

# 列車抑止計画作成アルゴリズムの開発

平井 力\* 國松 武俊\* 近藤 繁樹\*\*

富井 規雄\*\*\* 高場 基司#

## An Algorithm for the Train Stop Planning Problem

Chikara HIRAI Taketoshi KUNIMATSU Shigeki KONDOU

Norio TOMII Motoshi TAKABA

When an accident happens in a railway line, each train running in the line should be stopped at an appropriate location. It is a difficult task for a staff to determine the locations of train stop in a moment because there are a lot of such constraints that a local train should not block the following express train. We call this problem a train stop planning problem. In this paper, we introduce an algorithm with a Petri net model to locate stopping trains appropriately. Several numerical experiments with actual data have shown that the algorithm can work effectively to find a practical solution to the problem.

キーワード：列車抑止，運転整理，整数計画，ペトリネット

### 1. はじめに

事故等の発生により、長時間にわたる列車運行への支障が予測される場合、その支障区間を走行する予定であった列車を適切な位置に停車させておく必要がある。このように、列車を一時的に停車させることを「列車抑止」もしくは単に「抑止」と呼ぶ<sup>1)</sup>。また、本稿では、適切な位置に列車を抑止するための計画を、「列車抑止計画」もしくは「抑止計画」と呼ぶ。

抑止計画の作成は、列車運行を監視する指令員と呼ばれる担当者が行っているのが現状である。列車運行に支障が発生し、迅速な対応が求められる状況であるため、指令員は瞬時の判断に頼って抑止を手配せざるを得ない。特に、大都市圏の通勤線区では、抑止計画作成の対象となる列車は多数にのぼる。それらの列車に対し、様々な条件をすべて満たした抑止位置を瞬時に決定することは、熟練した指令員にとっても、きわめて難しい作業となる。

抑止位置に関する条件としては、旅客列車はプラットホームのある位置に抑止すること、不通区間よりも手前の駅を終着とする列車の運転を確保するため、その列車の進路を支障しないように他の列車を抑止すること、折返し運転に必要な番線には列車を抑止しないことなどがある。また、列車種別ごとに望ましい抑止位置が存在す

る。例えば、乗務員や利用者への伝達の手間等を考慮すれば、所定のダイヤで定められた番線に抑止することが望ましい。物理的な制約として、配線（進路の有無）、番線の長さ（有効長と呼ばれる。列車の長さより短い番線には、その列車を抑止することはできない）等も考慮される。

駅間に旅客列車が停車せざるを得ない場合には、その前方の駅のプラットホームに停車している列車の旅客を降車させ、回送として駅間に抑止することとし、空いたプラットホームに後続の列車を進入させることで、旅客が乗った列車を駅間に抑止することを避けるという手立てがとられる場合もある。以下では、この措置を「回送後駅間抑止」と呼ぶことにする。しかし、この回送後駅間抑止は、降車させられてしまう旅客のことを考えれば、できるかぎり避けなければならない。これも要求の1つとなる。

抑止計画の作成においては、単純に、前方の空いている番線に列車を収容していけばよいわけではない。物理的な制約を守った上で、これらの要求をできるだけ満たすような抑止位置を考案することが求められる。

抑止計画に関するアルゴリズムについては、文献<sup>2)</sup>以外には報告されていない。その中では、新幹線を対象として、長時間の不通区間が生じた時に、各列車の抑止位置を決定するアルゴリズムに関する記述が含まれている。しかし、配線や運行計画が単純な新幹線を対象としていること、また、それに起因して、単純に列車を前詰めするだけであることから、配線や運行体系が複雑な

\* 輸送情報技術研究部（運転システム）

\*\* 西日本旅客鉄道株式会社

\*\*\* 千葉工業大学（情報科学部 情報工学科）

# 株式会社ジェイアール総研情報システム

特集：輸送情報技術

(例えば、貨物列車や特急列車等も含む様々な種別の列車が混在する) 在来線に対しては適用することができない。望ましい番線に抑止したいという要求や、抑止対象としない列車の運転を確保するように抑止位置を決定すること、折り返し運転等のために番線を空けておくこと等の要求も考慮されていない。

本研究では、列車の現在位置と、不通区間、折り返し運転実施の有無等その後の運転整理のおおまかな方針が与えられた時に、制約と要求を満たす列車の抑止位置と、そこに各列車を移動させるための手順を自動的に生成するアルゴリズムの確立を目的とする。鉄道における配線とその上での列車の移動をペトリネットモデル化し<sup>3, 4, 5)</sup>、整数計画問題として定式化する。そして、駅間に列車を抑止しない(正確には「旅客が乗っている列車をプラットホームのない位置に抑止しない」という制約を満たす抑止計画を求める。求められない場合には、この制約を緩和し、回送後駅間抑止を許容した解を得る。このような手順により、回送後駅間抑止をなるべく避けた抑止計画を得ることが可能となる。

2. 列車抑止計画

2.1 列車抑止計画とは

抑止計画の概要を図1に示す。(a)は2つの線区が分岐・合流する線区の配線図である。四角形がプラットホームを表し、ホームベース型の五角形が列車(尖った方向が列車の進行方向)を表す。また、Kn, Mn等は列車番号で、KnはK線を走行する列車、Mnは駅11経由でM線に直通する列車である。

(a)の×印で示すように、駅1の構内においてなんらかの事故が発生し、長時間にわたって駅1を通れなくなった場合を想定する。このまま何も手を施さないとすると、列車が駅間に長時間停止することとなり、車内の旅客は多大な迷惑を被ることとなる。よって、まずは各列車をその場に停止させ(a)、その後なるべくプラットホームのある位置まで移動させる(b)。これを、「前詰め抑止」と呼ぶ。

(b)においては、K1以外の列車は、すべてプラットホームのある位置に抑止されている。なお、鉄道においては、保安システムの制約により、通常、列車を後退させるには時間を要するため、ここではK1をプラットホームのある位置まで移動させることはできなかったとする。しかし、(b)の抑止計画は、利用者の利便性の点からは問題がある。その理由は、本来、不通区間を通らずにM線に向かうはずの列車M1, M2も抑止されてしまっているからである。

そこで、前詰め抑止ではなく、M1, M2の進路を考慮して抑止位置を決定することにする。具体的にはK3を

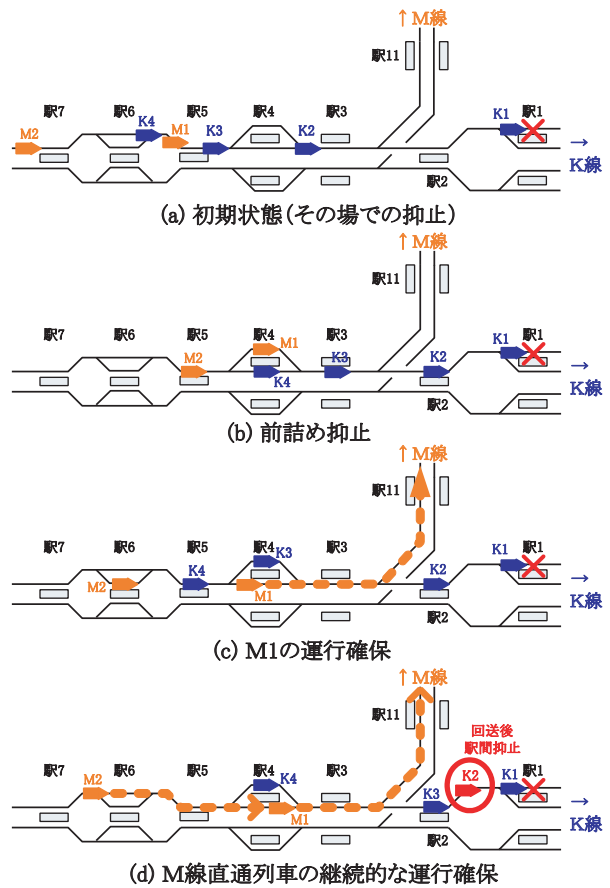


図1 列車抑止計画の概要

駅4に抑止することにする(c)。その結果、M1についてはM線への運転を継続することが可能になる。

ただし、(c)においても、M2については、K4が進路を支障しているため、運転を継続できない。そこで、駅2に停車しているK2の旅客をすべてそこで降車させ、K2を回送扱いとして、駅1と駅2の間の線路上に抑止する(回送後駅間抑止)。その後、K3, K4をそれぞれ、駅2, 駅4に抑止することとすれば(d)、M2のM線への運転を継続することができる。

簡単のために図1では一方方向の列車のみを表示したが、現実には反対方向の列車も存在する。それらについても、同様に抑止位置を決定することが必要である。

抑止計画を作成するにあたっては、旅客が乗っている列車を駅間に抑止しないことがまずは求められる。空いているプラットホームがない等の場合には、駅に停車中の列車の旅客をすべて降車させた後、その列車を回送扱いとして駅間または、引上線や車両基地等に移動させ(回送後駅間抑止)、空いた番線に、後続の列車を進入させてから抑止するなどの手配がとられる。また、不通区間を通らない列車については、できる限りそれらの列車の進路を支障しないように、他の列車の抑止位置を決定することが求められる。さらに、抑止位置についても、踏切鳴動が続いてしまうため、直前に踏切のある駅は避け

たい、といった要求や、同じ駅の中でも、運転士等への伝達を不要とするため、できれば所定の番線に抑止したい等の要求が存在する。

このように、抑止計画の作成は、多数の列車と複雑な配線を対象とし、さまざまな制約と要求を考慮して、各列車の抑止位置を迅速に決定しなければならないという複雑な問題となっている。

## 2.2 列車抑止計画の位置付け

事故発生後に、正常な列車運行に戻すために行なわれる運転整理<sup>1)</sup>に至るまでの流れを図2に示す。ただし、事故の状況等によっては、必ずしもこの順序になるとは限らず、逆転したり、並行したりすることもある。

### (1) 事故発生

乗務員からの無線連絡等によって、事故の発生が指令室に知らされる。

### (2) 緊急停止

事故発生箇所周辺の列車等を緊急停止させる。防護無線受信による運転士の緊急停止操作、列車無線による連絡等に基づく指令室からの信号操作等による。

### (3) 復旧時刻推定

事故の状況に関する報告を受けた後、復旧に要するおおまかな時間を推定する。これは、次の運転整理方針策定の基礎となる。

### (4) 運転整理方針策定

おおまかな運転整理の方針を決定する。不通区間の前後での折り返し運転を行なうのかどうか、不通区間を不通時間帯に通る列車（特に、長距離列車）を運休するかどうか、あらかじめ準備されている運転整理パターンに沿った運転整理を行なうかどうか等を決定する。なお、運転整理パターンとは、事故の発生地点等に応じ、採るべき運転整理手法のおおまかな方針を予め定めたもので、近年、多くの鉄道会社で準備され、それに基づいて運転整理が行なわれることが多くなってきている<sup>6)</sup>。

### (5) 列車抑止計画作成

抑止計画を作成する。

### (6) 運転整理（不通区間外）

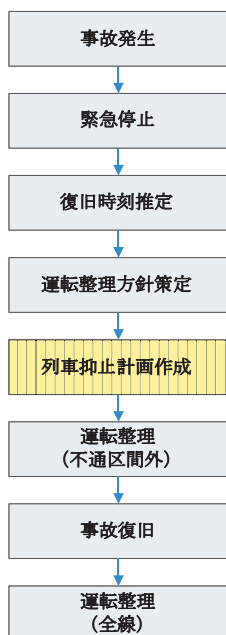
不通区間外で列車を折り返し運転する等の運転整理が行なわれる。

### (7) 事故復旧

事故が復旧し、不通区間が解消する。

### (8) 運転整理（全線）

抑止されていた列車の運転を 図2 事故発生後の流れ



再開する等の運転整理が行なわれる。

本稿で提案するのは、(5)の抑止計画を自動的に作成するアルゴリズムである。

## 2.3 入力と出力

抑止計画作成の入力と出力は次となる。

【入力】列車ダイヤ、配線等の設備データ、支障箇所、列車の現在の位置、運転整理方針

なお、ここで、運転整理方針は、具体的には、次のように与えられる。

(a) 抑止対象とする列車

(b) 抑止対象としない列車（例：不通区間の手前で終着となる列車等）

(c) その後の運転整理を行なうために、空けておくべき番線（折り返し等に必要の番線等）・線路

【出力】抑止対象とする列車の抑止位置、抑止対象列車を抑止位置まで運転するための手順（回送後駅間抑止の処置を含む）

## 2.4 制約と抑止位置に関する要求

### (1) 制約

抑止計画を作成するにあたっては、各種の制約を考慮する必要がある。それらは、物理的な制約と列車運用に起因する制約とに分類できる。

物理的な制約としては次がある。

- ・ 番線に関する制約：番線の有無、番線の有効長、架線の有無
- ・ 線路に関する制約：進路の有無、架線の有無
- 運用に起因する制約としては次がある。
  - ・ 旅客を乗せている列車は、駅間およびプラットホームのない位置に抑止してはならない（これを、抑止禁止位置基本制約と呼ぶことにする）。
  - ・ 運転整理方針で指定された番線には列車を抑止してはならない。
  - ・ 運転整理方針で指定された線路上には列車を抑止してはならない。

### (2) 抑止位置に関する要求

- ・ 列車ダイヤで停車するように定められた番線（以下、所定の番線）のいずれかに抑止したい。
- ・ 踏み切りの長時間鳴動を避けるため、直前に踏み切りがある駅での抑止は避けたい。
- ・ 所定の番線でない場合には、列車種別ごとに適した番線に抑止したい。
- ・ 駅間に止めるよりは、プラットホームがなくとも駅構内に抑止したい。
- ・ 回送後駅間抑止はなるべく避けたい。

特集：輸送情報技術

3. 列車抑止計画作成問題の定式化

3.1 列車抑止計画のモデル化

抑止計画作成問題の記述に先立ち、列車運行のモデル化を示す。図3の配線の下り線路に対するペトリネットモデルを図4に示す。なお、図3および図4では、駅1の1番線に列車が存在していることを表す。この列車は、駅1から下り線路を走行し、駅2において、1番線または2番線、駅3において1番線または2番線に進入できる。また、各駅間の閉そく数は2としている。

図4のペトリネットモデルにおいて、円で示されるプレースは番線または閉そくを示す。長方形で示されるトランジションは「列車の番線への到着」、「列車の番線からの出発」等の事象に対応する。「1駅1番線」のプレースに黒円で示すトークンが入っているのは、そこに列車が在線していることを表す。どのプレースにトークンが入っているかを示す状態をマーキングと呼ぶ。なお、図4では、図が煩雑になるのを避けるため、各プレースの容量が1であることを表現するための補プレース<sup>5)</sup>は省略している。図4における「2駅1番線下り線路へ進出」等の文字列は、説明のために付したものである。

図3および図4では列車が1本だけ存在する場合の例を示したが、列車が複数存在する場合には、同様の方法で、列車ごとに図4に相当するペトリネットモデルを作成する。

このようにして作成したペトリネットモデルにおいては、2.4節で述べた物理的な制約は、ネットの構造と、特有の状態遷移規則であるトランジション発火規則に埋め込むことができる。また、運用に関する制約については、最終マーキングの内容で反映される。よって、後述する抑止計画作成アルゴリズムの中では、これらの制約を陽に考慮することは不要となり、アルゴリズムを簡明にすることが可能となる。

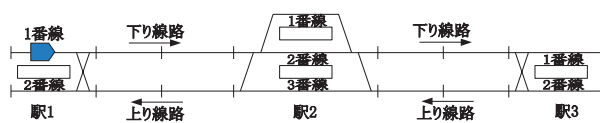


図3 配線の例

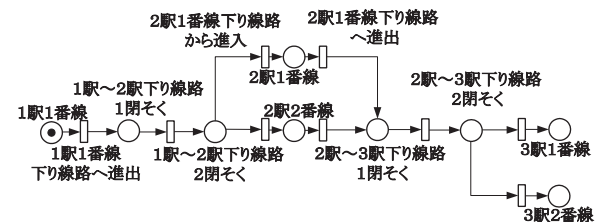


図4 ペトリネットモデル

3.2 抑止計画作成問題の定式化

3.1節の手順に従って、配線と列車の現在位置に対応するペトリネットモデルを構成すると、抑止計画作成問題は、現在位置に対応するマーキング（以下、初期マー

キング）から出発して、そこから到達可能なマーキングのうち、列車の抑止位置等に対して定義される目的関数の値を最適にするマーキングと、そこに至るトランジション発火系列を求める問題に帰着される。

ペトリネットにおいて、あるマーキングから別のマーキングに至る発火系列が存在するかどうかを決定する問題は、可達問題と呼ばれる<sup>4, 5)</sup>。抑止計画作成問題においては、可達性を判定するだけではなく、初期マーキングから到達可能なマーキングの集合の中から、目的関数を最適とする最終マーキングと、そこに至るための発火系列を見出すことが求められる。従って、これまでに提案されているアルゴリズム<sup>7, 8, 9, 10)</sup>をそのまま適用することはできない。

そこで、次の手順に従って、抑止計画作成問題を整数計画問題として定式化する。

(1) 準備：接続行列

M個のプレースとN個のトランジションを持つペトリネットに対して、接続行列  $A = [a_{ij}]$  とは、各成分が次の式で与えられる  $M \times N$  整数行列のことをいう。

$$a_{ij} \equiv a_{ij}^+ - a_{ij}^- \quad (1)$$

$a_{ij}^+$  はトランジション  $j$  からその出力プレース  $i$  に向かうアークの重み、 $a_{ij}^-$  はトランジション  $j$  の入力プレース  $i$  からトランジション  $j$  へ向かうアークの重みである。

(2) 整数計画問題としての定式化

【変数】

$u_{kj}$  … 発火系列:  $k$  番目の発火がトランジション  $j$  で起こるなら1, そうでなければ0となる変数

$m_{Fi}$  … 最終マーキング: プレース  $i$  にトークンが存在するなら1, そうでなければ0となる変数

【定数】

$M$  … プレースの数

$N$  … トランジションの数

$K$  … 発火系列長

$m_{0i}$  … 初期マーキング: プレース  $i$  にトークンが存在する時1, そうでなければ0となっている。

$Q$  … トークン存在禁止プレースの集合: 最終マーキングにおいて、トークンが存在することを許可しないプレースの添字集合

$a_{ij}$  … 接続行列の要素

$w_j$  … トランジション  $j$  が発火することのペナルティを表す重み

$q_i$  … 最終マーキングにおいてプレース  $i$  にトークンが存在することのペナルティを表す重み

【目的関数】

最小化: 
$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K w_j u_{kj} + \sum_{i=1}^M q_i m_{Fi} \quad (2)$$

【制約】

$$m_{Fi} - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N a_{ij} u_{kj} = m_{0i}, \quad i=1,2,\dots,M \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} u_{ij} - \sum_{n=1}^{k-1} \sum_{j=1}^N a_{ij} u_{nj} \leq m_{0i}, \quad i=1,2,\dots,M, k=1,2,\dots,K \quad (4)$$

$$m_{Fi} = 0, \quad i \in Q \quad (5)$$

式(2)は、目的関数の中で、最終マーキングとそこに至るまでの発火系列を考慮することを意味する。つまり、列車の抑止位置だけでなく、列車がそこに至るまでの経路についても考慮されている。

なお、ペナルティの重みは、具体的には次のような事情を考慮して決定する。

$w_j$  : 所定の番線，線路かどうか。

$q_i$  : 次に基づく。

旅客列車(回送でない)の場合：抑止位置が駅か線路か。  
 旅客列車(回送でない)を駅の番線に抑止する場合：

- ① そこにプラットホームが存在するかどうか。
- ② そこが所定の番線かどうか。
- ③ その直前に踏切が存在するかどうか。

4. 列車抑止計画作成アルゴリズム

抑止計画作成アルゴリズムの全体構成は次となる。

Step1：抑止計画作成の対象区間入力

抑止計画作成の対象とする区間(抑止対象区間)の入力を受け付ける。なお、抑止対象区間は、事故復旧の推定時刻、その区間を通る予定の列車の現在位置等を勘案して決定される。

Step2：在線列車情報の取得

抑止対象区間に在線している列車とその現在位置を取得する。これは、運行管理システムから得られるものとする。

Step3：運転整理方針の入力

運転整理方針として、抑止対象列車・抑止対象とせず運転を確保する列車の区分、空けておくべき番線や線路の情報が入力される。

Step4：抑止位置決定(抑止禁止位置基本制約の考慮)

抑止禁止位置基本制約を考慮して、抑止計画作成問題を解くことを試みる。解が得られれば、Step6へ。

Step5：抑止位置決定(抑止禁止位置基本制約の緩和)

Step4で解が得られない場合、制約を満たした解が存在しないため、抑止禁止位置基本制約を緩和して、解を得ることを試みる。これにより、回送後駅間抑止を含んだ抑止計画が得られる。

Step6：抑止手順作成

抑止対象列車に対する抑止位置までの運転計画，お

よび、運転確保列車の運転計画を作成する。

なお、Step4, Step5で抑止計画作成問題を解く際には、3.2節の定式化にもとづき、数理計画問題を解くパッケージであるCPLEX<sup>11)</sup>を使用した。

このような手順により、回送後駅間抑止を行なわないで済む場合には、Step4で、目的関数を最小とした解を得ることが可能である。

5. 計算実験および評価

4章で示したアルゴリズムを、実在する複々線路線の実ダイヤに適用した。路線の概略を図5に示す。2つの事故のケース Case1 と Case2 を想定し、本アルゴリズムによる抑止計画作成を試みた。

図6に示すCase1は、朝通勤時間帯に駅4～5の間で不通区間が発生したケースであり、2.2節(2)の緊急停止時の列車位置(以下、初期位置と呼ぶ)は(a)で表わ

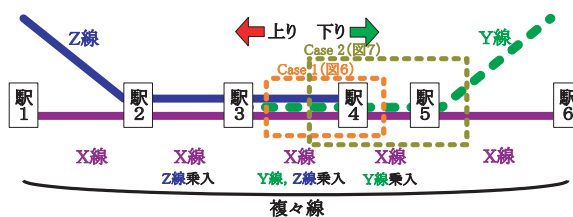


図5 実験対象路線(主要駅のみ)

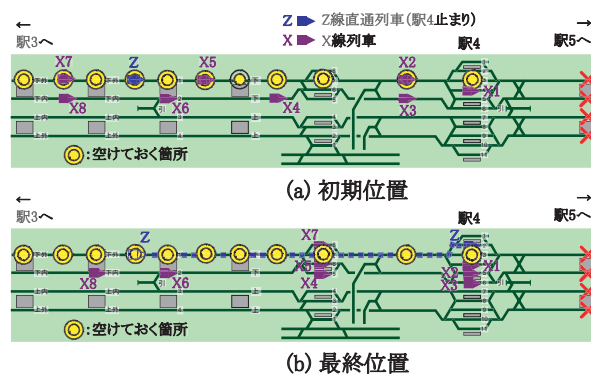


図6 実験 Case1

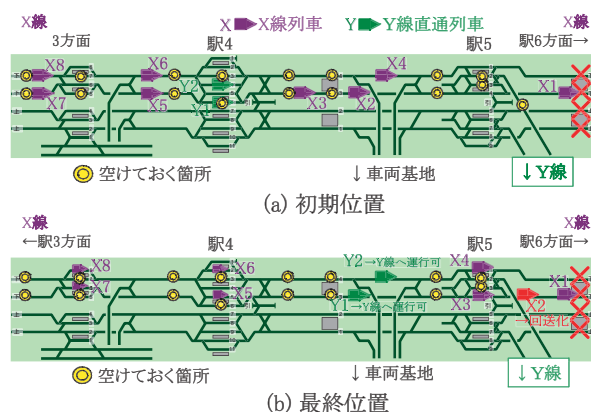


図7 実験 Case2

特集：輸送情報技術

される。このとき、2.2節(4)の運転整理方針として、不通区間を通らないZ線からの直通列車を、終着の駅4まで運転するというを決定したとする。そのためには、(a)の◎印で表わされる駅番線、および線路を空けておく(最終的に列車が抑止されていない状態にする)必要がある。本アルゴリズムにより作成された抑止計画では、最終的な抑止位置は(b)のようになり、空けておくべき駅番線、線路が全て確保されている。その結果、X線の列車を抑止したまま、Z線からの直通列車を、継続的に駅4まで運行することができる。

図7に示すCase2は、夕通勤時間帯に駅5～6の間が不通となったケースであり、初期位置は(a)で表わされる。このとき、運転整理の方針として、不通区間を通らないY線への直通列車の運行を確保する、という方針を決定したとする。そのためには、(a)の◎印で表わされる駅番線、および線路を空けておく(最終的に列車が抑止されていない状態にする)必要がある。本アルゴリズムにより作成された抑止計画では、抑止位置は(b)のようになった。ここで、X2列車は、本来、駅5のホームに抑止するのが望ましいが、仮にそうした場合、X3列車は駅5の◎印のホームに入れざるを得ず、それではY線直通列車の運行を確保できない。そこで、X2列車の旅客を駅5で全て降車させ、X2列車は回送列車として駅6方面の駅間に出し、抑止している。このような、回送後駅間抑止を含めた抑止計画も提案可能であることを確認した。

Case1, Case2の計算時間をまとめたものを、表1に示す。計算には、CPU:1.6GHz、メモリ:1.49GBのPCを用いた。いずれのケースでも、数十秒以内に抑止計画が作成されており、実用的な処理時間だと言える。

表1 実行例と計算時間

	Case1	Case2
不通箇所	駅4～5間	駅5～6間
抑止対象区間	駅2～4間の下り線	駅2～5間の下り線
抑止対象列車数	28本	20本
計算時間	約11.6秒	約27.0秒

6. おわりに

列車運行に支障が発生した場合に、列車を抑止する位置を決定するアルゴリズムを開発した。抑止計画作成問題を、ペトリネットの表現を用い、初期マーキングから可達なマーキングのうち、評価値を最適とするものを探索する問題として定式化した。そして、アルゴリズムを実際の列車ダイヤデータに適用した結果、実用的な処理時間内に、抑止手配として意味のある解が得られることを確認した。

本アルゴリズムにより、回送後駅間抑止の必要性の有無を短時間で判断することが可能になるほか、運転を確保したい列車の進路を支障しないように他の列車を抑止

する計画の作成等、これまで困難であった高度な抑止計画の作成が可能になる。

近年、鉄道会社では、部分的であるにしても複々線化される箇所が増えてきている<sup>12)</sup>。また、相互直通運転の実施など、運行形態も複雑化している<sup>13)</sup>。このような配線・列車ダイヤの線区においては、列車の抑止位置に工夫を凝らせば、長時間にわたる不通が発生した場合でも、利用者の利便性の低下を未然に防止することが可能になると考えられる。本アルゴリズムは、このような場合にこそ、その真価を発揮すると考えている。今後は、さまざまな線区に対する適用・評価を行なうことにより、アルゴリズムの完成度を高めていきたい。

文献

- 1) 富井規雄：列車ダイヤのひみつ - 定時運行のしくみ, 成山堂書店, 2005
- 2) 辻野照久他：東海道・山陽コムトラックにおける運転整理機能について, 第21回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, pp.154-158, 1984
- 3) Sakaguchi, T. and Tomii N.: "A Train Traffic Model based on Coloured Petri Nets and its Application to a Train Schedule Planning Systems," Proc. 5th International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Railway and Other Advanced Mass Transit Systems, pp.457-466, 1996.
- 4) Murata, T.: Petri nets: properties, analysis and applications, Proc. IEEE, Vol.77, No.4, pp. 541-580, 1989.
- 5) 村田忠夫：ペトリネットの解析と応用, 近代科学社, 1992
- 6) 平井力, 富井規雄, 田代善昭, 近藤繁樹, 藤森淳：運転整理パターン記述言語Rによる列車運転整理案作成アルゴリズム, 情報処理学会, 情報科学技術レターズ (FIT2005) Vol.4, pp.85-88, 2005
- 7) Shih, Heloisa Martins and Sekiguchi Takashi : "A Petri Net and Beam Search based FMS Scheduling System," Transactions of IEE Japan, Vol.112-D, No.4, pp.377-386, 1992.
- 8) 小林重信, 高橋桂子：遺伝的アルゴリズムを用いたペトリネットの可達問題の近似的解法, 北野宏明編 遺伝的アルゴリズム3, 第9章, 産業図書, 1997
- 9) Mayr, E.W.: "An algorithm for the general Petri net reachable problem," SIAM Journal on Computing, Vol. 13, No.3, pp.441-460, 1984.
- 10) 藤井康正, 関口隆：数理計画法によるペトリネットの可達問題における発火系列の探索手法, 電気学会電子・情報・システム部門論文誌, Vol.116-C, pp.289-295, 1996
- 11) <http://www.ilog.com/products/cplex/>
- 12) 特集 複々線, 鉄道ピクトリアル, No.776, 2006
- 13) 特集 相互直通運転, 運転協会誌, Vol.45, No.6, 2003