

列車ダイヤの頑健性評価手法の開発

輸送情報技術研究部 運転システム
研究員 武内陽子

1 はじめに

多くの旅客が鉄道を利用する都市圏では、短い列車間隔で列車が運行されており、また、旅客の利便性を向上させるために、対面ホームでの接続や他線区との相互乗り入れもさかんに行なわれている。このような線区では、駆け込み乗車の発生、天候等による運転時分と旅客流動の変動等が列車運行に与える影響が大きいと、これらに起因する小さなダイヤ乱れが頻繁に発生している。旅客の視点からは、このような小さな遅延が発生しても安定した列車運行サービスが提供されること、すなわち列車ダイヤが頑健であることが重要である。ここでは、旅客の視点に基づく列車ダイヤ頑健性評価指標を定義し、評価指標を算出する手法について説明するとともに、実データを用いた列車ダイヤの頑健性評価のケーススタディ結果について紹介する。

2 都市圏稠密線区の運行実績分析

日常の小さなダイヤ乱れの分析を行なうために、運行管理システムから取得した列車運行実績データをさまざまな角度から分析するシステム「@Plan」(A Prc Log Analyzer、エープラン)を開発した。図1に起動画面を示す。@Planでは、対象期間、天候、曜日、時間帯、列車種別、対象駅範囲などを指定して、着発の遅延、遅延の相関、運転時分、停車時分、折り返し時分の分析を行なうことが可能である。実際の都市圏稠密線区の運行実績データを用いて行なった分析例を、2.1と2.2で紹介する。

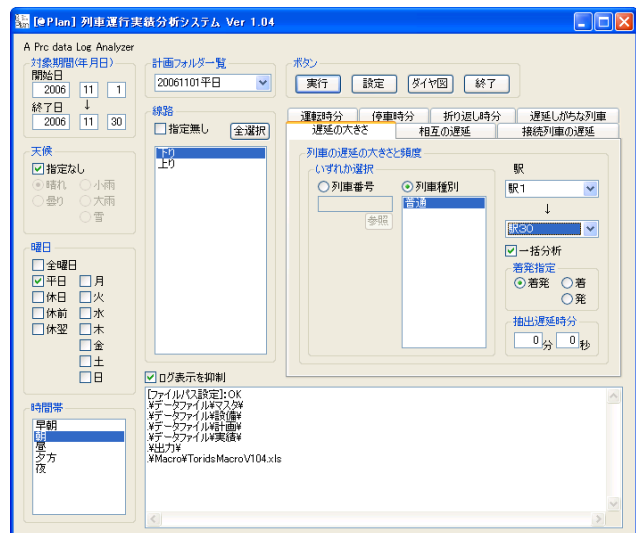


図1 @Planの起動画面

2.1 @Planの実行例①：列車の遅延状況

遅延の大きさを分析する機能を用いて、各駅での到着時点／出発時点の平均遅延時分を算出してその推移を観察した。その結果、上りの朝時間帯においては、次のような傾向が見られた。

- (1) 郊外の駅：遅延時分の変化は少ない
- (2) 他線区との乗り換えの多い駅：駅での停車時に遅延が増加していく
- (3) (2)以降の駅：(2)で発生した遅延がなかなか回復しない

2.2 @Planの実行例②：駅での停車時分

駅での列車ごとの平均停車時分を算出する機能を用いて、2.1の分析で遅延が最も大きかった駅での平均停車時分の推移を観察した。その結果、次のような傾向が見られた。

- (1) 7:00～7:30 頃：停車時分は比較的短く、計画の停車時分からの延びも小さい
- (2) 7:30～8:30 頃：停車時分が増加していき、それに伴って計画の停車時分よりも長く駅に停車している
- (3) 8:30 以降：停車時分は(2)より短くなり、計画の停車時分に近づいていく

3 列車ダイヤの頑健性評価指標の明確化

ここで扱う「外乱」とは、駆け込み乗車による再開扉などの小さなダイヤ乱れを対象とし、運転整理を伴わないものとする。そして、予期せぬ外乱が発生した時においても、安定した輸送サービスを提供できる列車ダイヤを「頑健な列車ダイヤ」と呼ぶ。

3.1 列車の遅延と旅客の遅延の例

一般には、列車遅延は輸送サービスの低下と考えられることから、既存研究では列車遅延をもとに運行計画の頑健性を定義している。しかし、旅客の視点から見れば、列車遅延は旅客がこうむった輸送サービスの低下の度合いを直接反映しているものではない。個々の旅客にとっては、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が重要となる。

たとえば、図2のように駅Bで接続している線区において「列車の遅延」と「旅客の遅延」を考える。この線区では、図3のように、列車1と列車3、列車2と列車4がそれぞれ接続している。ここで、駅Aから乗車して駅Bで乗り換えて駅Eまで行く旅客が、列車1の出発直前に駅Aに到着したとする。列車1の駅Bへの到着時に遅延が発生した場合、遅延の大きさ次第で列車3と接続がとれるかが決まり、その結果、旅客は遅延しない場合（図3左）と大きく遅延する場合（図3右）にわかれる。

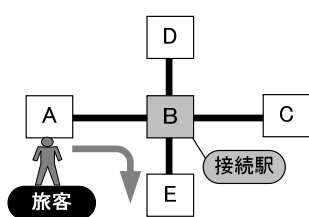


図2 接続のある線区の例

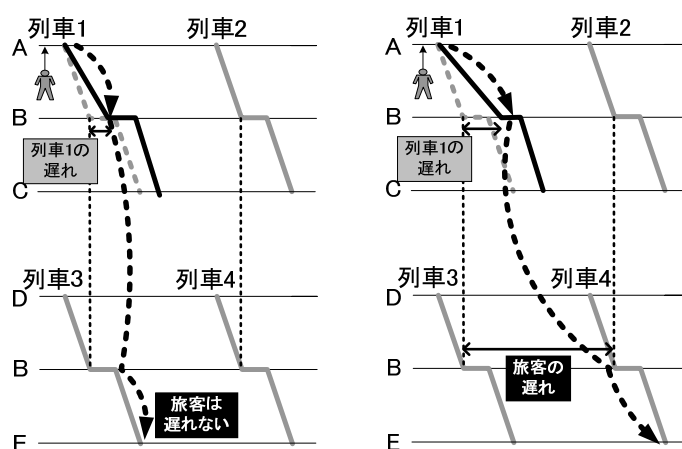


図3 列車の遅延と旅客の遅延との比較

(左：遅延が小さいとき、右：遅延が大きいとき)

3.2 旅客の視点に基づく輸送サービスの低下度合い

3.1 の例のように、列車遅延の大きさと乗り継ぎのある旅客の遅延の大きさは、異なる場合がある。すなわち、個々の旅客の視点に立った場合には、列車遅延の大きさだけでは輸送サービスを表現することはできない。そのため、本研究では旅客の利便性を表わす指標である不効用値を用いて、運行計画の頑健性を定義することを提案する。不効用値の例としては、待ち時間、乗り換え、車内の混雑度にある係数をかけて乗車時間に換算して合計した値等がある。そして、個々の旅客について、遅延時の不効用値と平常時の不効用値との差分を計算し、その総和を、「遅延が

起こった場合の輸送サービスの低下度合い」とする。具体的には（式 1）の通りとなる。

- 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

$$\text{遅延が起こった場合の輸送サービスの低下度合い} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - d_i) \quad (\text{式 1})$$

3.3 外乱を確率的に表現する手法の導入と頑健性評価指標の定義

（式 1）の輸送サービスの低下度合いを計算するためには、発生する小さな遅延を決める必要があるが、外乱の発生頻度や発生箇所、発生時刻、それによる列車の遅延を、事前に確定的に知ることとは不可能である。この問題を解決するために、本研究では、外乱のデータを実態調査等にもとづいて確率的に知ることができるという前提を元に、頑健性を確率的に定義する。すなわち、頑健性評価指標を、（式 1）の輸送サービスの低下度合いの期待値として定義する。

3.4 モンテカルロ・シミュレーションによる頑健性評価指標の算出方法

頑健性評価指標を算出するためには、各旅客がどの駅からどの列車に乗車したかという履歴が必要となるが、現在、このような旅客の乗車履歴データを得ることは不可能である。

そこで、本研究では、旅客流動を加味した列車運行シミュレータを開発し、これらのデータを取得する。開発した列車運行シミュレータは、旅客 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おり、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する。

そして、外乱を表わす確率をもとに乱数を用いて模擬的な外乱を発生させてシミュレーションを行ない、個々の旅客の不効用値を算出する、ということを繰り返し実施するモンテカルロ・シミュレーションにより、頑健性評価指標を算出する手法を提案する。頑健性評価指標は、具体的には（式 2）となり、その計算の流れを図 4 に示す。

- m : シミュレーションを繰り返す回数

$$\text{列車ダイヤの頑健性評価指標} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \text{遅延}j\text{が起こった場合の輸送サービスの低下度合い} \quad (\text{式 2})$$

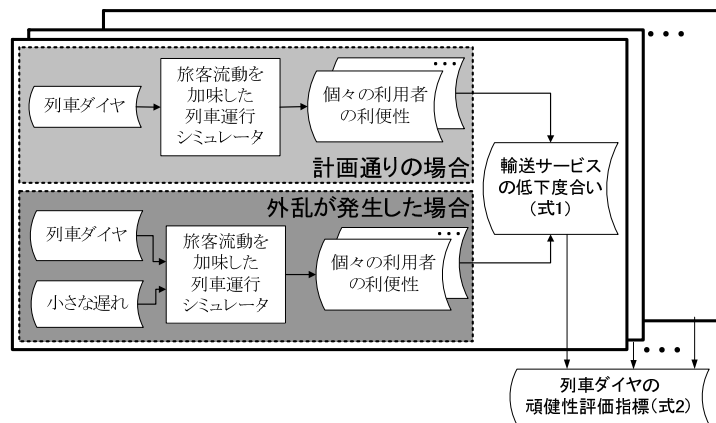


図 4 頑健性評価指標を計算する流れ

4 実データを用いたケーススタディ

ケーススタディとして、実際の列車ダイヤデータを用いて（式 2）で提案した頑健性評価指標を計算した。また、列車ダイヤの駅間走行時分に付加されている余裕時分を、他の駅間や停車時

分に再配分した列車ダイヤ案を2つ作成して、頑健性評価指標を計算し比較を行なった。実験対象線区のデータを表1に、列車ダイヤおよび作成した列車ダイヤ案の一部を図5に示す。実際の列車ダイヤは、設備や運用上の様々な厳しい制約を満たした上で作られていることから、列車ダイヤを大幅に修正することは非現実的である。そのため、本ケーススタディでは、列車ダイヤの駅間走行時分に付加されている余裕時分の再配分により、新しい列車ダイヤ案を作成することとした。具体的には、接続駅であるF駅とJ駅に着目し、それらの停車時分に余裕を集中的に配分するパターンを適用した列車ダイヤを作成した。

計画ダイヤと作成した列車ダイヤ案それぞれの頑健性評価指標を算出して比較した結果、最大で約1.4%の頑健性評価指標の向上が確認された(表2参照)。

表1 実験対象とした実データ

線区	駅数 39 駅、他線区との相互乗り入れあり、他線区への接続がある駅が複数あり
列車	7時～8時に始発駅を出発する列車(当該線区内で完結の列車は、下り 23 本、上り 17 本)
旅客	[1]を元に算出(シミュレーション内での総旅客人数：121,427 人)

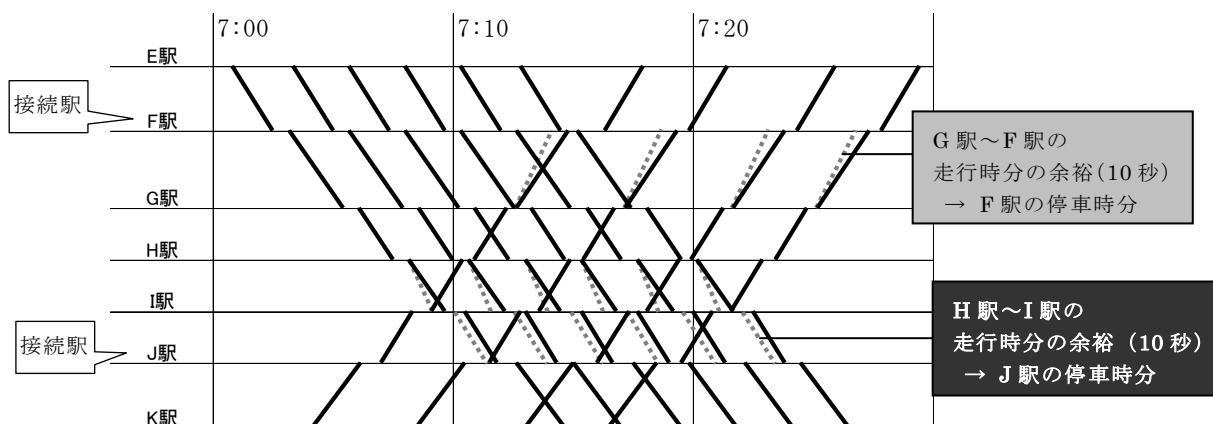


図5 計画ダイヤ(一部抜粋)と余裕時分の再配分パターン

表2 頑健性評価指標の比較

	改善率	頑健性評価指標
計画ダイヤ	—	206,942 分
J 駅に余裕を配分	1.4%	204,092 分
F 駅に余裕を配分	0.4%	206,030 分

5 まとめと今後の課題

本研究では、旅客の視点に基づく列車ダイヤの頑健性評価指標を提案し、その算出方法を提案した。また、実データを用いたケーススタディの結果を紹介した。

参考文献

- [1] 財団法人 運輸政策研究機構：平成 12 年 大都市交通センサス 首都圏報告書、財団法人 運輸政策研究機構、2002.3