

S6-2-6

旅客の不効用値を用いた接続判断基準の評価

○ 武 内 陽 子 ((財) 鉄道総合技術研究所)

[電] 富 井 規 雄 ((財) 鉄道総合技術研究所)

Evaluation of Train Connection rules based on Passenger's Utility

Yoko Takeuchi, (Railway Technical Research Institute)

Norio TOMII, Member (Railway Technical Research Institute)

We introduce a method to evaluate connection rules for two trains which cross at a station and are scheduled to connect each other. Train connection rules are rules which decide whether to keep or release connections when trains are delayed. In this paper, we evaluate simple connection rules that release connection when delays of trains are larger than a certain threshold. Firstly, we introduce an idea to evaluate connection rules based on passengers' utility. We then introduce an idea to use Monte Carlo simulation method because we only probabilistically know when, where and how much trains are delayed. We have conducted several experiments and confirmed that a rule to keep all connections regardless of delays performs better than a rule to release connections in case that average delays are rather small. When delays are comparatively large, however, there exists an optimal value in the threshold that maximizes expected average of utilities of all passengers. We have also confirmed that the optimal value of the threshold varies depending on volumes of passengers.

キーワード : 接続, 不効用, モンテカルロ・シミュレーション, 列車ダイヤ

Keyword: connection between trains, passenger's utility, Monte Carlo simulation, train schedule

1 はじめに

乗換駅においては、対面ホームで、かつ、待ち時間なしに接続列車へ乗換えられるようなダイヤ設定にすることで、旅客の利便性を向上させることができる。このようなダイヤは、乗換が必要な旅客にとって便利である一方、他路線で遅延が発生した場合に接続待ちを行なうと、その遅延の影響がもう 1 つの路線にまで波及してしまう。その結果、乗換が必要ない旅客も遅延することになる。従って、遅延が大きい場合には、計画を変更して接続を解除した方がよい場合もある。

本報告の目的は、対面ホームでの接続を持つような 2 路線の列車ダイヤに軽微な遅延が生じた場合に、計画通りの接続を維持すべきか、解除すべきかを決定するためのルール(「接続判断基準」と呼ぶ)を評価することである。前提として、小乱れが起こる確率分布は、事前にわかっているものとする。まず、複数の接続判断基準を設定する。次に、小乱れ発生分布に従って、遅延発生箇所および遅延時分をランダムに発生させ、各接続判断基準にもとづいて、列車運行予測シミュレータで運行予測結果と旅客行動、および、旅客が被った不効用値を算出する。そして、ランダムな遅延の発生を繰り返して行なうモンテカルロ・シミュレーションを行なって、全旅客の不効用の平均の期待値を算出し比較することで、接続判断基準の評価を行なう。

ケーススタディとして、対面ホームでの接続を持つ 2 路線において、「接続先の列車の遅延がある閾値を超えたときにその接続を解除する」という接続判断基準を用いて、遅延分布および閾値を変えて、平均不効用値の期待値を算出して比較した。結果として、平均遅延が小さい場合は接続を継続した方がよく、大きくなるにつれて、最適な閾値が存在することを確認した。また、同じダイヤでも、OD に依存して、最適な閾値が異なることも確認した。

2 節では列車運行予測シミュレータについて、3 節では接続判断基準の評価尺度について述べる。4 節ではケーススタディと実験結果を示す。5 節では今後の課題について述べる。

2 旅客流動を加味した列車運行予測シミュレータ

1)では、列車ダイヤを PERT を使って表現し、高速な運行予測を可能にする手法を提案している。2)3)4)では、この PERT を用いた運行予測に、旅客流動を加味し、乗降人数の増加による必要乗降時分の増加を表現することにより、列車の遅延を予測する機能を追加し、ケーススタディを行なった。これらに加えて、本報告で接続を考慮するにあたり、主に以下の機能を開発した。

- ・複数線区の運行予測
- ・旅客行動モデルの精緻化
- ・旅客会社からの案内を用いて、各列車経路の予測不効

用値を算出する

- ・予測不効用値に基づいた選択行動を行なう
- ・接続判断基準の組み込み

運行予測シミュレータの流れを図1に、入出力データを表1に示す。

表1 入出力データ

入力	計画ダイヤ、設備データ、ODデータ、接続判断基準、遅延データ、案内データ
出力	予測実績ダイヤ、各駅各列車への乗降人数

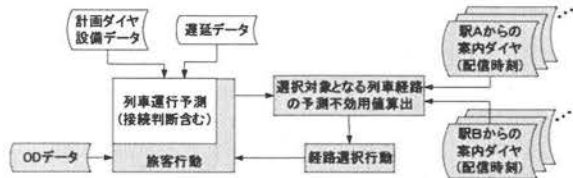


図1 運行予測シミュレータの流れ（網掛は開発した部分）

2.1 複数線区の運行予測

PERTを用いて運行予測を行なう場合、ノードは各駅各列車での着発事象であり、ノード間にひかれる主なアークの種類と重みは走行時分、停車時分、時隔などである1)。運行予測結果は、各ノードでの最早実行可能時刻であり、高速に計算を行なうことができる。

本報告では、他路線との接続を表す「接続アーク」を追加した。これは、接続する元の列車（以後「接続元列車」と言う）の着ノードから、接続先の列車（以後「接続先列車」と言う）の発ノードへと引かれるアークであり、重みは、乗りかえる際に必要な移動時分である。相互乗換可能なダイヤにおいては、接続する2つの列車間に相互に2本の接続アークが引かれる（図2、図3）。駅Xで東西線と南北線が対面ホームで接続している場合、接続アークの重みは対面ホームへの移動時間となる。

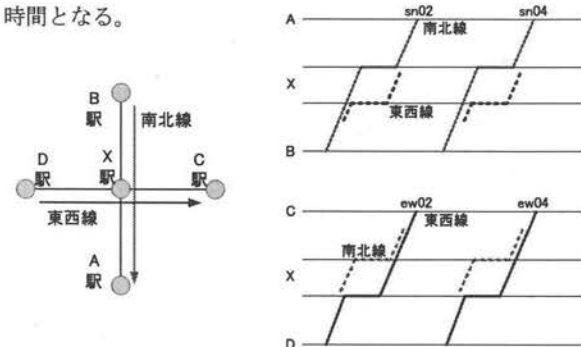


図2 接続のある複数線区の例

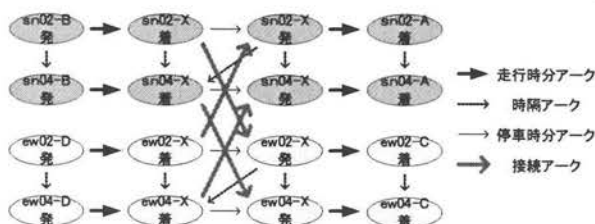


図3 複数線区例のPERTネットワーク

2.2 旅客行動モデルの精緻化

各旅客は、ある時刻に出発駅へ到着し、目的駅への経路選択および列車選択を行ない（本稿では、この2つをまとめて列車経路選択と言う）、乗車列車を決定する（図4）。

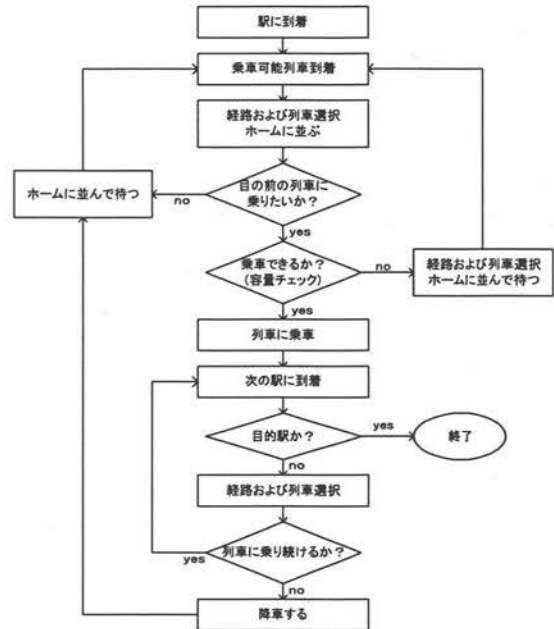


図4 旅客行動モデル

以下では、列車経路選択のタイミング、列車の容量の導入、列車経路選択方法について説明する。

(1) 列車経路選択のタイミング

列車経路選択のタイミングは、次の3通りである。

- ・駅に到着した旅客：最初の乗車可能列車が到着したとき
- ・列車に乗車中の旅客：駅に着いたとき（この列車に乗り続けていて良いのか）
- ・乗換駅などのホームで待っている旅客：最初の乗車可能列車が到着したとき（待っている列車と異なる列車が到着した場合も、列車経路選択を行なう）

(2) 列車の容量の導入

ダイヤが乱れて旅客が列車に乗り切れないことを表現するために、列車には容量があり、それを超えては乗車できないこととする。乗車対象列車が容量オーバーとなった場合、乗車できなかった旅客は、次の列車以降を対象として列車経路選択をし直す。どの旅客が乗れなかったかを判定するために、シミュレータ内では、各駅での各ホームへの旅客の到着データを保持している。

(3) 列車経路選択方法

前提として、次の2つを仮定する。1つ目は、旅客会社は旅客に対して運行案内を行ない、各旅客はその案内にもとづいて、とりうる列車経路の予測不効用値を算出し、旅客それぞれの判断基準にもとづいて列車経路を選択することである。運行案内はダイヤの形で与えられるものとし（これを、「案内ダイヤ」と呼ぶことにする）、案内ダイヤは、状況に応じて、新たなものが配信されるとする。また、こ

れを示すために、案内ダイヤには、配信時刻を持たせる。旅客は最も新しい案内ダイヤを利用することで、最新の状況を反映し、かつ、遅延を加味した列車経路選択が可能になる。2つ目の前提は、計算の高速化および現実的な行動を模擬するために、とりうる列車経路に含まれる乗車対象列車をN本までと限定することである。

また、本報告では、5)で導入した列車経路選択ネットワークを利用し、更なる計算の高速化を実施している。列車経路選択ネットワークでは、運行予測のPERTで用いたノードの一部に加えて、走行時分、停車時分、乗換、待ち時間のアークを張ることにより、各列車経路の予測不効用値をdijkstra法を用いて高速に算出することができる。

2.3 接続判断基準の組み込み

2.2までのモデルに、接続判断基準を組み込んだ場合に行なわなければならない手順について説明する。運行予測を進めていき、ある接続元列車の着ノードを計算する段階となった場合、まず、計画通りの接続を取るか、それとも解除するかどうかを接続判断基準を用いて判定する。そして、計画ダイヤで設定されていた列車の接続を解除する場合は、接続アークを取り除く。

3 接続判断基準の評価方法と評価尺度

本節では、2節の運行予測シミュレータを用いて、仮想的な遅延を確率的に繰り返し発生させ、旅客の不効用値を求め、接続判断基準の評価を行なう手法について述べる。

本来、接続判断基準は、旅客がどれだけ迷惑を被ったかで評価されるべきである。なぜならば、遅延時分のみに注目しては、その接続のために、どれだけの旅客がどれくらい迷惑したのかどうか分からないからである。シミュレーションにおいては、旅客の行動履歴を保有している。よって、旅客が被った迷惑度を表す不効用値算出式を与えれば、運行予測終了後、各旅客の不効用値を計算することができる。

遅延の発生箇所、遅延の大きさ等は、その時によってさまざまである。従って、接続判断基準を評価するためには、特定の遅延ではなく、不特定多数の遅延を考慮する必要がある。本報告では、遅延の発生箇所および遅延時分の分布が事前にわかっているものと仮定し、乱数を用いて事故を多数発生させるモンテカルロ・シミュレーションによって、接続判断基準の評価を行なう。具体的な評価尺度としては、全旅客の不効用値の平均の期待値を用いることとする。

4 ケーススタディ

4.1 対象となる線区

対象とする線区およびダイヤを図5に記す。駅Xで南北線と東西線が対面接続しており、列車は、2Lと12L、4Lと14L、6Lと16Lが相互接続している。列車間隔は全て10分、駅間走行時分は全て5分、停車時分は駅Xでは1分、それ

以外では30秒とする。

案内ダイヤは、遅延が起こった時刻に全駅に配信されるとする。その内容は、発生した遅延は加味するが、旅客流動の影響は加味せずに運行予測を行なったダイヤとする。

列車選択時における乗車対象列車は、最も早く乗車できる列車を含めて4本までとする。

旅客が被った不効用算出式は、5)より

$$\alpha \sum_j \left\{ t_j \left(\frac{C_j}{100} \right)^\beta \right\} + \gamma N + \delta T_w + T_R$$

を用いる。 t_j は駅間jの走行時分(分)、 C_j は駅間jの混雑度(%)、 N は乗り換え回数、 T_w は総待ち時分(分)、 T_R は列車乗車時分(分)である。

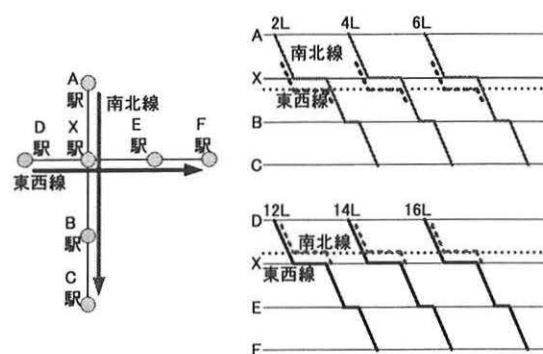


図5 対象線区とダイヤ図

4.2 接続判断基準

本報告では、接続判断基準として、接続先列車の遅延時分を用いる。接続駅Xにおいて、ある列車同士の接続を継続したために発生する接続先の列車の遅延をd分とする。

具体的には、各接続について、
 ・ $d < d_0$ ならば、その接続を継続
 ・それ以外ならば、その接続を解除
 という閾値 d_0 を導入する。

4.3 実験パターンと結果

遅延の分布は、列車2L、4L、12L、14LのA駅発、D駅着発、X駅発において遅延が起こる確率が0.1であり、遅延が起きた場合の遅延時分は一樣分布 $U(a,b)$ に従うこととする。接続判断基準の評価に着目したいため、接続判断に関係のない駅B、C、E、Fの着発および駅X発での遅延はないものとする。実験を行なった遅延分布 $U(a,b)$ および接続判断基準の閾値 d_0 を表2にまとめる。全ての実験において、遅延分布の最大値と最小値の差は2分とし、閾値は、 $a-1$ 、 a 、 $(a+b)/2$ 、 b 、 ∞ の5パターンとした。

また、旅客の到着率を2パターン設定した。実験1では、存在する全ての16パターンのODについて均一の到着率10(人/分)とし、実験2では、直通の12パターンのODの到着率を12(人/分)、乗換が必要な4パターンのODの到着率を2(人/分)とする。実験1および2における具体的な到着率および平常時における駅間最大混雑度、最小混雑度、平均混雑度を表3にまとめる。

図6および図7に、実験1および実験2の結果となる各遅延分布ごとの平均不効用値の期待値と閾値の値をグラフ化したものを示す。また、実験1の平均不効用値の期待値を表4に示す。網掛けの部分は、最も不効用値が小さかった閾値である。なお、紙面の都合で実験2の表は省略する。

表2 遅延分布と閾値のパターン

遅延分布	U(0, 2)	U(1, 3)	U(2, 4)	U(3, 5)	U(4, 6)	U(5, 7)	U(6, 8)	U(7, 9)	U(8, 10)
閾値(分)	0,1,2,∞	0,1,2,3,∞	1,2,3,4,∞	2,3,4,5,∞	3,4,5,6,∞	4,5,6,7,∞	5,6,7,8,∞	6,7,8,9,∞	7,8,9,10,∞

表3 旅客のODパターン

	到着率	最大平均遅延	最小平均遅延	平均遅延
実験1	A→X,A→B,A→C,X→B,X→C,B→C,D→X, D→E,D→F,X→E,X→F,E→F,A→E,A→F, D→B,D→C:10.0(人/分)	131% (東西線 X-E間)	86% (東西線 E-F間)	109%
実験2	A→X,A→B,A→C,X→B,X→C,B→C,D→X, D→E,D→F,X→E,X→F,E→F:12.0(人/分), A→E,A→F,D→B,D→C:2.0(人/分)	124% (南北線 X-B間)	84% (東西線 E-F間)	101%

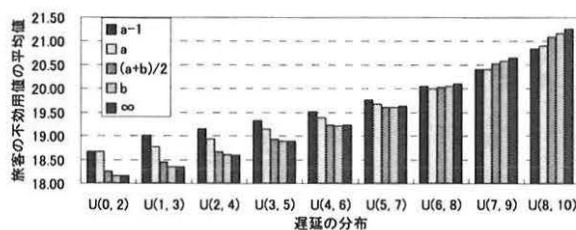


図6 実験1(均一OD)での平均不効用値の期待値

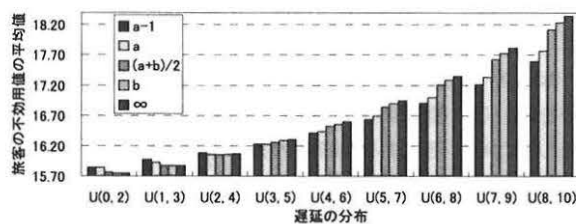


図7 実験2(直通OD多)での平均不効用値の期待値

表4 実験1(均一OD)での平均不効用値の期待値

閾値(分)	a-1	a	(a+b)/2	b	∞
U(0, 2)	18.667	18.667	18.253	18.163	18.163
U(1, 3)	19.011	18.771	18.448	18.346	18.346
U(2, 4)	19.149	18.944	18.671	18.610	18.595
U(3, 5)	19.321	19.147	18.931	18.888	18.887
U(4, 6)	19.517	19.385	19.236	19.214	19.229
U(5, 7)	19.762	19.674	19.604	19.606	19.637
U(6, 8)	20.051	20.008	20.029	20.058	20.106
U(7, 9)	20.404	20.403	20.525	20.580	20.650
U(8, 10)	20.841	20.903	21.096	21.168	21.261

4.4 考察

実験1では、平均遅延時分が5分よりも小さいU(0, 2), U(1, 3), U(2, 4), U(3, 5)では接続を継続した方が、U(4, 6), U(5, 7), U(6, 8)では閾値を6分、U(7, 9), U(8, 10)では閾値を7分とすると、最も不効用値が小さくなるという結果となった。一方、実験2では、U(0, 2), U(1, 3)では接続を継続

した方が、U(2, 4), U(3, 5), U(4, 6)では閾値を3分、U(5, 7)では4分、U(6, 8)では5分、U(7, 9)では6分、U(8, 10)では7分とすると、最も不効用値が小さくなるという結果となった。このように、同じダイヤであっても、ODに依存して最適な閾値が異なることを確認することができた。

以下、実験1の結果を例にして、最適な閾値についての考察を行なう。一般に、接続を解除すると、乗換旅客の待ち時間および次の接続先列車への乗車人数が増加し、接続を継続すると、当該接続先列車の遅延時分が増加する。まず、接続を継続した方がよいという評価となった平均遅延時分が列車間隔の10分の半分である5分よりも小さい場合(U(0,2), U(0,3), U(2,4), U(3,5))を考える。接続を解除した場合は、次の接続先列車までの待ち時間が長く、かつ、次の接続先列車へ乗客が集中する。接続を継続した場合は、当該接続先列車への遅延時分はあまり大きくはない。そのため、接続を解除した方が不効用値が大きくなったと考えられる。次に、最適な閾値が存在した平均遅延時分が5分以上の場合(U(5,7), U(6,8), U(7,9), U(8,10))を考える。接続を解除した場合の次の接続先列車への待ち時分は5分以内となり、接続を継続した場合の当該接続先列車の遅延時分は5分を超える。また、遅延時分が大きい場合、接続に関わらず、列車への乗車人数にばらつきが生じており、混雑不効用での差は少ない。よって、遅延解除の場合の待ち時間不効用および混雑不効用と、接続継続の場合の遅延時分の増加による不効用との大小関係が入れ替わるところが、接続解除基準の最適な閾値となっていると考えられる。

5 まとめと今後の課題

本報告では、接続判断基準の評価尺度として旅客の平均不効用値の期待値を用いて、ケーススタディを通して、遅延時分の分布と接続判断基準の閾値との関係について考察した。今後は、閾値による接続判断基準ではなく、最適な接続を自動的に決定するアルゴリズムの開発に取り組み、より高度な接続判断を含んだモデルへと拡張する予定である。

参考文献

- 1) 安部, 荒屋:「最長経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)
- 2) 武内, 富井:「鉄道の運行計画の頑健性評価に関する考察」, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-03-40 (2003)
- 3) 武内, 富井:「鉄道の計画ダイヤの頑健性評価」, J-Rail2003, No.03-51 (2003)
- 4) 武内, 富井:「旅客の不効用値を元にした列車の接続判断のケーススタディ」, OR 学会 2005 年秋季研究発表会, pp.66-67, (2005)
- 5) 家田, 赤松, 高木, 畠中:「利用者均衡配分法による通勤列車運行計画の利用者便益評価」, 土木研究学術・論文集, No.6 (1998)