が駅(車両基地も含む)、横軸が時刻を表すダイヤ上に、運行の例を太線で示したものである。平日運行1は、車両基地aを6時15分に出庫し、所定のダイヤを走行した後に、車両基地bに8時10分に入庫する運行である。また、平日運行2は、駅yを6時20分に出庫し、車両基地aに7時55分に入庫する運行である。

運行計画は各編成に、平日又は土休日ごとに定義された各運行を漏れや重複なく割り当てる形式をとり、約1か月ごとに基本計画を作成するのが一般的である。これを基本計画作成と呼ぶ。基本計画作成は、図2に示すように、各行が編成を表し各列が日付を表す運用表に、運行や作業予定を記入することにより行う。

ある編成には、1日に二つ以上の運行が割り当てられる場合があり、逆に一つも運行が割り当てられない場合もある。一つも運行が割り当てられない場合、編成は1日車両基地に滞在することになり、この状態は予備と呼ばれる。

各編成は、通常、運行によってしか移動できないことから、連続する運行は着発の場所が一致し、かつ手前の運行の入庫時刻が次の運行の出庫時刻より前である必要がある。これを、運行のつなぎ条件と呼ぶ。

更に、都市圏の場合は車両基地の用地確保が困難であることから、車両基地以外に留置可能な場所(駅など)が10か所を超えるような路線も珍しくない。したがって、運行のつなぎ条件を満たすだけでも、組合せが複雑な難しい問題となる。

また、ある編成に検査や清掃などの構内作業が設定される場合は、所定の時間帯に所定の車両基地に滞在する必要があるため、その間は運行を割り当てられない。したがって、構内作

業が行われる場合には、割当て可能な運行が限定される。特に構内作業の種類によっては、工場に1日滞在、すなわち予備にしなければならない場合もある。

一方、ダイヤ乱れが発生した場合は、ダイヤの回復を優先し、一部運休や発着順序の変更といった運転整理が行われることが多い。そのため、ダイヤが正常運転に回復した後においても、計画は乱れたままである場合が多い。その結果として一部の編成が予定された場所に入庫しないことで、翌日以降の計画に支障が生じる場合があり、見直しが必要になる。このとき、運行計画の見直しは、検査計画や清掃計画と併せて行われるため、制約条件が多く困難な作業となる。これを運用戻し計画作成と呼ぶ。この場合、既に作成済みの基本計画の変更は、多くの関係者に影響を与えるため、できるだけ基本計画との変更箇所が少ない計画を作成することが求められる。

このほかにも、運行計画には次に示すような様々な実運用上の制約条件がある。

- (1) 計画期間中に工場に入出庫する編成がある。
- (2) 計画期間中に新車が出現したり廃車になる編成がある。
- (3) 運行を割り当てる編成に偏りが出ないようにしたい。
- (4) 同一の運行が、同じ編成に偏らないようにしたい。

当社は、これらの複雑な条件を満たす運行計画の作成を自動化できる、組合せ探索エンジンを開発した。組合せ探索エンジンの構成を図3に示す。

以下の章では、組合せ探索エンジンの概要と制約表現の詳細について述べる。

### 3 組合せ探索エンジンのモデル化とアルゴリズム

ここでは、ネットワークモデル上のアルゴリズムとして実装した組合せ探索エンジンの概要について述べる。

#### 3.1 ネットワークによるモデル化

運行計画の問題は図4のように、運行をノード(ネットワーク上の接点)、運行間の接続可能性をアーク(ネットワーク上の枝)とするネットワークで表現できる。ここで、各ノードの左上には出庫場所を、右上には入庫場所を示すようにした。また、ある運行と次の運行がつなぎ条件を満たす場合にノード間をアークで結ぶようにした。

図4において左端のh1などは編成の番号を示し、ここから太線をたどる経路が各編成の運行計画を表す。例えばh1編成の場合、“運行1→運行4→運行8→”がこの編成に対する運行計画を表す。

このようにネットワークでモデル化すると、ネットワーク上のすべてのノードが、H台の各編成に相当するH本の経路により漏れや重複なく含まれるように分割できれば、すべての運行を実行できる運行計画が得られる。ただし、このままでは運行のつなぎ条件しか考慮していないため、前に述べた構内作

編成名称	04/01(日) 土休日			04/02(月) 平日			04/03(火) 平日			
	出庫場所	2番目の運行のIDと 入庫場所	最初の運行のIDと 入庫場所	作業予定	3番目の運行のIDと 入庫場所	出庫場所	入庫場所	作業予定	出庫場所	入庫場所
03	府	01.青 26.府	検査 24.四	四	45.川 26-2.府	府	18.府			
04	府	09.川		川	37.府	府	13.四2			
05	府	府三		府	05.府 17-2.府	清掃	府	05.府 14-2.青1	検査	
06	川	川三		川	35.府	転	府	10.府		
07	府	08.日 25.青		青	40.川		川	28.府		
08	青2	14.府		府	01.四		四	45.川		
09	府	府三		府	府三	転	府	府三	列2	

ID : Identification(識別番号)

図2. 運用表の例 — 運用表の各行は編成、各列は日付を表し、運行や作業予定が記入される。  
Example of rolling stock allocation table

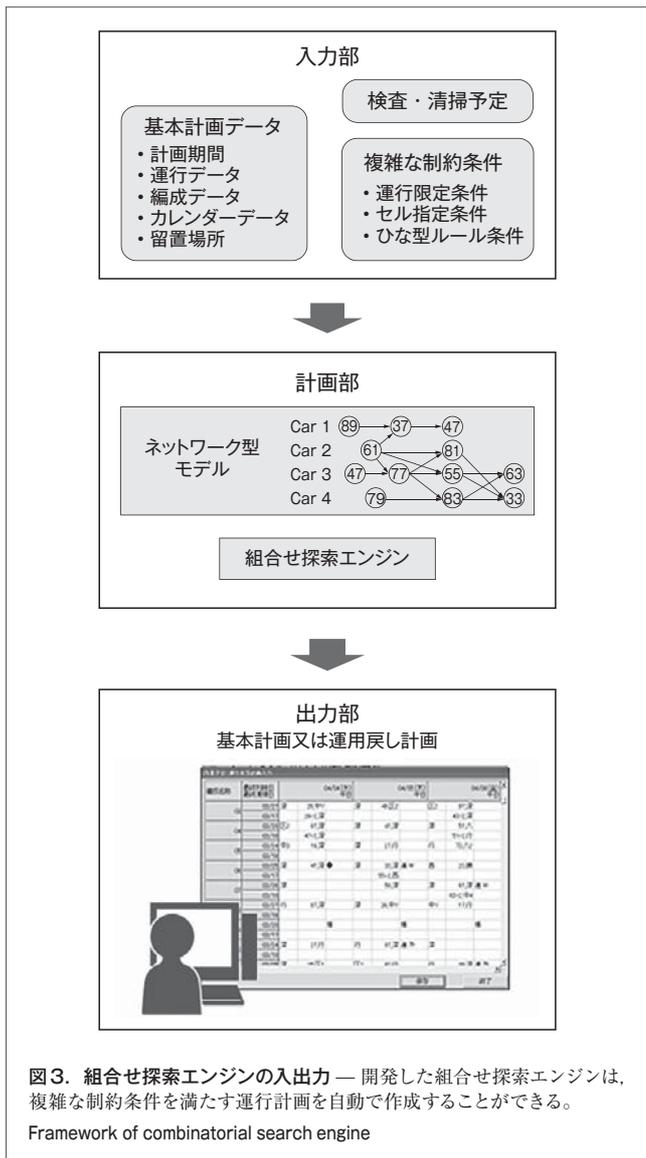
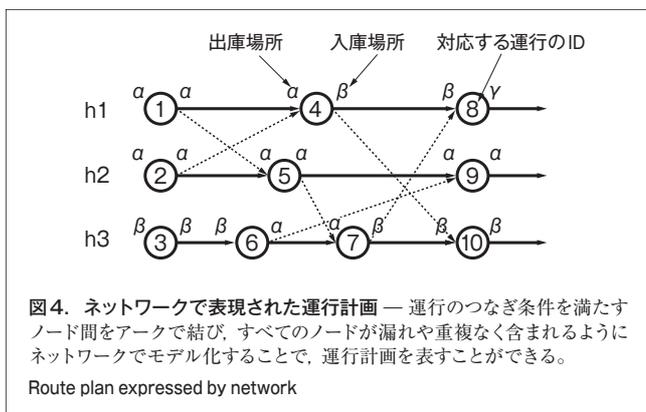


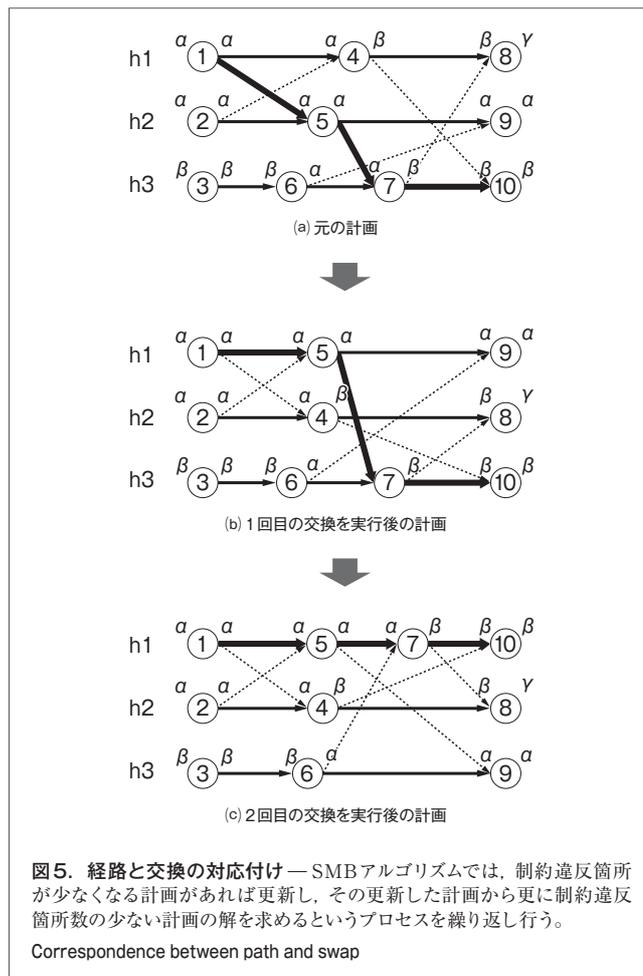
図3. 組合せ探索エンジンの入出力 — 開発した組合せ探索エンジンは、複雑な制約条件を満たす運行計画を自動で作成することができる。

Framework of combinatorial search engine



業に基づく制約などが満たされるとは限らない。

そこで、提案手法では運行のつながり条件以外の制約条件を、必ず守らなければならない条件（ハード制約）と、できる



だけ守りたい条件（ソフト制約）の2種類に分類した。このように分類すると、運行計画の問題は、ハード制約違反を0とする条件下でソフト条件違反を最小化する最適化問題として定式化できる。

### 3.2 SMBアルゴリズム

当社は、このネットワーク上の最適化問題の解法として、SMB (Swap-Path Multiple Backtracking) アルゴリズムを提案した<sup>(1)</sup>。

このアルゴリズムでは、例えばh1編成に制約違反がある場合に、h1編成を基点とした経路を考え、この経路に従って別の編成の運行計画との入替え処理（以下、交換と呼ぶ）を行う。一例として、図5(a)において1→5→7→10の経路を考えると、1→5及び5→7が他編成との交換となる。具体的には図5(a)の運行計画から、最初に1→5に従ってh1編成のノード4以降とh2編成のノード5以降の運行計画を入れ替え（図5(b)）、次に5→7に従ってh1編成のノード9とh3編成のノード7以降の運行計画を入れ替えることで、図5(c)の計画が得られる。

提案手法では、元の計画から交換がK回以内で到達できる計画の解を求め、制約違反箇所数が少なくなる計画があれば計画を更新し、その更新した計画から更に制約違反箇所数の

少ない計画の解を求めるというプロセスを繰り返す。

通常1か月の運用表の中に、交換可能な箇所の数 ( $N$ ) が数千か所あるため、交換が  $K$  回の範囲を調べ尽くすには、単純には  $O(N^K)$  の計算時間を要するはずである。しかし、提案手法では、問題の分割と枝刈り条件の工夫により、実効的には計算時間のオーダを  $O(3^K)$  程度に削減できた<sup>(1)</sup>。この結果、実際の制約条件の下では、数秒から数十秒という、短時間で解を求められることがわかった。

## 4 制約条件の表現方法

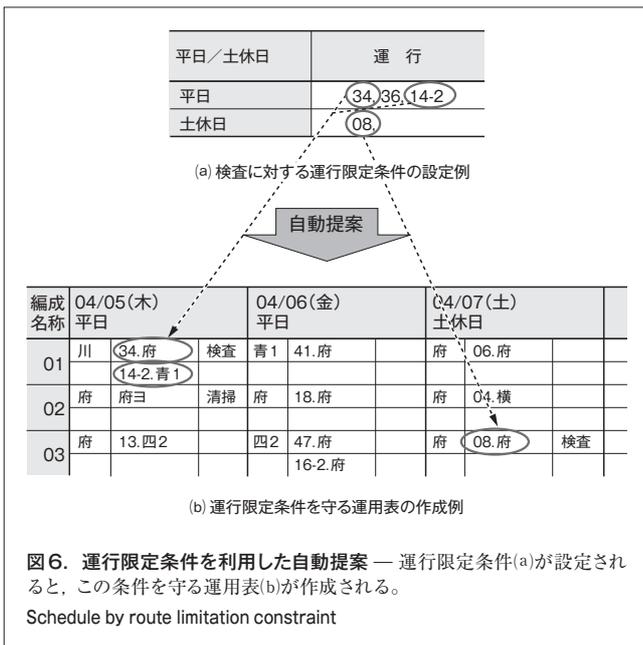
運行計画を作成するにあたっては、様々な制約条件があるが、ここでは、運行限定条件、セル指定条件、及びひな型ルール条件の3種類について述べる。

### 4.1 運行限定条件

運行限定条件とは、構内作業予定日に対し、充当可能な作業予定編成の運行を限定する制約条件である。

組合せ探索エンジンは、構内作業予定日には、運行限定条件に設定された運行を計画する。例えば検査で表される構内作業に対し、図6(a)のような運行限定条件が設定された場合、図6(b)のような計画を作成する。実際に検査の設定された4月5日の01編成では、平日に登録された運行の中から運行34と運行14-2を計画しており、4月7日の03編成では、土休日に登録された運行の中から運行08を計画している。

なお、運行限定条件では、指定された複数の運行群から必ず充当しなければならない運行(ハード制約)と、できれば避けたいが、やむを得ない場合は充当可能とする運行(ソフト制約)に分けて登録し、制約の強弱を設定できる。



東京地下鉄(株)の現場の計画作成では、同種の構内作業に対して運行を限定する手法が採られることが多いことから、この制約は直感的に扱いやすく、また、制約入力の手間を省力化できる効果がある。

### 4.2 セル指定条件

セル指定条件とは、ある日のある編成に特定の運行を固定する条件である。例えば図7(a)に示すように、4月3日の01編成に運行65を計画したい場合には、このセル指定条件を設定する。その結果、作成された運用表では図7(b)に示すように、4月3日の01編成に運行65が確実に計画される。

このセル指定条件についても、必ず充当したい場合(ハード制約)と、できるだけ充当したい場合(ソフト制約)を分けて登録できる。更に、運用戻し計画作成の場合には、元の計画にある運行計画をそのままソフト制約とすることで、できるだけ元の計画に近い計画を作成できる。

### 4.3 ひな型ルール条件

ひな型ルール条件とは、あらかじめ用意されたひな型の運行ルールを、パラメータを設定することで指定する制約条件である。ひな型の運行ルールには、例えば次のような例がある。

- (1) 平日の運行u1の後は、必ず運行u2とする。
- (2) 3日連続で同一編成を予備にはしない。
- (3) ある編成に充当可能な運行は、u1, u2, ... だけとする。

ここで、u1, u2などの変数で表された部分は、ルール登録時に値を確定するパラメータを意味する。この条件にも、必ず守らなければならない条件(ハード制約)と、できれば守りたい条件(ソフト制約)の2種類を用意し、ソフト制約については、違反した場合の重みも設定できる。



---

## 5 試験運用による実験

---

当社と東京地下鉄(株)は、開発した車両運用スケジューラを東京地下鉄(株)の実際の車両基地に導入し、基本計画作成の試験運用を行った。

実際の運行条件、検査予定、清掃予定、及び制約条件を入力して探索エンジンを実行したところ、求解に要する時間は数秒から数十秒程度であった。運用表出力までの時間は、制約条件の入力時間を含めても数時間程度であり、従来は数日間から数週間かけていた手作業を1/5～1/20程度に短縮できることがわかった。

また、運行限定条件やセル指定条件を駆使することで、日々の車両運用のなかで突発的に必要となる緊急の作業や、新車の導入、廃車設定など、現実には生じる様々な条件にも柔軟に対応できる。更に、適切なルール条件を設定することで、熟練者による軽微な手直しにより、実際に運用できるレベルの運用計画を作成できることを確認した。

---

## 6 あとがき

---

当社は、独自に開発した高速な組合せ探索エンジンを適用し、柔軟な制約条件を表現できる仕組みを持つ車両運用スケジューラを東京地下鉄(株)と共同開発した。

このスケジューラは、東京地下鉄(株)の車両基地における試験運用を通して、実用的な計画を高速に作成できることを確認した。提案手法は評価関数の設計自由度が高いため、多くの鉄道事業者への適用が期待できる。

---

## 文献

- (1) 大槻知史, ほか. 車両運用計画に対する制約充足解法の提案. 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌. 53, 2010, p.30 - 55.



大槻 知史 OTSUKI Tomoshi

研究開発センター システム技術ラボラトリー研究主務。  
スケジューリング、最適化手法の研究・開発に従事。  
System Engineering Lab.



愛須 英之 AISU Hideyuki

研究開発センター システム技術ラボラトリー主任研究員。  
最適化や人工知能応用システムの研究・開発に従事。  
System Engineering Lab.



安本 高典 YASUMOTO Takanori

電力流通・産業システム社 交通システム事業部交通制御システム技術部主務。鉄道における制御系システムのエンジニアリング業務に従事。  
Transportation Systems Div.



中島 正貴 NAKAJIMA Masayoshi

東京地下鉄(株) 鉄道本部 車両部設計課副主任。  
鉄道車両に関する研究・開発に従事。  
Tokyo Metro Co., Ltd.