

1705 確率的列車運行シミュレータを用いた遅延縮小施策の評価手法

正 [電] ○國松 武俊 (鉄道総研)

Evaluation method of strategies for train delay reduction with the probabilistic operation simulator.

Taketoshi KUNIMATSU, Railway Technical Research Institute. 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji City

In commuter lines in metropolitan areas, it is effective for increasing capacity or decreasing chronic delay in rush peak hours to improve headway time between successive trains by subdividing tracks for signaling, or installing additional platforms at stations to dispatch trains alternately. In this research, we propose an evaluation method for these improvements by using probabilistic operation simulator. By the simulator, we can reproduce train operation near stations essential for estimating occurrences or propagations of train delay, by modeling fluctuations of dwell time or headway time at stations. We tested the effectiveness of the proposed method by evaluating and comparing maximum delay or capacity of both before or after facility improvements.

Keywords : railway, train timetable, delay, strategy evaluation, Monte Carlo simulation

1. はじめに

大都市圏の鉄道においては、通勤ラッシュ時間帯の最大混雑度が一部路線で 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問題に対処するため、ラッシュ時間帯への最大限の列車本数の設定、遅延が発生、伝播しにくいダイヤ上の工夫などのソフト的な対策や、ホーム増設、駅構内改良、信号設備改良といったハード的な対策の両面から、輸送改善の取組を行っている。

後者のハード的な対策は、ラッシュ時間帯に列車運行のボトルネックになっている駅を中心に、改良を行い、乗降時間短縮により停車時間を減少させたり、先行列車から後続列車への遅延の伝播度合いを小さくしたりするものである。ハード的な対策は、相応の設備投資が伴うため、事前に適切な費用対効果分析を実施する必要がある。しかし、これまでのハード的な対策の輸送面からの効果測定は、主として計画ダイヤ上での程度の列車本数が設定可能となるか、という計画輸送力の観点に基づくものが多く、ラッシュ時間帯の遅延が頻発、伝播する現象が考慮されておらず、例えば最大遅延が平均的にどの程度減少する、というような議論はなされてこなかった。その理由の1つとして、設備改良後は輸送計画(ダイヤ)そのものが変わるため、変更後のダイヤ、設備に対する遅延の推定が困難である、という事情がある。

そこで本研究では、まず、以前ソフト的な対策の評価に利用した、確率的列車運行シミュレータを改修し、ボトルネックとなる駅に対し、信号設備上の軌道回路割りの変更や、交互発着するためのホーム増設などの影響を考慮できるように改修を行う¹⁾。そして、設備改良前後の列車運行シミュレーションを実施し、比較評価を行うことで、改良前後における最大遅延、実効輸送力等の評価が、ダイヤ設定上の列車本数、各駅停車時間に変更がある場合でも、可能であることを示す。

2. 運転設備改良が列車運行に与える影響

2.1 大都市圏の通勤輸送と遅延の発生・伝播

大都市圏の通勤時間帯には、主に駅での乗降に伴う停車時間の増加等によって遅延が発生する。このような、当該列車で最初に発生した遅延のことを、一次遅延という²⁾。停車時間は、乗降人数の増加に伴い増加をする傾向にあるが、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。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、一次遅延が発生することもある。

ある列車、駅で一次遅延が発生した場合、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れず、遅延が発生する場合がある。この伝播による遅延を二次遅延という。このときの二次遅延の伝播度合いは、先行列車の一次遅延量以外に「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、信号の軌道回路割りや密接な関係があり、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一次遅延が zf 発生した場合に、後続列車に伝播する二次遅延量 dl は、理論的には以下の式で計算される。

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

dl が正のときには後続列車に dl だけの二次遅延が伝播し、負であれば遅延は伝播しない。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、二次遅延は発生しにくい。

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、運転間隔を 1 分 50 秒～2 分 30 秒と小さめに設定している。一方で、混雑による一次遅延防止のために、各駅の停車時間も 30～60 秒と長めの設定が必要である。したがって、二次遅延の伝播防止のた

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ます。

2.2 遅延縮小に向けたハード的な対策

前節の遅延メカニズムを踏まえ、鉄道事業者では、ハード・ソフト両面の遅延対策を実施している。ソフト面の対策としては、列車ダイヤの工夫や駅員の増員等があり、運転間隔の平準化や混雑の平準化により、停車時間の増加、一次・二次遅延の発生を防ごうとするものである。

一方、ハード面の対策としては、信号設備に関連する軌道回路割りの見直しや、ホームの増設、平面交差の解消等がある。軌道回路割りの見直しは、列車が詰まりがちなボトルネックの駅の手前において、列車を検知する軌道回路の1区間あたりの長さを縮小し、より詳細な先行列車位置情報をもとに後続列車に信号を現示することで、最小追込みを減少させることを意図したものである。また、ホームの増設は、これまで1方向の全列車を1つの番線で乗降していた場合に、それを2つの番線に到着順に交互に振り分けるものである。これにより、先行列車の停車時間が伸びた場合でも、後続列車は異なるホームを利用して乗降するため、二次遅延の伝播は低減される。

2.3 従来のハード的な対策評価の問題点

このようなハード面の対策は、相応の設備投資が伴うため、実施した場合の効果について、これまで事業者内でも検討がおこなわれてきた。それらの効果測定のためには、列車の増発を主眼に置いており、設備改良後にどの程度運転間隔が短縮され、その結果何本の増発がダイヤ上可能か、という評価である。しかし一方で、例えば改良の結果、最大遅延量は何分減少する、5分以上の遅延の発生頻度がどの程度減少するというような、遅延の観点からの定量的な評価は、適切に行われていないのが現状である。その理由は、ダイヤ上の増発本数は、担当者が設備改良後の運行条件をもとにダイヤを作成すれば求まるのに対し、遅延の縮小度合いは、設備改良後の一次遅延だけでなく二次遅延の伝播の有無、伝播範囲、旅客流動など、様々な要因が複雑に絡まるため、予測困難だからである。

2.4 関連研究

都市鉄道の遅延に関する研究開発として、仮屋崎らは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³⁾。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。しかし、この分析はソフト面の対策を主眼としており、軌道回路割りの遅延への影響について言及しているものの、ハード面の対策の定量的評価には至っていない。

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、運行設備制約との因果関係が不明確で、軌道回路割りの変更等の設備改良が及ぼす影響が測定しにくい、という課題がある。

また、運行設備改良に対する評価についての研究開発として、筆者らは、ダイヤ乱れ時に途中駅で折返運転をする際の、折返設備の新設に対する評価に取り組んでいる⁵⁾。この研究では、折返運転時の列車運行、旅客行動予測をシミュレーションで行っており、折返設備の形態により遅延が発生することも考慮されるが、当該シミュレーションでは軌道回路割りや、遅延そのもののランダムな発生は考慮されておらず、本研究の目的のためには、別のアプローチを検討する必要がある。

2.5 ハード的な対策評価に必要な要件

前節までの議論を踏まえ、筆者らは、遅延縮小に向けたハード的な対策を適切に評価するためには、以下の3つが必要と考える。

- ①計画ダイヤ上の輸送力の観点だけでなく、実際に運行した場合の列車遅延や実効輸送力等、実際に提供される輸送サービスに関する複数の観点から評価すること
- ②停車時間の超過、遅延の発生、伝播を考慮し、それらの発生形態が日により異なることを考慮すること
- ③設備改良前後で、計画ダイヤに多少変更が生じる場合にも対応可能なこと

本研究では、これらを満たす対策評価手法を提案する。

3. 提案する列車運行モデル

3.1 遅延の発生、伝播推定のための確率的列車運行モデル

筆者らが文献1)で構築した、簡易な列車運行モデルの列車運行時刻推定手法を以下に示す (Fig.1)。

(当駅予測着時刻) = MAX(所定着時刻, 前駅発時刻 + 最小運転時間, 先行列車当駅発時刻 + 最小追込み)

(予測停車時間) = $N(m, \sigma^2)$ の正規乱数により決定

(当駅予測発時刻) = MAX(所定発時刻, 当駅予測着時刻 + 予測停車時間)

駅停車時間については、より現実的な「ゆらぎ」を考慮した予測を行うために、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。

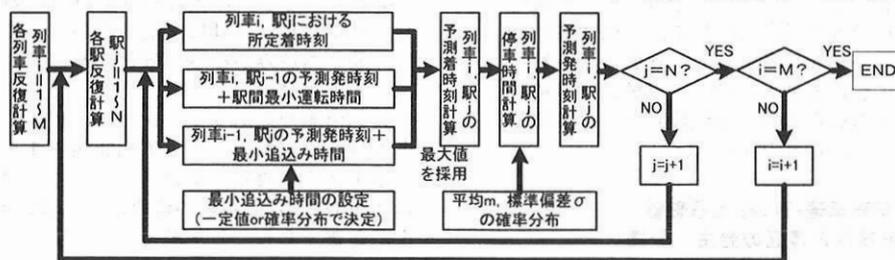


Fig. 1. Traditional calculation method for train departure/arrival time

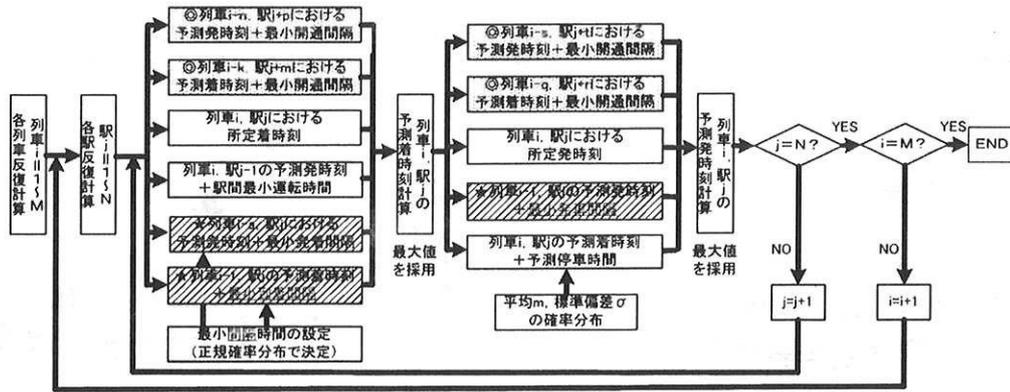


Fig. 2. Proposed calculation method for train departure/arrival time

3.2 軌道回路割り変更, ホーム増設に対応した改修

本研究では, 前節の列車運行モデルを改修し, 軌道回路割りや列車の交互発着を考慮した列車運行モデルを構築した (Fig.2)。

まず, 軌道回路割りによる影響として, 例えば駅間距離が非常に短い区間では, 当該列車が駅に停車中で先行列車も次駅に停車中の場合, 当該駅ホーム出発直後~次駅ホームまでが1つの軌道回路となっているため, 先行列車が先の駅を発車し, 在線がクリアされるまで当該列車が当該駅を発車できないケースがある。このような場合に対応するため, 各駅での到着, 発車時刻の計算に際し, 以下の条件を付加した (Fig.2の◎)。

(列車 i の駅 j 着時刻) \geq (列車 i-k の駅 j+m の着時刻) + (必要間隔)

(列車 i の駅 j 着時刻) \geq (列車 i-n の駅 j+p の発時刻) + (必要間隔)

(列車 i の駅 j 発時刻) \geq (列車 i-k の駅 j+m の着時刻) + (必要間隔)

(列車 i の駅 j 発時刻) \geq (列車 i-n の駅 j+p の発時刻) + (必要間隔)

※k, n は, 先行列車が当該列車の何個列車前かを表す整数で, m, p は, 先行列車の在線駅が当該列車の在線駅の何駅前かを表す整数

例えば, 最後の式で n=p=1 とすれば, 前述の発車条件を記述可能である。

次に, 複数ホームでの交互発着運行を検討すると, 交互発着時には当該駅への到着条件が, 続行列車間の最小追込み時間ではなく, 到着~異なるホームへの到着に必要な時間と, 2 個列車後の同一ホームへ到着する列車との間の最小追込み時間になる。発車条件の場合は, 発車~異なるホームへの発車に必要な時間になる。よって, 各駅到着, 発車時刻の計算に際し, 以下の条件を変更, 付加する (Fig.2の★)。

(列車 i 駅 j 着時刻) \geq (列車 i-a 駅 j 発時刻) + (最小追込み)

(列車 i 駅 j 着時刻) \geq (列車 i-1 駅 j 着時刻) + (最小到着間隔)

(列車 i 駅 j 発時刻) \geq (列車 i-1 駅 j 発時刻) + (最小発車間隔)

※a は交互発着に利用する番線の数

これにより, 例えば a=1 とすれば, 2 つの番線で交互に列車が到着し, 乗降する場合の運行が推定できる。

4. 数値実験と考察

4.1 線路条件, ダイヤ設定

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, 4.3 節でホーム増設する駅を除き各駅とも1線ずつのホームを使用するものとする。

ダイヤ設定上の運転間隔については, 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。

ダイヤ設定上の停車時間は, ボトルネックとして設備改良対象とする駅を除き, 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。また, 各駅, 各列車の停車時間も, ボトルネック駅を除き, 平均50秒, 標準偏差7秒として正規乱数で確率的に設定する。最小追込みは, 各列車, 駅で平均70秒, 標準偏差7秒の正規乱数で設定する。

これらの条件のもと, 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10回反復し, 最大遅延等の10回分の平均値を, そのシナリオの評価値とする。

4.2 ボトルネック駅の軌道回路割り変更の効果

まず, ボトルネック駅での軌道回路割りの変更の効果を検討するため, 路線のE駅~F駅間について, 軌道回路割りを変更した。具体的には, 設備改良前後の設定として, 下記の場合を考える。

①設備改良前: E駅~F駅間, およびF駅ホーム出発までを1つの閉そくとし, 先行列車がF駅を発車し20秒が経過しない限り, 後続列車がE駅を発車できない

②設備改良後: E駅~F駅間を1つの閉そく, F駅ホームを別の1つの閉そくに改良し, 先行列車がF駅に到着し20秒経過すれば, 後続列車はE駅を発車できる

上記①, ②の各設備条件に対し, 前節のダイヤ設定シナリオを適用した場合の最大遅延量をシミュレーションで求めた。その結果を Fig. 3 に示す。実線は①改良前, 破線は②改良後である。これより, 列車の運転間隔が130秒未満の場合には, 遅延縮小に一定の効果があることがわかる。しかし, 運転間隔が130秒以上の場合には, 改良前後で最大遅延に大きな差異は見られない。これは, 120秒以上の場合, ①改良前でもダイヤ設定上の運転間隔に対し十分な設備であるためと考えられる。

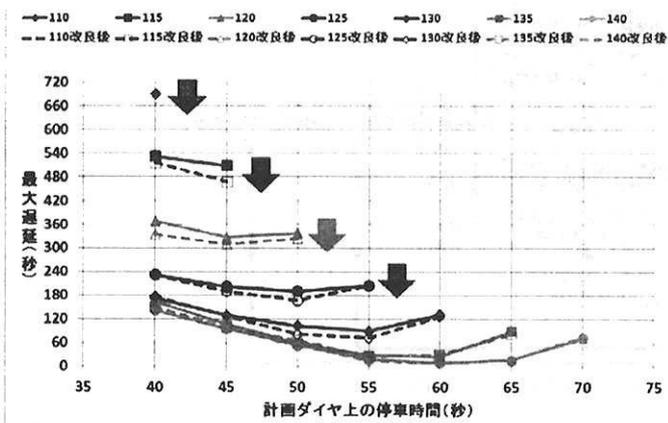


Fig. 3. Comparison of train delay with/without track division improvement

4.3 ボトルネック駅のホーム増設の効果

次に、ボトルネック駅でホームを増設し、片方向に対し1つのホームを使用して着発するダイヤから、2つのホームを交互に使用して着発するダイヤに変更した場合の効果を推定した。具体的には、設備改良対象駅をE駅として、以下の設定で実験を行った。

- ①設備改良前：E駅では発着に1つのホームのみ使用。E駅のみ必要停車時間平均を60秒とする。
- ②設備改良後：E駅では発着に2つのホームを交互に使用。E駅のみ必要停車時間平均を60秒とする。

上記①、②の各設備条件に対し、前節のダイヤ設定シナリオを適用した場合の最大遅延量をシミュレーションで求めた。その結果をFig. 4に示す。実線は①改良前、破線は②改良後である。これより、ホーム増設の場合は、ダイヤ設定上の運転間隔が130秒以下の場合、一定の遅延縮小効果があることがわかる。例えば現行ダイヤが130秒間隔、停車時間55秒である場合に、最大遅延は135秒程度であるが、設備改良後には90秒程度になる。ここで、仮に設備改良後に列車を増発し、同一の計画停車時間のままで125秒間隔とすると、最大遅延は190秒程度となる。このように、設備改良とともに増発等が行われ、運転間隔が変化する場合にも、本手法は適用可能である。

また、ピーク1時間帯の輸送力、混雑度との関係を知るために、計画運行時刻、予測運行時刻がともにピーク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Fig. 5に示す。これより、改良前後で最大の実効本数は27.6本→28本程度に増加することがわかる。また、改良により実効本数28本近くの運行が、計画ダイヤ上の運転間隔が130秒程度であっても実現可能になることがわかる。特に、改良前後で最大の実効本数を実現する場合、改良前は27.6本の運行に240秒程度の最大遅延が発生したが、改良後は27.9本の運行が75秒程度の最大遅延で実現可能であり、実質的な輸送力向上と遅延縮小が同時に可能なことがわかる。

5. 終わりに

確率的列車運行モデルを、軌道回路割りや交互発着時の運行シミュレーションに対応できるように改修をし、運行上のボトルネック駅に対する軌道回路割り変更、ホーム増設による交互発着化の効果を、列車遅延や実効本数の観点から分析した。提案手法は、①停車時間、追込みの予測に確率的手法を用いることで、日常発生する「運

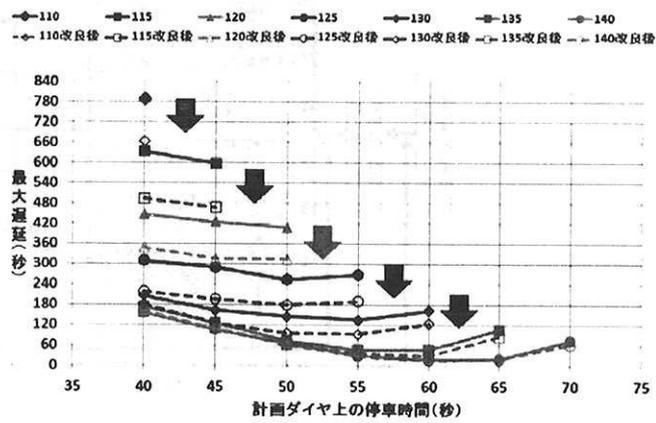


Fig. 4. Comparison of train delay with/without an additional platform installation

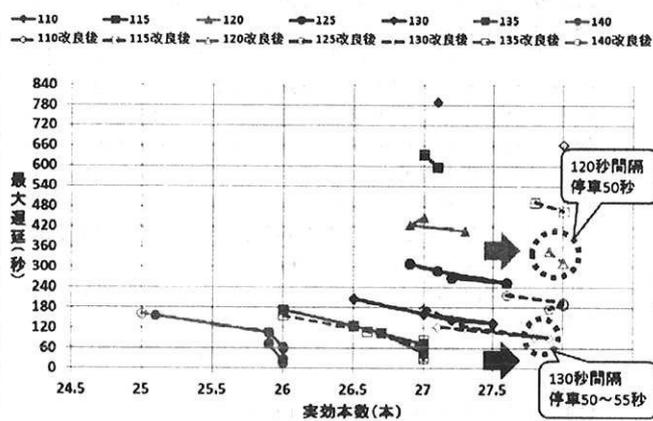


Fig. 5. Comparison of effective transportation capacity and train delay with/without an additional platform installation

行のゆらぎ」を織り込んだ設備改良評価が可能、②改良後に計画上の運行本数や停車時間を変更する場合にも対応可能、③遅延、実効輸送力の両面から施策を評価可能という利点がある。

今後の課題として、実在線区のデータ、改良計画を利用した妥当性検証や、旅客流動シミュレーションを含むより精緻なシミュレーションを行った場合の結果との比較が挙げられる。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) 國松武俊：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，J-Rail2011，2011。
- 2) 富井規雄：列車ダイヤのつくりかた，オーム社，2012。
- 3) 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。
- 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) 國松武俊，坂口隆，石原裕介：列車運行・旅客行動シミュレータを用いた折返設備評価，電気学会産業応用部門大会，2012。