確率的局所探索と PERT を組み合わせた 駅構内入換計画作成アルゴリズム

正員 富井 規雄 (財)鉄道総合技研

非会員 周 利 剣 (財)鉄道総合技研

非会員 福村 直 登 (財)鉄道総合技研

An Algorithm for Shunting Scheduling Problems combining Probabilistic Local Search and PERT

Norio Tomii, Member, Li Jian Zhou, Non-member, Naoto Fukumura, Non-member (Railway Technical Research Institute)

Shunting scheduling problems in railway stations can be regarded as a sort of resource constrained project scheduling problems (RCPSPs). But unlike normal RCPSPs, shunting scheduling problems have such requirements that the number of works which consist of a project has to be dynamically changed in the process of solving the problem, some of the works have to be performed at prescribed timing, etc.. We propose an efficient algorithm for shunting scheduling problems combining probabilistic local search and PERT. Local search and PERT is combined so that the candidates for answers in the local search process are evaluated by PERT. This enables to reduce the search space of the local search to a great extent and to make the algorithm work quite fast. We have confirmed effectiveness of our algorithm through several experiments using practical train schedule data.

キーワード：駅構内入換計画，局所探索，PERT，スケジューリング，有限資源プロジェクトスケジューリング問題

1. はじめに

鉄道においては、輸送形態の複雑化やコスト削減への対応を目的として、列車ダイヤをはじめとする輸送計画作成作業を効率化することが強く求められている。本論文で対象とする駅構内入換計画作成作業についても、従来の人手に依存した形態を、計算機を主体とした進め方に移行することが強く求められている。そのためには、駅ごとに異なる設備や列車ダイヤ等の個別の条件や固有の作成知識にとらわれない、汎用的なスケジューリングアルゴリズムが必要となる。

駅構内入換計画（以下、構内入換計画）とは、駅における列車の入換作業のスケジュールのことをいう。すなわち、始発終着列車などが存在し、入換作業が必要な駅において、どの列車を、どの引上線に、いつ引上げるかを定めた計画が構内入換計画である^(注1)。構内入換計画は、ダイヤ改正や、臨時列車運転時に作成される列車ダイヤと合わせて作成される。

構内入換計画は、列車ダイヤの実現可能性との関連で、きわめて重要である⁽¹⁾。すなわち、列車ダイヤにおいて列車の到着・出発の時刻や番線が定められているが、列車ダ

イヤを物理的に実現可能とするためには、列車がその時刻にその番線に出現可能でなければならない。そして、それを規定したものが構内入換計画だからである。

従って、構内入換計画の第一の目的は、列車ダイヤで定められた列車の着発時刻と番線を条件とした構内入換計画が作成可能であることを確認することにある。

しかしながら、列車ダイヤは必ずしも構内入換計画を念頭において作成されるわけではないため、列車ダイヤで定められた時刻と番線をすべて守った構内入換計画が作成可能であるという保証はない。そのような計画が作成不可能であることが判明した場合、列車ダイヤの修正を行うことになる。しかし、列車ダイヤはその駅だけでなく、線区全体、場合によっては、他線区の列車との接続なども考慮して作成されるものであり、一箇所の変更が広範囲に影響を及ぼすこともある。よって、列車ダイヤの変更はなるべく少ないことが望まれる。すなわち、構内入換計画としては、極力列車ダイヤを守った計画を作成する必要がある。

構内入換計画作成は多数の列車相互に存在する多種類の

(注1) 入換計画には、車両基地や貨物列車を対象としたものもある。
本論文で対象とするのは、旅客駅に対する入換計画である。

制約を考慮しなければならないきわめて複雑な作業である。制約としては、列車ダイヤのほかに、引上線で列車が競合しないこと、引上線への移動時間を守ること、進路が存在する引上線を使用すること、保安上の理由による列車相互の時間間隔を確保すること、などがある。

駅構内入換計画については、自動作成に関する研究は報告されておらず、すべて人手で作成されているのが現状である。よって、その作成には、1日分の入換計画を作成するのに、おおむね数時間程度を要している。また、列車ダイヤの修正に伴う入換計画の修正や作り直しが何度も発生する。従って、これの作成を迅速に行うことができれば、ダイヤ改正作業などに要する時間短縮の点で大きな効果がある。

構内入換計画問題は、列車の引上線の占有を「作業」、列車の、駅への着から発までの番線の占有と移動を一つの「プロジェクト」、番線と引上線を「資源」とみることによって、ある種の有限資源プロジェクトスケジューリング問題 (Resource Constrained Project Scheduling Problem, 以下、RCPSP と略記)⁽²⁾ ととらえることができる。

近年、スケジューリング問題に対して、シミュレーティドアニーリング、タブーサーチ、遺伝的局所探索などの局所探索の有効性が注目されている⁽³⁾⁽⁴⁾。例えば、RCPSPの特別な場合であるジョブショップスケジューリング問題に対しても局所探索が有効であることが示されており⁽⁵⁾⁽⁶⁾、本論文でも、局所探索を用いて解くことを検討する。

一般に、局所探索を用いたアルゴリズムを考える場合、近傍をどのように定めるか、および近傍内でどのような探索を行うかが重要である。しかしながら、構内入換計画には、第2章で詳述するように、

- ① 問題を解く過程において問題自体を動的に変化させざるを得ないこと
- ② 作業の順序だけでなく作業の実行時刻までを決定する必要があるので探索空間が大きくなること

など通常のスケジューリング問題にはない特徴がある。従って、従来の近傍空間の考え方や探索アルゴリズムをそのまま用いることはできない。

本論文では、構内入換計画を、資源の割当て問題と資源の使用時刻決定問題の二つに分離する。具体的には、作業実行時刻を陽に考えない探索空間の中で局所探索を実施し、そこで得られた解候補に対して、作業実行時刻を決定してその評価を行う、という二段階の探索手法を提案する⁽⁷⁾。前者の資源割当て問題に対しては、構内入換計画をある種の PERT ネットワーク (入換計画ネットワーク) で表現すると共に、それに対する変形オペレータによる近傍空間 (1-オペレータ近傍) を定義し、その中で入換計画ネットワーク中の制約違反箇所のみ注目した効率の良い局所探索を実行する。後者の時刻決定問題の解は、入換計画ネットワークに対する PERT 計算の結果として得られる。

本アルゴリズムの特徴は次のとおりである。

- (1) 資源の割当て問題と使用時刻決定問題を分離することにより、探索空間を大幅に小さくすることができた。
- (2) PERT で入換計画を表すことにより、常に実行可能解が得られるので、制約を守るように時刻を決定するプロセスを意識する必要がなくなった。
- (3) ネットワークの変形操作による近傍空間を導入した。これにより、従来の作業順序の入換などによる近傍空間の定義では対処できない、問題解決過程で動的に変化する問題への対処が可能になった。
- (4) アルゴリズムの中では、初期解の作成部分を除いて、駅に固有な条件や作成知識は一切用いていないため、各種の配線条件やダイヤに対して適用可能な、汎用的なアルゴリズムとなっている。

以下、第2章では、構内入換計画の概要とスケジューリング問題としての特徴を述べる。第3章では、構内入換計画に対する確率的局所探索と PERT を組み合わせたアルゴリズムを導入する。第4章では、現実の列車ダイヤに対する実験結果を紹介し、本アルゴリズムが良好な結果を与えることを実証する。

2. 駅構内入換計画

〈2・1〉 駅構内入換計画とは 図1に示すような配線をもつ駅に対する入換計画の例を図2に示す。この図は作業ダイヤ図と呼ばれ、横軸方向の時間の経過にともなう、列車の駅内での移動作業のスケジュールを表現している。

図1の配線において、番線1から番線3は、列車が駅外から直接到着できる箇所 (番線) である。それに対して、上り引上線、下り引上線は、到着した列車が折返しになる

図 1 駅の配線の例

Fig. 1. An example of track layout in a station.

図 2 入換計画の例

Fig. 2. An example of train shunting schedule.

場合などに、一時的にその列車を留置するために使用される箇所（引上線）である。番線 4 は、ホームがないために列車の着発線としては使用されず、引上線と同様に、列車の一時留置のために使用される番線で、留置用番線と呼ぶ。更に、A、B のような駅外の線路上にある箇所を入換のために使用することがあり、これを本線入換箇所という。引上線と留置用番線、本線入換箇所は、いずれも入換のために使用される箇所であるので、本論文ではこれらをまとめて引上線と呼ぶ。

列車を、番線と引上線相互間、あるいは、引上線相互間で移動させることを、入換と呼ぶ。到着列車の着番線と発列車の発番線が異なる場合や、着番線と発番線が同じであっても、着時刻と発時刻の間にその番線をほかの列車が使用する場合には、入換が必要となる。

更に、いったん引上線に移動させた列車であっても、その引上線をほかの列車が使用せざるを得ない場合（ほかに空いている引上線がないなどの理由による）には、更に別の引上線に入換を行う。これを 2 段入換と呼ぶ。

列車の、駅への到着時刻、発車時刻、到着番線、発車番線は、あらかじめ列車ダイヤとして定められており（列車ダイヤで定められたこれらの時刻、番線をそれぞれ、計画着時刻、計画発時刻、計画着番線、計画発番線と呼ぶ。またこれらを総称して、それぞれ計画時刻、計画番線と呼ぶことがある）、それを条件として構内入換計画を作成する。

具体的には、入換が必要である列車に対して、

- ・ どの引上線に入換を行うか
- ・ 各々の入換に対する、入換実行時刻（番線から引上線への発時刻・着時刻、引上線から番線への発時刻・着時刻）を決定することが、構内入換計画作成の目的である

〈2・2〉 構内入換計画の制約 構内入換計画作成にあたっては、次のような制約を考慮しなければならない。

- (1) 列車ダイヤに関する制約
  - ・ 列車ダイヤで定められた計画番線、計画時刻を守らなければならない
- (2) 設備に起因する制約
  - ・ 進路の有無：移動前の地点と移動後の地点の間に物理的な経路が存在しなければならない
  - ・ 引上線の有効長：引上線の長さには、制限があるため、収容できる列車の両数には、限りがある
  - ・ 引上線の競合：一つの引上線には、1 編成の列車しか収容しない
- (3) 時間に関する制約
  - ・ 番線、引上線での停車時間：番線や引上線では、乗客の乗降や車内点検のために、ある定められた時間以上の停車時間（最小停車時間）を確保しなければならない
  - ・ 入換時間：番線と引上線との間の移動時間（入換時間）は、移動の経路ごとに定められているある一定値（駅によって、場所によって異なるが、おおむね

2 分程度）でなければならない。これは、この時間が短かすぎると物理的に到着不可能であり、長すぎるとその進路を支障する時間が長くなるためである。進路支障時間：鉄道の駅においては、複数の進路が交差する場合がある。図 1 においては、番線 1 から上り方向に出発する進路と、上り引上線から番線 2 への進路が互いに交差している。このような場合、これらの進路上での入換を同時に実行することはできない。それらの進路上での入換は、分岐器が転換する時間（これを進路支障時間と呼ぶ）だけの間隔をおいて実施しなければならない。また、本線入換箇所を使用する場合には、駅外からの着列車・駅外への発列車との競合を避けるために、やはりそれらとの間に一定の時間間隔（これも進路支障時間と呼ぶ）をおいて、入換を実施しなければならない。これらは、保安上絶対に守らなければならない制約である。

入換時刻の決定に際しては、進路支障時間の考慮はきわめて重要である。駅外へ出発する列車や、駅に到着する列車に対して、入換による進路支障が発生すると、それらの列車は、計画時刻を守れなくなるからである。

〈2・3〉 構内入換計画の評価基準 前節で述べた制約のうち、列車ダイヤと入換時間以外の制約は、物理的な条件に起因するため、緩和不可能である。列車ダイヤについては、守れるにこしたことはないが、どうしても守れない場合には、その修正件数は少ないほうが望ましい。入換時間については、長くなるほうに限り緩和可能ではあるが、もちろん、あまり長くなることは好ましくない。また、不要な入換は、エネルギーの無駄であるので、入換回数はなるべく少ないほうが良い。

以上まとめると、構内入換計画に対する評価基準は、

- ・ 極力、計画着発時刻を守っていること
- ・ 極力、各入換の入換時間があらかじめ定められた値に一致していること
- ・ 入換回数なるべく少ないこと

ということになる。

〈2・4〉 有限資源プロジェクトスケジューリング問題としての構内入換計画問題 構内入換計画問題は、ある種の有限資源プロジェクトスケジューリング問題と考えることができる。しかしながら、通常扱われる有限資源プロジェクトスケジューリング問題と比較して、次のような特徴をもつ。

- (1) プロジェクトを構成する作業の数が所与ではなく、問題解決の過程において、動的に変化させる必要がある。これは 2 段入換を考慮する必要があることに起因する。
- (2) プロジェクトを構成する作業の所要時間が所与ではなく、問題解決の過程において、これを動的に変化させる必要がある。すなわち、解として、作業の

順序だけでなく、実行時刻までを決定する必要がある。これは、番線の競合や進路支障を避け、かつ計画時刻を守るように、入換時刻を決定しなければならないことに起因する。

- (3) 通常の RCPSP では、作業と作業の間の時間間隔については、制約がない。しかし、構内入換計画問題では、作業と作業の間の時間がある一定の値にしなければならないケースが存在する。これは、入換時間がある定められた値にしなければならないことに起因する。
- (4) 対象プロジェクトの数が多い。駅の規模によって異なるが、数十本から数百本程度の列車が関係する。

3. 確率的局所探索と PERT を組み合わせた駅構内入換計画作成アルゴリズム

〈3・1〉 基本的考え方 一見制約を満たしていない入換計画でも、入換時刻を調整することにより、制約を満たす入換計画を得ることができる場合がある。例えば、図3に示す入換計画は、引上線で列車が競合しているため、このままでは、制約を満たしていない。しかし、引上番線から番線2への入換時刻を早め、番線3から引上番線への入換時刻を遅くすることによって、競合を解消することができる。つまり、時刻以外の引上線の使用計画は同一であっても、使用時刻を変えるだけで結果が制約を満たしたり、満たさなかったりする。

このことは、構内入換計画では、各作業の順序だけではなく、各作業の実行時刻を制約を満たすように決定する必要があることを意味する。よって、次の二つの問題点を解決する必要がある。

図 3 引上番線で列車が競合する入換計画
Fig. 3. A conflicting shunting schedule.

- Step 0 初期解生成：ヒューリスティクスによって初期解 x を求め、 x を暫定解とする。 $k=0$ とする。
- Step 1 近傍探索： x の近傍内の探索を行い、解候補 $x_1, x_2, \dots, x_m$ を生成する。 $k=k+1$ とする。
- Step 2 評価： $x_1, x_2, \dots, x_m$ に対する評価値を計算する。その中に解があれば、それを出力しておわり。 $x_1, x_2, \dots, x_m$ の中に暫定解よりも良い解があれば、それを暫定解とする。
- Step 3 選択： $x_1, x_2, \dots, x_m$ の中から一つを選択し、それを x とし、Step 1 へ。ただし、 $k>L$ のときは、その時点での暫定解を x として、Step 1 へ。

手続き 1 アルゴリズムの全体構成
Procedure 1. Outline of the algorithm.

- (i) 入換時刻の決定までを探索の中に組み入れると探索空間が非常に大きくなる
- (ii) 多数の列車相互に存在する制約を考慮しつつ、各列車の入換時刻を合理的に決定していくことは非常に難しい

これらに対して、本論文では、次の考え方からなるアルゴリズムを提唱する

- 入換計画問題を資源の割当問題（どの引上線を使用するかと、その使用順序を決定する問題）と、資源使用時刻の決定問題（入換時刻を決定する問題）とに分離する。そして、引上線の使用計画を仮に決定した後、その条件のもとで、制約を満たすように入換実行時刻を決定することができるかどうかを探索する、という2段階の探索を行う
- 入換計画を一種の PERT ネットワーク（入換計画ネットワーク）で表現する。入換計画ネットワークに対する計算結果は、常に実行可能解を与えることが保証される。また、局所探索は、入換計画ネットワークに対して変形オペレータを適用することで実行される

このアルゴリズムの全体構成を、手続き1に示す。アルゴリズムの全体構成は、局所探索法に基づくが、各ステップの探索において複数の解候補を生成してそこから一つを選択すること、あるステップ数 L を進んでも解が得られない場合には、その時点での暫定解にもどって探索を続行するという特徴がある。なお、 L の値は、問題の複雑さに応じてヒューリスティックに決定する。各ステップの詳細を以降に示す。

〈3・2〉 初期解生成 ヒューリスティクスによって入換番線と入換時刻を決定し、初期解を一つ生成する。ここで用いるヒューリスティクスは、ごく単純なもので、

- 計画着番線と計画発番線の組合せから、使用すべき引上線を決定する
  - 入換時刻は、最小停車時分のみから決定する
- つまり、この段階では引上線での列車の競合に関しては一切考慮していない。

〈3・3〉 近傍探索

(1) 構内入換計画の PERT 表現
構内入換計画を次のようにして PERT ネットワークで

表 1 アークの種類
Table 1. Arc types.

種別	内容	重み
運用	ある列車の番線占有の着ノードと発ノードの間	最小停車時間
入換	異なる番線・引上線間の発ノードと、着ノードの間	入換時間
番線	同一番線・引上線上の発ノードと着ノードの間	続行時隔
進路支障 計画時刻	支障する進路を使用するノード間 開始ノードと、計画時刻をもつノード間	進路支障時間 計画時刻

図 4 入換計画ネットワークの例
Fig. 4. An example of shunting schedule network.

表現する。これを、入換計画ネットワークと呼ぶ。入換計画ネットワークは、 (N, A) で表される。ここで、 N はノードの集合、 A はアークの集合で、 $A \subset N \times N$ である。アークには、重み $w \geq 0$ が付されている。この意味は、次のとおりである。

- ・ ノードは、列車の番線・引上線の着事象または発事象を表す（それぞれ、着ノード、発ノードという）。ほかに、仮想的な、開始ノードがある
- ・ アークは、ノード間の時間的実行順序を表す。アークの重みは、始点ノードの事象と終点ノードの事象との間に最低限必要な時間を示す。アークには、表 1 に示す 5 種類が存在する。

入換計画ネットワークは、その時点での解候補がもつ入換時刻をもとにして決定された作業実行順序に従って構成される。図 2 に対する入換計画ネットワークを図 4 に示す。（図 4 のノード中の文字は、列車-ノード番号-着発区分を示す。着発区分は、A が着、D が発である。）

(2) 入換可能時刻計算

解候補の入換ネットワークに対して、各ノードの実行可能時刻を計算する。計算方法は通常の PERT の計算と同様であるが、通常の計算方法そのままでは入換時間が守られない場合があるため、入換アークに対しては、バックトラックを行って、物理的に不可能でない限り入換時間を守るような結果が得られるようにしている。これにより、時刻計算結果として、設備に関する制約、入換時間以外の時間に関する制約をすべて守った、物理的に実行可能な入換計画が得られる。

(3) 1-オペレータ近傍

ジョブショップスケジューリング問題に対する近傍探索を行う場合、近傍として、クリティカルブロック上の隣接する作業の処理順序の入換による近傍⁽⁸⁾⁽⁹⁾、クリティカルブロック内の作業をそのブロックの先頭、あるいは最後へ

表 2 ネットワーク変形オペレータ
Table 2. Network transformation operators.

オペレータ	操作の内容
引上線変更	引上番線の変更
2 段入換	2 段入換の設定
2 段入換解消	2 段入換の解消
順序変更	隣りあう二つの占有の順序変更
進路支障	進路支障アークの向きを反転

- Step 0 ノードの選択：解候補の入換計画ネットワークの中で、計画時刻を守っていないノード、入換時間を守っていないアークの終点のノードから、一つをランダムに選ぶ。これを、 x とする。
- Step 2 ネットワークの変形
- ・ 計画時刻を守っていないノードの場合：計画時刻を守っているノードの集合を Y とする。ノード x から、クリティカルパスを逆にたどって最初にであったノード $y \in Y$ に至るパスの集合を、 $Cr(x)$ とする。 $Cr(x)$ の構成要素であるアーク一つずつに対して、そのアークの種別ごとに表 3 に示す変形オペレータを適用することにより、それぞれ一つの解候補を得る。
  - ・ 入換時間を守っていないノードの場合：入換時間を守っていないアークの両端のノードに対して、引上線変更オペレータを適用して、解候補を生成する。

手続き 2 近傍内の探索
Procedure 2. Local search algorithm.

の移動による近傍⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾などが用いられている。しかし、構内入換計画においては、2 段入換を考慮しなければならないことから、問題自体が動的に変化する。よって単純な作業順序の入換だけでは対処できない。そこで本論文では、入換計画ネットワークの変形操作による近傍という考え方を導入する。まず、入換計画ネットワークに対するネットワーク変形オペレータ（以下、変形オペレータ）を、表 2 のように定義する。そして、これを用いて、入換計画

表 3 アーク種別ごとのネットワーク変形オペレータ
Table 3. Network transformation operators.

アーク種別	適用オペレータ
運用アーク	引上線変更, 2 段入換
入換アーク	引上線変更
番線アーク	順序変更
進路支障アーク	進路支障

ネットワーク P に対する 1-オペレータ近傍 $Nb(P)$ を次のように定義する。

$Nb(P) = \{P \text{ に対して, 変形オペレータを 1 回適用して得られる入換計画ネットワーク} \}$

(4) 近傍内の探索

近傍内での探索を行い、解候補（複数）を生成する。ただし、ここでは、1-オペレータ近傍内すべてを探索するのではなく、解を導出する可能性の高い部分のみを探索する。詳細を手続き 2 に示す。

〈3・4〉 評価 計画時刻を守っていないノードの数、入換時間を守っていないアークの数、入換回数の観点から解の評価を行う。評価値は次のステップで用いる。制約をすべて守っていれば無駄な 2 段入換を解消して解とする。

〈3・5〉 選択 近傍内で探索された複数の解候補から、一つの解候補を選択する。選択の方法は、遺伝的アルゴリズムで用いられる、評価値を基にしたルーレット選択による。

4. 実行結果と考察

〈4・1〉 実行結果 現実のダイヤデータを用いて試行を行った。対象とした駅は、番線数 6、留置用番線数 2、引上線数 2、本線引上箇所数 2、合流する線区の数 3 の駅である。この駅は典型的な中規模駅であって、全国の大多数の駅は、この駅と同等またはそれ以下の規模である。この駅の配線を図 5 に示す。対象時間帯は、この駅の最繁時間帯である、6:00~10:00 (ケース 1) と 16:00~18:00 (ケース 2) で、対象となった列車本数は、それぞれ、98 本、40 本である。

ケース 1、ケース 2 に対するそれぞれ 10 回の試行結果を表 4、表 5 に示す。探索数は、探索の対象となった解候補の数、Step は、手続き 1 の Step 1~Step 3 を何回繰り返したかを示す。また、計画時刻は、計画時刻を守っていない列車の着発の数、入換時間は、入換時間を守っていない入換の回数、入換回数は、入換の総回数を示す。なお、手続き 1 における L の値は 15 としてプログラムを実行した。いずれの場合も、制約をすべて満たした解を見出すことに成功している。ケース 1 に対する実行結果の 1 例を図 6 に示す。なお、これらの解はおおむね数分で得られた (Pentium 166 MHz, メモリ 80 MB)。

〈4・2〉 考察

(1) 計 20 回の試行において、いずれも、実用とすることに足る解を得ることに成功している。また、実行時間も十

図 5 試行に用いた駅の配線図
Fig. 5. Track layout of the station used for experiments.

表 4 実験結果 (ケース 1)
Table 4. Results of experiments (Case-1).

試行	探索数	Step	計画時刻	入換時間	入換回数
1	40	9	0	0	28
2	21	7	0	0	28
3	21	7	0	0	28
4	73	17	0	0	28
5	26	8	0	0	28
6	26	8	0	0	28
7	31	9	0	0	28
8	42	9	0	0	28
9	90	17	0	0	28
10	33	9	0	0	28

表 5 実験結果 (ケース 2)
Table 5. Results of experiments (Case-2).

試行	探索数	Step	計画時刻	入換時間	入換回数
1	50	6	0	0	18
2	11	2	0	0	18
3	27	6	0	0	18
4	49	6	0	0	18
5	37	9	0	0	18
6	12	2	0	0	18
7	11	2	0	0	18
8	36	8	0	0	18
9	27	6	0	0	18
10	12	2	0	0	18

図 6 実行結果の例 (ケース 1)
Fig. 6. An example of results of experiments.

図 7 解探索の推移
Fig. 7. Search results.

分実用的な値である。

(2) ケース 1 における試行 4 と試行 9 においては、 $L=15$ ステップ内では、制約をすべて満たした解が発見されず、暫定解に戻って探索を再開しているが、その後はいずれも 2 ステップで解を得ている。このことは、一定のステップまで探索を続けた後、暫定解に戻って探索を再開するという戦略の有効性を立証していると考えられる。

(3) 図 7 に、ケース 1 における試行 2 (最短で解が発見された)、試行 9 (最長で解が発見された)、試行 5 (その中間であった) について、各ステップで選択された解候補中での、計画時刻を守れないノードの数の推移を示す。このグラフから、次ステップに渡す個体として、各ステップの最良の解候補を選択することは得策ではなく、評価値が悪い個体を選択したほうが効率が良い場合があることがわかる。これはほかの試行についても同様であった。このことは、次ステップに渡す解候補を複数の解候補の中から評価値に応じた確率で選択するという方式 (ルーレット選択) が有効であることを示している。

5. おわりに

駅構内入換計画作成問題に対して、確率的局所探索と PERT を組み合わせたアルゴリズムを提唱した。

本アルゴリズムでは、時刻の要素を除いた番線使用計画を局所探索の探索空間とし、得られた解候補に対して PERT を用いて時刻の決定を行うという、2 段階の探索を実施している。また、局所探索のための近傍の定義には、PERT ネットワークに対する変形オペレータを用いる考え方を導入した。合わせて近傍内の探索には、クリティカルパスなどに着目した効率の良い方法を提唱した。

その結果、効率的なアルゴリズムを構築することが可能になり、実用規模の列車ダイヤデータに対して、実用的な解が得られることを実証した。

本アルゴリズムは、初期解の生成に簡易なヒューリスティックスを用いた以外は、駅固有の作成知識を一切用いておらず、配線と列車ダイヤのみから解を生成可能な汎用的なアルゴリズムとなっている。

なお、今後の課題として、より大規模な駅に対する本アルゴリズムの有効性の検証がある。

(平成 10 年 8 月 24 日受付, 同 10 年 10 月 16 日再受付)

文 献

- (1) 脇田・富井・ほか: 鉄道とコンピュータ, (平 10) 共立出版
- (2) 鍋島: スケジューリング理論, (昭 49) 森北出版
- (3) 吉川: 「制約最適化技術のスケジューリング問題への応用」, 人工知能学誌, 13, No. 3 (平 10)
- (4) 茨木: 「組合せ最適化とスケジューリング問題: 新解法とその動向」, 計測自動制御学誌, 34, No. 5, (昭 60)
- (5) 山田・中野: 「遺伝的局所探索法によるジョブショップスケジューリング問題の解法」, 情報処理学論文誌, 38, No. 6 (平 9)
- (6) 山田・中野: 「確率的探索と確定的探索の組合せによるジョブショップスケジューリング問題の解法」, 情報処理学論文誌, 37, No. 4 (平 8)
- (7) 富井・周・福村: 「確率的局所探索と PERT を組合せた駅構内入換計画作成アルゴリズム」, 情報処理学会情報システムと社会環境研資 98-IS-68-6 (平 10)
- (8) E. Taillard: "Parallel Taboo Search Techniques for the Job-shop Scheduling Problem", *ORSA, J. on Comput.*, 6, No. 2 (1994)
- (9) P. V. Laarhoven, E. Aarts, and J. Lenstra: "Job Shop Scheduling by Simulated Annealing", *Oper. Res.*, 40, No. 1 (1992)
- (10) M. Dell'Amico, and M. Trubian: "Applying Tabu Search to the Job-shop Scheduling Problem", *Annals of OR.*, 41 (1993)
- (11) P. Brucker, B. Jurisch, and B. Sievers: "A Branch Bound Algorithm for the Job-Shop Scheduling Problem", *Discrete Applied Mathematics*, 49 (1994)

富 井 規 雄 (正員) 1954 年 1 月 14 日生。78 年 3 月京都大学工学部工学研究科情報工学専攻修了。同年日本国有鉄道入社。87 年より、(財)鉄道総合技術研究所。主として、鉄道輸送におけるスケジューリングの研究に従事。現在、同所輸送システム開発推進部主幹技師。情報処理学会, 人工知能学会会員。

周 利 剣 (非会員) 1971 年 10 月 30 日生。96 年 5 月西南交通大学大学院修士課程修了。同年(財)鉄道総合技術研究所入所。主として、構内入換計画の研究に従事。現在、同所輸送システム開発推進部技師。

福 村 直 登 (非会員) 1963 年 9 月 18 日生。88 年 3 月早稲田大学大学院工業経営学分野修了。同年(財)鉄道総合技術研究所入所。主として、数理計画法の輸送業務への適用研究に従事。現在、同所輸送システム開発推進部主任技師。日本 OR 学会, 情報処理学会会員。