

# 鉄道の運用計画問題に対する 整数計画法によるアプローチ

今泉 淳

鉄道には各種資源の割り当て問題、特に時系列的な割り当てを考える必要がある計画立案が数多く存在し、とりわけ、列車の運行を行うに当っては車両や乗務員の割り当てが不可欠である。この計画立案においては、これらの有限な資源をその使用条件を守りつつダイヤに示された全列車に対して割り当てねばならないが、従来そこでは人手に頼っている部分が大きかった。しかし、近年になって次第に数理技術を用いた方法に移行しつつある。本稿では、乗務員や車両の運用計画の作成（スケジューリング）に対する整数計画法による考え方や試みを、筆者が最近関わったものを含む既存の研究に基づき概説する。

キーワード：鉄道，車両運用，乗務員運用，整数計画法，スケジューリング

## 1. はじめに

鉄道には各種スケジューリング問題があるが[1]，その計画立案において従来はベテランの勘に頼る部分が大きかった。しかし、人材の確保が困難になる中、将来的には計画立案の支援システムを用いたり、ある程度の自動化が求められている。この分野での数理技術の応用は海外でも比較的最近であり[2]，その発展に対しては実務サイドからの要望も極めて強い。

本稿では、主にJRにおける乗務員や車両の運用計画の作成（スケジューリング）を念頭に置きながら、理論側の観点から、そのモデル化や定式化、求解の方法などについて、海外の関連する研究やモデルも交えて説明する。

## 2. 乗務員と車両のスケジューリング

### 2.1 ダイヤに対する資源の割り当て

旅客・貨物を問わず、鉄道における各種の資源の中で最も重要なものが列車に不可欠な車両であり、またその運行に従事する乗務員であることは説明を要しない。これら資源は、ダイヤが所与の下でそれに示された各列車に対して必ず割り当てなければならないという意味で共通し、それゆえ運用計画の立案は似た性格を持つ。

より詳細に述べれば、両者のスケジューリングは、ある特定の資源が、

(1) 一日内でどんな順番で最小単位の仕事（列車）を担当するのか

(2) (1)のスケジュールをどんな順序で実行するのかの二つを決める意味で共通する。

計画の細かさから見れば、(1)が日単位でより細かくその意味で下位に位置し、(2)が数週間程度の長さからなる計画であり上位に位置すると見なせる。

これら問題の概要に関してはすでに富井[1]などが紹介しているが、本稿においても文献[3]にある例を用いて改めて基本的な概念を示す。

ここでは車両のスケジュールを考える。各列車は実際には何両かの車両から構成される「編成」という単位で運行されるが、以下では特に断らない限り「車両」は同一のスケジュールに同時にしたがう「編成」を意味するものとする。

図1が与えられたダイヤだとしよう。その中の列車を始発・終着地、時間などを勘案して適宜つなぎ合わせた結果が図2で、四つの日単位のスケジュールができたことになる。それぞれのスケジュールが(1)の一日内の仕事の担当内容（順序）であり、ここではある日の運行に車両が四つ必要であることになる。

(2)は、上述の四つのスケジュールをどんな順序で迎えるかを与えるものである。図3は、図2のスケジュールを、ある日の最後の担当列車の終着地と翌日の最初の担当列車の始発地が同一になるようつないだものである。これにより、四つの車両がこれら四つのスケジ

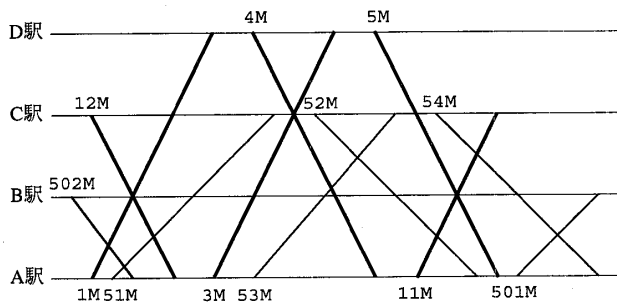


図1 与えられたダイヤ

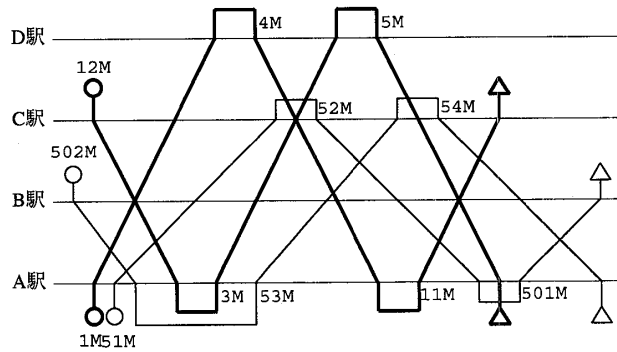


図2 各車両の日単位のスケジュール

作業番号	6時	12時	18時	24時
1	A駅 ○	D駅 4M	A駅 11M	C駅 △
2	C駅 ○	A駅 3M	D駅 5M	A駅 △
3	A駅 ○	C駅 51M	A駅 52M	B駅 501M △
4	B駅 ○	A駅 53M	C駅 54M	A駅 △

図3 日単位のスケジュールをつなぐ

スケジュールを順々に巡ることになり、最終的に各車両は4日を周期として同じスケジュールを繰り返す。

なお、(1)のスケジュールについて、乗務員の場合これを「行路」、車両の場合これを「仕業」と呼ぶ。また、これらをつないだ結果できあがる(2)のスケジュールのことを、いずれの場合においても「交番」と呼ぶ。

### 2.2 乗務員と車両の相異点

このように共通点を持つ両者であるが、一方で両資源の性格の違いに起因する割り当ての制約条件の相違点がある。

上述の(1)のスケジュールに関して、乗務員の場合のある日のスケジュール（行路）では、自分の所属区か

ら始まり最終的にそこに戻る乗り継ぎパターンを決める必要がある。正確には、深夜や早朝の列車を担当する場合は、特定の場所のみで行える仮眠を挟んだ暦日2日間の勤務とするため、所属区から始まり所属区に戻る、1日もしくは2日間のスケジュール群によって、すべての列車をカバーする。すなわち、乗務員は出発した当日もしくは翌日にその出発地に戻ることになる。

車両の場合、ある日のスケジュール（仕業）は所属区から始まり所属区で終る必要は必ずしもなく、スケジュールの開始あるいは終了の場所は「車両が留置できる場所」であれば良い。もちろん留置できる場所の容量の都合から、場合によっては、回送列車として車両基地（そこがその車両の本来の所属区であるかとはともかく）へ、あるいは車両基地から列車の所定の始発地に送り込むことになる。また、終着地や始発地の関係である日の最終の担当列車によってその車両の次の日の最初の担当列車が決まってしまうこともあるが、いずれにせよその日の最初あるいは最後の担当列車に関して乗務員のようなことを意識する必要はない。

また、最小単位の仕事のつながりにも制約の違いがある。乗務員の場合、(1)のスケジュールにおいて、隣接する列車乗務の間の時間間隔以外にも、行路の内容に応じて累積計算される各種属性値に上下限がある。さらに、休憩時間や準備時間などの就業上の細かいルールがあるため、ある列車で到着して一定時間後のどの列車でも乗務ができるというわけではない。同時に、(2)のスケジュールでは行路の並び方に関して存在するさまざまな条件に配慮することも必要になる。

一方、車両は法令に定められる検査を数日おき（車両の種類によって異なる）にそれが可能な場所で行う必要がある。これを(2)のスケジュールのレベルで満たす必要がある。しかし、(1)のスケジュールにおいて、ある列車に充当された後に次の列車に充当されるまでの時間に関しては、入換えや清掃、整備作業の所要時間などは考慮する必要があるものの、それ以外の制約はない。

すなわち、乗務員の場合は(1)と(2)の両者に比較的小さい制約があるのに対して、車両の場合は留意すべき主要な制約が(2)のスケジュールに存在しているといえる。

さらに細かい違いを述べれば、乗務員の場合は列車の始発地から終着地までを続けて乗務する必要はない。また、(1)のスケジュールの制約により、列車の始発地から終着地の間の一部分のみを担当するということも

あり得る。すなわち、(1)のスケジュールにおける仕事の最小単位はある列車の全体もしくはその一部である。

しかし、車両、特に旅客列車に使用される車両の場合、ある列車の始発地から終点地まで同一の車両が充当されるのが通常である（そうでなかったら、同一の列車であるにもかかわらず、乗客は途中駅で車両を乗り換えるという不便を被る）。ところが、機関車が牽引する長距離の客車の旅客列車や貨物列車の場合、ある列車の始発地から終着地までを同じ機関車が牽引し続けるのではなく、途中で機関車を交換することもある。つまり、(1)のスケジュールにおける仕事の最小単位は、列車や車両の性格によって異なる。

また、なんらかの都合でこれら資源が移動だけしなければならぬとき、乗務員の場合はダイヤに存在する列車で業務をせず便乗の形で移動をすることになるが、車両の場合は回送という形でダイヤ上に新たな列車を設定することで実現される。しかし、この回送列車の設定が可能かどうかは別のレベルの意思決定を必要とし、これも違いの一つである。もちろん、不要な回送は車両の使用効率を低下させることになるため、これは避けねばならない。

### 2.3 実際のアプローチ

ダイヤ上の列車に資源を割り当てる上での共通点と相異点があることは上で述べたとおりだが、問題を解くためのアプローチや周辺状況には以下のような違いがある。

乗務員の場合は前述の(1)のスケジューリング (Crew Scheduling Problem, 行路計画作成問題, 以下 CSP) と(2)のスケジューリング (Crew Rostering Problem, 交番作成問題, 以下 CRP) のそれぞれは、数理的な問題としては別々に扱われることが多い。また、(2)のスケジューリングは(1)のスケジューリングが行われていることが前提となる。これに対して、車両の場合はこれらをひとまとめにして、一つの問題で(1)と(2)のスケジューリングを同時に行うことが多い。

また乗務員の問題は、とりわけ CSP についてはすでに海外に多数存在している航空のそれと定式化のレベルではほぼ同一であるが、車両の問題は運用のポリシーが必ずしも日本のそれと同一でないこともあり、同じ鉄道に対する研究といえどもその成果の転用が容易でないという事情がある。

以下、これらの事情も含めて、数理モデルや解法、海外の研究などに関して説明しよう。

## 3. 乗務員の運用計画

CSP と CRP は、与えられた最小単位の仕事を、規則を満足するように複数の仕事からなる仕事列にまとめ、最終的にすべての仕事がいずれかの仕事列に属するような最小コストの仕事列の集合を見つける、と表現できる意味で類似の問題構造を持つ。

### 3.1 CSP

CSP は、「所属区からはじまり所属区にもどる可能な行路の候補の中から適当な組合せを見つけること」に他ならない。

ここで、ある列車の始発地から終着地までの間を乗務員の乗り降りの最小単位（上で述べた最小単位の仕事）に分割し、それを「乗務」と呼ぼう。そうすると、CSP は、定式化された問題の制約式の係数行列の、列に仕事列（行路）を、行に最小単位の仕事（乗務）をそれぞれ対応づけた上で、集合被覆問題 (Set Covering Problem, SCP) や集合分割問題 (Set Partitioning Problem, SPP)、あるいはその派生形の問題として定式化できる。

行路の候補は、一般にその守るべきルールが与えられているだけであり、行路を作ることから問題の解決ステップが始まる。行路の作り方は CSP の要点の一つであり、筆者はこの観点から、「列（行路）をルールに基づいて事前に列挙するもの」（事前列挙型）と、「必要な列を動的に生成するもの」（列生成型）のふたつにアプローチを分類している。

行路の候補は、単にルールを守るかどうかだけでいえば、その数は場合によっては百万以上に及び[4]、前者のアプローチでは多くの場合において解く際に対象とする行路を限定せざるを得ない。したがってこの場合、仮に最適に解けても「その範囲内で」という前提条件がつく弱味を持つ。一方、本来の意味での最適性を保証するものとして、後者のアプローチと分枝限定法を組み合わせた分枝価格法[5]があるが、実装にはそれ相応の手間を要することを考えると手軽な方法とはいえない。これは、純粋な分枝限定法と違い、商用パッケージに全面的に依存することができず、通常は問題に依存した実装を必要とするからである。

しかし、実務的な観点からの評価が可能な場面では、前者の事前列挙型のアプローチと高精度の解を高速に算出する近似解法の組み合わせでも実用的であると筆者は考えている。また、分枝価格法ではないが、列生成法によって線形緩和問題を最適に解きそこまでに生

成された列から整数解を得る方法（これは後者の列生成型に属するが、事前列挙型との折衷案とも見なせる）でも、下界値による評価が可能ならかなり良い解が得られる[6].

CSP のもう一つの要点は、便乗の扱いである。便乗とは乗務員が業務をすることなく移動のためだけに列車に乗ることを指すが、その扱いは定式化に影響を与える。もちろん、一般に便乗がない行路だけの組合せで実行可能なスケジュールが得られる保証はないため、定式化や得られた解においては便乗を許す前提で考えざるを得ない。

航空業界においても類似した乗務員スケジューリングが行われているが、そこでは便乗であるかないかにより費用が違うことなどを踏まえて、あらかじめ便乗を考慮する前提で SPP として定式化する[7].

一方、鉄道では航空ほど厳密かつ細密な行路のコスト計算を行っていない現状もあり、SCP による定式化を行い、便乗が解において「ある乗務が複数の行路に割り当てられる」という形で「結果」として生じても、航空におけるほど深刻な問題は引き起こさない。ただしその場合、解を得た後でそのような乗務をどの行路に実際に業務として行わせるか（逆にいえば、どの行路に便乗として割り振るか）を決める必要がある。もちろん鉄道でも便乗が少ない方が良く、また、行路内におけるある乗務が便乗なのか否かは、厳密に考えるならば行路の実行可能性に影響を与える。

そこで、あらかじめ便乗を考慮して SPP で定式化したり、SPP が SCP に比べて実行可能解を見つけ難いため、SCP に適当な変数を導入して等式制約に置き換えその変数に対するペナルティを考えることで「必ずしも許されないわけではないが、しかし便乗を少なく」を実現するやり方[8]もある。

筆者が係わった研究におけるモデル化では、今のところ最小化の対象を乗務員数レベル（正確には総勤務日数）で行っているが、これは後述するように、将来的な検討課題の一つでもある。

### 3.2 CRP

CSP と類似の問題構造を持つ CRP だが、「すべての行路を、ルールを守りつつ一巡する」を達成する必要がある部分が CSP と異なる。交番は、必要な休日の日数やそのタイミングも含めて、就労上のルールに基づき作成する必要がある。また、多くの場合、区所の乗務員数の関係から複数の交番に分けることが必要になり、それらの間の負荷の平準化も求められる。

このような背景から CRP は、CSP のように「仕事列の組合せを見つける」というよりも、むしろ、各行路を点とし、つなげられる点（行路）の間を適当なコストを持つ枝で結んだ有向グラフ上で「各種制約を満足する、複数の巡回路を見つける」というほうが、問題のイメージとしてより近いであろう。

このレベルの問題に対しては Caprara et al.[9] のヒューリスティックアプローチがある他、厳密には本稿が前提にしている整数計画法の枠組外になるが、制約論理によるアプローチ[10]もある。

ところで、CRP は CSP の結果が得られてからでないで解けず、また CSP のある特定の解に基づいた CRP の最適化がトータルで良い結果を導くかは保証の限りではない。これを踏まえ、CSP を反復的に解き、その中で CRP を解くという考え方[11]がある。これは、CSP と CRP が段階的に解かれていることによって発生する問題への対策の一つである。

## 4. 車両の運用計画

車両運用計画問題は、一般には車両循環問題 (Rolling Stock Circulation Problem) として知られる。車両は高価な資源であり、その結果、導入・保有できる車両数は、実際のダイヤ上の列車の運行に必要な車両数に対して大きな余裕があるわけではない。それゆえ、保有する車両数内でダイヤに設定された全列車の運行を実現するためには、綿密な検討を必要とする。鉄道会社にとって、乗務員と同様にその運用計画の立案が重大な関心事の一つとなることは、このような事情からも容易に想像できよう。

### 4.1 諸外国における研究

外国における車両運用の研究に関しては Caprara et al.[2] の分類にしたがって説明しよう。それによれば、諸外国の問題やモデルは、車両が「機関車と客車」か「列車編成」かによって分類できるとともに、列車の走行距離や運行頻度により特徴づけられるネットワーク（ダイヤ）の密度の観点からも分類ができる。

「機関車と客車」は、ある列車に対して必要とされる輸送量（乗客数）とその内容（等級）に応じて充当すべき客車の種類と数と、それを牽引するのに必要な機関車の形式や数を決定する（例えば Cordeau et al.[12]）。これに対して「列車編成」は、最小運用単位の「編成」のスケジュールを考える。例えば Alfieri et al.[13] は、ピーク時とオフピーク時の旅客需要の差に対応するよう編成（3 ないし 4 両からなる）の単

位で連結・解放することで効率的な運用を目指している。

ダイヤの密度の観点からは、長距離列車で列車頻度の低いケースと近距離列車で列車頻度が高いケースに分類されるが、特に前者の場合、規定された期限内に検査が受けられるようにあらかじめ考えておく必要がある。Cordeau et al.[14]が対象としている問題はその例である。一方、さきの Alfieri et al.[13]が扱っている問題は後者の例であるが、こちらでは検査は考慮していない。これは、検査が必要になった時点でその車両を検査可能な場所に送り込むようなスケジューリング (Maintenance Routing と呼ばれる) を行うためである。

#### 4.2 日本における運用方法とそのための数理的アプローチ

このように車両運用のモデルは色々あるものの、日本の場合、貨車以外のほとんどの車両はその種類や列車の運行頻度を問わず、同一形式の車両や編成に対して、すでに述べたように個々の車両が同一の交番に一日遅れで順繰りにしたがることを前提に、周期的な検査 (仕業検査) をあらかじめ交番内に組み込んでおくというスケジュールを立案する関係もあり、そのまま転用可能な海外のモデルはほとんどない。

この日本でのやり方は長らく使われている方法であり、各車両は結果的に同一のスケジュールにしたがるため、トータルとして個々の車両の走行距離に偏りが出ず保守の上で都合が良いという利点がある。また、そのスケジュールにしたがる限り検査周期が満足される実行可能なスケジュールの存在を現場に示すという目的もある。

検査は、車両の形式ごとに定められたおおむね数日の周期で、検査が可能な場所 (基本的には複数あることが多い) において消耗品の交換や点検作業を数時間かけて行う。図3ではそれを無視していたが、実際には交番を作る際に検査周期を満たすよう検査をそのスケジュールに組み込んでおく必要がある。もちろん、検査期限よりも早めに検査を受けることは構わないが、一方で検査の頻度が高くなることで検査数が増えることも無視し得ない。

すでに述べたように、車両の場合も概念的には「仕業」「交番」という階層構造があるが、乗務員ではCSPとCRPという階層に対応したモデルや研究があるのに対して、車両のスケジューリングに関する過去の研究は前述のとおりこれらをひとまとめの問題とし

て扱うものが多い。

問題をひとまとめにして扱う場合、この仕業検査がなければ、列車を点、接続可能な列車間を枝で結び、枝のコストとして列車間の間合い時間を与えることで、巡回セールスマン問題 (TSP) に帰着できる。ところが、検査の制約のために、巡回セールスマン問題に対する研究成果や知見をそのまま利用することはできない。

しかし、TSPにならないとはいえ条件付きの巡回路を作るという見方をすればそのようなモデル化は自然に思いつくところで、趙ら[15]や福村ら[16]、佐藤と佐々木[17]のアプローチはその代表例である。

その一方で、問題の階層構造を意識し、乗務員のそれと同じような二段階のアプローチを採用した例[18]もある。ただし、これは路線距離が長くない、また列車頻度が高くかつ検査の時間帯がオフピーク時にある、通勤路線に対する試みであった。したがって、運用の考え方は同じであるものの、列車の頻度や走行距離、検査場所に関する条件が異なるケース、例えば長距離を走る機関車などの場合は別の考え方を必要としよう。これは今後の研究課題でもある。

#### 5. おわりに

本稿では、日本における鉄道の運用計画の作成を念頭におき、主として理論面における研究成果を中心に述べた。

乗務員運用 (特にCSP) については諸外国の航空産業を中心とした過去の成果が多く存在し、それらを転用できる余地は大いにある。ただし、定式化レベルで同一視できても特定の方法をそのまま用いることで成功するとは限らず、問題固有の特徴を踏まえた上での修正を要するかもしれないことは言うまでもない。

車両運用に関しても諸外国にも多くの研究があるが、日本のそれとは運用ポリシーの違いがあり、研究成果を日本の問題に転用することは難しい。一方、国内の研究も萌芽的時期はすでに過ぎているものの、実的な意味で解決すべき諸課題はまだ多い。

乗務員も車両もいずれの問題も二段階の構造をしているが、それらをひとまとめにして扱う場合は数多くの変数を含む問題を相手にすることになり、解く上ではそれ相応の工夫を要しよう。一方、段階的に解くアプローチでは、それぞれの問題のサイズは小さく目標も立てやすいが、問題間で相互に結果をやりとりしたりするメカニズムが必須となろう。

ところで、本稿で紹介した研究は理論的な方向からのもが多かった。特に、筆者が係わった研究は、どちらかという将来に向けての基礎固めに相当するという評価が妥当である。例えばCSPでは、現状のSCPを中心にしたモデル化において、さらに多くの制約を取り込んだり、行路の内容にも踏み込んでコストを設定するなどの課題があると考えている。

また、実際の運用計画作成にあたっては、列挙すればきりがなほの考慮すべき条件が場合によってはあり、さらには、評価尺度が複数あり単一化しにくかったり、制約を厳密に守らなくても良い場合があるなどの事情もあり、これらにどう対処すべきかは未知の部分も大きい。

なお、この種の計画立案はダイヤが改正される際に行われるものである。その性格を考えると、意思決定にかけられる時間すなわち許容される計算時間には比較的余裕があるといえる。しかし、数理モデルが問題の本来の条件を完全に取り込んでいるとは必ずしもいえない現状ではモデルを修正して最適化を反復することも必要であり、またWhat-if分析を行うような場面も考えられ、自ずと計算時間に対する要求も厳しくなる。解法の構築においては、このようなことも踏まえる必要があろう。

このように鉄道の運用計画問題にはさまざまな課題があるが、地道な研究成果の積み重ねの先に実務的な問題の解決を強力に手助けできるような数理手法が構築・確立されることを期待して、本稿を終える。

なお、本稿の執筆にあたり貴重な助言をいただきました(財)鉄道総合技術研究所の福村直登氏に感謝いたします。

#### 参考文献

[1] 富井規雄：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—オペレーションズ・リサーチ, Vol. 49, No. 1, pp. 33-39, 2004.  
[2] A. Caprara, L. Kroon, M. Monaci, M. Peeters and P. Toth: Passenger railway optimization. In C. Barnhart and G. Laporte, editors, *Transportation*, Handbooks in Operations Research and Management Science, chapter 3. North-Holland, 2006.  
[3] (財)鉄道総合技術研究所運転システム研究室：鉄道のスケジューリングアルゴリズム—コンピュータで運行計画をつくる。エヌ・ティー・エス, 2005.  
[4] 今泉淳, 鷺見亮, 斎藤秀和, 森戸晋, 富井規雄, 福村直登：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リポート168最適化：モデリングとアルゴリズム17, pp. 172-179. 統計数理研究所, 2004.

- [5] C. Barnhart, E. L. Johnson, G. L. Nemhauser, M. W. P. Savelsbergh and P. H. Vance: Branch-and-price: Column generation for solving huge integer programs. *Operations Research*, Vol. 46, No. 3, pp. 316-329, 1998.  
[6] 今泉淳, 福村直登, 森戸晋：鉄道における乗務員スケジューリング問題に対する数理計画法の適用. スケジューリング・シンポジウム2006講演論文集, pp. 99-104, 2006.  
[7] 田島玲：パイロットの乗務パターン最適化. 杉原厚吉, 茨木俊秀, 浅野孝夫, 山下雅史(編), *アルゴリズム工学—計算困難問題への挑戦—*, pp. 266-267. 共立出版, 2001.  
[8] 加藤怜, 植田達広, 森戸晋, 福村直登：乗務員運用計画問題に対する便乗削減の定式化と解法. 日本オペレーションズ・リサーチ学会2006年春季研究発表会アブストラクト集, 2006.  
[9] A. Caprara, P. Toth, D. Vigo and M. Fischetti: Modeling and solving the crew rostering problem. *Operations Research*, Vol. 46, No. 6, pp. 820-830, 1998.  
[10] 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, pp. 16-21, 2002.  
[11] A. Caprara, M. Monaci and P. Toth: A global method for crew planning in railway applications. In S. Voß and J. R. Daduna, editors, *Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, Vol. 505 of *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, pp. 17-36. Springer, 2001.  
[12] J.-F. Cordeau, F. Soumis and J. Desrosiers: A Benders decomposition approach for the locomotive and car assignment problem. *Transportation Science*, Vol. 34, No. 2, pp. 133-149, 2000.  
[13] A. Alfieri, R. Groot, L. Kroon and A. Schrijver: Efficient circulation of railway rolling stock. *Transportation Science*, Vol. 40, No. 3, pp. 378-391, 2006.  
[14] J.-F. Cordeau, F. Soumis and J. Desrosiers: Simultaneous assignment of locomotives and cars to passenger trains. *Operations Research*, Vol. 49, No. 4, pp. 531-548, 2001.  
[15] 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.  
[16] 福村直登, 坂口隆, 富井規雄, 中村達也, 西森進矢, 登坂安彦：鉄道における車両運用計画作成問題. 日本オペレーションズ・リサーチ学会2004年春季研究発表会アブ

ストラクト集, 2004.

[17] 佐藤達広, 佐々木敏郎: ハミルトン閉路の近傍操作に基づく遺伝的アルゴリズムと鉄道車両運用計画問題への適用. 情報処理学会第 59 回 (平成 11 年後期) 全国大会講演論文集, No. 2, 1999.

[18] 山岸雄樹, 今泉淳, 森戸晋, 福村直登: 数理計画による鉄道車両運用計画の策定. 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2007 年春季研究発表会アブストラクト集, 2007.