

列車ダイヤ乱れ時の 再スケジューリングアルゴリズム

平井 力

列車ダイヤに乱れが生ずると、たいへん多くのお客さまに影響が生ずる。列車の運行を管理する指令室では、運休や、到着番線の変更など、列車ダイヤに対して一連の変更を加えることで、その影響を最小限にする努力がなされる。運転整理と呼ばれるこの業務を支援するため、各鉄道会社では専用のコンピュータシステムが導入されつつあるが、ダイヤ変更の内容を決定しているのは、実は、指令員と呼ばれる人間である。運転整理の根幹であるこの判断を、コンピュータが自動的に提案することはできるのだろうか。本稿では、この運転整理案の自動作成に関する研究動向と、筆者らの取組みを紹介する。

キーワード：鉄道、ダイヤ乱れ、運転整理、シミュレーション、スケジューリング

1. はじめに

事故などが発生して列車に遅延が生ずると、列車の運休、発車順序や使用する番線の変更など、列車ダイヤを一時的に変更して、列車の運行を正常に戻す作業が行われる。これを運転整理という。運転整理は、緊急性を要し、社会的な影響が大きいことから、非常に重要な業務であるが[1][2]、複雑で関係者の数も多く、現時点では、コンピュータによる支援は必ずしも十分に行われてはいない。本稿では、運転整理について、その難しさの理由、現状、研究動向について解説する。

2. 運転整理とその難しさ

鉄道は、それぞれの役割を担う多数の関係者および旅客が、列車の運行計画という情報と、列車運行に関わる各種のルールを共有して行動することで、成立している。

共有情報である運行計画は、本来、長い時間をかけて作成され、時間的な余裕をもって、すべての関係者にあらかじめ知らせておくのが原則である[3]。ダイヤ改正は多くても年に数回であり、臨時列車の設定も、通常は数日前までには完了している。

しかし、運転整理のときには、状況が大きく異なる。すなわち、

- ① 運行計画を緊急に作り直さなければならない。
このとき、リソースの面での実行可能性が保証されている必要がある。つまり、列車の運転に必要な車両や乗務員が存在すること、運休となった車両を留置する場所があること等を、その場で確認しなければならない。
- ② そのときの状況に応じた運転整理を行わなければならない。しかし、時間帯や事故原因、線区の特情等は千差万別であり、運転再開までの時間なども動的に変化する場合があるため、最適性の評価は容易ではない。
- ③ 作り直した運行計画を、各関係者および旅客に至急知らせなければならない。

等の面で、前もって運行計画を作成する業務との相違があり、これらが、運転整理を難しくしている。

特に、②の運転整理の評価については、非常に難しい課題である。

3. 運転整理システムの現状

駅の信号機等は、指令室に設けられた進路制御システム（PRC：Programmed Route Control）と呼ばれるコンピュータシステムから集中的に管理される。ダイヤに乱れがなければ、信号機等は、PRCによって自動的に制御される[4][5]。しかし、ダイヤが乱れたときには、あらかじめ定められたものとは異なる制御が必要となる。このとき、どのような変更を行うかは人間である指令員が決定し、それをPRCに入力している。つまり、システムが自動的にすべてを行っている。

ひらい ちから
（財）鉄道総合技術研究所
〒185-8540 国分寺市光町 2-8-38

るわけではなく、指令員の考案による運転整理案が実施されているのが現状である。

4. 運転整理システムに関する研究

コンピュータ技術の進展に伴い、運転整理を支援するシステムに関する研究が活発に行われている。

システム化という観点からも、最も難しいと考えられる運転整理案の自動作成に着目した研究として、比較的最近のものでは文献[6]～[10]がある。制約プログラミングやメタヒューリスティクスによってアプローチされているこれらの研究の目的は、指令員に対する運転整理案の提示にある。運転整理システムは、必ずしもすべてを自動的に判断するわけではなく、的確な判断材料を迅速に供し、指令員を支援することが目的と考えられる。このときに最も望まれるのが、運転整理案そのものの提案である。

ヨーロッパにおいても、運転整理案作成の問題が着目されており[11]、最近では文献[12]～[14]といった研究が見られる。特に文献[12]では、コンピュータ・チェスの研究になぞらえ、将来的には自動で運転整理を行うという方向性が述べられている。

次節では、筆者らの取り組みとして「運転整理パターン」を活用してコンピュータで運転整理案を作成するアプローチを紹介する。

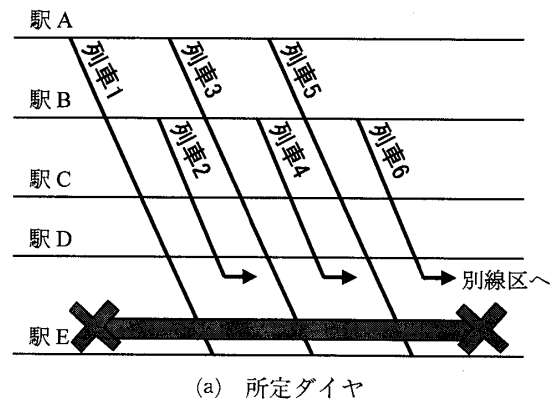
5. 運転整理パターンによるアプローチ例

5.1 運転整理パターン

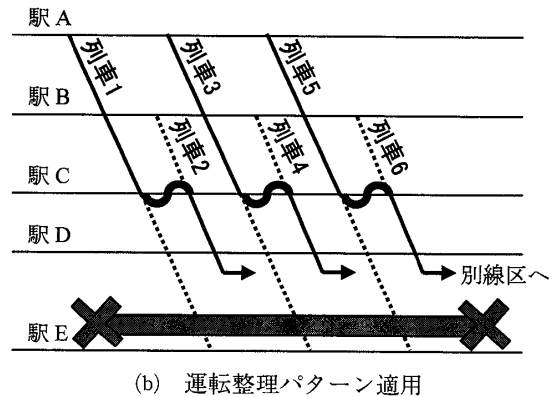
近年、鉄道事業者は、運転整理案を作成する際に、「運転整理パターン」の考え方を活用し始めている。運転整理パターンとは、事故の発生地点や時間帯等に応じ、頻繁に採られる運転整理手法を、各指令員が理解できる形に整理したものである。これには、指令員の知識として、鉄道会社としての経営方針、混雑等に伴う予期せぬ事象に対する配慮、現業機関における各種の事情等が考慮されている。筆者らは、この運転整理パターンを活用した運転整理案作成に取り組んでいる[8]。

5.2 運転整理パターンの例

運転整理パターンの例を図1に示す。いずれも、横軸が時刻、縦軸が駅の位置を表し、斜めの線（スジ）が列車の運転を表す。図1(a)のスジは所定ダイヤである。列車1, 3, 5は駅Aから駅Eの間を走る。一方、列車2, 4, 6は駅Bから駅Dを経由し、別線区に入る。このとき駅Dと駅Eの間で何らかの支障が発生



(a) 所定ダイヤ



(b) 運転整理パターン適用

図1 運転整理パターンの例

し、列車1, 3, 5が駅Eまで運転できなくなったものとする。

支障区間にかかる列車1, 3, 5を運休するのが最も素直な取扱いと考えられるが、駅Aで待つ旅客の輸送手段が絶たれてしまう。そこで、図1(b)のような手配が行われる。

列車1, 3, 5については、駅Cから先を運休する。列車2, 4, 6については駅B～C間を運休とし、駅Cで列車1から列車2、列車3から列車4、列車5から列車6への車両運用変更を行っている。この結果、駅Aから出発しようとする旅客の輸送手段と、別線区への直通運転が確保される。ここでは、駅Bには車両基地が併設されていて、運休した列車の編成を収容できることが利用されている。

5.3 運転整理パターンの背景

鉄道会社で運転整理パターンが積極的に用いられるようになってきた背景には、次のようなものがある。

- ① 統一的な運転整理の方針を定めておくことで、指令員の考え方の差異に起因する個人差をなくし、提供する輸送サービスにバラツキが生じることを防ぐことができる。
- ② 運転整理の方針を事前に定めて、駅・乗務員基地等の関係箇所に周知しておくことにより、迅

速かつ統制のとれた行動が可能となる。

- ③ 運転整理パターンを車両や乗務員の事情も含めたものとしておくことにより、リソースの面での実行可能性の問題の発生を回避できる。
- ④ 作業の輻輳等を予想した運転整理手段をパターンに組み込んでおくことにより、不測の事態を回避することができる。
- ⑤ 鉄道会社としての経営方針を明確に組み込んだ運転整理が実現できる。

5.4 運転整理パターンによる運転整理アルゴリズム

これらを考慮すると、計算機で運転整理案を作成する際にも、鉄道会社が策定している運転整理パターンを無視することは得策ではなく、積極的に利用することが、実用的なアルゴリズムの構築につながると考えられる。また、処理速度の観点においても、保持しているパターンを利用することで、何も無いところから生成するよりも効率的な運転整理案作成アルゴリズムになると考えられる。

しかしながら、運転整理パターンを適用するだけでは現実的な案を作成することはできない。なぜならば、運転整理が行われる状況は無数にあり、そのすべてに対する運転整理パターンの準備はできない。よって、実際には、運転整理パターンを適用できない列車も存在する。そこで、運転整理案の大枠（主な運休列車の決定、およびそれに伴う運用変更）を作成する際に運転整理パターンを活用し、パターンを適用できない部分に対しては、文献[7]によるスケジューリングアルゴリズムが補完する、という二段構えの構成とした。これにより、現実的な運転整理案の作成が可能となる。

運転整理パターンに基づく運転整理アルゴリズムを構築するためには、次の課題の解決が必要であった。

- ① 運転整理パターンをコンピュータで解釈可能な形で表現しなければならない。運転整理パターンは、一般的なルールを図等で記述したものにはすぎない。これをコンピュータ可読な形にすることが必要になる。
- ② 運転整理パターンを適用する手法と手順を考案しなければならない。運転整理パターンには、列車番号等の個別情報が含まれているわけではない。したがって、運転整理パターンを「理解」し、それを的確に「適用」するための仕組みが必要となる。
- ③ 運転整理パターンが適用できない列車に対する

変更も作成しなければならない。パターンだけで運転整理案が作成できるわけではないので、パターンが適用できない列車と適用可能な列車が混在する状況に対して運転整理案を作成する必要がある。

課題①を解決するために、運転整理パターンを記述するためのRと呼ぶ言語を導入した。また、課題②を解決するために、Rインタプリタと呼ぶ仕組みを導入した。また、課題③を解決するために、目的ごとに構成されたサブシステムの連携によって運転整理アルゴリズムを構成するという枠組みを提案している。

6. シミュレーションによる運転整理評価の試みと今後の方向性

6.1 運転整理の評価

前節で紹介したアルゴリズムは、定量的な評価が難しい部分を取りだして、運転整理パターンというヒューリスティクスに押し込め、そのまわりを最適化アルゴリズムで解決するという考え方である。しかし、今後は、ベテランの減少が懸念されており、ヒューリスティクスの獲得が困難になることも予想される。また、ヒューリスティクスそのものに対する評価が求められていることも事実である。よって、ヒューリスティクスに頼らない運転整理案の評価方法が必要となる。

運転整理の評価にあたっては、旅客の視点を考慮する必要がある。特に、列車密度が高い大都市圏の線区では、列車ダイヤに対する旅客の意識は、主に所要時間や混雑率にあり、列車番号で指定される個別の列車ではないと考えられる。

関連の既存研究[15]～[19]においても、運転整理は旅客の視点から評価すべきであるという考え方は共通しており、個別の列車の遅延よりも、旅客の利便性を測ることによる評価に主眼が置かれている。このような評価を行うためには、ダイヤ乱れ時の旅客流動を把握しなければならないが、現時点ではそれらを正確に取得する手段は必ずしも用意されていない。また、たとえあるときのダイヤ乱れにおける旅客流動を把握できたとしても、旅客に対する案内の方法、振替輸送による他線区への迂回行動、その結果として生じた列車選択行動の変化といった状況が組み合わさった結果であるため、別のダイヤ乱れに対してそのまま用いることができる旅客流動データとはならない。

6.2 列車運行・旅客行動シミュレータ

このような現状に対峙するため、筆者らは、できる

だけ詳細なシミュレーションを行ってダイヤ乱れ時の旅客流動を推定するという試みを行っている。ひとりひとりの旅客行動と、列車運行とを連動させたシミュレーションを行い、旅客が選択する列車、列車の混雑、列車の運行時刻を推定する。それらの結果を積み上げることによって、対象とする線区の旅客流動全体を推定しようというものである。ひとりひとりの旅客行動のシミュレーション結果を用いることで、様々な評価値を算出することが可能となる。例えば、個別の旅客の所要時間、混雑率、乗換回数の重み付け和を、行先別に集計して比較する、といったことが可能である。筆者らはこのシミュレーション計算を行うシステムの開発を継続しており、「列車運行・旅客行動シミュレータ」と呼んでいる[20]。

このシミュレータの基本的な考え方を図2に示す。列車運行シミュレーションと旅客行動シミュレーションが連携し、共通の「時計」で示される時刻に従い、列車運行実績や、駅における乗降人数等を提供し合うことによってシミュレーション計算が行われる。

旅客行動シミュレーションにおける各旅客は、自動改札機から収集されたデータを、出発駅、到着駅、出発時刻の形に変換した旅客データに従って出発駅に出現する。各旅客は自分の行動を決めるために、その時点における「運行予測ダイヤ」を参照する。運行予測ダイヤとは、その時刻における列車運行実績から、その後の列車運行を予測したダイヤである。予測の方法や精度に応じ、複数の運行予測ダイヤが準備されることもある。この運行予測ダイヤを手がかりとして、乗車する列車、乗換駅といった、目的駅に到着するまでの「乗継経路」を決定し、それに従って行動することになる。例えば、ある旅客が出現した直後に発車する列車があったとしても、その旅客が次の列車に乗車することを決めていれば、その駅で待つことになる。また、列車運行シミュレーションに伴い、各旅客は、列車が駅に着発する時点で、自分の乗継経路を再び探索して決定し直す。このときに運行予測ダイヤが参照さ

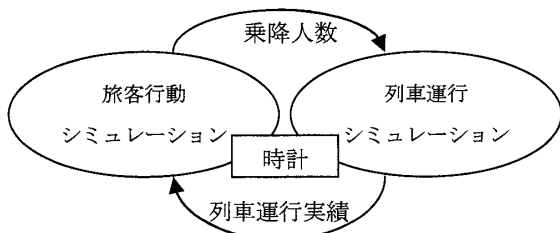


図2 列車運行・旅客行動シミュレータの考え方

れるので、列車の遅延に伴って利用列車を変更するという行動も表現される。

列車運行シミュレーションにおける各列車の動きは、与えられた列車ダイヤと、その時点までの列車運行実績に基づく。旅客の乗降がある各駅では、各旅客の乗継経路に基づいて、当該列車に乗降する扉ごとの人数が算出され、必要な乗降時間が推定される。その推定乗降時間が、所定のダイヤで設定された停車時間を上回る場合には、超過した時間だけ当該列車の発車が遅れる。この遅延は運行予測ダイヤに反映され、各旅客の乗継経路の決定に影響を与えることになる。

シミュレータ画面を図3に示す。図3(a)はシミュレーションの結果となるダイヤ図を表示する画面である。混雑率および遅延時間に応じて色分けされる。図3(c)はある列車の詳細表示である。乗車している旅客のひとりひとりについて、乗車した駅、途中経路、行先とする駅を確認できる。また、この列車の号車別混雑率も色分けで表示される。図3(b)は、各列車の在線状況をアニメーション表示する画面である。これについても、混雑率を色分けで表示する。また、各駅の滞留人数もアニメーションで確認できる。このように、シミュレーション実行中の列車運行と旅客数の変化を視認できるため、シミュレーション結果を詳細に分析する際の見通しを事前に得ることが可能である。

6.3 ダイヤ乱れ時のシミュレーション

ダイヤ乱れ時における列車運行、旅客流動の推定を適切に行うためには、次の3つを考慮する必要がある。①増延(遅延増大)の発生、②旅客案内が与える影響、③振替輸送実施による他経路への迂回である。本シミ

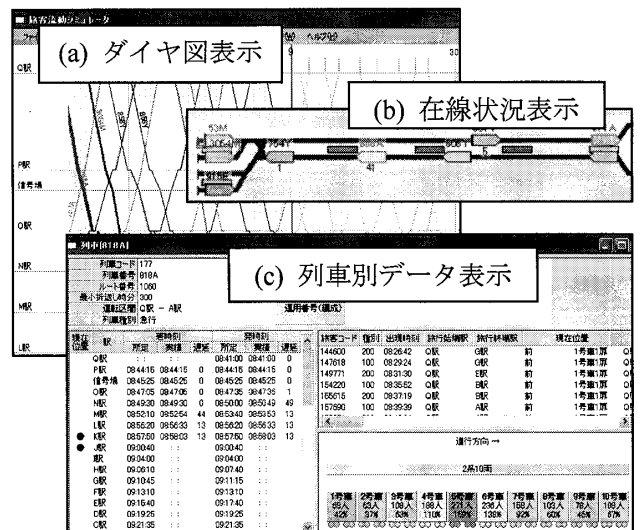


図3 列車運行・旅客行動シミュレータの表示画面

シミュレータにおいては、それぞれについて、次のようにモデルを構築している。

列車の増延とは、ある駅で発生した列車遅延が、列車運行に伴って増大していくことであり、特に旅客数が多い線区で発生しやすい。ある列車の到着が遅れた結果、その列車に乗車しようとする旅客が増える。これにより旅客の乗降に必要な時間が増えるので、その駅からの発車も遅れる。これが繰り返され、列車遅延が増大する結果となる。列車の増延を再現できるようにするためには、既に述べたように、乗降人数に基づく列車の発遅延を表現する機能が必要である。本シミュレータでは、この機能を実装しており、列車の増延を再現することが可能である。

旅客案内が与える影響については、「運行予測ダイヤ」を用いて表現する。実世界における旅客への案内においては、その内容、タイミング、その情報を旅客が理解できるかどうか、といった要因を考慮する必要がある。しかし、本シミュレーションモデルでは、それらはすべて運行予測ダイヤに集約されるものとしている[21]。例えば、案内がまったくない場合で旅客が知っているのは、自分がいる駅に停車中の列車の遅れ情報だけであり、その他の列車はすべて所定で運行していると考えて、自分の行動を決定する。これは、運行予測ダイヤとして、所定のダイヤと、当該の旅客がいる駅に停車している列車の遅れ時分だけが与えられることに相当する。このように列車運行ダイヤの与え方により、旅客に案内があった場合となかった場合における旅客行動の違いを見ることが可能となる。

振替輸送実施による他経路への迂回においては、旅客の行動を、「迂回」か「待ち」かの二者択一として表現している。これには、アンケート調査から構築されたモデル[22]を導入しており、目的とする駅までの到達予想時間と、通常とは異なる迂回経路への抵抗感、運転再開までの予想待ち時間等を考慮して「迂回経路選択確率」が算出される。この確率に従い、駅に現われた旅客、および、迂回経路選択が可能な駅に到達した旅客が、迂回経路を選択するか否かを決定する。

6.4 シミュレータと連携した運転整理案作成の試み

運転整理案を作成する際、推定した旅客人数を直接用いれば、これまでよりも「良い」運転整理案を作成できると考えられる。しかし、そのためには計算時間が膨大になることが予想されるため、直接的に推定乗車人数を用いた運転整理案作成については、これまで

ほとんど議論されてはいない。ところが、コンピュータの計算能力向上もあり、列車運行・旅客行動シミュレータでは、線区によっては十数分で1日分の列車別乗車人数の推定が可能となっている。筆者らは、この機能を活用した運転整理案作成アルゴリズムを構築することで、乗車人数を直接用いることの寄与を確かめようと考えている。

既存の運転整理案作成アルゴリズム[7]の考え方を踏襲し、本シミュレータと連動させた運転整理案作成システムを試作した[10]。国土交通省によるマニュアル[23]に基づき、「利用者不効用値」と呼ぶ評価尺度を用いた運転整理案作成の試算を行っている。当然のことながら計算時間は要するものの、利用者不効用値の観点から、より好ましいと評価される運転整理案を作成できる見通しが得られている。

6.5 運転整理評価の今後

運転整理の評価尺度については、長期的に議論されてきてはいるものの、いまだ確立されてはいない。運休本数や、列車頻度が確保されるまでの時間、といったわかりやすい評価尺度だけでは不足である一方、旅客の視点を盛り込もうとすると乗車人数推定等の計算量が増え、その結果、評価結果に対する理由付けが難しくなる、というトレードオフが存在する。

筆者らは、まずは旅客の視点を盛り込んだ評価指標の構築を目標としている。その次に、その評価尺度をいかに理解しやすい形に見せるかという課題があらう。旅客の視点を盛り込んだ評価尺度の算出には、適切な精度の旅客流動推定手法が求められる。列車運行・旅客行動シミュレータを活用して運転整理評価に関する議論を進めたいと考えている。また、頑健性という観点からの考え方[24]や、心理学的なアプローチ[25]もたいへん有効と考えている。

7. おわりに

運転整理案の自動作成および評価は、重要な研究課題だが、解決すべきことは、これだけではない。例えば、事故発生後の復旧時刻の予測を正確に行いたいというニーズがある。これについては、文献[26]では、過去10年の実績に基づいて復旧見込時刻を算出しており、文献[27]では人身事故後の復旧見込予測に関する検討がなされている。また、旅客への案内方法も大切な課題である。例えば文献[28]では、案内のタイミングや内容が議論されている。運転整理案に対する乗務員の再スケジューリング[29][30]も求められている

技術である。

運転整理は、鉄道輸送サービスの低下を水際で防ぐ業務である。人でなければできないといわれる部分を含む一方で、コンピュータによる業務支援も進みつつある。必ずしも鉄道に関わってはいない方々にORの適用対象として見ていただくことにより、新しい課題が見えてくる可能性もある。多くの皆さんに興味を持っていただければ幸いである。

参考文献

- [1] 富井規雄,『列車ダイヤのひみつ—一定時運行のしくみ』,成山堂書店,2005.
- [2] 富井規雄,「鉄道の運行管理システムへのAI適用の現状」,『人工知能学会誌』,22(2007),529-536.
- [3] 鉄道総研 運転システム研究室,『鉄道のスケジューリングアルゴリズム』,NTS出版,2005.
- [4] 中村達也,井原恭平,「運行管理システムの現状と課題」,『電気学会誌』,124(2004),279-283.
- [5] 片岡健司,明日香昌,駒谷喜代俊,「安全・安定に寄与する鉄道情報処理技術(後編)」,『情報処理』,48(2007),1008-1017.
- [6] 清水宏之,野末尚次,「新しい計画技術と鉄道運行管理—制約プログラミングを用いた新幹線運行管理システム」,平成14年電気学会産業応用部門大会,S7-4 831,2002.
- [7] 富井規雄,田代善昭,田部典之,平井力,村木国満,「利用者の不満を最小にする列車運転整理案作成アルゴリズム」,『情報処理学会論文誌:数理モデル化と応用』,46(2005),SIG2(TOM11).
- [8] 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」,『情報科学技術レターズ』,4(2005),LF-001.
- [9] 井上健造,有澤太一,相馬真,辺田文彦,「運転整理システムの開発」,『JR EAST Technical Review』,No.20,59-61,2007.
- [10] 國松武俊,平井力,村木国満,高場基司,「旅客の流動と評価に基づく運転整理案作成アルゴリズム」,電気学会 交通・電気鉄道研究会,発表申込中,2008.
- [11] J. Törnquist, “Computer-based decision support for railway traffic scheduling and dispatching: A review of models and algorithms,” *ATMOS 2005-5th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways*, 2005. S.
- [12] S. Wegele, R. Slovak and E. Schnieder, “Real-time decision support for optimal dispatching of train operation,” *RailHannover 2007: 2nd International Seminar on Railway Operations Modeling and Analysis*, Hannover, Germany, 2007.
- [13] A. D’Ariano and M. Pranzo, “An advanced real-time dispatching system for minimizing the propagation of delays in a dispatching area under severe disturbances,” *RailHannover 2007 2nd International Seminar on Railway Operations Modeling and Analysis*, Hannover, Germany, 2007.
- [14] J. Rodriguez, “A constraint programming model for real-time train scheduling at junctions,” *Transportation Research Part B*, 41 (2007), 231-245.
- [15] 長谷川豊,近谷英昭,篠原専二,「運転整理評価基準の実験的検討」,『第15回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集』,251-255,1978.
- [16] 村田悟, C. J. 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・シンポジウム論文集』,100-103,1997.
- [17] 小林里紗,家田仁,柴崎隆一,寺部慎太郎,「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」,第7回鉄連合シンポジウム(J-Rail),379-382,2000.
- [18] 原和弘,熊澤一将,古関隆章,「運転整理計算支援のための列車運転乱れ時の因果律を考慮した旅客流動推定法」,スケジューリング・シンポジウム,OS6-1,2007.
- [19] 館雅憲,福山浩史,「輸送安定度使用「POINT」の開発と全社展開」,『第44回サイバネ・シンポジウム論文集』,論文番号101,2007.
- [20] 國松武俊,平井力,富井規雄,「列車運行・旅客行動シミュレーションシステムの開発」,『鉄道総研報告』,21(2007),No.4,5-10.
- [21] 國松武俊,平井力,富井規雄,「利用者への案内の有無を考慮したダイヤ乱れ時の列車運行・旅客行動シミュレーションシステム」,平成19年電気学会産業応用部門大会,論文番号3-30,2007.
- [22] 武藤雅威,「運転再開時における旅客数の予測手法の開発」,『鉄道総研報告』,22(2008),No.6,17-22.
- [23] 国土交通省,『鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル2005』,2005.
- [24] 武内陽子,富井規雄,平井力,「列車ダイヤの頑健性評価手法」,『鉄道総研報告』,21(2007),No.4,11-16.
- [25] 村越暁子,國松武俊,斎藤綾乃,「列車ダイヤに対する顧客満足度の予測」,『鉄道総研報告』,22(2008),No.7,49-54.
- [26] 嶋津重幹,「運行異常時における取組みについて」,第14回鉄連合シンポジウム(J-Rail),SS2-2,2007.
- [27] 杉山陽一,土屋隆司,「鉄道人身事故における復旧時間予測に関する研究」,電気学会 交通・電気鉄道研究会,TER-07-21,2007.

- [28] 土屋隆司, 山内香奈, 杉山陽一, 藤浪浩平, 有澤理一郎, 中川剛志, 「列車ダイヤ乱れ時における経路選択支援システムとその利用者行動への影響把握」, 『情報科学技術レターズ』, 5 (2006), LO-005.
- [29] 坂口隆, 「運転整理ダイヤ案に対する乗務員運用の難

- 易度評価手法」, 『第 206 回鉄道総研月例発表会』, 2007.
- [30] 佐藤圭介, 福村直登, 重田英貴, 川上浩司, 森田潤, 渡辺哲夫, 「貨物列車運用整理案自動作成システムの研究」, 『第 44 回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集』, 論文番号 414, 2007.