

遅延に強い列車ダイヤを考える

武内 陽子

輸送情報技術研究部(運転システム 研究員)



たけうち ようこ

はじめに

鉄道は、あらかじめ決められた計画(列車ダイヤ)に従って運行されています。遅れの少ない列車運行は、旅客に対して良い輸送サービスを提供しますが、それを実現する列車ダイヤは、鉄道会社にとっても管理しやすいものであると言えます。

しかし、遅れない列車ダイヤを作成するのは非常に困難です。なぜなら、事前に予測できない小さな遅れが起こる可能性がたくさん存在しているからです。たとえば、駆け込み乗車、車内の急病人、荷物がはさまることによるドアの再開閉、雨の日の傘や冬の着膨れで普段よりも乗降に時間がかかること等、数えればきりがありません。

ここでは、遅れない列車ダイヤではなく、予期できない小さな遅れが起こるという前提のもとで、利用者の視点から見た遅延に強い列車ダイヤについて考えます。利用者の視点から見て遅延に強いとは、小さな遅れが発生したとしても、利用者が不便だと感じない、あるいは、不便を感じる度合いが小さいような輸送サービスが提供できることを意味します。そして、コンピュータ上で動く列車運行シミュ

レータを使って、遅延に対する強さを計算する方法を紹介します。

ここで対象とする遅れは、先ほどの例で述べたような、数分程度の小さな遅れとします。列車が数十分以上遅れるような状況が発生した場合には、運行管理をする指令員が列車の運休や行き先変更などの一連の手配を行いますが、このような大規模な遅れは考えないこととします。

実際の運行状況

図1は、ある都市圏の駅での朝ラッシュ時のホームの様子です。階段からホームに上がってくる人、電車から降りて階段を下りる人、電車に乗るためにホームに並んでいる人が混在し、非常に混みあっているのがわかります。このような路線では、たくさんの人を運ぶために、短い列車間隔で多数の列車が運行されています。そのため、遅れが起きやすい状況となっているのが現状です。

図2は、都市圏のある線区での1ヶ月の運行実績データを使って計算した、到着時点／出発時点での遅れの平均値の推移です。朝ラッシュの上り列車で特徴的だった一部の



図1 都市圏の朝ラッシュの様子

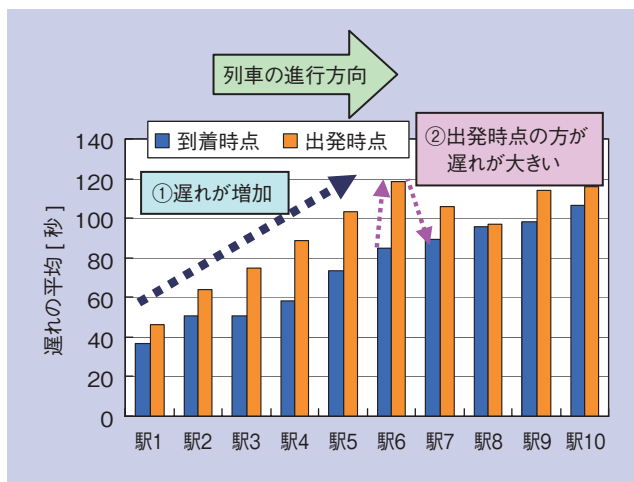


図2 遅れの平均の推移(朝時間帯, 上り方向)

駅（駅1～駅10）を抜粋しグラフ化しました。この線区は、複数の駅で他線区と接続しており、ピーク時の列車間隔が2分20秒という高密度で列車が運行されています。

まず、全体的な傾向として、駅1から駅6にかけて遅延が増加していき、その遅延が駅10になっても回復していない様子がわかります（図2の①）。次に、到着時点（青）と出発時点（橙）を比べてみますと、到着時点から出発時点にかけて遅れが大きくなり、次の駅の到着時点で遅れが小さくなっていることがわかります（図2の②）。このことは、駅での停車時間が計画よりものびていること、駅間で遅れが回復している傾向があることを意味しています。

遅れが広がる仕組み① 遅れた列車がどんどん遅れていく理由

図1の写真のように混雑した線区で、ある列車の駅への到着時点に小さな遅れが発生したとして、乗客の人数と遅延した列車の運行を追ってみます（図3と図4）。

まず、乗車する人が、遅延した分だけホームにたまりま（図3の②）。ホームに並んでいる全員が乗車しようとした場合、乗車人数が増えて乗車時間が多くかかってしまい、遅れが増加してしまいます（図4のⅠ）。

次に、遅延した列車内の人数（図4の③）と次の停車駅Bのホームで待っている人数（図4の④）に着目すると、両方ともいつもより増えています。そのため、駅Bでの乗降では更に時間がかかり、遅れが増加してしまいます（図4のⅡ）。

このように、混んでいる線区では、最初は小さな遅れであっても、段々と遅れが増加していく傾向があります。

遅れが広がる仕組み② 後続列車へと遅れが伝わる理由

列車間隔が短くても衝突しないために、鉄道では線路を信号で区切っておき、1つの区間には必ず1つの列車しか入れないような仕組みとなっています。

図5は、先行列車が遅れてしまい、後続列車が駅に到着する直前の時刻になってもまだ駅に止まっている場合です。こうなると、後続列車が駅に進入するための信号が赤となり、後続列車は駅に到着することができません。このように、遅れが大きくなると後続列車にも遅れが伝わってしまいます。

列車の遅れと利用者への輸送サービス

個々の利用者の視点から考えると、列車の遅れだけでは、

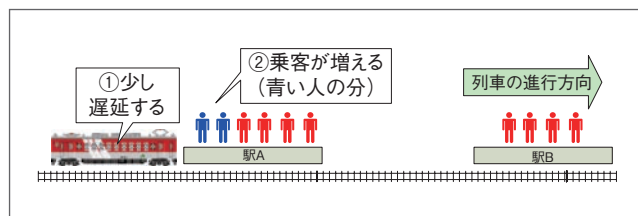


図3 遅延した列車の運行状況 その1

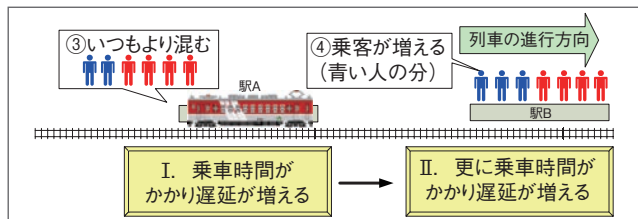


図4 遅延した列車の運行状況 その2

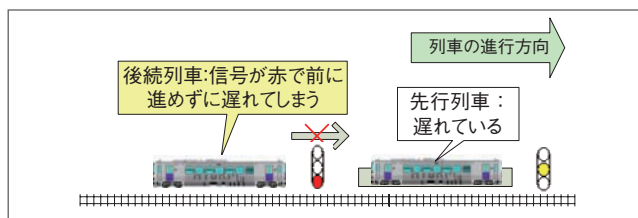


図5 先行列車から後続列車へと遅れが伝わる状況

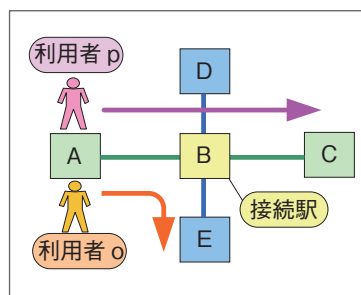


図6 接続のある線区の例

利用者への輸送サービスを表わすことはできません。

たとえば、図6のように、緑の路線（駅A－駅B－駅C）と青い路線（駅D－駅B－駅E）が駅Bで接続していて、図7のように、列車ダイヤでは、列車1と列車3、列車2と列車4がそれぞれ接続しており、簡単に乗換えができる状況とします。

図6の2人の利用者o（オレンジ）と利用者p（ピンク）に着目して、それぞれが乗車する列車を追ってみます。利用者oは駅Aから緑の路線に乗車し、駅Bで青い路線に乗り

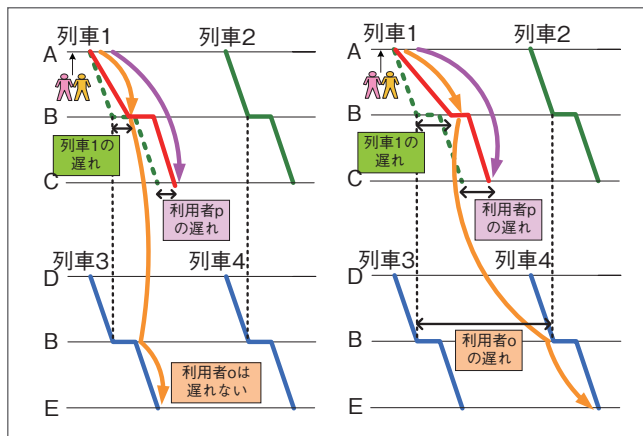


図7 各利用者の遅れの大きさ
(左：遅れが小さい場合、右：遅れが大きい場合)

換えて駅Eまで行きます。一方、利用者pは、緑の路線のみに乗車して、駅Aから駅Cまで行きます。2人の利用者が駅Aに到着した時刻は、図7のように、列車1が駅Aに到着する少し前だったとします。

ここで、図7のように、列車1の駅Bへの到着が遅れた場合を考えます。図7では、緑の点線／実線が列車ダイヤでの運行、赤い斜めの線が遅れた列車1の実際の運行を表わしています。

まず、図7左のように、遅れが小さくて列車1から列車3への乗換が可能なときは、利用者oは列車1と列車3に、利用者pはそのまま列車1に乗車します。このとき、利用者pは列車1と同じだけの遅れが発生するのに対して、利用者oは遅れることなく駅Eに到着することができます。次に、図7右のように、列車1の遅れのために、列車3への乗換ができないときを考えます。このとき、利用者oは列車3に乗りかえることができずに列車4を待たなければなりません。一方で、利用者pは、図7左と同じように列車1に乗車し、列車1と同じだけ遅れて駅Cに到着します。

このように、列車の遅れの大きさと同じだけの不便を感じる利用者pもいれば、列車の遅れの大きさによって、不便を感じなかったり、逆に大きな遅れを生じたりする利用者oもいます。つまり、個々の利用者にとっては、どの列車がどれくらい遅延するのかよりも、自分の利用する列車が遅延しないこと、特に列車を乗り継いでいく場合には、自分で立てている計画通りの乗り継ぎができるかどうか重要となります。

列車ダイヤの遅延に対する強さを計算する

筆者が提案する利用者の視点から見て遅延に強い列車ダイヤとは、小さな遅れが発生したときでも、利用者に良い輸送サービスを提供できるということを意味しています。ここでは、輸送サービスを表わす指標を個々の利用者の利

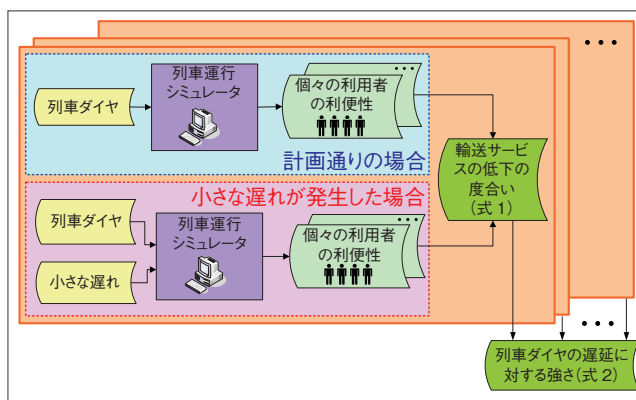


図8 列車ダイヤの遅延に対する強さを計算する流れ

便性で表現します。利便性の例としては、列車の混雑具合や待ち時間や乗換回数などの利用者の利便性に関係すると考えられる事柄に注目し、それらにある係数をかけて乗車時間に換算して合計した値などがあります。

この利便性を用いて、計画通りの運行が出来た場合と小さな遅れが発生した場合の個々の利用者の利便性をそれぞれ計算して、その差を遅れたときの迷惑度とします。そして、全ての利用者の遅れたときの迷惑度を合計して、発生した小さな遅れに対する輸送サービスの低下の度合いを表わします。具体的には、式1の通りです。

- ・ u_i : 計画通りの場合の利用者 i の利便性
- ・ d_i : 小さな遅延が発生した場合の利用者 i の利便性
- ・ n : 利用者数

$$\text{輸送サービスの低下の度合い} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - d_i) \quad \dots\dots (式1)$$

個々の利用者の利便性を計算するためには、どの利用者がどの列車に乗車したのかというデータが必要となります。しかし、このデータを、現在収集できる情報(列車の運行結果など)から知ることは不可能です。そのため、コンピュータの中で動く列車運行シミュレータを用いて、利用者の利便性を計算します。列車運行シミュレータについては、次の「利用者の行動を含む列車運行シミュレータの実施例」で紹介します。

式1を計算するためには、小さな遅れを発生させる必要があります。しかし、どこでどんな遅れが発生するのかは事前にはわかりませんし、発生する遅れも毎日異なります。

ここでは、この問題を解決するために、小さな遅れを確率モデルで表現します。具体的には、「ある駅で△秒の遅れが起こる確率が○%」というように確率を使ってモデル化します。この確率を元に、乱数とよばれるランダムな数を使って発生する小さな遅れを決定して、列車運行シミュレータによる運行予測を行ないます。この予測を繰り返す

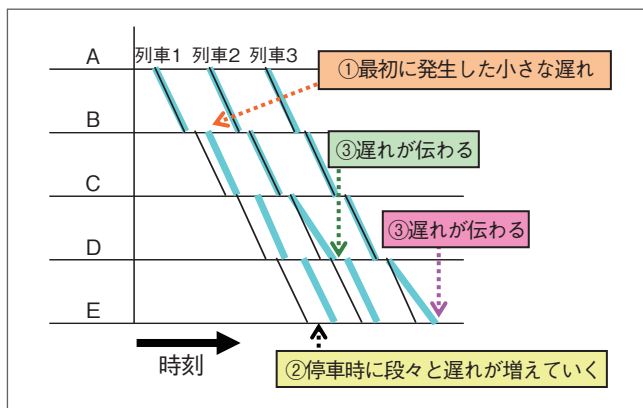


図9 遅れが広がる様子(シミュレーション結果)

ことで、様々な日の運行の様子を表現することができます。このようにシミュレータを繰り返し用いて確率モデルでの現象を再現する手法はモンテカルロ・シミュレーションと呼ばれ、解析的に困難な場合に対応する手法として、一般的によく用いられています。

そして、列車ダイヤの遅延に対する強さは、様々な日の輸送サービスの結果を平均的に評価する必要があります。そのため、運行予測を繰り返して得られた結果からそれぞれ計算した式1の値の平均を、列車ダイヤの遅延に対する強さとします。計算の流れは図8、具体的な計算式は式2となります。

・ m：シミュレーションを繰り返す回数

遅延に対する強さ =

$$\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \text{遅れが} j \text{ の場合の輸送サービスの低下の度合い} \quad \dots\dots (式 2)$$

利用者の行動を含む列車運行シミュレータの実施例

ここで用いる列車運行シミュレータの内部では、利用者1人1人が列車ダイヤを見て自分が乗車する列車を選択しています。そして、どの駅でどの列車に何人乗降したのかをトレースし、旅客数に応じた停車時分を計算します。

列車運行シミュレータを使って「遅れが広がる仕組み」で説明した現象を再現してみます。図9は、シミュレータを用いてある小さな遅れが発生したときの運行予測結果をダイヤ図で表示したものです。縦が駅、横が時刻、斜めの線が列車であり、黒い細線は計画を、水色の太線は運行予測結果を表わしています。黒い細線と水色の太線が重なっていれば計画通りに運行していますし、水色の太線が右側にずれていれば遅れていることを表わします。

最初に発生する小さな遅れは、列車1の駅Bの出発とします(図9の①)。駅B以降の列車1の線をたどっていくと停車時に遅れが増えています(図9の②)。また、後続の列

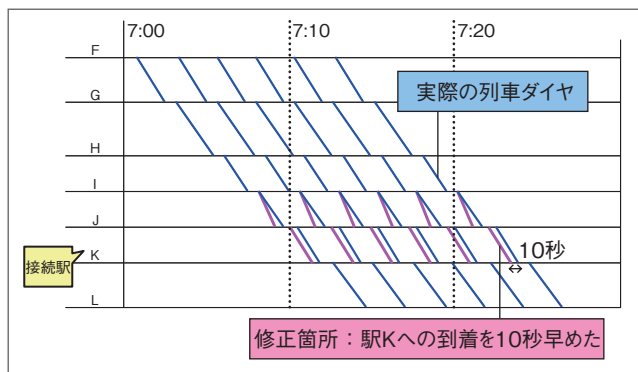


図10 実際の列車ダイヤ(一部抜粋)と修正部分

表1 遅延に対する強さの比較

遅延に対する強さの改善率	シミュレーション内でのK駅から他線区への乗換人数
1.4 %	7,130 人

車2と列車3も、途中から遅れはじめます(図9の③)。

このように、

- ①小さな遅れが起こる
 - ②遅れた列車の停車時分が段々と増加する
 - ③後続列車との列車間隔が最低限必要な間隔よりも短くなると、後続列車に遅れが伝わる
- という流れで遅延が広がっていくことが確認できます。

実際の列車ダイヤを使った実験

都市圏の線区の実際の列車ダイヤを使って、遅延に対する強さを計算してみました。また、実際の列車ダイヤを微細に修正した案を作成し、遅延に対する強さを計算して、比較を行ないました。具体的には、他線区に接続している駅の中で他線区への乗り換え人数が多い駅(駅K)に着目し、その駅への到着時刻が早くなるようにしました。駅Kを含む列車ダイヤの一部と修正部分を、図10に示します。

実際の列車ダイヤと各列車ダイヤ案とを比較して、列車ダイヤの遅延に対する強さの改善率を計算しました。その結果を表1に示します。この表から、乗換人数の多い接続駅に早く到着するような列車ダイヤにすることで、遅延に対する強さを改善できたことがわかります。

おわりに

利用者の利便性の視点から見た列車ダイヤの遅延に対する強さを表わす指標と、その計算方法について紹介しました。今後も、様々な視点からの列車ダイヤの評価に関する研究を進めていきます。 [RRR]