

組合せオークションモデルに基づく 異常時の鉄道乗務員運用変更計画作成アルゴリズム

A Crew Rescheduling Algorithm based on Combinatorial Auction Model

藤森 淳[†] 富井 規雄[†] 平山 純一郎[†]
FUJIMORI Atsushi[†] TOMII Norio[†] HIRAYAMA Junichiro[†]

1. まえがき

鉄道において、列車ダイヤに乱れが生じた時には、列車の運休、臨時列車の運転、列車の順序の変更等、一連のダイヤの変更を行なって、列車ダイヤを正常に復する業務（運転整理）が行なわれる⁽¹⁾。そして、作成された運転整理案にあわせて、乗務員運用の変更計画が作成される。ここで、乗務員運用計画とは、各乗務員（運転士と車掌）がどの列車を担当するかを決めた計画のことを言い、乗務員運用の変更計画とは、作成した運転整理案の各列車に乗務員が充当されるように、当初の乗務員運用計画に変更を加えた計画のことを言う。

乗務員運用の変更計画（以下、乗務員運用変更計画）は、現時点では、すべて人手によって作られている。しかし、2節で詳述するように、乗務員運用変更計画の作成は、人間の勤務を作成する業務であることに起因して、様々な条件を考慮しなければならないこと、大規模な組合せ問題であること、迅速に作成しなければならないこと、ミスが許されない業務であること等の理由により、人手による作業では、作成に要する時間、作成された計画の質の両面で問題が生じているのが現状である。

本稿では、乗務員のうちの運転士を対象として、乗務員運用変更計画を自動的に作成するアルゴリズムを提唱する（以下では、「乗務員」は運転士を指す）。具体的には、列車ダイヤの変更計画（運転整理ダイヤ）と所定の乗務員運用計画が与えられた時に、すべての列車に乗務員が充当されるような乗務員運用変更計画を作成する。その際、各乗務員の労働条件（食事時間、超勤時間等）、所定行路との差異、勤務の公平性等を評価尺度として、その評価値が最小となる計画を探索する。

本研究では、乗務員運用変更計画作成問題に対するアプローチとして、組合せオークション(Combinatorial Auction)に基づくモデル化を用いる。組合せオークションとは、価値に依存関係のある複数の品物（「財」と呼ぶ）が同時にオークションの対象になり、財の組合せに対するビッド（入札）が許されるオークションのことを言う⁽²⁾。

本研究では、列車を財と考える。そして、各乗務員に対して、現在位置、それまでの勤務内容、帰着すべき基地等を考慮して、その乗務員が担当してもよいと考えられる列車の並び（行路）を、複数生成する。そして、それぞれの行路に対して、コストを付して、それをビッドと考える。コストは、行路の内容とその乗務員のそれまでの勤務内容を考慮して算出する。従って、同一の行路であっても、担当する乗務員によってコストが異なることがある。

このように考えると、乗務員運用変更計画作成問題は、すべての列車が少なくとも1人の乗務員に落札され、かつ、その時の評価値が最小になるようなビッドの組合せを見つける問題と定式化される。

以下、2節では、乗務員運用変更計画について、概要、制約、評価尺度について述べる。3節では、組合せオークションによるモデル化のアプローチを述べ、4節では、メタヒューリスティクスによる乗務員運用変更計画作成アルゴリズムと実データを用いた評価結果について述べる。

2. 乗務員運用変更計画

2.1 乗務員運用変更計画とは

図1は、乗務員運用計画をダイヤ図形式で表したものである。横軸は時間軸で、時間とともに移動する列車の軌跡を斜めの線分（スジ）で表している。スジに付された数字は、列車番号である。また、スジとスジを結ぶ半円は、乗務員の乗継ぎを示している。例えば、乗務員Xは、C駅から列車2に乗務し、A駅からは列車1に乗務する。その後、C駅からは列車6に乗務して、B駅でこの日の勤務を終了する。図2は、図1のダイヤに変更が加えられたときの乗務員運用変更計画を示している。時刻*t*において、何らかの理由により、列車1, 4をA駅～B駅間運休すると決定されたとする（点線で表されている）。所定の計画のままでは、列車1のB駅～C駅間、列車3等に乗務員が充当されないことになる。そこで、図2に示すように乗務員運用を変更する。この場合、乗務員XにA駅から列車3を担当させる。ただし、そのまま列車3に乗務させると、所定の勤務終了地であるB駅で勤務終了とならないため、B駅からは、乗務員Yに乗務を交代する。乗務員Yについては、あらたに列車1のB駅～C駅間および列車6を担当させる。

事故の発生等によって、列車ダイヤに変更が生じた時には、このように、乗務員の帰着する基地等の制約を守りながら、すべての列車に乗務員を割り当てるように乗務員運用計画の変更を行なう。

2.2 乗務員運用変更計画の制約、考慮すべき事項

乗務員運用変更計画の制約は、次の通りである。

- ① 列車の全区間に乗務員が充当されていること。
- ② 乗務の交代は、定められた駅（乗継可能駅）でのみ行なうこと。
- ③ 乗務の間に、移動・乗継ぎに必要な時間、手段が確保されていること（駅が異なる場合、他の乗務員が担当する列車に便乗することになる）。
- ④ 所定の行路での勤務終了箇所（駅・基地）で、勤務を終了すること。

また、絶対的な制約ではないが、考慮すべき事項として、次がある。

[†] (財) 鉄道総合技術研究所 Railway Technical Research Institute

[‡] (株) ニューメディア総研 New Media Souken Co. Ltd.

- ⑤ なるべく食事時間、休憩時間を確保すること。
- ⑥ なるべく厳しすぎる行路（乗りっぱなし、退勤時刻が大幅に遅くなる等）にならないこと。
- ⑦ なるべく所定の行路からの変更を少なくすること。
- ⑧ 乗務員の勤務内容に大きな不公平が生じないようにすること。

なお、⑦は、行路を変更すると、新たに担当する列車の運転時刻表を乗務員に交付する手間が発生するため、それを避けたいということが主な理由である。

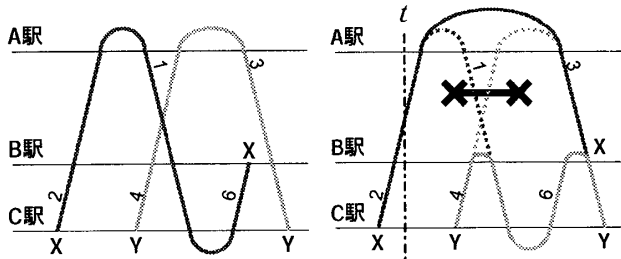


図1 所定の乗務員運用計画 図2 乗務員運用変更計画の例

2.3 乗務員運用変更計画の難しさ

乗務員運用変更計画の難しさは、次の様に要約される。

- 迅速に計画を作成することが求められる。
- 多数の列車と乗務員を対象とする大規模な問題である。
- 多数の乗務員について、個々の事情（食事を済ませたか、長時間乗務を継続してきたか等）を考慮して、その後の行路を決定する必要がある（本来、乗務員の行路の内容には、連続運転時間の制限等、さまざまな制約がある。ダイヤ乱れ時には、それらの制約は必ずしも守る必要はないが、乗務員の勤務は、安全・事故防止に関連するため、その場合でも、むやみに厳しい勤務になるのは避けるべきであると考えられている）。
- その時の状況に応じて、何を重視するかが変わる（大事故の時には、休憩時間や公平性にはかまっていられないが、それほど事故でない時には、なるべくなら、休憩や公平性に配慮したい等）など、状況に応じた判断が必要となる。

2.4 乗務員運用変更計画の評価尺度

乗務員運用変更計画の評価尺度は、次のようになる。

- 所定の行路からの変更が少ないこと。
 - 所定の退勤時刻からの超過勤務の時間
 - 食事・休憩時間が十分にとれていること。
 - 乗務員間の勤務の不公平さが少ないこと。
- すなわち、乗務員運用変更計画作成問題は、多目的最適化問題としてとらえる必要があることがわかる。

3. 組合せオークションによるアプローチ

3.1 組合せオークション

組合せオークション (Combinatorial Auction) は、次のような特徴を有するオークションである。

- 価値に依存関係のある複数の財が同時にオークションの対象になる。
- 財一つだけでなく、財の組合せに対する入札（ビッド）が許されている。
- 同じ財（の組合せ）に対してでも、入札者（ビッド）

によって価値が異なるため、その結果、入札値が異なることがある。

全てのビッドのビッドが出揃った後、オークションは、「どのように財をビッドに配分すればその対価としての入札額の合計が最大になるか」という問題（勝者決定問題）を解決する必要がある。この問題は複雑な組合せ最適化問題になり、重み付き集合詰め問題 (Weighted Set Packing Problem) という NP 困難問題に等しいことが知られている⁽²⁾。

組合せオークションは、時間枠を連続して押さえることが、そうでない場合よりも価値が高いことを自然に表現できることに着目して、スケジューリング問題にも適用されている⁽³⁾⁽⁴⁾。

3.2 組合せオークションによるアプローチ

前節での議論から分かるように、乗務員運用変更計画作成問題は、乗務員個々についての事情を考慮しつつ、全体としての制約と評価尺度（充当、公平さ）をも考慮しなければならないという特徴を有する。

乗務員運用変更計画作成問題は、迅速なアルゴリズムを必要とするため、メタヒューリスティクスに基づくアルゴリズムを適用することが適切であると考えられる。乗務員運用変更計画作成問題に対してメタヒューリスティクスを適用する場合、例えば、適当なヒューリスティクスを用いて初期解を作成し、その後、乗務員の行路の変更を繰り返して行なって、近似最適解を探索していくという手法が考えられる。しかし、このような手法では、各乗務員の行路は、全体や他の乗務員の行路と関係なく変更されていくため、一部の乗務員のみならず労苦のしわ寄せが行く行路案を作成してしまうことが考えられる。すなわち、このようなアルゴリズムでは、乗務員の個々の事情を反映し、かつ、全体の不公平を少なくする解を得ることは難しいと考えられる。

本稿では、組合せオークションの考え方に基づくアプローチを導入する。基本的な考え方は、次の通りである。

- 列車を「財」と考え、行路（複数の列車の並びからなる）を財の組合せとして表現する。
- 各乗務員に対して、その乗務員に担当させてもよいと考えられる行路の案を複数生成し、その行路の「望ましくなさ」をコストとして付す。この行路の案それぞれを、ビッドとする（これにより、乗務員をビッドと呼ぶことにする）。
- 各乗務員のビッドからひとつずつを選び、すべての列車がどれかのビッドに含まれ、かつ、ビッドのコストの総和と不公平さが最小になるようなビッドの組合せを見出す。

なお、解としてのビッドの組合せの中で、1つの列車が複数のビッドに含まれていてもよい。その場合、複数の乗務員がその列車に乗務することになるが、1人の乗務員（本務）以外は「便乗」（運転しない）となる。

組合せオークションによるアプローチを用いることの利点は、次の通りである。

- 行路の好ましくなさ（休憩時間、超勤、列車間の乗継ぎ等に関して）を、財の組合せに対する価値として明示的に表現可能である。
- 乗務員は、存在するビッド以外の行路に充当されることはないため、適切なビッドのみ作成するようにしておけば、効率的な計画が得られる可能性が高い。また、勤務の内容が意に染まない結果になることもない。

3.3 ビッドの生成

(1) 入力

次が入力として与えられるとする。

- 運転整理ダイヤ
- 所定の乗務員運用計画
- 作成開始時刻：この時刻以降、乗務員運用の変更を行なってもよいという時刻である。現実には、乗務員運用変更計画の作成を開始する時刻+T (Tは、変更計画の作成と伝達に要する時間を考慮して決定)となる。
- 所定復帰時刻：ダイヤ乱れが収束し、この時刻以降は、所定の行路に戻したい、という時刻である。

(2) 財の定義

列車を乗継可能駅ごとに分割し、その分割された1つをlegと呼ぶ。1つのlegを1つの財とする。

(3) ビッドの生成手順

次の手順によって、乗務員のビッドを生成する。

Step 1: 乗務員の現在位置の把握

作成開始時刻における各乗務員の位置(現在位置)を、運転整理ダイヤと所定乗務員運用計画から検索する。作成開始時刻において、列車に乗務中の乗務員に対しては、その列車が次に到着する乗継可能駅を、現在位置とする。

Step 2: 行路案の生成とコストの付加

乗務員の現在位置を起点とし、所定復帰時刻における所定行路の列車を終点とする行路案をlegの並びとして複数作成する。ただし、所定行路で、所定復帰時刻以前に基地に帰着している場合には、基地を終点とする。各行路案には、次の手順で算出したコストを付し、ビッドとする。ただし、コストがあらかじめ定めた一定の値以上になる行路は、ビッドとして採用しない。

[コストの計算手順]

行路案Sに対して次を算出する。

- c_1 : 所定行路に含まれているが、Sに含まれていないlegの数
- c_2 : 所定行路に含まれていないが、Sに含まれているlegの数
- c_3 : Sでの退勤時刻-所定退勤時刻
- c_4 : 食事をとれない回数(食事がとれるかどうかは、あらかじめ定めておくある時間帯に一定時間以上の休憩時間が存在するかどうかで判断する)
- 次の式によって、Sのコストを算出する。

$$S \text{ のコスト} = \sum w_i c_i \dots\dots\dots(1)$$

なお、ここで、 w_i は、各評価尺度の相対的重要度を表す重みであるが、その時の事故の状況や、現在時刻以前に既に食事をとったと判断される乗務員に対しては、 $w_4=0$ とするなど、各乗務員の实態に応じて重みを変えること等も考慮する。

(4) ビッド生成の例

図2を用いて、ビッド生成の例を示す。

- 作成開始時刻：列車2がC駅を発車した直後に相当する時刻($t+T$)が指定されているものとする。
- 所定復帰時刻：列車3が運転を終了した後の時刻が指定されているとする。
- 乗継可能駅：A駅、B駅、C駅であるとする。

この時、

- 乗務員Xの現在位置はB駅、乗務員Yの現在位置は、C駅となる。
- 乗務員Xの行路案：2(BA)-3(AB), 1(BC)-6(CB), -
- 乗務員Yの行路案：4(CB)-1(BC), 4(CB)-1(BC)-6(CB)-3(XY), -

となる。なお、“2(BA)”は、「B駅とC駅の間の列車2」に相当する財(leg)を表す。他も同様である。また、“-”は、現在位置以降、列車を担当しない行路を表す。

これらの行路案に、前述の手順に従って算出したコストを付加してビッドとする。

このようにビッドを構成することで、2.2の制約②、③、④を自然に表現することができる。ただし、制約③については、1人の乗務員が複数の列車に同時に充当される計画になる等の事態を防止するために、あわせて、「乗務員のビッド集合の中からちょうど1つのビッドを選ぶ」ようにアルゴリズムを構成する必要がある。

3.4 勝者決定問題

乗務員運用変更計画作成問題においては、採用されているビッド b_i のコストを $\text{cost}(b_i)$ として、次の式で算出される評価値を最小にするようなビッドの組合せを求めることが目的となる。

$$\text{評価値} = \sum \text{cost}(b_i) + \alpha (\text{cost}(b_i) \text{の標準偏差}) \dots\dots\dots(2)$$

なお、 α は、ビッドのコストに対して、乗務員の行路の不公平さをどの程度考慮するのかを定める重みである。

4. 乗務員運用変更計画作成アルゴリズムと評価

4.1 アルゴリズムの概要

組合せオークションの勝者決定問題のアルゴリズムについては、多くの研究成果が報告されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかし、乗務員運用変更計画作成問題においては、すべての財が落札されなければならないという制約、1人のビッドのビッド集合の中からちょうど1つずつのビッドを選ばなければならないという制約、および各ビッドの落札コストの公平性を考慮しなければならないことの3点から、これらのアルゴリズムをそのまま用いることはできない。

本稿では、メタヒューリスティクスに基づく乗務員運用変更計画作成問題に対するアルゴリズムを提案する。全体構成を図3に示す。また、詳細を以下に示す(図3の中の数字は、以下の記述に対応している)。

4.2 アルゴリズムの詳細

(1) 初期解の生成

各ビッドのビッド集合からコスト最小のビッドを1つずつ集めたものを初期解とする。初期解を解候補Aとする。

(2) 落札されていない財があるかどうかのチェック

未落札の財が存在するかどうかをチェックする。

(3) ビッド範囲拡大の判断

コストの低いビッドのみを用いて解探索を行なう方が、探索空間のサイズや得られる解の質の点で有利であると考えられる。本アルゴリズムでは、探索に用いるビッドのコストの値にしきい値を設ける。すなわち、コストがそのしきい値以下のビッドのみを用いて探索を行なう。ただし、一定回数以上探索を繰り返しても未落札の財が残る場合には、そのしきい値を増加させ、より多くのビッドを用いて解の探索を行なうという戦略をとる。

(4) 落札可能なビッドの選択と新たな解候補の作成

- ・落札されていない財を1つ、ランダムに選ぶ。
- ・その財をビッドに含むビッド(以下、「落札可能なビッド」)すべてに対して、そのビッドがその財を落札したとした場合の解候補 A_1, \dots, A_k を生成し、それぞれの評価値を算出する。評価値は、式(2)に従って算出する。ただし、落札されていない財について、その分のペナルティを評価値に加える。
- ・ A_1, \dots, A_k から1つ (A') を確率的に選ぶ。この確率は、評価値がよいものほど高い確率で選ばれるように設定しておく。

(5) 解候補を用いて探索を続行するかどうかの判断

A' が A よりも改善されていれば、 A を A' で置きかえる。そうでない時、ある確率で A を A' で置きかえるかどうかを決定する。この確率は、シミュレーテッド・アニーリング⁽⁸⁾の考え方にに基づき、探索の進行度合いと改悪の程度から決定する。

(6) すべての財が落札されている時の新たな解候補の生成

ランダムに1人のビッドとそのビッドが落札している財を選び、それを、ランダムに選んだ、その財を落札可能なビッドに落札させることとして、新たな解候補を生成する。これを A として、(2)に戻る。

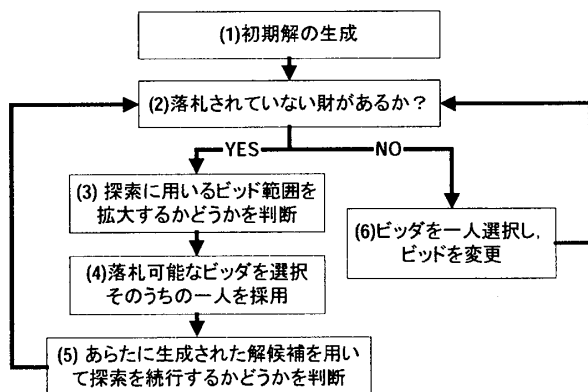


図3 アルゴリズムの概要

4.3 実データによる実験と評価

提案アルゴリズムの有効性を検証するために、大都市近郊の列車密度の高い線区を対象に、実データを用いて実験を行なった。実験に用いたデータは、次の通りである。

- (1) ダイヤ：24時間分 (総列車本数 1131本)
- (2) 実験ケース

- ケース1：列車に運休が生じた場合。不通区間が生じた場合を想定し、上下計7本の列車が運休されたとした。
 - ・作成開始時刻：22時00分とした。
 - ・所定復帰時刻：終着列車到着後とした。
- ケース2：列車に大幅な遅延(約60分)と運休が生じた場合。大規模な運転整理が行なわれ、ダイヤが大幅に変更された場合のケースを用いた。
 - ・作成開始時刻：22時00分とした。
 - ・所定復帰時刻：終着列車到着後とした。

実験1、実験2について、それぞれ10回ずつの試行を行なった。各試行においては、図3の繰返しを1000回ずつ実行した。結果のまとめを表1に示す。「変更行路数」は、得られた解において変更が加えられた行路の数である。

表1 実験結果のまとめ

試行	実験1		実験2	
	評価値	変更行路数	評価値	変更行路数
1	36.9	9	161.0	15
2	36.0	8	158.8	15
3	36.0	8	172.4	15
4	36.0	8	160.1	14
5	46.7	8	156.1	14
6	36.0	8	163.7	14
7	36.0	8	176.7	15
8	36.0	8	159.8	14
9	36.0	8	166.4	16
10	36.0	8	161.3	15

実験1、2において、全乗務員の行路数は192、そのうち、変更の候補となった乗務員の行路の数は、それぞれ、53、57であった。また、財(leg)の数は、いずれの場合も約1900、生成されたビッドの総数はそれぞれ、約10,000、約27,000であった。処理時間は、通常のPCで、実験1の場合、約2分30秒、実験2の場合、約4分30秒であった。

処理時間、得られた結果とも、きわめて実用的であり、本アルゴリズムの有効性が確認できたと考えられる。

5. おわりに

列車ダイヤに乱れが生じた時の鉄道の運転士の勤務の変更計画を自動的に作成するアルゴリズムを提案した。この問題は、運転士の個々の事情と全体としての解の最適性を考慮しなければならない複雑な問題で、しかも、高速なアルゴリズムが求められるという難しさがある。本稿では、この問題を組合せオークションの考え方によってモデル化し、それ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提案した。また、実データを用いて、提案アルゴリズムが実用的な解を与えることを確認した。

文 献

- (1) 富井規雄：「ダイヤの乱れを克服するー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)
- (2) S. de Vries and R. Vohra.: Combinatorial auctions: A survey, *INFORMS Journal on Computing* (2003)
- (3) 大園忠親, 服部宏充, 新谷虎松：組合せオークションの枠組みに基づくスケジューリングシステム, JAWS2002 エージェント合同シンポジウム (2002)
- (4) S. Rassenti, V. Smith, and R. Bulfin, Combinatorial: Auction Mechanism for Airport Time Slot Allocation, *Bell Journal of Economics*, Vol. 13, No. 2 (1982)
- (5) 櫻井祐子, 横尾真, 亀井剛次：「組合せオークションの高速な準最適勝者決定アルゴリズム」, 人工知能学会論文誌, Vol.16, No.5 (2001)
- (6) T. Sandholm：Algorithm for optimal winner determination in combinatorial auctions, *Artificial Intelligence*, Vol. 135, No.1-2 (2002)
- (7) Holger Hoos and Craig Boutilier：Solving combinatorial auctions using stochastic local search, in *Proc. National Conference on Artificial Intelligence (AAAI)* (2000)
- (8) Aarts, E. H.L. : *Simulated Annealing and Boltzman Machines*, John Wiley, Chichester, UK (1989)