

3312 鉄道の計画ダイヤの頑健性評価

Robustness measures in train schedules

○武内 陽子 ((財)鉄道総研)

正 [電] 富井 規雄 ((財)鉄道総研)

TAKEUCHI Yoko, Railway Technical Research Institute

TOMII Norio, Railway Technical Research Institute

In railways, trains are operated based on the schedules determined and distributed in advance. Accidents and troubles, however, sometimes prevent the trains from being operated punctually. In this paper, we introduce a notion of robustness of train operation schedules as a serviceability measure indicating how the schedules can be stable even when they are unexpectedly disrupted. Then, we propose a method to evaluate robustness of a given train schedule using Monte Carlo simulation and show the results of several experiments we conducted focusing on the influence of margins in train running times and dwell times on the robustness measures.

Keywords: railway, train schedule, monte carlo simulation, robustness

1. はじめに

鉄道においては、あらかじめ定められた運行計画（計画ダイヤ）に従って列車が運転されているが、予期せぬ事態の発生によって、列車運行に混乱が生じることがある。本稿では、少々の外乱が発生した場合でも、安定した列車運行サービスを提供できることを、計画ダイヤの頑健性 (robustness) と呼ぶ。

一般に、頑健性とは非常に広い概念であり、運行計画の頑健性をどのように定義するべきであるから議論を開始する必要がある。そのためには、具体的なケーススタディを通して、様々な角度から運行計画の頑健性を定性的・定量的に考察していく必要があると考えられる。

筆者らは、[1]で、日々変動する旅客流動を外乱とする場合での計画ダイヤ予測手法を提案し、シミュレーション実験で列車間隔の異なる3つの列車ダイヤ案に対する頑健性評価を行なった。その結果、旅客流動に適応した列車間隔を設定したダイヤ案が最も頑健であることを、定量的に示すことができた。

本稿では、頑健性評価の具体例として、旅客が多く過密なダイヤにおける効果的な余裕時分配分問題を取り上げる。余裕時分を配分したダイヤ案の頑健性を、[1]の手法に従って求め、それらを比較することで、効果的な余裕時分配分ルールを抽出することが目的である。特に、余裕時分を停車時分につけるのか、走行時分につけるのかに着目して、分析を進める。

2節では、運行計画の頑健性について触れ、計画ダイヤの頑健性と評価尺度について述べる。3節では、確率を用いた列車運行予測手法の概要を説明する。4節では、シミュレーション実験のパラメータについて説明し、5節に実験結果と考察、6節にまとめと今後の課題を記す。

2. 運行計画の頑健性の考え方

2.1 系としての頑健性

鉄道は、計画ダイヤ、設備（配線、待避線、車両など）、環境（利用者）、運転整理手段等から構成されると考えられる。よって、運行計画の頑健性を考える場合、運行計画そのものだけを対象とすることは意味がない。それは、外乱等の予期せぬ事態が生じた場合の影響の度合いは、利用者の数などの環境に大きく左右されることや、ダイヤの変更（運転

整理）の可能性と効果は、線区の設備（駅の位置、配線等）に大きく依存する等の理由による。また、どのような運転整理手段を用いるかにも依存する。

すなわち、運行計画の頑健性を考える場合には、その運行計画が置かれている環境を構成している要素全体を対象とする、言い換えれば、計画ダイヤ、配線・車両等の設備条件、利用者数等の周囲条件、ダイヤが乱れた時にとられる運転整理手段等を含む系(system)全体に対しての頑健性を考慮する必要があると考えられる。

本稿では、特に、利用者とダイヤとの関連に焦点をあてて、ダイヤの頑健性に関する考察を行なう。

2.2 計画ダイヤの頑健性

計画ダイヤの頑健性とは、それに基づいて列車が走行した場合、少々の外乱が発生しても、安定した列車運行を提供できることと考えられる。外乱とは、天候や乗車人員や運転士の操縦方法の相違等による駅間走行時分のばらつき、旅客の集中等における停車時分のばらつき等が挙げられる。このような外乱が発生したときにおいても、なるべく遅延が発生しない、あるいは、遅延が発生してもそれが他の列車に伝播しないダイヤが頑健であると考えることが適切であると考えられる。

[1]では、頑健性の評価指標として次の5つを挙げた。

指標1：各列車の各駅での到着遅延時分の平均

指標2：各列車各駅での到着遅延時分の分散

指標3：各列車各駅での到着遅延時分の平均の最大値

指標4：各列車各駅での到着遅延が発生する確率

指標5：各列車各駅での到着遅延が20秒以上となる確率

本稿でも、指標1～5の評価指標を元に比較を行なうこととする。

3. 確率列車運行ネットワーク

走行時分や停車時分は一定ではなく、日々変動すると考えられる。よって、本稿では、これらの変動を確率分布で表し、列車運行を確率的に表現するモデルを用いる。列車の運行計画は、列車の駅への着発事象をノードとし、ノード間の実行順序に関する制約をアークとする一種のPERTネットワークを用いて表現することができる[2]。このPERTネットワークを基本とし、乗降時分など事象間の所要時間が確率的に変動する部分のアークの重みを確率変数で表し

たネットワークを、確率列車運行ネットワーク (Probabilistic Train Operation network (PTO network)) と呼ぶこととする。

確率列車運行ネットワークモデルを用いることによって、列車運行実績を確率的に予測することが可能になる。具体的には、各ノードへの最長パスの重みの確率分布を算出することになる。

しかし、分布を解析的に求めることは、困難である。これは、確率列車運行ネットワークは、アークの重みを表す確率変数が互いに独立ではないことや、ノードの時刻分布が正規分布などの一般的に良く知られた分布とはならない等の理由による[1]。

本研究ではモンテカルロ法を用いたシミュレーションによって分布の推定を行なう。乱数を用いてアークの重みの確率変数の実現値を決めれば、通常の PERT と同じ手順で列車運行予測を行なうことができる。よって、乱数をくり返し発生させ、何度もシミュレーションを行なうことで、列車運行実績の分布を推定することができる。

確率列車運行ネットワークの詳細は、[1]を参照していただきたい。

4. 頑健性評価のシミュレーション実験

ここでは、余裕の含まれていないある列車ダイヤを元にして、列車の停車時分と走行時分に余裕時分を加えたダイヤ案の比較評価を行なう。具体的には、停車時分に余裕をつけた3つのダイヤ案と、走行時分に余裕を持たせた4つのダイヤ案それぞれに対して、確率的列車運行予測を行ない、頑健性の比較を行なう。

なお、これら7つのダイヤ案は、列車種別毎の列車本数、総列車キロ、トレインアワーが等しくなるように作成した。その理由は、到達時分等の利用者の視点から見た利便性をほぼ同じとした上で、頑健性を比較する必要があると考えるためである。

変動要素

旅客の到着がある確率分布に従って、日々変動し、それによって停車時分が変動することがあるものとする。列車の走行時分は一定とし、変化しないものとする。

旅客の到着

OD ごとの旅客の到着分布はポアソン分布、つまり、旅客は列車ダイヤを見ずに、ランダムに発生することとする。到着率は、Table 1 の通りとする。駅1と駅2は比較的小さなベッドタウン、駅3は大きなベッドタウン、駅5は比較的小さなオフィス街、駅6は大きなオフィス街であると想定した。それぞれの特徴は以下の通りである。

- ・駅1, 2, 3: 降りる乗客は少なく、乗る乗客が多い。
- ・駅4: 降りる乗客も乗る乗客も多い。
- ・駅5, 6: 降りる乗客は多く、乗る乗客は少ない。

Table 1: Arrival rates (person / min)

到着駅 出発駅	1	2	3	4	5	6
1	0.0	0.5	0.5	2.0	1.0	2.0
2	0.0	0.0	0.5	2.0	1.0	2.0
3	0.0	0.0	0.0	5.0	2.0	4.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	6.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

旅客の列車選択ルール

旅客は目的駅に最も早く到着する列車を選択するものとする。

旅客流動の予測

旅客流動が停車時分に与える影響を考察し、その結果と

して列車運行の傾向がどうなるかを予測しておく。

旅客はランダムに駅に到着し、最も早く来た列車に乗るため、列車の混雑度は駅での列車間隔に依存する。列車間隔が狭ければ列車は空き、広ければ待っている乗客がたくさんいるために列車は混む。設定した到着率を見ると、駅4での乗降人数が多いため、駅4での乗降時間が延びて、遅延が発生する確率が高いと考えられる。そこで、遅延が発生しないよう、または発生したとしても、後の列車に伝播しないよう、余裕時分を配分することが効果的であると考えられる。

想定するダイヤ

駅1から駅6まで運行する列車と、駅3から駅6まで運行する列車の2種類の列車がある。各種別の列車本数は4本ずつとする。

大元となる余裕時分のない列車ダイヤは、駅1と駅2での列車間隔が6分、駅3～駅6での列車間隔が3分、各駅の停車時分は全て30秒である。また、各駅間の到達時分は、4分である(ダイヤ図をFig. 1に記す)。

このダイヤに対し、各列車に10秒ずつの余裕時分を配分する。具体的には、余裕時分を均等に配分した場合(案1, 4)と、混雑すると考えられる駅4に集中して配分した場合(案2, 6)、駅4の前後に配分した場合(案3, 5, 7)である。

<停車時分に余裕を持たせる場合>

案1: 駅2～5の停車時分に2.5秒ずつ配分

案2: 駅4の停車時分に10秒配分

案3: 駅5の停車時分に10秒配分

<走行時分に余裕を持たせる場合>

案4: 駅2-3, 3-4, 4-5, 5-6の走行時分に2秒ずつ配分

案5: 駅3-4の走行時分に10秒配分

案6: 駅4-5の走行時分に10秒配分

案7: 駅5-6の走行時分に10秒配分

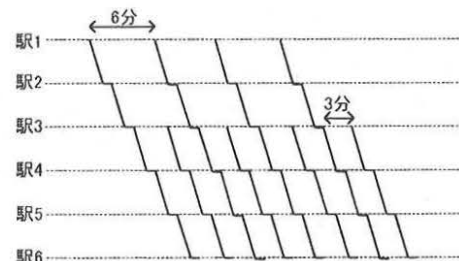


Fig. 1: Original train schedule

必要乗降時間の求め方

駅での乗降においては、降車が終わってから乗車が始まるものと仮定する。一般に、混雑度が高くなるにつれ、1人当たりの必要乗降時間は長くなる。このことを以下のようにモデル化する。

必要乗降時間を d 、降車人数を n_{off} 、乗車人数を n_{on} 、列車が着く直前の乗車率を r_{off} 、降車が終わって乗車が始まる直前の乗車率を r_{on} 、乗車率が0%の時に1人当たりに必要な降車時間および乗車時間をそれぞれ c_{off} 、 c_{on} とするとき、必要乗降時間を以下の式で表す。

$$d = f(r_{off}) c_{off} n_{off} + f(r_{on}) c_{on} n_{on}, f(r) = ar^2 + 1, a > 0$$

実験では、 $a = 0.25$ 、 $c_{off} = 0.416$ 、 $c_{on} = 0.497$ [3]とする。

サンプルバスの数

サンプルバスの数は1000とする。

5. 実験結果

5.1 到着時刻分布

Fig. 2 から Fig. 8 は案 1 から案 7 での駅 5 および 6 における列車番号 1013, 1015 の着時刻分布である。なお、1001～1011 の列車も同様の傾向が見られたが、見やすさの関係上省略した。

分布図の見方

分布図は、横軸が時刻、縦軸が確率を表している。計画時刻に到着する確率が高く、とがっている分布は遅延しにくいと解釈できる。一方で、裾が長い分布はばらつきが多く、遅延が発生しやすいと考えられる。以下では、分布の形、分布形の高さ、裾の長さに注目して考察を行なう。

1015 駅 5 への到着時刻分布

すべての案において、駅 3 始発の列車 1015 はほとんど遅延せず到着できていることがわかる。

1013 駅 5 への到着時刻分布

駅 4 での停車時分の延びを引きずるため、すべての案において、駅 5 への到着時刻には遅れが生じていることがわかる。分布形の差はあまり見られないが、案 2, 6 は計画時刻に到着する確率が高く、言わば、直角三角形のような形をしているのに比べ、案 1, 3, 4, 7 は山形である。これは、案 2, 6 では計画通りに到着する確率が高く、案 1, 3, 4, 7 は、遅れる確率が高いことを意味している。一方で、分布形の高さおよび裾の長さは、すべての案ではほぼ同じであり、全体的には、良く似ていると考えられる。

1013 駅 6 への到着時刻分布

通常、駅 5 での乗降人数は駅 4 よりも少ないため、駅 5 では、駅 4 での遅れを回復できる可能性がある。よって、前述のように、駅 5 での分布が似ていたとしても、余裕時分の分配方法によって、駅 6 での分布形が変わると考えられる。

結果として、駅 6 への到着時刻分布は、案 2, 3, 6, 7 と案 1, 4, 5 で明らかに異なっている。案 2, 3, 6, 7 は、案 1, 4, 5 に比べて分布の高さが高く、計画時刻に到着する確率がほぼ倍になっている。一方、すべての案において、分布形は、計画時刻に到着する確率が高い直角三角形に近い形となっており、裾の長さも、ほぼ同じである。

案 3, 7 については、駅 5 の停車時分、または駅 5-6 の走行時分に余裕をつけたため、駅 6 での到着遅延が回復している。案 2, 6 については、駅 4 での遅れが、駅 5 で回復できる範囲の遅れである確率が高かったため、駅 6 の到着時刻が計画通りになる確率も高くなっていると考えられる。

このことから、遅延しがちな駅の次駅において遅延を回復できる可能性がある場合は、分布の高さ、裾の長さよりも、分布の形が大きく影響してくると思われる。具体的には、遅延時分が次駅で回復できる範囲内である確率が高いこと、つまりは計画時刻近くの確率が高いダイヤ案が、遅延の伝播を防ぐのに効果的であると考えられる。

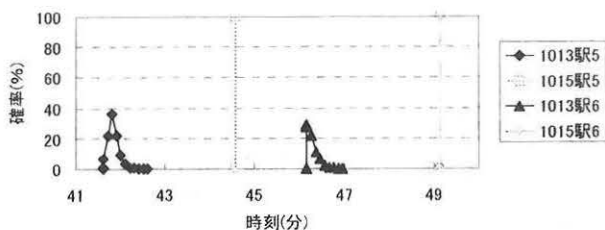


Fig. 2 : Dist. of arrival times (plan 1, station 5 & 6)

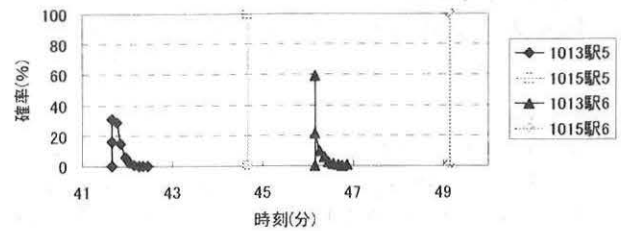


Fig. 3 : Dist. of arrival times(plan 2, station 5 & 6)

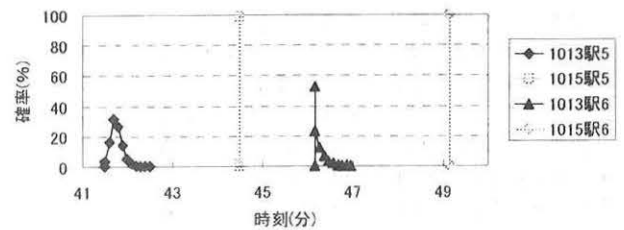


Fig.4: Dist. of arrival times (plan 3, station 5 & 6)

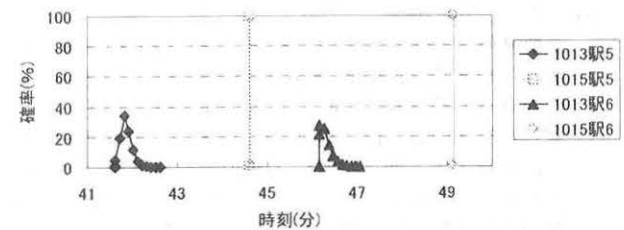


Fig. 5 : Dist. of arrival times(plan 4, station 5 & 6)

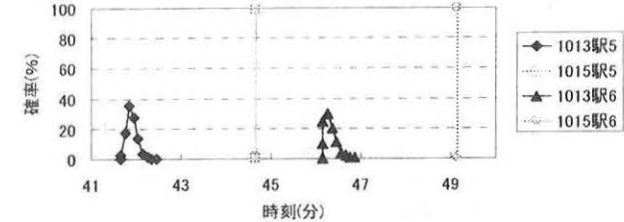


Fig. 6 : Dist. of arrival times (plan 5, station 5 & 6)

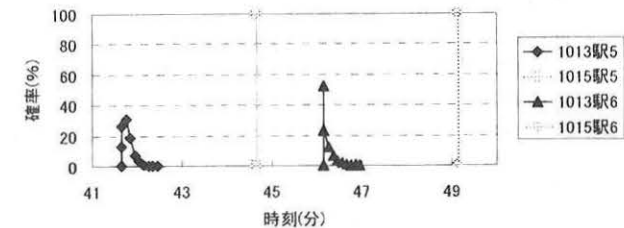


Fig. 7 : Dist. of arrival times(plan 6 station 5 & 6)

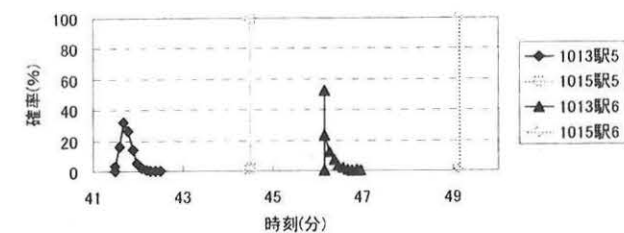


Fig. 8 : Dist. of arrival times (plan 7, station 5 & 6)

5.2 頑健性評価指標

Table. 2とFig. 9に案1～案7における頑健性評価指標を示す。Fig. 9は、左から右に向かって案1から案7を表している。

全体傾向

Fig. 9を見ると、指標4、5は、どの案でもあまり差がない。つまり、どの案を採用しても、遅れやすい箇所が同じであると考えられる。指標1、2、3については、案2と案6が特に良い。案2は、混雑する駅4での停車時分に余裕をつけているためであり、案6は、駅4での発時刻が遅れても、駅4-5の走行時分で回復できるためである。

停車時分と走行時分への余裕配分

案2と案6を比較することで、停車時分と走行時分それぞれに余裕を分配したときの影響について考察する。全ての指標において、案2がわずかではあるが優れている。

以下、説明のため、下記の表記を導入する。

d_2 : 案2における駅4での停車時分(秒)

d_6 : 案6における駅4での停車時分(秒) ($d_2 > d_6$)

d^* : 駅4でのある列車の必要乗降時分(秒)

また、前提として、当該列車以前の列車運行は、列車ダイヤ通りだったとする。

(1) $d^* < d_6 < d_2$ の場合

必要乗降時分が設定された停車時分以内に収まるため、駅5への着時刻は案2、案6とも計画通りとなるが、当該列車への乗車数は、 d_6 から d_2 の間(Fig. 10①)に到着した旅客の分だけ、案2の方が多し。列車ダイヤ通りに運行できる間は、車内人数の差が停車時分に影響を及ぼすことはないが、例えば、次列車での必要乗降時分が停車時分を上回ったとき、次列車には、案6の方が乗車人数が多くなる(Fig. 10②)。そのため、案6での停車時分は案2よりも延びる可能性が多く、結果として、遅延の平均と分散、最大遅延値が高くなっていると考えられる。

(2) $d_6 < d^* < d_2$ の場合

両案での駅5への到着遅延は発生しないが、(1)と同じように、案2では当該列車に乗ることができた乗客が、案6では乗ることができないため、同様の結果となる。

(3) $d_6 < d_2 < d^*$ の場合

案2、案6ともに当該列車への乗車人数は同じであり、駅5への到着遅延も同じである。よって、この場合は、案2と案6に差は生じない。

今回比較したダイヤ案では、5.1節での考察の通り、駅5への着時刻が計画通りである確率がかなり低い。具体的には、計画通りとなる確率は、案2では約18%、案6では約15%であった。そのため、列車は常に遅れ気味となり、(3)の状況が頻繁に起こるため、案2と案6の頑健度の差がわずかであったと考えられる。

余裕の均等配分と集中配分

余裕を均等に分ける場合と、特定の箇所に集中させた場合を比較する。案2、案6を除けば、均等に余裕を配分した案1と案4が最も良い。これは、必要のないところに余裕をつけても(結果として必要なところに余裕がなくなるので)、遅延の平均や分散や最大遅延を減らすことに対しては、あまり効果がないと解釈できる。興味深いのは、駅5で余裕を取った場合(案3、案7)である。5.1節の1013駅6の分布図を見ると、案3と案7は、案2と案6とほぼ同じ形となっている。これは、遅れ気味な駅の次駅に余裕時分をつけておくと、それ以降は計画に近くなるように回復できる可能性が高いことを、定量的に示していると考えられる。

Table. 2 : Results of experiments

		(指標1)遅延の平均(秒)	(指標2)遅延の分散(秒)	(指標3)最大遅延(秒)	(指標4)遅延が発生する確率	(指標5)遅延が20秒以上になる確率
停車時分に余裕	案1	2.577	0.788	16.200	0.324	0.188
	案2	1.328	0.318	8.100	0.288	0.166
	案3	2.603	0.887	18.780	0.313	0.196
	案4	2.841	0.914	17.160	0.333	0.195
走行時分に余裕	案5	3.065	0.966	17.760	0.335	0.201
	案6	1.528	0.384	9.120	0.298	0.168
	案7	2.608	0.889	18.780	0.313	0.196

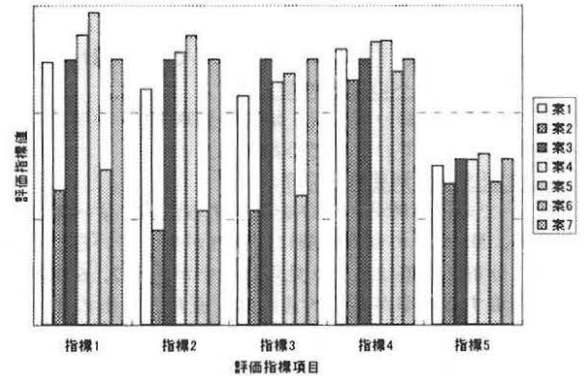


Fig. 9 : Results of experiments

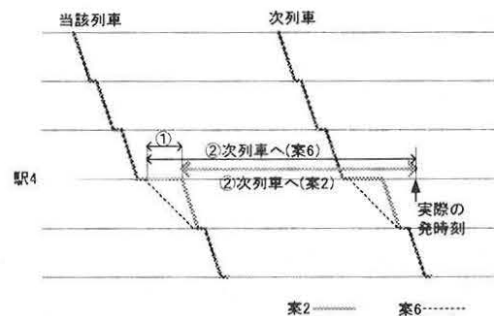


Fig. 10 : Comparison of the plan2 and the plan6

6. まとめと今後の課題

本稿では、変動要素を確率的に表す確率列車運行ネットワークによって、列車運行予測を行なう手法を用いて、余裕時分配分問題という観点から見たダイヤの頑健性評価を行なった。旅客流動のみを外乱要素として取り上げた今回の実験では、遅れ気味な駅の停車時分に余裕をつけることが最も効果的であり、必要ない部分への余裕時分の配分は、頑健性を下げることが観察された。

列車運行における変動要素は、旅客流動だけではない。今後の課題として、様々な変動要素を取り入れたときに、計画ダイヤの頑健性がどのように変化するか、定量的・定性的評価を通して、頑健な計画ダイヤの特徴の深度化を行なっていくつもりである。

参考文献

- [1] 武内陽子, 富井規雄:「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/リニアドライブ合同研究会, 2003.7.
- [2] 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」, 情処論, Vol.27, No.1, 1986.
- [3] 平井 力, 富井規雄:「運転整理案評価のための列車別乗車人員推定手法」, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-99-72, 1999.