

# 通勤電車のダイヤ乱れへの対応アルゴリズム

富井 規雄

都市圏の鉄道において、小規模のダイヤ乱れが頻繁に発生することが問題になっている。電車で遅れが発生すると、接続をとるか接続をあきらめるかを決めなければならない。現時点では、接続の判断は、局所的な判断で決められており、鉄道のネットワーク全体が考慮されているわけではない。また、利用者の満足度や利用者の数などの視点は必ずしも考慮されていない。本稿では、筆者らが開発中の鉄道ネットワーク全体を考慮して最適な電車の接続判断を行うアルゴリズムについて、その背景、考え方などを紹介する。

キーワード：鉄道、最適化、タブーサーチ、シミュレーション、接続判断、最短経路問題、PERT

## 1. 最近の鉄道の事情—乗換案内の普及

国土交通省の調査[1]によると、平成19年度、三大都市圏において、10分未満の輸送トラブルは2,000件近く発生している。また、10~20分の輸送トラブルは約700件発生している。これらをあわせると1日あたり平均7件以上だから、決して少ない数字とはいえないだろう。

これを反映して、最近、鉄道会社に寄せられる苦情には、電車の遅れに関するものがずいぶん増えているらしい。その背景には、いわゆる「経路案内システム」の普及がある。いわく、「駅前探検倶楽部では、ここでこの電車に乗り換えられると知っているのに、なぜ乗り換えられなかったのか!?!」というような苦情であるらしい。

このような苦情の増加に配慮して、鉄道会社は、なるべく遅れがでないように、つまり、ダイヤ通りに列車を運行させることに注意を払うようになってきた。しかし、都市圏の鉄道の利用者の数は非常に多く、それに応えるために多数の列車が運転されている。その結果、ある列車に発生したわずかな遅れが他の列車に伝播し、遅れが拡大していくという現象が見られる。これを防ぐには、列車ダイヤに余裕を持たせることが一案ではあるが、どの程度の余裕をどこに持たせるかを決定することは、それほど単純な話ではない。例えば、「過去の余裕は転んだ後の杖」である。電車は、ダイヤで決められた時刻通りに走っていく。余裕を消

費した後では、もし遅れが生じてそれを回復することはできない。かといって、終着駅の手前だけに大きな余裕をつければいいわけでもなかろう。終着駅に定時に着けばすべてよし、ということではないからだ。もちろん、どこにどの程度の余裕をつければいいのかは、どこにどの程度の遅れが発生するであろうかということと深く関連する。

そもそも、余裕をつけすぎれば余計に時間がかかってしまう（「到達時分が延びる」という）。その結果、車両も余計に必要なし、利用者にとっても毎日数分ずつ時間を損することになる。このコストは、いずれは利用者にはねかえるわけであるから、定時性に対する過度の要求は社会的な損失を生む可能性がある。個人的には考えている（なお、余裕時分の配分を確率的な最適化問題として定式化した研究に文献[2]がある。また、きめ細かく停車時間などを調整して遅延を減少させることに成功した例が文献[3]に紹介されている。これは、東京メトロ東西線の2009年3月のダイヤ改正の例である）。

もうひとつのポイントは、接続である。電車が遅れたときでもちゃんと接続をとることにすれば、冒頭で述べたような苦情が来ることはないだろう。しかし、その裏にはやはりいろいろな課題がある。本稿では、こちらの問題（接続決定問題）のアルゴリズムについて述べてみたい。

## 2. 接続

列車ダイヤを作るときに、電車の接続を考慮することが多い。ある一つの線区で急行と各停の接続という場合（図1）もあるし、本線の電車と支線に行く電車との接続（図2）という場合もある。また、複々線で、

とみい のりお

千葉工業大学 情報科学部

〒275-0016 習志野市津田沼2-17-1

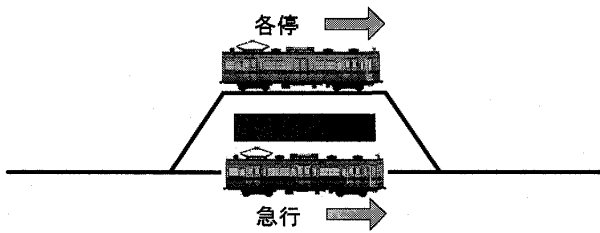


図1 急行と各停との接続

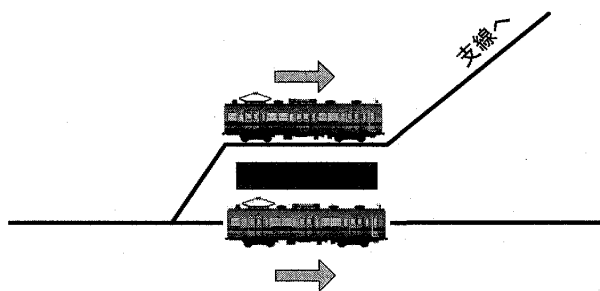


図2 支線列車との接続

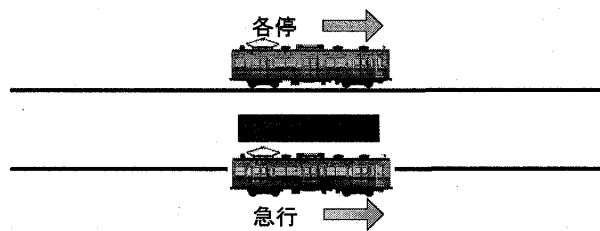


図3 複々線での接続

外側を走る電車（例えば急行）と内側を走る電車（例えば各停）との接続（図3）というケースもある。

接続が考慮されたダイヤは非常に便利である。特に、同じホームでの接続であれば瞬時に乗り換えることができる。しかし、電車に遅れが生じて接続がとれないときには、ふだんの接続が便利であればあるほど利用者から苦情が来ることになる。例えば、主要駅で非常にうまく接続がとられているダイヤで有名な（列車だけでなく列車とバスとの接続も）スイスでは、便利なダイヤのおかげで輸送量が劇的に増えた反面、ダイヤの乱れで接続がとれないときの苦情が急増したことが報告されている。そして、これに対応するために、スイス連邦鉄道では、運転士に指示を送ってなるべくうまく接続がとれるように列車を運転させようという技術開発を行っている[4][5]。

### 3. 接続決定問題

電車に遅れが生じたときにも接続をとることとすれば、乗換客からの苦情はないだろう。しかし、そのた

めには、遅れている電車が来るまでもう一方の電車を待たせておかなければならない。当然、発車が遅れることになる。それだけではない。その遅れはそのまま持ち越され、その電車を待避している電車や折り返しの電車にも遅延が波及する。また、その後の駅での接続にも影響する。そして、念のためにいえば、乗り換ええない利用者からは、意味もなく無駄に停車しているという苦情が来るだろう。一方、接続をとらないとすれば、それ以上、電車に遅延が生じることは防止できる。しかし、普段なら待っていてくれるはずの電車がいないことになり、乗り換えるはずだった乗客は途方にくれてしまう。その後しばらく電車がなくなれば、文句の一つも言いたくなるかもしれない。

このことから、接続をとるかをとらないかを決定するためには、

- ・ その駅だけではなく、その後の他の電車への影響を考慮して接続を決定しなければならない。また、それによって、その後の接続も適宜変更しなければならない。すなわち、鉄道ネットワーク全体のダイヤを対象とした接続判断を行わなければならない。
- ・ その場だけでなく、鉄道ネットワーク全体の利用者の利便性を考えてそれぞれの箇所の接続を決定しなければならない。

ことがわかる。

現状では、接続をとるかをとらないかは、ローカルな判断に基づいて決められている。指令員が指示をだすこともあるし、場合によっては、車掌が決めることもある。しかし、いずれにしても、鉄道ネットワーク全体のダイヤや利用者の利便性を考慮した判断にはなっていない。

このような事情を背景に、本稿では、鉄道ネットワーク全体を対象として、その後の運行状況も考え合わせて、接続の決定を行うアルゴリズムを検討対象とする。このアルゴリズムが完成したあかつきには、これを運行管理システムに組み込んで、そのときの状況に応じて接続に関する指示をだすことができるようになることをもくろんでいる。

### 4. 解決すべき課題

前節の議論から、鉄道ネットワーク全体を対象とした接続決定問題のためには、次の4つの課題を解決する必要があることがわかる。

- (1) 利用者の満足、不満足はどのように定義する

のか。

- (2) (1)で定義した利用者の満足・不満足はどのような手順で推定するのか。
- (3) 提示する解を一つに決定するためには、どういう評価関数に基づけばいいのか。
- (4) (3)で設定された評価関数に基づく最適解はどういう手続きに従って求めるのか。

以下では、これらの課題に対する筆者らのアプローチを紹介する。

## 5. 不効用の定義と算出

### 5.1 「不効用」とは？

接続を考慮すると、利用者の満足・不満足を考える上では、列車の遅延は無意味である。要は、乗り換えられたか乗り換えられなかったかが重要であるわけであるから、遅れたとしても接続列車の発時刻までにその駅に電車が着いていさえすればよい。

利用者の満足・不満足を数値化するために、経済学の効用理論をベースにして構築された不効用値という尺度を用いる。不効用値は、到達時間、待ち時間、乗換回数、混雑度から算出される（詳細は、文献[6]をご参照いただきたい）。混雑は、混雑不効用関数と呼ばれる非線形の関数によって、乗車時間に換算される。不効用値は、もともと鉄道の新線建設などの効果を評価するために導入されたものである[7]。

### 5.2 不効用の算出方法—旅客流動シミュレーションと列車運行シミュレーションの並行動作

#### (1) シミュレータに対する要件

ある接続案に対して個々の利用者の不効用を算出するには、利用者がどの列車を選び、どこでどの列車に乗り換えたのかを推定する必要がある。これを求めるには、利用者の行動をシミュレーションするしかない。その際注意すべきこととして次がある。

- (a) 乗降者数の増加による停車時間の増加など、列車運行と利用者の行動との間にはたらく動的なインタラクションを再現可能であること。都市圏の鉄道では、列車に遅延が生じると平常時よりも多くの利用者がその列車に乗り込むことになり、その結果、乗降時間が増大し列車が遅延する。列車が遅延すると利用者の行動もそれに応じて変化する。すなわち、利用者の行動が列車の運行に影響を与え、それがさらに利用者の行動に影響を与える。これは、都市圏の鉄道においては看過できない非常に重要な現象であり、

これを忠実に再現できることが必要である。

- (b) 案内情報の取得状況、経路に対する嗜好等（以下、個人属性）は、個々人によって異なる可能性があるため、利用者一人ずつの行動を追跡することが可能であること。また、処理速度向上のため、個人属性が同一の利用者をまとめて追跡することも可能であること。
  - (c) 旅客行動シミュレーションの過程において、利用者が最初に決定した経路をシミュレーションの途中で変えることにも対応可能であること（これは、利用者が経路を決定したタイミング以降に、乗る予定であった電車などが遅延し、1本前の電車に乗れてしまった等の状況が変化したときに必要になる）。
  - (d) 高速に動作すること。運転整理案は短時間に作成することが求められること、また、最適化アルゴリズムによっては、その中で旅客行動シミュレーションを何度も実施することが必要になることを考慮すると、高速な動作が求められる。
- (2) 旅客流動シミュレータ

旅客流動シミュレータの基本的考え方は、次の通りである。

- 運転整理案とODデータ（OはOrigin, DはDestination。それぞれの利用者がいつどの駅からどの駅に行きたいのかを表すデータ）に基づいて、利用者がとるであろう経路（どの列車を利用するか、どこで乗換えるかを含む）を推定する。この処理を経路探索と呼ぶ。経路探索は、運転整理案をある種の有向グラフ（旅客流動ネットワーク）で表現し、それに対して目的駅までの最短経路を探索することによって行う。旅客流動ネットワークでは、列車の着・発をノードとし、利用者の移動の可能性（駅における待ちを含む）をアークで表す。移動の可能性には、駅での待ち、列車による移動、乗換がある。アークには、それに必要な時間を重みとして付す。
- 経路の探索にあたっては、利用者は自らの不効用が最小になる経路をとるという前提のもとに経路を探索する。
- 本研究で設定した利用者の行動モデルを図4に示す。このモデルでは、列車に乗車した後も経路変更が可能なあらゆるタイミング（具体的には、列車が駅に停車したとき）に経路探索をあらためて行うこととしている。これにより、例

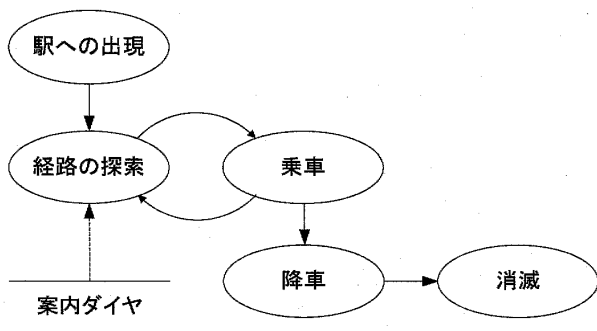


図4 利用者行動モデル

えば、最初に決めた経路に沿って移動している途中で、状況が変化（乗ろうと思っていた列車が遅延したなど）した場合でも、それに追従して動的に経路を変更することが可能になる。

- ・ 図4中の「案内ダイヤ」は、利用者が経路を決めるために参照するダイヤのことをいう。これは、計画ダイヤや運転整理案と同じとは限らない。また、そのときの状況の変化に応じて、逐次、入れ替える、あるいは一部を修正することも可能である。事故が発生する前のタイミングで行動を決定する際には、計画ダイヤを案内ダイヤとする。これによって、事故が発生する前に利用者が事故を予見した行動をとることを防止することが可能になる。また、案内ダイヤを運転整理案そのものとするれば、今後の列車運行状況に関する情報が利用者に与えられるとした状況を表現できるなど、案内ダイヤをシミュレーションの目的に応じた適切なものに随時入れ替えることによって、利用者への案内情報の内容や案内タイミングの検証を行うことも可能になる。

### (3) 列車運行シミュレータ

列車が遅延が生じたり、接続を変更したりした場合、それらは将来の列車運行に影響を与えることになる。そのため、ネットワーク全体に対する接続判断を行うためには、それらの影響を反映した列車運行を予測することが必要になる（これを、列車運行シミュレーションと呼ぶ）。本研究では、高速な列車運行シミュレーションを実現するため、PERT (Program Evaluation and Review Technique) に基づく手法を採用する[8]。この手法は、列車の着・発事象をノード、その間に存在する時間的關係（到着してから発車する、ある列車が到着してから発車するなど）をアーク、2

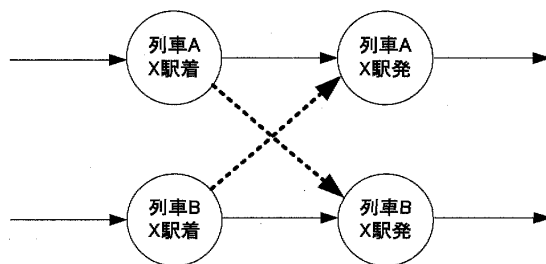


図5 接続をあらわすPERTネットワーク

つの事象の発生の際に最低限確保しなければならない時間（最低  $t_1$  分停車しなければならない、次の駅まで最低  $t_2$  分かかると）をアークの重みとしたネットワークを構成し、各ノードへの最長経路の重みを算出することによって各事象の最早実行可能時刻を高速に算出する。

さらに本稿では、2本の列車が接続関係にあることを表現するために、接続アークを導入する。接続アークは、ある列車  $a$  のある駅での着ノードから接続をとる列車  $b$  のその駅での発ノードに対して設定される。これにより、列車  $b$  は列車  $a$  の到着後でないとは発車できないということになり、これによって列車  $a$  から列車  $b$  への接続を実現したシミュレーション結果を得ることができる。列車  $a$  と列車  $b$  の間で相互に接続をとるとする場合には、列車  $b$  の着ノードから列車  $a$  の発ノードへの接続アークを設定すればよい（図5にPERTネットワークの一部を示す。点線のアークが接続アーク。これにより、X駅で列車  $a$  と列車  $b$  が相互に接続をとることを表現できる）。

### (4) 旅客流動シミュレータと列車運行シミュレータの並行動作

列車運行と利用者行動の動的なインタラクションの考慮と、利用者が移動途中で状況の変化に応じて行動を変更することの推定を可能とするためには、旅客流動シミュレーションと列車運行シミュレーションを並行に動作させ、互いの途中経過等の情報をそれぞれが参照できるようにしなければならない。イベントドリブン型の列車運行シミュレーションの場合には、列車運行シミュレータ、旅客流動シミュレータともに共通のクロックに従って動作（状態遷移）を行うこととすればよい。しかし、PERTによるシミュレーションの場合、クロックという概念がないため、両者の動きに整合性をとり、矛盾がないように両者を並行に動作させるしくみを別途考えなければならない。本研究では、最長経路の計算過程において当該ノードが発ノ

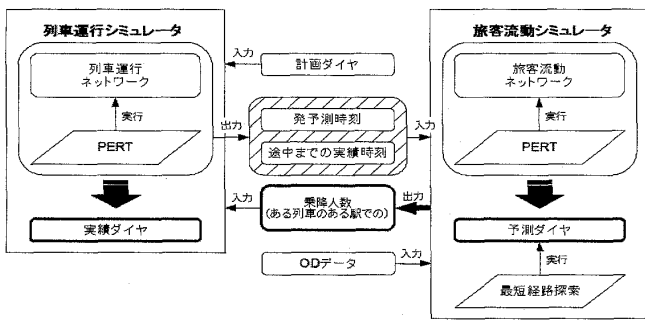


図6 列車運行シミュレータと旅客流動シミュレータの並行動作

ドである場合、旅客流動シミュレータにコントロールを渡してその列車への乗降者とその人数が乗降するのに必要な停車時間を求め、再度コントロールを列車運行シミュレータに戻すようにしている（図6に概念を示す。詳細は文献[9]を参照いただきたい）。

## 6. 鉄道ネットワーク全体を考慮した接続決定アルゴリズム

### 6.1 評価関数

利用者の不効用を用いた評価関数を採用するとして、評価関数の式をどのような形にするかは、十分な検討を要する問題である。最終的にどのような評価関数を用いるのかは、鉄道会社の経営判断に属する事柄であるにせよ、アルゴリズムの研究者としては、どのような評価関数を用いるとどのような結果が得られるのかを鉄道会社に示しておく必要があるだろう。

その際、考え方としては、例えば、

- ・ 特定の駅（主要駅など）の利用者の利便性の低下をなるべく防ぐ。
- ・ 移動距離に応じて利便性の低下度合いを考慮する（例えば、遠距離を移動する利用者の利便性なるべく低下しないような解を選ぶ）。
- ・ 移動距離、利用駅等にかかわらず、なるべく、「公平性」を考慮する。

などがありうる。

また、利便性の「低下度合い」の算出方法にしても、差で算出すべきか、比で算出すべきかなどの議論がありうる。

単純な評価関数としては、個々の利用者の不効用値の総和が最小になるような接続案を最適解とする考え方がありうる。ただし、単純な総和では、移動距離の大小が考慮されていない点が問題になる可能性がある。そのためには、不効用値の増分の分散を考慮した評価関

数を用いることも考えられる。

本稿で提案するアルゴリズムでは、利用者の不効用に基づくものであるかぎり、評価関数の形を変えても、次で述べる最適化アルゴリズムが有効に動作する。すなわち、さまざまな形の評価関数に対して、その結果を検討することが可能である。

### 6.2 最適解の導出—タブーサーチ

ネットワーク全体を考慮した接続判断を実現するために、接続判断問題をある種の組合せ最適化問題として扱う。具体的には、5節のシミュレータで算出された個々の利用者の不効用を用いて算出される評価値を最小とするように、接続の解除と設定を決定する問題と考える。

アルゴリズムとしては、評価値の算出にシミュレーションを使わざるを得ないことから、最適化手法としては、シミュレーションとメタヒューリスティクスを組み合わせたものを用いることとし、メタヒューリスティクスとしてはタブーサーチを用いた。タブーリストには、接続の解除または接続の設定を行ったノードの対と接続の設定・解除のいずれを行ったかの情報を格納している。

## 7. 数値実験

### 7.1 実験に用いたデータ

都市圏の複々線区間の列車ダイヤ約4時間分を用いた。列車本数は、計40本（上下各20本）、駅数は41である。ODデータとしては、当該線区のODデータから、当該時間帯に出現する旅客約9,000人を抽出した。

### 7.2 実行結果

ある駅で1本の列車が3分遅延した場合を想定して、接続判断アルゴリズムを動作させた。そのときの利用者の不効用値の増減を図7に示す。評価関数は、利用者の不効用値の総和を最小にするように設定した。図7は、発駅・着駅の対（ODペア）ごとに、それらの利用者の不効用値の平均が初期解（接続判断を行わないで計画ダイヤ通りの接続とした場合）と比べてどのように増減したかを示している（上方向への突出は接続判断を行わない場合よりも不効用値が増加したことを示している）。図7からわかるように、多くのODペアに対して、初期解よりも不効用値が減少している。

今後は、他の評価関数や他の線区に対して実験と評

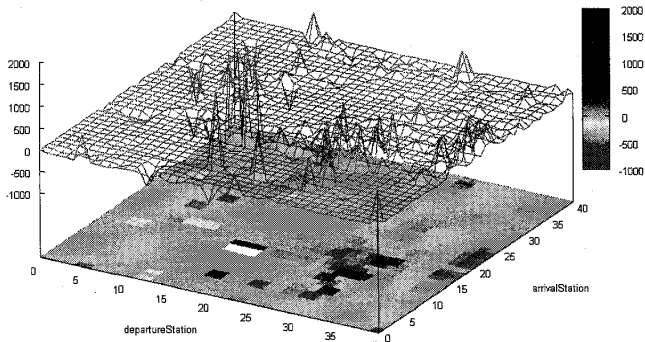


図7 アルゴリズムの実行結果 (総不効用値最小)

値を継続し、評価関数の形と得られる結果との関係についての検討を深めていく所存である。

## 8. おわりに

電車間の接続を考慮した列車ダイヤにおいて、ある電車で小乱れが発生したときに鉄道ネットワーク全体の利用者の利便性を考慮して接続判断を行うアルゴリズムを紹介した。このアルゴリズムは、現在、処理速度の向上と並行して、いろいろな評価関数を用いたときに得られる解の比較評価を行っている。また、本稿では複々線の線区に対する結果を紹介したが、複数の複線の線区にまたがる事例についての実験も行っている。これらの結果については、別途ご紹介させていただきたい。

また、本稿のアルゴリズムは、利用者のODデータが得られることを前提としている。これは、現時点では実現されていない。しかし、ICカード乗車券の普及などによって、オンラインかオフラインかはともかく、近い将来には本研究で使用できるその時点のODデータがかなりの精度で利用可能になると考えている。

**謝辞** 本稿は、千葉工業大学情報科学部情報工学科の原田真吾、金井里司の両名の卒業研究をもとにして執筆したものである。また、本研究は科研費 21510156 の助成を受けている。

## 参考文献

- [1] 国土交通省：「鉄道輸送トラブルによる影響調査」  
<http://www.mlit.go.jp/common/000047882.pdf>
- [2] Kroon, L. et al.: "Stochastic Improvement of Cyclic Railway Timetables," *Transportation Research Part B*, Vol. 42, No. 6, pp. 553-570, 2008.
- [3] 稲川真範, 富井規雄, 牛田貢平:「列車運行データの可視化」, 第16回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL 2009), 2009.
- [4] Wüst, R., Laube, F., Roos, S. and Caimi, G.: "Sustainable Global Service Intention as objective for Controlling Railway Network Operations in Real Time," *Proc. 8th World Congress of Railway Research (WCRR)*, Seoul, Korea, 2008.
- [5] Laube, F. and Luthi, M.:「スイス連邦鉄道における接続を重視した新しい運行管理手法—戦略的施策から実際の運営の場に至るまでの余裕時分の活用手法—」, *オペレーションズ・リサーチ*, Vol. 53, No. 8, 2008.
- [6] 國松武俊, 平井力, 富井規雄:「マイクロシミュレーションを用いた利用者の視点による列車ダイヤ評価手法」, *電気学会論文誌 (産業応用部門) to appear*.
- [7] 運輸政策研究機構:「鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル 2005」, 2005.
- [8] 安部恵介, 荒屋真二:「最長経路法を用いた列車運行シミュレーション」, *情報処理学会論文誌*, Vol. 27, No. 1, pp. 103-111, 1986.
- [9] 金井里司, 富井規雄:「鉄道ネットワーク全体を考慮した最適接続決定アルゴリズムとその評価」, 第16回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2009), 2009.