

簡易な列車運行モデルを用いた高密度運転線区のダイヤ設定と遅延伝播に関する研究

○ [電] 國松 武俊

A study of high density timetables and train delay propagation with a simple operation model.

○Taketoshi Kunimatsu, (Railway Technical Research Institute)

In commuter lines in Japan, chronic train delay has occurred at peak hours. One reason of that is the increase of dwell time in a certain station by congestion, but the short interval of train also encourages the chronic delay. That is, the delay which occurred on a certain train easily propagates a successive train. In this research, we represent the phenomenon of train delay propagation with a simple train operation model. We also estimate the train delay when stated operation interval and station stoppage time on a timetable is modified.

キーワード：列車遅延，列車ダイヤ，高密度運転，運転時隔，停車時間，遅延伝播

Key Words：train delay, train timetable, dense operation, train interval, dwell time, delay propagation

1. はじめに

大都市圏の鉄道においては、度重なる新線建設等の輸送力増強策にも関わらず、通勤ラッシュ時間帯の混雑度が一部路線で最大で 200%を超え、慢性的な混雑とそれに起因した列車遅延が発生している。鉄道事業者では、この通勤需要に対応するため、ラッシュ時間帯は最大限の本数の列車を設定し、さらにダイヤ設定を工夫することで、混雑度の平準化、列車遅延の抑制に取り組んでいる。

しかし、このダイヤ設定の工夫は、現行ダイヤで問題となっている箇所に対し、担当者自身が自分の経験に基づいて修正する、という作業を重ねて構築されることが多く、どのような路線にどのようなダイヤ設定が最適なのか、事前に定量的な評価がなされているとは言い難い。例えば、一定の時間帯に走る列車本数の増加は、混雑度の低下という観点からは望ましいが、列車密度が増加するため、一度ある列車に遅延が発生した場合には、その遅延が伝播しやすく、遅延の収束まで長い時間を要する、というトレードオフがある。これを考慮した場合に、どの程度の列車本数が望ましいのかは明らかでない。

本研究では、特に遅延の波及現象に着目し、大都市圏のような高密度運転線区を対象に、ラッシュピーク時間帯のダイヤ設定が、列車運行にどのような影響を及ぼすのかを、簡易な列車運行モデルを用いたシミュレーションで考察す

る。そして、ピーク時間帯におけるダイヤ設定上の列車本数、各駅停車時間と、そのときの最大遅延等の関係を明らかにすることで、望ましいダイヤ設定方法が検討可能なことを示す。

2. 高密度運転線区における遅延の発生と伝播

2.1 大都市圏の通勤輸送の現状

(1) 遅延発生メカニズム

大都市圏の通勤時間帯には、急病人等のトラブルによるものを除けば、駅での乗降に伴う停車時間の増加によって遅延が発生する。この停車時間は、乗降人数の増加に伴い増加をする傾向にあり、「増延」と呼ばれる、ある駅で遅延が発生した場合に、前の列車との間隔が開くため、次の駅で列車を待つ乗客の数が増え、それにより停車時間が増加し、さらなる遅延が発生する、という現象もみられる。この現象については、乗降人数と停車時間との関係を明らかにした研究¹⁾、列車運行全体に対する影響を推定するシミュレータを構築した研究²⁾等が報告されている。

一方で、停車時間は乗降人数のみで確定的に決まるのではなく、実際には、ドア挟み、駆け込み乗車等により多少変動し、一定値ではない。例えば、ある駅において各扉で 30 人が乗降を行う場合、停車時間が 40 秒で済む場合もあれば、ドア挟みが起こり 60 秒かかることもある。したがって、たとえダイヤ設定上の停車時間を、実際の停車時間

の平均値と同じか上回るように設定しても、場合によっては、ダイヤ設定上の停車時間を上回る停車時間となり、遅延が発生することもある。この停車時間の変動は、列車の混雑度、乗降人数が多いほどドア挟み等の外乱が起こりやすく、変動幅も大きくなる傾向にある。

(2) 遅延伝播のメカニズム

ある列車、駅での停車時間が増加し遅延した場合、その後続列車が、先行列車がホームに止まっているために駅ホームに入らず、遅延が発生する場合がある。これが基本的な遅延の伝播現象である。

このとき、遅延の伝播する度合いは、先行列車の停車時間の増加量以外に、「追込み」と呼ばれる、先行列車が発車してから後続列車がホームに到着するまでの時間によって決まる。追込みは信号条件と密接な関係があり、後続列車が信号現示を守りながら続行運転をした場合の追込みを「最小追込み」と呼ぶ。先行列車の所定の停車時間を tf 、停車時間の増加量を zf 、先行列車と後続列車の所定の運転間隔を m 、最小追込みを h とすると、先行、後続列車の遅延が 0 の状態から先行列車の停車時間が zf だけ増加した場合に、後続列車に波及する遅延量 dl は、理論的には以下の式で計算される。

$$dl = tf + zf + h - m \dots\dots\dots(1)$$

dl が正のときには後続列車に dl だけの遅延が波及し、負であれば遅延は波及しない。上式から分かるように、最小追込みが小さいほど、運転間隔が大きいほど、遅延は後続列車に波及しにくい。

大都市圏の通勤ラッシュでは、ピーク時に最大限の列車本数を設定するため、運転間隔は 1 分 50 秒～2 分 30 秒と小さくならざるを得ない。同様に、停車時間も混雑により各駅 30～60 秒と長めの時間が必要である。したがって、遅延の波及しにくい列車運行とするためには、安全を確保した上で最小追込みを小さくする必要があり、鉄道事業者では、信号設備の改修等の取組を行っている。しかしそれでも、一般的な路線では最小追込みは 60～90 秒程度となり、停車時間と最小追込みの和は、運転間隔とほぼ等しいか多少少ない程度となり、遅延発生時に遅延が伝播しやすい構造となっている。

また、ある列車、駅での停車時間が超過し、その次の駅での停車時間が短縮された場合、その列車の遅延は短縮分だけ回復する。しかし、停車時間超過がその後続列車に遅延の伝播という形で影響を及ぼすと、後続列車に遅延が残る。通勤ラッシュ時には多くの駅、列車で遅延の伝播が発生し、後の列車になればなるほど前の列車の遅延が蓄積される。これが慢性的な遅延が発生するメカニズムである。

(3) 遅延縮小に向けたダイヤ設定上の工夫

鉄道事業者では、通勤ラッシュ時の遅延縮小のために、停車時間の適切な設定、運転間隔と混雑度の平準化という 2 つのダイヤ設定上の工夫を行っている。前者は、乗降による停車時間の超過を防止するため、ダイヤ上の駅停車時

間を実態に合わせるものである。一方後者は、通勤時間帯のトータルの輸送力を保ちながらも、遅延の伝播を起こりにくくするために運転間隔を極力広げる、すなわち運転間隔の最小値を最大化するものである。しかしこれらの工夫は、日常、遅延が発生しやすい列車、駅の停車時間を延ばすなど、現行ダイヤ上の課題点の修正を中心とした、局所的な検討による場合が多い。例えば、列車の運行本数を現行よりも減らし、より大きな運転間隔とした場合に、路線全体としてどの程度の遅延となるのかといった予測は、シミュレーション無しでは困難である。

2.2 関連研究

列車遅延の分析手法については、日々の実績ダイヤデータを、遅延の平均、分散等に応じてダイヤ図上で色分けして表示する手法³⁾等が提案されている。この手法を用いれば、遅延の全体像や原因となる箇所の特定が容易になり、改善のための示唆が得られるが、実際にダイヤを修正した場合の遅延を予測することはできない。

遅延を予測する研究としては、モンテカルロシミュレーションにより遅延をランダムな駅、列車に発生させ、旅客流動推定を行ったうえで旅客の不効用値の増減を分析する手法がある⁴⁾。この手法は、旅客の観点からの評価を行っているという点では望ましいものの、運転間隔や停車時間などの詳細なダイヤ設計との因果関係が不明確で、遅延が発生しにくいダイヤを作成するための指針が得られにくい、という課題がある。

また、大都市圏の列車遅延拡大メカニズムについて、現地調査と実績データ等から詳細に分析した研究もある⁵⁾。この研究では、ピーク時間帯におけるダイヤ設定上の停車時間、運転間隔の工夫が、遅延の抑制につながる可能性について言及している。本研究では、このピーク時間帯の停車時間、運転間隔と最大遅延等の関係を、定量的に明らかにすることを目指す。

2.3 本研究のアプローチ

本研究は、大都市圏の通勤路線のラッシュピーク時間帯を対象に、ダイヤ設定上の停車時間、運転間隔と、実際に列車を運行した場合の最大遅延等の関係を、シミュレーションにより導き出すことで、より適切なダイヤの検討に資することを目標とする。

実際に列車を運行した場合の最大遅延等の予測にあたっては、簡易な列車運行モデルを用いたシミュレーションを用いる。このモデルでは、各列車は、計画ダイヤと 2.1 (2) で述べた停車/追込みの関係により運行し、各駅での停車時間は、所与の平均値、分散値に従い確率的に変動させて予測する。停車時間が変動することで、小規模な遅延の発生、伝播が様々な駅、列車で発生し、それが累積して大きな遅延に進展する現象が再現でき、より実態に近い推定が可能となる。

3. 簡易な列車運行モデルにおける列車運行時刻の計算 (図 1)

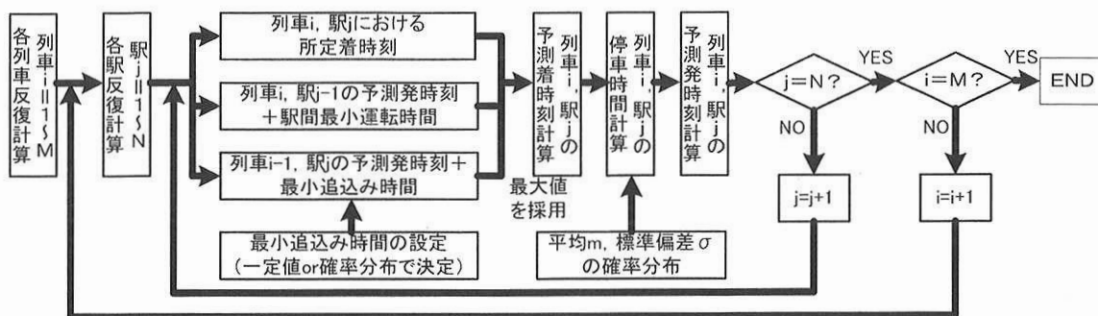


図1 簡易な列車運行モデルにおける列車運行時刻の計算方法

3.1 駅到着時刻の予測方法

列車は原則的には、ダイヤ上の所定運行時刻に従って運転するが、その列車が前駅を発車する際に既に遅延していた場合、および次駅で先行列車の停車時間が伸び、ホームを占有しているためにその列車が次駅に到着できない場合には、次駅の予測着時刻を以下の方法で算出し、所定着時刻との差分だけ遅延を設定する。

前者の場合には、次駅の到着時刻は、前駅の予測発時刻と駅間最小運転時間の和で算出する。本研究では、駅間最小運転時間は、その列車、駅間のダイヤ設定上の運転時間と同一とし、駅間運転時間に余裕は付与されていないものとする。すなわち、先行列車に影響を受けなければ、前駅での発車遅延と次駅での到着遅延は同一である。

一方、後者の場合には、次駅の到着時刻は、先行列車の次駅予測発時刻と最小追込み時間の和で算出する。これにより、先行列車の停車時間増が後続列車に遅延として伝播する現象を表現する。

以上より、次駅予測着時刻は、「所定着時刻、前駅発時刻 + 最小運転時間、先行列車次駅発時刻 + 最小追込み」の最大値で算出できる。

3.2 駅停車時間、発車時刻の予測方法

駅停車時間について、より現実的な「ゆらぎ」を考慮した予測を行うために、正規分布を利用した確率的な決定手法を用いる。具体的には、各列車、駅に対し予測停車時間の平均 m 、標準偏差 σ を与え、 (m, σ^2) に基づき正規乱数を生成し、算出する。これは、例えばある列車、駅での停車時間について、平均 50 秒、標準偏差 7 秒という統計的な結果が得られた場合に、これに従って停車時間を確率的に決定することに相当する。これにより、たとえダイヤ上の停車時間が 55 秒で、平均停車時間 50 秒を上回っていても、場合によっては 55 秒を超過する停車時間が生じ、遅延が発生することが表現可能となる。

一方、駅発車時刻は、その駅の予測到着時刻と上記予測停車時間の和により算出する。なお、算出された時刻がダイヤ上の所定発車時刻より前であれば、早発はせず、停車時間を延ばして所定発車時刻に発車するものとする。

4. 数値実験と考察

4.1 線路条件、ダイヤ設定

(1) 想定線区と配線、最小追込み

複線の通勤路線を想定し、そのうち中央の 10 駅 (A 駅 $\Rightarrow$ J 駅)、片方向の運行をシミュレーションの対象とする。この路線は全列車各駅停車で、途中駅始発、終着列車は無く、各駅とも 1 線ずつのホームを使用するものとする。

(2) ダイヤ設定上の運転間隔 <変動パラメータ>

ピーク 1 時間帯の列車運行のみを考慮し、この時間帯で、全列車は等間隔となるよう計画ダイヤを設定する。シミュレーション時には、ピーク 1 時間帯のダイヤ設定上の運転間隔を 115 秒～150 秒の間、5 秒刻みで設定する。

(3) ダイヤ設定上の停車時間 <変動パラメータ>

各駅同一で、最小 40 秒～{(ダイヤ設定上の運転間隔) - (最小追込み)} の範囲内で、5 秒刻みで設定する。

(4) シナリオとシミュレーション回数

ダイヤ設定上の(運転間隔、停車時間)の組合せ数だけのシナリオを用意、同一シナリオのシミュレーションを 100 回反復し、最大遅延等の 100 回分の平均値を、そのシナリオの評価値とする。

4.2 実験 1：停車時間のみが変動する場合

(1) 設定条件

各列車、駅の予測停車時間の平均を 50 秒、標準偏差を 7 秒として正規乱数で確率的に設定する。一方、最小追込みは各列車、駅で 70 秒の一定値とする。このとき、最小追込みと停車時間の平均値から算出した場合の運転間隔は 120 秒間隔となる。すなわち、平均的には 50 秒程度の停車時間が必要な駅が 10 駅連続する路線で、115～150 秒間隔の列車をダイヤ設定した場合に、日常的にどの程度の遅延

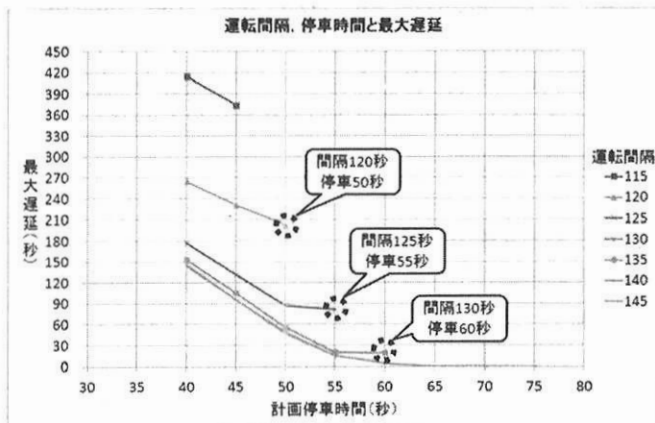


図2 実験 1：ダイヤ上の運転間隔、停車時間と最大遅延

延が生ずるのか考察する。

(2) 結果と考察

ダイヤ上の(運転間隔, 停車時間)の設定値と, シミュレーションで予測される最大遅延量との関係を, 図2に示す。ダイヤ上の運転間隔を120秒, ダイヤ上の停車時間を50秒と設定すると, 最大遅延は約310秒となった。それに対し, ダイヤ上の運転間隔, 停車時間を各5,10秒余裕を持たせ, (125,55), (130,60)とした場合には, 最大遅延はそれぞれ約80,20秒と大きく減少した。これより, 運転間隔を平均値から算出した間隔目一杯(120秒)に設定するよりも, 多少列車本数を減らして+5~10秒程度の運転間隔の余裕をとったほうが, 最大遅延が縮小することがわかる。

4.3 実験2: 停車時間, 最小追込みとともに変動する場合

(1) 設定条件

各列車, 駅の予測停車時間は4.2と同条件にしたうえで, 最小追込みについても, 各列車, 駅について平均70秒, 標準偏差7秒の正規乱数で確率的に設定する。これは, 運転士による手動運転を考えた場合に, 列車続行時の追込みは一定値ではなく, 多少のバラツキが発生することを踏まえた設定である。

(2) 結果と考察

(運転間隔, 停車時間)の設定値と最大遅延量との関係を図3に示す。全般的な傾向は同様であるが, 図2との差異として, 運転間隔を+5,10秒して125,130秒とした場合に, ダイヤ上の停車時間も+5,10秒として(125,55), (130,60)とするのではなく, +0,5秒として(125,50), (130,55)としたほうが, 最大遅延が小さいことがわかった。これより, 運転士の操作により追込みも変動する状況下では, その「ゆらぎ」に対する余裕として5~10秒程度の時間を, 停車時間とは別に確保するのが望ましいといえる。

次に, ピーク1時間帯の輸送力, 混雑度との関係をみるために, 予測運行時刻がピーク1時間帯内に収まる列車の本数(以下, 実効本数という)を横軸にとったグラフを図4に示す。本シミュレーション条件では, 実効本数の限度は28本弱であり, ダイヤ設定上の運転間隔を120秒, 列車本数を30本としても, ピーク1時間帯の中では全列車が運行できないことがわかった。特に, ダイヤ設定上の運転間隔, 停車時間が(120,50), (125, 50), (130, 50)の場合, 実効本数はほぼ同一である。これより, ダイヤ上の運転間隔を120秒⇒130秒に変更しダイヤ設定上の本数を減少させた場合には, 実効輸送力は同程度に保ちながらも最大遅延が減少することがわかった。

5. まとめと今後の課題

簡易な列車運行モデルを構築し, 大都市圏の通勤時間帯の遅延発生, 伝播メカニズムを再現し, ダイヤ設定上の停車時間, 運転間隔と, それを実施した場合の列車遅延, 実効本数との関係を分析した。本研究は, 停車時間, 追込みの予測に際し, 確率的な決定手法を用いることで, 日常発生する停車時間, 追込みの「ゆらぎ」を想定, 織り込んだ

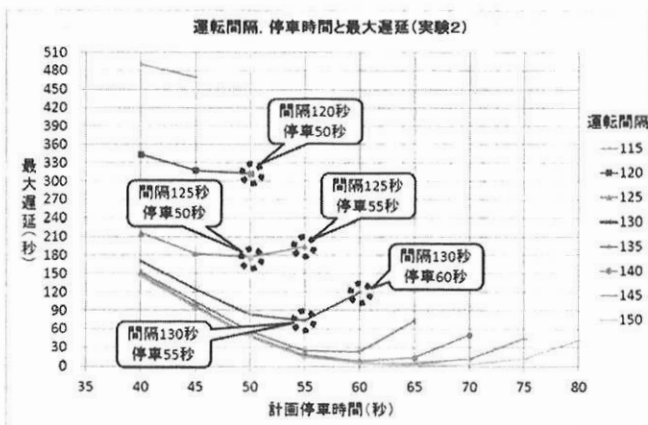


図3 実験2: ダイヤ上の運転間隔, 停車時間と最大遅延

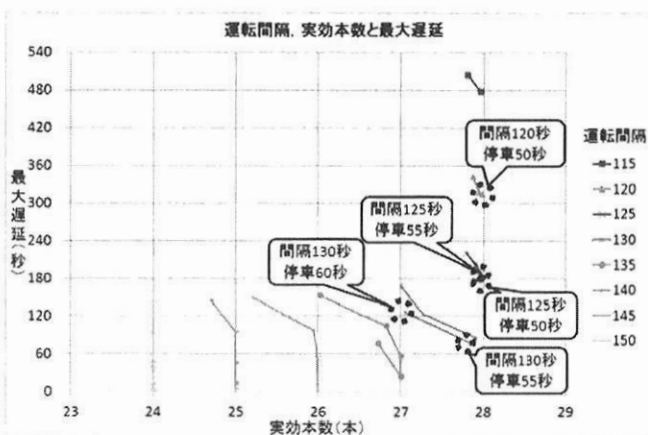


図4 実験2: 実効本数(輸送力)との関係

ことがポイントである。これにより, 遅延の抑制のためには, 平均停車時間を用いて算出される列車本数よりも少ない本数でダイヤを設定するのが望ましいことがわかった。

今後の課題として, 停車時間, 追込みの「ゆらぎ」を表す標準偏差を変動させた場合の感度分析, 列車本数, 混雑度の増減に伴い停車時間が変動することの考慮, 実在線区のデータを利用した妥当性検証が挙げられる。より実態に即したケーススタディを重ねることで, モデルの精緻化に努めたい。

参考文献

- 1) 青木俊幸: 駅停車時分短縮のための乗降分布予測手法, J-Rail2001, 2001.
- 2) 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, 電学論D, Vol.130-D No.4 2010.
- 3) 稲川真範, 富井規雄, 牛田貢平: 列車運行実績データの可視化, J-Rail2009, 2009.
- 4) 武内陽子, 富井規雄, 平井力: 列車ダイヤの頑健性評価手法, 鉄道総研報告, Vol.21, No.4, 2007.
- 5) 仮屋崎圭司: 都市鉄道の列車遅延の拡大メカニズムに関する研究, 運輸政策研究, Vol.13 No.1 2010.