

利用者の不満を最小にする列車運転整理アルゴリズム

富井 規雄[†] 田代 善昭[†] 田部 典之[†] 平井 力[†] 村木 国満[‡]

[†] (財) 鉄道総合技術研究所 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38

[‡] ニューメディア総研(株) 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38

E-mail: [†] {tomii, ytashiro, tanabe, hirai}@rtri.or.jp, [‡] muraki@nms-jg.co.jp

あらまし 運転整理を支援するコンピュータシステムが実用化されるようになってきているが、それらはインテリジェンスに欠けるために人間の負担はさほど軽減されていない。本研究では、従来とは異なって、運転整理案の評価尺度として、利用者の不満に着目することを提唱する。ここで、利用者の不満とは、列車の遅延、列車の頻度、接続等に対して、線区・ダイヤ・事故の規模に応じてあらかじめ定義しておくものである。そして、運転整理案の作成問題を、利用者の不満を最小にする組み合わせ最適問題ととらえ、メタヒューリスティクスに基づく高度な自動作成機能を備えた運転整理案作成アルゴリズムを導入する。あわせて、実線区に対する本アルゴリズムの実験結果についても紹介する。

キーワード 運転整理, メタヒューリスティクス, シミュレーテッド・アニーリング, 列車ダイヤ, 鉄道

Train Traffic Rescheduling Algorithm which minimizes Passengers' Dissatisfaction

Norio TOMII[†] Yoshiaki TASHIRO[†] Noriyuki TANABE[†] Chikara HIRAI[†] Kunimitsu MURAKI[‡]

[†] Railway Technical Research Institute 2-8-38 Hikari-cho Kokubunji-shi, Tokyo, 185-8540 Japan

[‡] New Media Souken Co. Ltd. 2-8-38 Hikari-cho Kokubunji-shi, Tokyo, 185-8540 Japan

E-mail: [†] {tomii, ytashiro, tanabe, hirai}@rtri.or.jp, [‡] muraki@nms-jg.co.jp

Abstract Although computer systems which assist human experts in rescheduling disrupted train traffic is being practically employed recently, they are not so helpful in decreasing the workload of human experts, because they are lacking in intelligence such as to automatically make rescheduling plans. Unlike conventional works, we propose to use passengers' dissatisfaction as a criterion of rescheduling. Files of passengers' dissatisfaction are prepared beforehand considering the situations when disruptions would occur. We regard train traffic rescheduling as a combinatorial optimization problem in which dissatisfaction of passengers should be minimized and introduce an algorithm using meta-heuristics. We also show some experimental results of the algorithm using actual train schedule data.

Keyword Train traffic rescheduling, Meta-heuristics, Simulated annealing, Train timetable, Railways

1. はじめに

鉄道にとって安定輸送は非常に大切であるが、時として、天災、事故、車両故障などによって列車ダイヤに乱れが生じることがある。このような場合、列車の運行を正常に戻すために、一連の列車ダイヤの変更が行なわれる。この業務を運転整理と言う[1]。

近年、運転整理案の作成を支援するコンピュータシステム(運転整理支援システム)が実用に供されるようになってきた[2]。しかし、それらのシステムは、列車順序の変更程度の単純なダイヤ変更提案機能を備えるのみで、全面的な運転整理案の自動作成機能は備えていない。そのため、運転整理案を考案する作業は、

指令員と呼ばれる専門家にまかされており、大きな負担となっているのが実情である。この問題を解決するためには、運転整理支援システムに、運転整理案の自動作成機能を付け加えるなどの方策を採用して、機能の高度化、インテリジェント化を図る必要がある。

しかしながら、運転整理案を自動的に作成することは、非常に難しい。2章で詳述するが、その主な理由は、多数の列車を対象とする規模が大きく複雑な組み合わせ問題であること、迅速性が要求されること、必要な情報がすべて得られるとは限らないこと、線区の事情や事故の規模等に応じて評価尺度がケースバイケースにならざるをえないこと等があげられる[1]。

本稿では、まず、運転整理の評価尺度として、利用者の不満を用いることを提唱する。そして、次に、利用者の不満を最小にする運転整理案を自動的に作成するアルゴリズムを導入する。本アルゴリズムは、運転整理案の作成を組み合わせ最適化問題ととらえ、列車ダイヤと乱れの状況が与えられた時に、利用者の不満を最小にするような列車ダイヤの変更案(運転整理案)の生成を試みるものである。

利用者が不満と感ずる状況は、あらかじめ洗い出して蓄積しておく(これをクレームファイルと呼ぶ)。利用者の不満としては、列車の発遅延、列車の着遅延、列車の駅外での停車(機外停止)による駅間の走行時分の延び、列車の運休や遅延に伴う乗車チャンスの減少、列車間の接続が取られないことなどを考慮する。

利用者が何を不満と感ずるかは、線区の性格や事故の規模等によって異なるため、状況に応じたクレームファイルあらかじめ準備しておく。アルゴリズムの実行にあたっては、その状況に応じたクレームファイルを用いる。前述のように、運転整理の評価尺度は、線区の事情や事故の規模等によって異なるが、本研究では、線区や事故の規模等に応じたクレームファイルを準備しておくことでその問題の解決を図る。

この考え方を採用することにより、従来の画一的な評価尺度の下では実現が困難であった、運休、車両運用変更、着発線変更等の高度な自動作成機能が実現できる他、接続や乗車チャンスへの考慮など、既存の研究では対象とされていなかった事柄への対応も可能となる。

アルゴリズムの全体構成は、シミュレーテッド・アーニリングに基づく。すなわち、運転整理を行わない場合の列車ダイヤを初期解として、そこから利用者の不満を検出し、その解消を試みることを繰り返す。

本アルゴリズムを PC 上に実装し、現実の線区のダイヤを用いて、その評価を行なっている。その結果、処理速度や機能の拡張等について改良の余地はあるものの、実用可能な運転整理案を迅速に作成可能であるという見通しを得ている。

2. 運転整理の難しさ

2.1. 運転整理とは

運転整理案を作成する際の具体的なダイヤ変更手段のうちの主なものを表 1 に示す。ただし、これらは単独ではなく、事故の規模に応じて、適宜組み合わせで適用される[1]。

運転整理は、非常に難しい業務である。その主な理由としては、

- (1) 多数の列車を対象とした大規模な組み合わせ問題であること。

大都市近郊の線区では、運転整理の対象となる列車は、数百本以上になることも珍しくない。これらの列車相互の関係と列車運行に関する制約を考慮しつつ、各列車の運転区間、運転時刻、着発線等を決定していかなければならない。

- (2) どういう運転整理が最適かを評価する基準は、事故の規模や発生日時、線区の性格等によって異なる。すなわち、評価尺度が一律でない。

例えば、通勤区間の朝ラッシュ時間帯には、列車を運休することは却って混雑を助長するため得策ではない。一方、昼間時間帯では、一般には、ある程度の数の列車を運休して、夕方の通勤輸送を正常に行なうことが望まれる。このように、どのような運転整理手段をとるのが適切かは、その時の状況に強く依存する。

- (3) 走行している列車を対象としているため、迅速性が要求される。

現に走行している列車群に対するダイヤの変更案を作成する業務であるため、迅速に指示を下す必要がある。

- (4) 必要な情報が必ずしもすべて得られるとは限らない。

例えば、列車がどれくらい混雑しているか/混雑する見込みであるか、あるいは、駅でどれくらいの利用者が列車を待っているか等は運転整理の方針を決める上で非常に重要な情報であるが、現時点では、このような情報を精度よく取得/予測することは実際上は不可能に近い。

等があげられる[1]。

表 1: 運転整理の具体的手段

名称	内容
運休	列車の運転を取りやめる
部分運休	列車の一部区間の運転を取りやめる
臨時列車	臨時列車を運転する
延長運転	列車の運転区間を延長する
車両運用変更	車両の使用計画を変更する
番線変更	列車の番線を変更する
発順序変更	列車の出発順序を変更する(待避の設定, 待避の解除)
着順序変更	列車の到着順序を変更する(合流駅)
停車種別変更	通過を停車に変更する
発時刻変更	列車の発時刻を変更する
列車種別変更	列車の種別を変更する(快速列車を普通列車に変更するなど)

2.2. 従来の運転整理支援システムとその問題点

運転整理は、きわめて難しい業務であるために、コンピュータによる支援が求められてきた。特に、運転整理業務の中心となる運転整理案の作成について、研究が進められてきた[3][4][5][6]。それらは、あらかじめ保持しておいた計画ダイヤをもとに、その時点までの列車の走行実績と列車の乱れ(遅延)を用いて、運転整理案を作成する。ただし、考慮されている運転整理手段としては、発順序変更(待避箇所の変更)程度であって、それ以外の手段によるダイヤの変更は、使用者が画面から入力する必要がある。

また、現実に用いられているシステムでは、発順序変更についても、コンピュータが自動的に行なうのではなく、その都度問いかけ画面を出力し、使用者の回答を求めるといったシステムも多い。

このような設計が採用されている理由は、2.1の(1)~(4)のような事情による。すなわち、運転整理は、判断基準が多岐に渡り、典型的な判断では対処できないために、コンピュータは定型的な処理のみを担当し、高度な判断は人間にまかせようとする考え方に基づくものである。

しかし、このような運転整理支援システムは、使用者である指令員の負荷の軽減には、あまり有用ではない。すなわち、

- (1) 発順序変更以外のダイヤの変更入力(表1)は、使用者がいちいち入力する必要がある。列車本数が多い線区の場合、この入力に要する時間は、無視できないものとなる。事実、運転整理案を考える時には、ダイヤ変更の入力件数なるべく少なくなるような運転整理案を採用するなど、本末転倒とでもいうべき状態になっているのが実情である。
- (2) その時の状況をきめ細かく反映した運転整理案を作成できないため、場合によっては、コンピュータが作成した運転整理案をそのまま使用することができず、修正に手間を要する。
- (3) 自動作成の機能が限定されているために、手戻りが生じることがある。すなわち、表1の各項目は、現実には、相互に関連をもって実施されることが多い。例えば、終着駅での列車の番線は、途中駅での列車の順序と密接に関連する。よって、終着駅での列車の到着番線を人間が仮に決定した後、途中駅での列車の発順序をコンピュータが自動的に決定するという現在の方式では、手戻りが発生することが懸念される。

等の問題があるためである。

このような問題を解決し、指令員の大幅な負担軽減を図るためには、その時の状況をきめ細かく反映した

上で、表1に示す項目をできるだけ多くカバーする高度な運転整理案作成アルゴリズムが求められる。

3. 利用者の不満による運転整理案の評価

3.1. 運転整理の評価に関する従来の研究

運転整理案作成問題を組み合わせ最適化問題ととらえるためには、運転整理案に対する評価尺度を明確にする必要がある。

運転整理案の評価指標としては、これまで次のようなものが提案されてきた[7][8][9][10][11][12]。

- (1) 遅延時分による評価
- (2) 運休列車本数による評価
- (3) 遅延が収束するまでの時間による評価
- (4) 利用者側の損失・不効用による評価
- (5) 利用者が期待するサービスとの乖離による評価

しかし、運転整理が行なわれる状況は千差万別であること、必ずしもすべての情報が得られるとは限らないこと等を考慮すると、これらの評価は、いずれも満足のいくものではない。例えば、遅延時分による評価(全列車の遅延時間の和、あるいは、各列車の遅延時間の重み付き線形和)は、運休との関連が問題となる。すなわち、多数の列車を運休すれば、当然、総遅延時分は小さくなる。極論すれば、遅延している列車すべてを運休とすれば、総遅延時分は0となる。しかし、このような運転整理が望まれることは、まずありえない。

運休列車本数による評価(運休する列車の数が少ない方がよい)も問題がある。列車の運休は利用者には迷惑をかけるため、なるべく少ない方がよいと考えられる場合もあるが、一方では、輸送力が確保できるのであれば適切な数の列車を運休することによって、混乱したダイヤを正常に復する方が望ましい場合もある。

遅延が収束するまでの時間が短い方がよいという考え方は、これとは逆の問題を抱えている。多くの列車を運休すれば遅延は早期に収束するが、場合によっては、待ち時間や混雑の増加を招くことになり、利用者にとってよい運転整理にはならない可能性がある。

これらの評価尺度の問題点は、ダイヤ乱れが与える迷惑は個々の利用者に対してであるのに、それを運転整理案全体から評価しようとしていることにあると考えられる。すなわち、利用者は、ダイヤ全体の遅延時分や運休本数等よりも、自分自身の待ち時間、到達時間、乗り換え、混雑の増加が重要であると感じるからである。

このような考え方に基づいて、利用者がこうむる不効用をもって、運転整理案を評価しようとする考え方もある。しかし、そのためには、作成した運転整理案に対して、利用者の数や利用者の行動(今後どれくら

いの利用者が各駅にいつ頃出現し、それらの利用者はどの列車を利用するか)を予測する必要がある。これは、現時点の技術では、非常に困難である。

3.2. 利用者の不満による運転整理の評価

本研究では、利用者が不満と感ずる状況をあらかじめ定義しておき、利用者の不満を最小とする運転整理案を作成することを目的とする。この考え方の背景は、次の通りである。

- (1) 運転整理が行なわれるケースは千差万別であり、さまざまなケースに対して、遅延時分や運休本数等の画一的な評価尺度を使用することは適切でない。
- (2) 運転整理が行なわれる状況は、「異常時」であり、鉄道会社の視点からの評価尺度は、重要ではない。すなわち、評価尺度としては、利用者の視点が圧倒的に重要である。
- (3) 運転整理が行なわれる状況において、利用者の数や利用者の行動を予測することは、容易ではないため、それらを用いた評価尺度を使用することには、現時点では限界があると考えられる。仮にこれが実現できたとしても、利用者の不効用を最小とする運転整理案を作成する問題は、きわめて複雑な問題となり、迅速に解を得ることは非常に難しいと考えられる。
- (4) 指令員が運転整理案を作成する際には、利用者になるべく迷惑をかけないことを念頭において、「利用者の不満」という考え方は、指令員の直感によく合致する。

利用者がどういう状況を不満と感ずるかは、事故の規模や線区の状況によって異なると考えられる。例えば、20分程度列車が停止した等の小規模の事故の場合には、10分の到着遅れでも不満であろうが、数時間不通になった場合などには、10分程度遅延することよりも列車の頻度の方に不満を感ずると考えられる。

本研究では、このような点に配慮し、線区や事故の規模等に応じて、利用者が不満と感ずる状況をそれぞれ蓄積しておき(これを、クレームファイルと呼ぶ)、運転整理案を作成する時には、その時の状況に合致したクレームファイルを選定した後、運転整理案を作成することとしている。

3.3. 利用者の不満の定義

本研究では、利用者の不満として、次を考慮する。

- (1) 列車の遅延に関する不満
 - ・ ある列車のある駅への到着がある値以上遅延した。

- ・ ある列車のある駅からの発車がある値以上遅延した。
- (2) 列車の停車時分の増加に関する不満
 - ・ ある列車のある駅での停車時分が、所定の停車時分よりも、ある値以上増加した。
 - (3) 列車の駅間の走行時分の増加に関する不満
 - ・ ある列車のある駅間での走行時分が、所定の走行時分よりもある値以上増加した。
 - (4) 列車の運転頻度に関する不満
 - ・ ある駅でのある時間帯のある方向の停車列車の運転間隔が、ある値以上となった。
 - (5) 列車の接続に関する不満
 - ・ ある駅でのある時間帯のある方向のある2本の列車の間隔が、ある値以上となった。

4. 利用者の不満を最小にする運転整理案作成アルゴリズム

4.1. 全体構成

アルゴリズムの全体構成を図1に示す。本アルゴリズムは、メタヒューリスティクスの一種であるシミュレーテッド・アニーリング[13]の枠組みに基づく。以下の節で、各ステップの詳細を述べる。

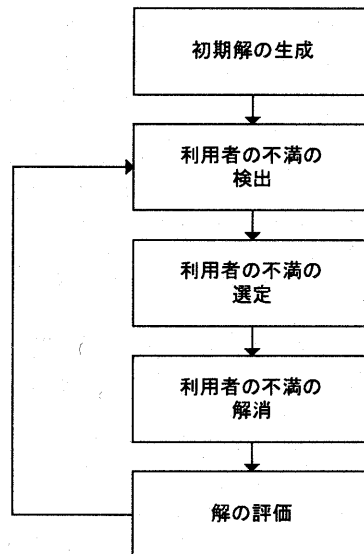


図1: アルゴリズムの全体構成

4.2. アルゴリズムの詳細

4.2.1. 初期解の生成

計画ダイヤに事故の状況(事故復旧予定時刻等)を入力し、運転整理を実施しないものとして予測を行な

った列車ダイヤ（単純予想ダイヤ）を初期解とする。

4.2.2. 利用者の不満の検出

クレームファイルとその時点の運転整理案を比較し、利用者の不満を洗い出す。

4.2.3. 解決すべき利用者の不満の選定

4.2.2で検出された利用者の不満の中から、乱数を用いて1つを選ぶ。乱数は、発生時刻が早い利用者の不満の方が高い確率で選ばれるように設定する。

4.2.4. 利用者の不満の解消

次の手順に従って、利用者の不満を解消した運転整理案を作成することを試みる。探索の初期段階においては、列車の遅延、停車時分・走行時分の増加に関する不満の解消に重きをおき、探索がある程度進行した後、列車の運転頻度や接続に関する不満の解消を行なう。なお、列車の運転頻度や接続に関する不満の解消手段は、ダイヤの軽微な変更にとどめている。これは、4.2.5で述べるように、列車の運転頻度や接続に関する不満の件数も解の評価値に反映されており、それらを極端に悪くするような解は、そもそも探索対象として選ばれる可能性が少ないためである。

- (1) 列車の遅延、停車時分・走行時分の増加に関する不満の場合
 - ① 列車ダイヤをある種の PERT ネットワークで表現する[14][5]。具体的には、列車の各駅の着・発をノードとし、ノード間の時間的依存関係をアークで表現する。アークには、両端のノードの事象間に最低限必要な時間を重みとして付す。
 - ② 列車の遅延、停車時分・走行時分の増加に関する不満は、対応するノードに至るクリティカルパスを構成するアークのいずれかに原因がある。クリティカルパスを構成するアークから、列車の順序を規定するアーク、番線の使用順序を規定するアーク、車両の使用順序を規定するアークを選び出し、さらにそのうちの一つをランダムに選ぶ。そして、選ばれたアークの種類に応じて、表2に示すダイヤ変更を実施する。

表2：アークの種類に応じたダイヤ変更の実施

アークの種類	ダイヤ変更手段
列車の順序	順序の変更
番線の使用順序	番線の変更
車両の使用順序	(部分)運休
	車両運用変更

- (2) 列車の運転頻度に関する不満の場合

当該駅を含むある区間に対して、通過列車を停車列車に変更する。

- (3) 接続に関する不満の場合

当該駅での列車の発時刻を、接続時間以内になるように変更する。

4.2.5. 解の評価

検出された利用者の不満の件数に対して、あらかじめクレームファイルの中で定められている重みを乗じ、それらをすべて加算したものを、解の評価値とする。

4.2.6. 新たな解の採用の決定

4.2.4の操作によって新たに得られた解 A' の評価値を、直前の解 A の評価値と比較し、改良されていれば、A' を新たな解として採用して、そこから探索を続行する。改悪となっている場合には、改悪の程度と探索の進行状況に応じた確率で A' を採用するかどうかを決める。A' を採用しないと決定された場合には、A から探索を再開する。

5. 実験結果

現在、4節で導入したアルゴリズムを PC 上に実装し、評価を行なっている。現時点でのプロトタイプは、列車の遅延、停車時分・走行時分の増加に関する不満と、順序変更、番線変更によるそれらの解消までを実装している。本プロトタイプによる実験結果の一例を図2に示す。図2は、首都圏近郊のある線区において、車両故障等によって、ある列車のある駅での発が20分程度遅延したと想定した状況に対する運転整理案を示す。図2-(a)は運転整理を行わない場合（これが初期解となる）である。利用者の不満の数は、428件となっている。図2-(b)は、本アルゴリズムの実行結果を示す。20件弱のダイヤ変更を実施した結果、利用者の不満は、47件に減少している。順序変更と着発線変更をたくみにおこなって、乱れを極力回復した運転整理案を得ていることがわかる。なお、図2に表示されているのは、約2時間分の列車ダイヤであるが、コンピュータ内には、24時間分の列車ダイヤを保持している。図2-(b)の運転整理案は、おおよそ2分程度で得られており、実行速度の点でも十分実用的であると考えている。

6. おわりに

運転整理案の評価尺度として、利用者の不満に着目する考え方を新たに提唱し、その考え方に基づく運転整理案作成アルゴリズムとその実験結果を示した。本アルゴリズムは、これまでの研究では実現されてい

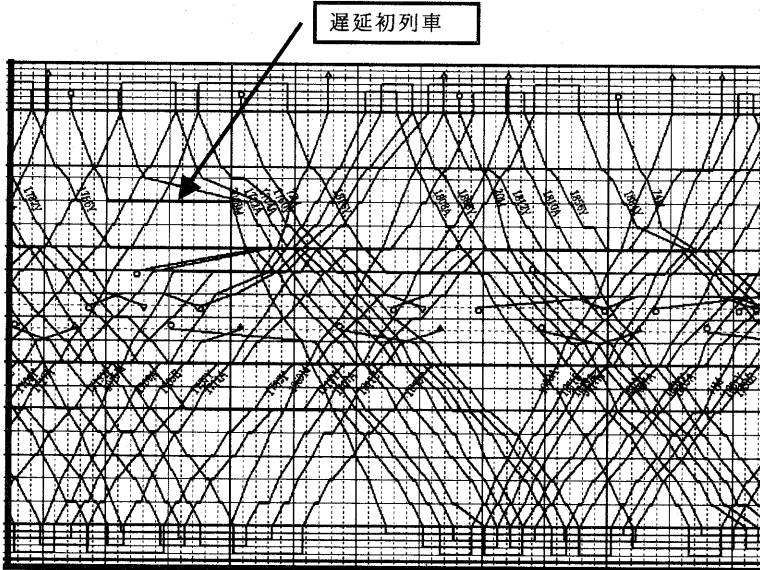


図2-(a): 運転整理を実施しない場合の列車ダイヤ

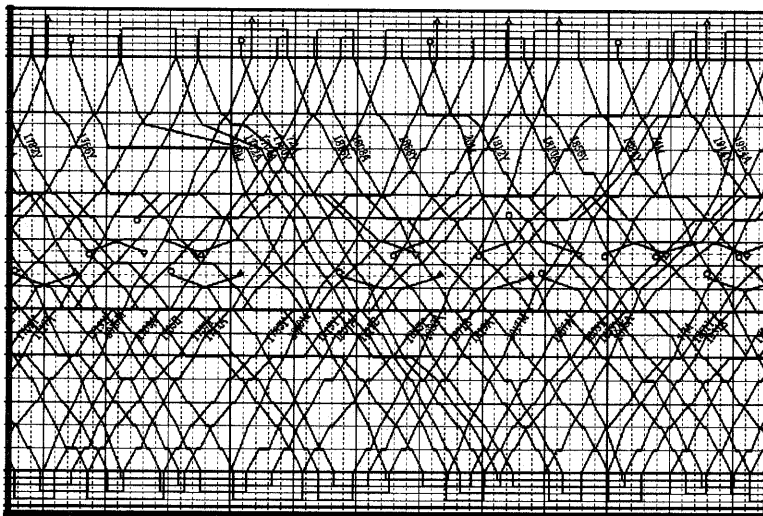


図2-(b): 運転整理を実施した場合の列車ダイヤ
(本アルゴリズムの出力)

かった、その時の状況をきめ細かく反映した運転整理案を自動的に作成できると考えている。

今後は、未実装の機能の実装を急ぐとともに、本アルゴリズムの効果の定量的な評価とそれに基づくアルゴリズムの改良と処理速度の向上を行なっていく。また、クレームファイルの効率的な構築方法についても研究を行ないたいと考えている。

鉄道の運行管理業務は、日々実施され、それらの実

績がすべて蓄積されているという特徴を持つ。このため、筆者らは、鉄道の運行管理に関するアルゴリズムを構築する上で、過去の事例を有効に用いることの可能性に注目している[15]。本稿で提案したアルゴリズムに対しても、クレームファイルの構築、不満の解消手法等に過去の事例を適用することの可能性について検討を続けていきたいと考えている。

文 献

- [1] 富井編：鉄道システムへのいざない、共立出版、2001.
- [2] レイルウェイガゼット、Vol. 57, No.3, 1999.
- [3] 駒谷、匹田、安部：知識工学的アプローチによる列車運転整理支援システムの開発、電学論、Vol. 107-C, No.2, 1987.
- [4] 荒木他：マンマシン協調モデルに基づく運転整理エキスパートシステム、電学論 Vol.115-C, No.5,1995.
- [5] 富井、池田：ハイブリッド型列車運転整理シミュレータ、電気学会産業システム情報化研究会 IIS-96-14, 1996.
- [6] 清水、野末：制約プログラミングを用いた新幹線運転整理システム、電気学会産業応用全大、2002.
- [7] 長谷川、近谷、篠原：運転整理評価基準の実験的検討、第15回鉄道サイバネ論文集、1978.
- [8] 長井他：運転整理の評価、第14回鉄道サイバネ論文集、1977.
- [9] 岡本、矢部：シミュレーションによる運転整理手法の評価、第15回鉄道サイバネ論文集、1978.
- [10] 村田、Goodman：乗客の満足度を考慮した列車群制御方式、第34回鉄道サイバネ論文集、1997.
- [11] 小林：利用者の利便性から見た非常時の運転整理ダイヤの評価、東京大学工学部土木工学科卒業論文、2000.
- [12] 長崎、古関：都市近郊鉄道における運転整理案の作成と評価、電気学会交通・電気鉄道研究会、TER-02-63, 2002.
- [13] Aarts, E. and Korst J.: Simulated Annealing and Boltzman Machines, Wiley & Sons Inc., 1989.
- [14] 安部、荒谷：最長径路法を用いた列車運行シミュレーション、情処論、Vol.27, No.1, 1986.
- [15] 富井、周：事例ベース推論を応用した鉄道駅構内入換作業スケジューリングアルゴリズム、電学論、Vol. 122-C, No. 6, 2002.