

駅構内作業計画作成支援システムの開発

福村 直登*

Development of the Algorithm for the Station Shunting Scheduling

Naoto FUKUMURA

Station shunting scheduling is one of the important schedules to prepare train diagrams. Currently expertise employees plan the said schedule; however, it takes a considerable time and labor force. Therefore, we are developing a support system to plan the schedule. In addition, we are studying an algorithm capable of planning the shunting scheduling automatically. In this paper, we describe an outline of station shunting schedule, and explain concerning the support system and the algorithm, which we developed and studied.

キーワード：駅構内作業計画, PERT, 確率的探索アルゴリズム

1. はじめに

多くの列車が始終着となるターミナル駅では、列車の転線（入換え）、編成の分割・併合、列車留置、車内清掃・車両検査など、列車運行上必要な各種作業が行われるが、これらの作業を効率よく行うために、駅構内作業計画という作業手順を事前に決めている。従来から、駅構内作業計画は、各駅の担当者の手作業により作成されてきたが、時間がかかる、間違いが生じる等問題が多く、鉄道事業者から業務改善策が強く要望されている。

そこで、今回、パソコン（PC）を用いた駅構内作業計画作成支援システム、及び計画作成アルゴリズムを開発したので、本論文でその概要を紹介する。

2. 駅構内作業計画の概要

最初に駅構内作業計画と、その制約条件、評価尺度等の概要を述べる。

2.1 駅構内作業計画とは

駅構内作業計画とは、駅構内における列車・車両の構内番線の使用スケジュール、入換え、分割・併合、車両の検査・清掃（車両整備）などの作業スケジュールと、それら作業に従事する駅要員の作業スケジュールを定めたものをいう。鉄道の輸送計画は、列車運転計画（以下、列車ダイヤ）、車両運用計画、乗務員運用計画をはじめとする多くの計画から構成されるが¹⁾、構内作業計画もその重要な構成要素の一つである。

駅構内作業計画を示した図表を「構内作業ダイヤ図」、

または単に「作業ダイヤ図」と呼ぶ。図1に作業ダイヤ図の例を示す。図の横軸は時刻を表す。作業ダイヤ図上部には当該駅の構内番線の使用スケジュールと作業スケジュールを記載し、本論文ではこの部分を「構内ダイヤ」と呼ぶ。また、作業ダイヤ図下部には当該駅の駅要員の作業スケジュールを記載し、本論文では「要員ダイヤ」と呼ぶこととする。

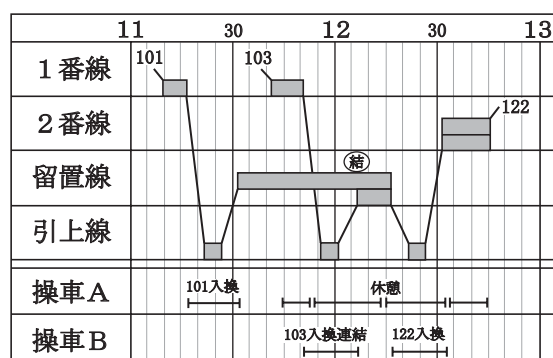


図1 構内作業ダイヤ図の例

2.2 構内作業計画作成に関わる制約条件

駅構内作業計画作成にあたっては、列車ダイヤに起因する条件や、物理的・資源的な条件等を考慮しなければならない。以下に主な制約条件を示す。

2.2.1 輸送計画に起因する制約条件

- (1) 列車ダイヤで定められている列車の着発時刻、及び着発番線の指定があるときはそれを守ること。
- (2) 車両運用計画で定められている折返し列車の指定、編成両数、車両整備の実施指示を守ること。
- (3) 旅客乗降、貨物積卸し、車両整備、乗務員の運転台交換等に要する在線時間を確保すること。

* 輸送情報技術研究部（運転システム）

特集：輸送情報技術

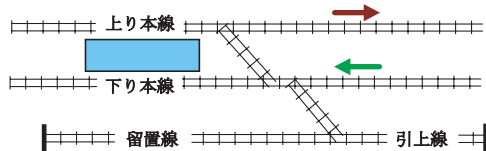
2.2.2 番線に関わる制約条件

- (1) 各番線の長さ（有効長）を超えた列車を在線させることはできない。
- (2) 番線用途、設備等の条件により、列車が入線できる番線が限定されることがある（例：特急専用番線、荷役設備や車両検査用設備による制限など）。
- (3) 電車・電気機関車は、架線がある番線を使うこと。
- (4) 連結していない複数の編成を同時に在線させる場合、当該番線の同時在線編成数の上限を守ること。

2.2.3 転線ルートに関わる制約条件

- (1) 入換え前後の番線間に転線ルートが存在すること。
- (2) 電車・電気機関車は、架線がある転線ルートを使うこと。
- (3) 複数編成の在線が許容されている番線、及び併合を行う場合を除き、入換え先の番線に他の編成が在線していないこと。
- (4) 複数編成が在線できる番線において、入換えの進行方向に他の列車・車両が在線していないこと。
- (5) 定められている転線時分を守ること。
- (6) 定められている交差支障時分を満たすこと。

なお、交差支障とは、異なるルートで同一の転てつ機を使用する場合、同時に列車を移動させられない事象のことであり（図2）、このとき一定時間以上を空けなければ列車を移動できない。この時間間隔を「交差支障時分」と呼ぶ。



- ・上り本線→引上線ルートと、下り本線到着ルート間には、交差支障あり。
- ・引上線→下り本線ルートと、上り本線出発ルート間には、交差支障なし。

図2 交差支障の例

2.2.4 駅要員に関わる制約条件

- (1) すべての駅作業に、担当する駅要員を割り当てること。また、担当者の勤務時間内で割り当てること。
- (2) 担当者が作業箇所間を移動するための時間、作業を行うための準備時間を確保すること。
- (3) 各駅要員に、所定の休憩時間を付与すること。

2.3 駅構内作業計画の評価尺度

駅構内作業計画の評価基準を一意に定義することは難しいが、以下のような計画が望ましいとされている¹⁾。

- (1) 入換え作業の回数は少ないほうがよい。
- (2) 旅客乗降、貨物の荷扱い、車両整備のための在线时间長いほうがよい。
- (3) 作業担当者が作業箇所間を移動するための時間は、ある程度の余裕があることがよい。

2.4 作業計画作成業務に関わる問題点

「はじめに」で述べたとおり、手作業で駅構内作業計画を作成しているため、以下の問題が生じている。

- (1) 計画作成に時間を要する。

データの転記と修正、計画内容の検討、業務用帳票類の作成など、多大な時間を要している。

- (2) ヒューマンエラーによる計画ミスが発生する。

誤記、見落とし、勘違い等、人間系のミスがしばしば発生するため、その防止策にも労力を費やしている。

- (3) 作成のノウハウが担当者に依存する。

計画作成には、各駅固有の事情を把握している必要があり、知識と経験がないと良い計画は作れない。また、そのため、技術継承が難しいという問題もある。

2.5 問題点解決のためのアプローチ

前節で述べた問題点を解決するためには、情報技術を活用し、以下の2つの機能を持つ業務支援システムを開発する必要があると考えられる。

- (1) 計画作成支援システム（計画作成支援機能）

現在、紙面上で行っている作業をPC上で行えるようにするためのシステムを開発する。計画内容は従来通り担当者が作成するが、付随作業の多くを効率化できるので、全体として作業時間を大幅に短縮できる。

- (2) 計画作成アルゴリズム（計画案自動提案機能）

計画作成支援機能を高度化するための計画作成アルゴリズムを開発し、支援システムに追加する。これにより、

- ・担当者は計画作成条件データを入力し、システムはその条件を満たした計画案を提示する。

- ・担当者は計画案の適否を判断し、不適当と判断した場合は、条件を修正してシステムに再作成させる。

という手順を繰り返すことで計画を完成させるという業務形態に変わると予想される。

以下、3章で計画作成支援システムの概要を、4章で計画作成アルゴリズムの概要を述べる。

3. 駅構内作業計画作成支援システム（“Suparc”）

業務効率化の第1ステップとして、PC上で駅構内作業計画を作成するためのシステム（愛称名 “Suparc”）を開発した²⁾。本システムの主な機能を以下に示す。

- (1) 計画作成機能

PCの画面上で、列車の入換えや分割・併合、車両整備等の作業スケジュール、及び駅要員への作業割当ての作成、修正を行う機能である。構内作業ダイヤ図をディスプレイ上に表示し、計画内容の設定や修正をマウスとキーボードにより簡単に指定できるため、紙面を用いた作業と比較して作業時間を大幅に短縮できる。

Suparcの計画作成画面例を図3に示す。

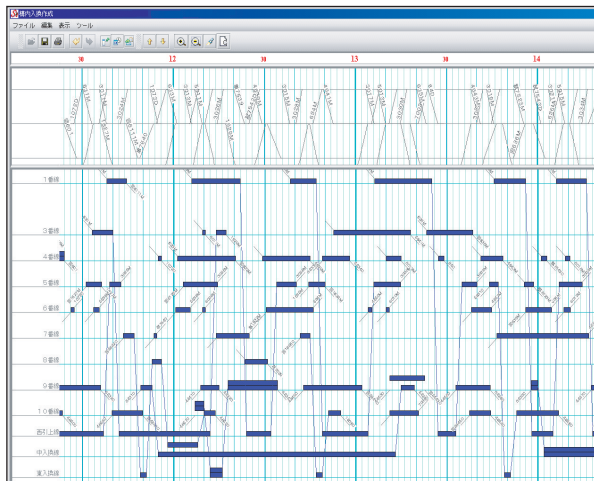


図3 Suparc 画面例

(2) 計画内容チェック機能

作成した計画の内容が、2.2 節に示した条件を満たしているかどうかをチェックする機能である。チェック自体は難しいものではないが、とくに交差支障時隔チェックは対象箇所が多く、人手では時間がかかる上、見落とすこともあった。この機能を使うことで、正確かつ短時間にチェックを行える。

なお、構内配線が複雑な大規模駅では、交差支障時隔チェック用データの作成も大変な作業となるため、連動図表から交差支障箇所を抽出するプログラムを別途準備し、作業負荷の軽減を図っている。

(3) データ入出力機能

構内作業計画作成で必要となる当該駅の列車運転時刻と車両運用計画データは、従来は、担当者が時刻表等の冊子類から抜粋、転記していたが、列車ダイヤ作成支援システム、車両運用計画作成支援システムから Suparc にデータを取り込めるため、転記等の作業負荷を軽減することができる。

また、計画作成完了後、構内作業ダイヤ図に加えて、作業担当者向けの作業手順表などの帳票を作成しているが、これらもシステムで作成できるようになる。

さらに、従来のダイヤ図出力プログラムでは、図中の文字や記号を一律のルールで出力するため、文字等の表記位置に重なりが発生し、担当者が一箇所ずつ手作業で修正する必要があったが、ダイヤ図上の記号類の重なりを排除するアルゴリズム³⁾を実装することで、さらなる作業負荷の軽減を実現した⁴⁾。

4. 駅構内作業計画作成アルゴリズム

本章では、駅構内作業計画作成業務をより強力に支援するための計画作成アルゴリズムについて述べる。

4.1 アルゴリズム開発の方針

駅構内作業計画作成アルゴリズムに関する従来の研究では、列車ダイヤと車両運用計画をもとにして構内作業計画全体を新規に作成すること（「白紙改正」という）を目的としている（例えば文献 5), 6), 7) 等）。

しかし、計画作成の実務者に対してヒアリング調査を行ったところ、構内作業計画の白紙改正は、前提である列車ダイヤ自体が白紙改正されたとき、もしくは構内の線路配線を大きく変更したときに行う程度で極めて稀なことであり、通常のダイヤ改正では、列車ダイヤは小幅な変更であることが多いため、構内作業計画を白紙改正する意義は小さいとのことであった。さらに、作業手順を大幅に変えてしまうとミスを起こしやすいため、事故防止の観点から、極力、現行の作業手順は変えたくないという強いニーズがあることもわかった。

そのため今回開発するアルゴリズムは、使用機会が限られる白紙改正ではなく、列車運転時刻の変更や小規模な配線変更などの条件データが指定されたとき、現行列車ダイヤに対する構内作業計画（以下、「ベース計画」という）をもとにして実行可能なベース計画の修正案を PC で作成、提示できるようにすることを目標とした。

4.2 駅構内作業計画のモデル化

駅構内作業計画作成アルゴリズムの開発にあたり、駅構内作業計画を表現するモデルを作成する必要がある。今回、先行研究⁵⁾と同じく、大規模プロジェクトの計画作成・工程管理を行うために開発された PERT 手法⁸⁾にもとづくモデル化を採用したが、構内作業計画をより精緻に表現できるよう、全面的な見直しを行った。

4.2.1 構内ダイヤのモデル化

駅構内における列車の着発、及び各作業の開始と終了事象（以下、「イベント」と記す）をノード（点）で表現し、各ノードは、対応するイベントの時刻を属性として保持する。また、イベント間の順序関係をアーク（矢線）で表現し、属性としてイベント間の時間を保持する。なお、PERT 手法では矢線を「ジョブ」、または「アクティビティ」と呼ぶが、本論文ではグラフ・ネットワーク理論の用語である「アーク」を用いることとする。

構内ダイヤを表すために導入したノードとアークには、以下の種類がある。

(1) 開始ダミーノード

PERT の出発点ダミーノードに相当し、構内作業計画の計画作成起点時刻を示すために導入する。

(2) 列車到着・出発ノード

列車の当該駅への到着イベント、及び当該駅からの出発イベントに対し、それぞれノードを設定する。

(3) 番線在線開始・終了ノード、番線在線アーク

列車の番線在線の開始・終了イベントに対し、それぞ

特集：輸送情報技術

れノードを設定する。なお、分割・併合作業により在線編成数が変化するとき、それに対応してノードを追加する。また、在線開始ノードと終了ノードとの間に番線在線アークを設定し、在線時間を属性として保持する。

(4) 入換え作業アーク

入換え作業における発番線の在線終了ノードと着番線の在線開始ノード間にアークを設定することで、入換え作業を表す。また、属性として入換え所要時間を持つ。

(5) 駅作業開始・駅作業終了ノードと駅作業アーク

入換え作業を除く、荷扱い、分割・併合、車両整備等、各駅作業の開始・終了イベントに対してそれぞれノードを設定する。また、駅作業開始ノードと終了ノードとの間に駅作業アークを設定し、作業時間を属性とする。

(6) 作業順序アーク

番線在線と駅作業の間、もしくは複数の駅作業間の実施順序の条件を表すためにアークを設定する。順序関係を示すだけなので、時間は0とする。なお、入換え作業間の実施順序は交差支障で表現できるため、後述する交差支障アークを用いる。

(7) 番線使用順序アーク

同一番線には同時に複数列車が在線できないという条件を表現するために導入するアークであり、属性として、必要な使用時間間隔を保持することもできる。

(8) 交差支障アーク

列車の移動ルート間に交差支障があるとき、移動順序を表すアークを設定し、交差支障時隔を属性として持たせる。なお、交差支障があるルート間であっても、移動間隔が十分に空いている場合は、明らかに支障しないためアークは設定しない。

(9) 交差支障反転アーク

交差支障アークは先行の移動ルートと後続の移動ルート間に設定するが、この順序を入れ替えたアークも設定し、交差支障反転アークと呼ぶ。これは後述する作業ダイヤ変更処理のときに利用する。

(10) 開始時刻制約アーク

開始ダミーノードから、列車出発ノード以外のすべてのノード間にアークを設定し、属性として計画作成起点時刻から各ノードの時刻までの時間を保持する。このアークは、与えられるベース計画からの変更を極力避けるという前提を満たすために導入した。

4.2.2 要員ダイヤのモデル化

駅要員が従事する作業は、構内ダイヤに関わる作業とそれ以外の作業（「単独作業」と記す）とに分類できる。このうち、構内ダイヤに関わる作業については構内ダイヤモデルと関連付ける必要があり、また、単独作業を含めた作業実施順序も示す必要があるため、以下のノードとアークを導入する。

(1) 勤務開始ノード・勤務終了ノード

勤務開始（出勤）・勤務終了（退勤）イベントについて、各駅要員に対してそれぞれ1ノードを設定する。

(2) 単独作業開始・終了ノードと単独作業アーク

駅作業と同じく単独作業についても、各作業の開始・終了イベントに対するノード、及び両ノード間のアークを設定し、作業時間を属性として持たせる。

(3) 前準備・後始末ノード、前準備・後始末アーク

すべての駅作業、単独作業について、本体作業の準備着手イベントと片付け完了イベントを表すために、作業従事人数分の前準備ノード、後始末ノードを設定する。また、前準備ノードと本体作業開始ノード間に前準備アーク、本体作業終了ノードと後始末ノード間に後始末アークを設定し、前準備、後始末時間を属性とする。

(4) 移動アーク

駅要員が担当する作業の実施箇所間を移動する状況を表現するために、先行作業の後始末ノードと後続作業の前準備ノードとの間に移動アークを設定し、移動時間を属性とする。移動しない場合、時間は0とする。

上記のノードとアークにより、構内作業計画を正確にモデル化することが可能である。図1に示した構内作業計画をモデル化した例を図4に示す。煩雑になるので、交差支障アークと交差支障反転アークは除いた。

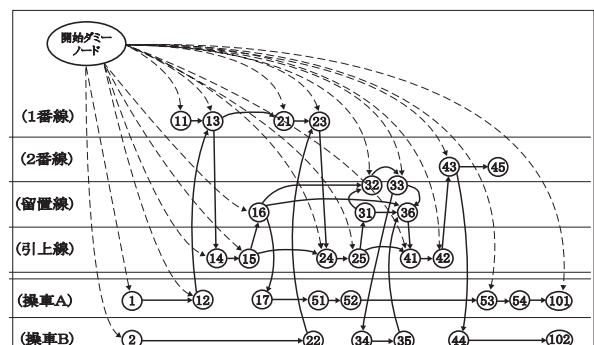


図4 構内作業計画のPERTネットワークモデル化例

4.3 構内作業計画作成アルゴリズム

前節に示したモデルに対して、PERT計算による実行可能性判定処理と、確率的探索手法による解探索処理を繰り返し実行させることで、構内作業計画を作成するアルゴリズムを構成した⁹⁾。本節でその内容を紹介する。

4.3.1 初期状態データの生成

ベース計画に対して、列車着発時刻の変更、入換え等の作業変更、駅要員の勤務時間の変更など、前提条件を入力して初期状態データを生成する。ベース計画は実行可能な計画であるが、前提条件に従って計画内容が変更されるため、初期状態の実行可能性は保証されない。

4.3.2 初期解作成処理

本アルゴリズムはPERT手法を応用することで計画の実行可能性を判定するが、この手法では時間要素の矛盾

しか検出できないため、有効長違反や転線ルート違反等、設備面の条件に違反している箇所をあらかじめ検出し、その違反が解消されるように初期状態データを修正して初期解を作成する。なお、初期解には時間要素の矛盾が存在するので実行可能解ではない。

修正方法には以下の3通りがある。

- ① 在線開始・終了時刻を変更することにより、複数編成が同一番線に在線している矛盾を修正する。
- ② 使用番線を変更することにより、在線可能な条件に反しているケースを修正する。
- ③ 在線終了時刻（または開始時刻）を変更することにより、入出線順序が違っている矛盾を修正する。

上記の修正が不可能なとき、入力された前提条件では設備面の条件を満たした計画を作成できないことを意味するので、関係する情報を出力して終了する。

4.3.3 PERT 計算による実行可能性の判定処理

作成した初期解をPERTでモデル化し、PERT計算を行うことで、その計画中の時間要素の矛盾解消と実行可能性の判定を行う。

- ① 開始ダミーノードをPERT計算の開始ノードとして、すべてのノードの最早作業開始時刻を算出する。
- ② すべての列車出発ノードにおいて、[ダイヤで定めた列車出発時刻] $\geq$ [最早作業開始時刻]であるとき、列車出発ノード以外の各ノードの時刻を、 $\min$ [ノード保持時刻, 最早作業開始時刻]とすることで、時間要素の矛盾が解消されて実行可能な計画となるので、その結果を出力して処理を終了する。
- ③ ②の条件を満たさない列車出発ノードがあるとき、当該列車は時刻通り出発できないことを意味するので、実行不可能解と判定する。このとき、PERT計算で得られるクリティカルパスから違反原因であるアークが特定できるので、解探索処理に移る。

4.3.4 確率的局所探索手法による解探索処理

前節で示した手順により、実行不可能の原因となっているアークは特定できるが、可能解とする方法はわからない。また、原因アークが複数存在するとき、どのアークが主要因かも特定できないため、原因アークの選択と計画内容の変更手段を乱数によって確率的に決定する、確率的局所探索手法を採用することとした。

計画内容の変更手段は、以下の4通りがある。

- ① 番線変更：列車の在線番線を、別の番線に変更する。
- ② 番線使用順序変更：番線を使用する順序（先・後）を入れ替える。
- ③ 交差支障反転：交差支障アークを、交差支障反転アークに変更する。
- ④ 担務変更：作業担当者を別の担当者に変更する。

この解探索処理によって計画内容を変更し、PERT計

算によって実行可能性を判定するという処理を繰り返すことで、実行可能な構内作業計画が作成できる。

開発したアルゴリズムの概要フローを図5に示す。無限ループに陥ることを防止するため、繰り返し回数の上限をあらかじめ設定しておき、その回数に達したときは計画作成失敗として終了する。この場合、原因アークとして検出された箇所を計画担当者に提示し、計画作成のネックとなっている箇所を見つけやすくしている。

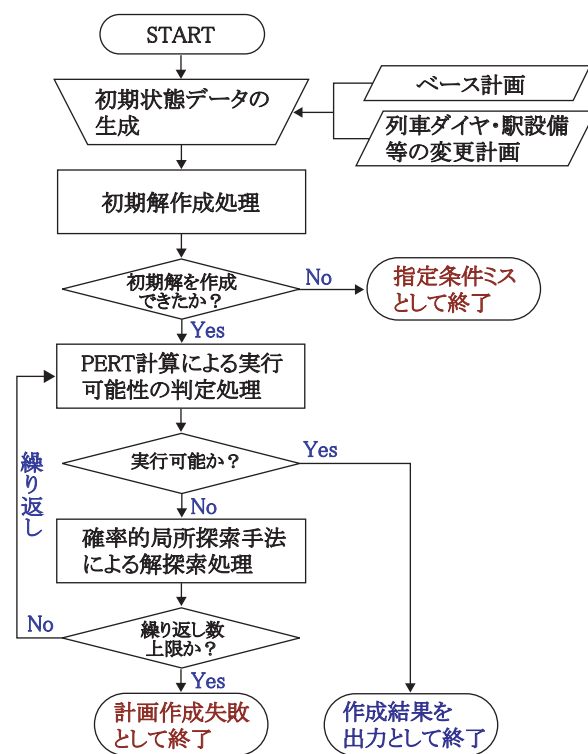


図5 構内作業計画作成アルゴリズムの概要フロー

4.3.5 3段階構成による解探索の効率化

前節までで開発したアルゴリズムの概要を示したが、実在する駅の構内作業計画作成問題に対して上記アルゴリズムを単純に適用すると、原因アークが多数検出されてしまい、確率的な選択では真の原因アークを選択できない可能性が高い。そのため、問題全体を一度に解くのではなく、問題を解く過程を3段階に分割し、各段階の可能解が得られたら次の段階に進む構成とすることで、効率良く問題を解けるようにしている。具体的には、以下のように問題の規模を順次拡大している。

- ① 交差支障アークを含まない構内ダイヤモデルを用いて、実行可能な構内ダイヤを得る。
- ② ①で得られた構内ダイヤモデルに交差支障アークを追加し、実行可能な構内ダイヤを作成する。
- ③ ②の構内ダイヤモデルに要員ダイヤモデルを追加し、実行可能な構内作業計画を作成する。

特集：輸送情報技術

4.4 評価試験例

開発したアルゴリズムについて、計画作成に要する計算時間を評価するために、実在する駅の構内作業計画データを用いた試験を行った。その概要を示す。

4.4.1 ダイヤ改正時の貨物駅の構内作業計画作成

国内有数規模の貨物駅について、ダイヤ改正前の構内作業計画をベース計画として、ダイヤ改正後の計画を作成する試験を行った。貨物駅の列車本数は多くはないが、入換え回数が多いという特徴がある。試験対象駅の概要を以下に示す。

- ・1日あたりの列車本数：着発合計約 80 本
 - ・1日あたりの入換え回数：約 370 回
 - ・駅要員数：9 人
 - ・PERTモデルの規模：約 4,500 ノード・10,000 アーク
- また試験で用いた PC のスペックは、Pentium4 3.6GHz、メモリ 1.5GB である。試験結果を表 1 に示す。

表 1 貨物駅を対象とした計画作成試験

	ダイヤ改正 1	ダイヤ改正 2
運転時刻を変更した列車数	18 本	14 本 (増発 2 本)
運転時刻の最大変更時間	1 時間 42 分	1 時間 52 分
計算時間	4 分 53 秒	20 分 16 秒

4.4.2 ダイヤ改正時の旅客駅の構内作業計画作成

旅客駅については、全列車が始終着となる行き止まり駅を対象とした試験を行った。当該駅は多数の留置線があり、車両検査設備もあるため、旅客駅としては入換え作業が多い駅である。この駅の概要を以下に示す。

- ・1日あたりの列車本数：着発合計約 240 本
- ・1日あたりの入換え回数：約 340 回
- ・作業要員：考慮せず
- ・PERTモデルの規模：約 2,800 ノード・6,900 アーク

ここでは、仮想的な列車着発時刻変更案を設定し、それに対する構内作業計画案を作成する試験を行った。PC のスペックは、Core2Duo 2.66GHz、メモリ 4GB である。結果を表 2 に示す。

上記のほかにも評価試験を行い、実用的な計算時間内で処理できることを確認した。なお、計算時間の構成を

表 2 旅客ターミナル駅の作業計画作成試験

	Case 1	Case 2
変更箇所設定数	3 箇所	8 箇所
計算時間	約 10 分	約 1 分 30 秒

見ると、PERT モデルへの変換処理が計算時間の約 5 割を占めており、この処理の高速化が課題である。

また、ベース計画からの変更であることと、開始時刻制約アークによって各イベント時刻の変動が抑えられるため、当初の目標どおり、ベース計画から大きく変化しない、妥当な計画が作成できることも確認した。

5. まとめ

今回、駅構内作業計画作成支援システム (Suparc) と、現行の駅構内作業計画をもとにしてダイヤ改正に対応した構内作業計画案を作成するアルゴリズムを開発し、両者を組み合わせることで、高機能な業務支援システムを構成できることを確認した。計画作成アルゴリズムについては、今後も評価試験を重ねて改良を進め、本システムの早期の実用化を目指したい。

謝 辞

千葉工業大学富井規雄教授をはじめ、本研究に対し、ご指導、ご協力いただいた皆様に深く感謝いたします。

文 献

- 1) (財)鉄道総合技術研究所運転システム研究室編：鉄道のスケジューリングアルゴリズム、エヌティーエス、2005
- 2) 平早水、福村、福留、佐藤、河西：駅・車両基地構内作業計画作成支援システム－Suparc－、第 43 回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集、pp.561-564、2006
- 3) 山下、富井、大塚：確率的局所探索を用いた視認性の高いダイヤ図描画方式、鉄道総研報告、Vol.20、No.2、pp.11-16、2006
- 4) 山下、福村：輸送計画作成を支援する、RRR、Vol.22、No.7、pp.22-25、2009
- 5) 富井、周、福村：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、電気学会論文誌、Vol. 119-C、No.3、pp.289-295、1999
- 6) R.Freling, R.M.Lentink, L.G.Kroon, D.Huisman, “Shunting of passenger train units in a railway station”, Trans. Sci., Vol. 39, No.2, pp.261-272, 2005.
- 7) 佐藤、角本、村田：条件変化に伴う再計画を考慮した鉄道車両基地構内入換スケジューリング方式、電気学会論文誌 C、Vol.127-C、No.2、pp.274-283、2007
- 8) 関根：OR ライブラリー 11 PERT・CPM、日科技連、1965
- 9) 福村、富井、池谷：鉄道駅における構内作業計画自動作成システムの開発、日本 OR 学会 2006 年度秋季研究発表会予稿集、pp.180-181、2006