

旅客起因の列車遅延の再現に向けた OSS 交通シミュレータの活用

Simulation of the train delay due to passengers by applying the OSS transport simulator

安藤 優平[†] 高田 佳典[†]
Yuhei Ando Yoshinori Takada

1. はじめに

首都圏の鉄道では、駅構内の混雑に起因する列車の遅延が課題となっている。国土交通省の報告[1]によると、主に朝の通勤ラッシュ時間帯において首都圏の複数の路線で小規模な遅延（5分以上10分未満）が平日の半数以上の割合で発生している。また、その原因の約6割は、旅客の乗降時間超過であるとされている。

列車の定時運行維持のためには、仮に遅延が発生してもその影響が拡大しないようなダイヤを作成する必要がある。そのためには、作成したダイヤによる遅延の発生・伝搬状況が事前評価可能となることが重要である。先行研究として、鉄道総合技術研究所では、旅客の移動需要とダイヤを入力として旅客・列車の動きをシミュレートする交通シミュレータを開発している[2]。筆者らは、駅構内の混雑解析との連携を見据えて、文献[2]のシミュレータでは考慮されていない旅客の駅構内移動を考慮したシミュレータを試作した。これを考慮することで、駅構内における旅客の移動状態を把握し、混雑解析に繋げることが可能である。また、駅構内の混雑状況の変化により旅客の移動速度が変化し、それに伴って列車の遅延状況が変化する、といった旅客移動と列車遅延の相互の影響が考慮可能となる。本シミュレータは、OSSの交通シミュレータである MATSim[3]をベースとして開発した。

本稿では、試作したシミュレータについて、計画ダイヤ及び朝の通勤ラッシュ時間帯を想定して作成した仮想的移動需要データを用いて、シミュレータの基本機能である遅延の再現が正しく行われるかを検証した結果を報告する。

2. シミュレータ概要

本シミュレータは、旅客の移動需要とダイヤを入力として旅客・列車の動きをシミュレートするものである。本シミュレータの特長としては、乗降中の旅客がいる場合は予定時刻を過ぎても列車が発車しない点や、旅客の駅構内移動をシミュレーションに含む点が挙げられる。

本シミュレータは、表1の情報を入力とし、全ての旅客および列車の移動結果を出力する。

表1 シミュレータの入力一覧

入力情報	説明
駅定義	駅の情報を、駅名および座標の組として定義する。
路線定義	路線の情報を、駅同士の接続情報として定義する。 駅間の距離、駅間の最短移動時間もここで定義する。

[†] 三菱電機株式会社 情報技術総合研究所
Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation

入力情報	説明
運行計画定義	列車毎の運行計画（計画ダイヤ）を、各駅における出発予定時刻、到着予定時刻の組として定義する。列車（編成）の車両数もここで定義する。
移動需要定義	旅客毎の移動需要を、OD（出発駅、目的駅）、移動を開始する時刻の組として定義する。
シミュレーション設定	シミュレーション全体の設定として、以下の項目を設定する。 ・1車両あたりの定員 ・1車両1人あたりの乗/降車時間 ・前の車両との最低車間距離

本シミュレータは、シミュレータ本体である MATSim と、表1の入力を MATSim 向けの入力へと変換する Python 製の変換モジュールから成る。

3. シミュレーションモデル

3.1 旅客移動モデル

本シミュレータにおける旅客移動の概念図を図2に示す。本シミュレータでは、旅客が徒歩で移動する「駅ホーム」と、旅客が列車を待機する「列車待ち行列」に分けて駅を表現する。図では、駅Aから駅Bに移動する旅客αおよび、駅Bから駅Aに移動する旅客βの移動を例示する。

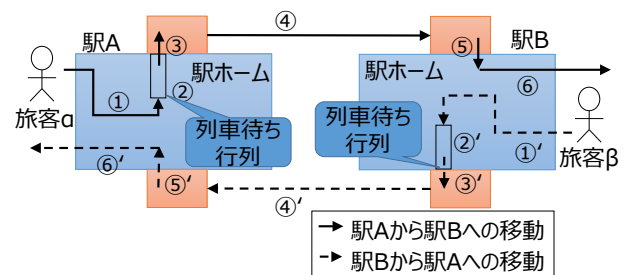


図2 旅客移動の概念図

旅客αは、図の①～⑥の状態のいずれかを取る。①は、駅ホームの入口から列車待ち行列までの徒歩での移動中の状態を表す。②は、列車待ち行列での待機状態を表す。②は、列車待ち行列内の直前の旅客の乗車が完了し、当該旅客が乗車可能な状態になる直前まで存続する。③は、列車待ち行列から列車への移動（乗車）イベントを表す。③は列車への乗車が完了した時点で終了する。④は、旅客αが列車内に存在する状態を表す。⑤は、列車内から駅ホームへの移動（降車）イベントを表す。⑥は、列車を降車してから駅ホームの入口までの徒歩での移動中の状態を表す。なお、降車イベントの優先度は乗車イベントより高く、全ての旅客の降車が完了した後で乗車イベントが開始される。

旅客αの駅構内移動時間、すなわち①および⑥の所要時間は、駅構内の旅客数によって定めるとする。旅客数は、

駅 A では①, ②, ⑥' の状態にいる旅客の合計、駅 B では①', ②', ⑥の状態にいる旅客の合計によって定義される。本シミュレータは、外部ツールに対し駅構内の情報を出力し、外部ツールで導出した駅構内移動時間をシミュレーションに反映させることを可能とする。

3.2 列車モデル

本シミュレータでは、全ての編成は1車両から成るものとし、入力情報（車両数と1車両あたりの定員）に応じて定員を調整することで、複数車両の編成を疑似的に再現する。また、1つの車両は1つのドアのみを持つものとする。この設定は、旅客の乗降時間に影響を与えるため、複数車両・複数ドアに対応した乗車時間を再現するために、以下のように対応する。

- ・シミュレーション設定（表1参照）の「1車両1人あたりの乗車/降車時間」にて、ドア数を考慮した値を予め設定する。例えば、1車両あたりのドア数が3つの場合、現実的な乗降時間の1/3を乗降時間として設定する。
- ・編成が複数車両から成る場合、「1車両1人あたりの乗車/降車時間」を車両数で割った値が、シミュレーションにおける1人あたりの実際の乗降時間となる。

3.3 列車運行モデル

本節では、本シミュレータにおいて列車が従う出発及び走行速度に関するルールについて説明する。

3.3.1 列車の出発に関するルール

駅に停車している列車を出発させるか否かの判定ルールは次のとおりである。まず、現在の時刻が運行計画情報で定義された出発予定時刻以降であるかどうかを確認する。出発予定時刻より前であれば、列車を出発させないと判定し終了する。出発予定時刻以降であれば、次に列車が満員であるかどうかを確認する。列車が既に満員であれば、列車を出発させると判定し終了する。列車が満員でない場合は、列車待ち行列に旅客が残っていないかを確認する。列車待ち行列に旅客が残っていれば列車を出発させず、旅客が残っていなければ列車を出発させると判定し終了する。列車を出発させなかった場合は、列車が出発するまで本判定処理を1秒おきに繰り返す。このルールによって、出発予定時刻以降になっても旅客の乗降が完了していない場合には列車が出発せず、列車の遅延が発生する。

3.3.2 列車の走行速度に関するルール

列車は、設定された最短移動時間で駅間を移動するような速度、すなわち、駅間の距離を最短移動時間で割った速度で走行する。列車は最短移動時間未満で駅間を移動することはできないため、列車が前の駅を出発した時点で大きく遅延していた場合は回復が間に合わず、次の駅への到着以降も遅延が継続する。

前方を走行する列車との車間距離が小さくなる場合は、設定された最低車間距離を維持するように速度を制限する。この制約によって、閉塞挙動を疑似的に再現する。

3.4 MATSim に起因する制約

本シミュレータには、MATSim の仕様に伴う制約がある。一部の制約については、3.1 節～3.3 節で説明したように、MATSim に対する入出力を工夫することにより解消可能である。一方で、MATSim の実装を変更しない限り解消不可

能な制約も存在する。その中で、特に列車遅延に影響すると考えられる制約は、以下2点である。

1点目の制約は、MATSim では出発予定時刻よりも早く列車が出発することを制限できるが、逆に、到着予定時刻よりも早く列車が到着することを制限できないというものである。現実の列車運行では、列車は到着予定時刻通りに駅に到着しようとし、予定より早く到着することはない。一方で、MATSim では到着予定時刻によらず列車は最速で駅に向かおうとするため、列車が到着予定時刻よりも早く駅に到着することがある。この場合、出発予定時刻まで余裕が生じることから、遅延が生じにくくなる可能性がある。

2点目の制約は、MATSim では、1人あたりの乗車時間は列車の混雑度合いによらず一定であるというものである。現実の列車の乗車では、列車が混雑するほど旅客のスムーズな乗車が難しくなり、旅客1人あたりの乗車時間が長くなるのが一般的である。特に、MATSim では、このような挙動を再現できないため、乗車時間が実際に想定されるものよりも短くなり、遅延が発生しにくくなる可能性がある。

本シミュレータは、上述のMATSimの制約を受け継いでいるため、遅延挙動に影響を与える可能性がある。評価では、この影響度についても検証する。

4. 評価内容

4.1 評価概要

評価対象として、都市圏の駅数19駅の路線を仮定する。計画ダイヤ及び、平均的な通勤ラッシュ時程度の混雑を想定して作成した仮定の移動需要を入力とし、表2に示す2点を目的とした評価を行う。

表2 評価目的

No.	評価目的
1	計画ダイヤにおける小規模な遅延の再現
2	移動需要を変動させた場合の列車遅延の変化の確認

1点目について、移動需要の日毎のばらつきを考慮するために、複数の移動需要データを作成し、評価する。2点目について、平均的な通勤ラッシュ時の想定旅客数を基準として、旅客数を0.1倍～2.0倍の0.1倍刻みで変動させてシミュレーションを実行し、列車遅延の変化を確認する。

4.2 評価条件

評価条件を表3に示す。

表3 評価条件

項目	条件	備考
対象路線	都市圏の路線を模擬したものの。駅数19駅	条件を単純化するため、乗換なしの単線で評価する (他の路線については考慮しない)
運行計画 (計画ダイヤ)	始発～11:00の間に発する上り方面の列車121本の運行計画	旅客が存在する間は常に列車が運行しているよう、移動需要が発生する時刻よりも長めの運行計画を設定する

項目	条件	備考
移動需要	通勤ラッシュ時間帯(6:00～9:00)に移動を開始する旅客の移動需要	平均的な通勤ラッシュ時間帯程度の混雑を想定し、第 12 回大都市交通センサス[4]の統計情報をもとに作成する
1 車両あたりの定員	300 人	「定員」は、これ以上は乗れないという人数を指す
1 車両 1 人あたりの乗車時間	0.333 秒/人	1 車両あたりドアが 3 つあることを想定。0.333 秒/人は、各ドアで 1 人あたり 1 秒で乗車する設定
1 車両 1 人あたりの降車時間	0.333 秒/人	「1 車両 1 人あたりの乗車時間」に同じ

作成した移動需要データでは、上り方面における各駅の乗降者数は表 4 のとおりとなる。本稿では駅 1 から駅 19 への移動を上り方面の移動とする

表 4 上り方面における各駅の乗降者数
(作成した移動需要データより集計)

駅	乗車数[人]	降車数[人]	乗降者数合計[人]
#1	64,156	0	64,156
#2	32,289	11,391	43,680
#3	754	9,551	10,305
#4	5,209	4,985	10,194
#5	33,392	12,409	45,801
#6	7,798	14,949	22,747
#7	0	39,631	39,631
#8	10,247	20,608	30,855
#9	3,127	11,718	14,845
#10	168	6,422	6,590
#11	9,516	14,665	24,181
#12	1,325	11,167	12,492
#13	1,073	2,762	3,835
#14	0	2,442	2,442
#15	340	285	625
#16	6,845	1,956	8,801
#17	48	2,839	2,887
#18	43	2,715	2,758
#19	0	5,835	5,835

4.3 評価環境

評価環境を表 5, 表 6 に示す。Java は MATSim の動作に必要なである。

表 5 評価環境(H/W)

項目	諸元
OS	Windows10 Enterprise 1909(64bit 版)
CPU	Intel Core i5-6500(3.20GHz, 4 コア)
メモリ	40GB
ストレージ	HDD 1TB

表 6 評価環境(S/W)

ソフトウェア名	バージョン
MATSim	0.10.1
Python	3.7.3(64bit 版)
OpenJDK	1.8(64bit 版)

5. 評価結果・考察

5.1 計画ダイヤにおける小規模な遅延の再現

本節では、遅延の規模の指標として、遅延時間の最大値(最大遅延時間)を評価する。ここで、「遅延時間」は、各列車の各駅における出発予定時刻と実際の出発時刻との差を意味する。日毎の移動需要のばらつきを考慮するために、移動需要データ作成時に旅客の OD の 1 割を無作為に変更し、10 パターンの移動需要データを作成する。

10 パターンの移動需要データに対するシミュレーションにおける最大遅延時間の最小値、最大値、平均値を表 7 に示す。遅延の規模は文献[1]で示されている 5 分以上 10 分未満とはならなかったが、いずれのパターンでも遅延が発生していることがわかる。また、最大遅延時間が最も大きい場合と最も小さい場合とで 20 秒の違いがあることから、移動需要の違いが遅延の規模に反映されているといえる。

表 7 最大遅延時間の最小値、最大値、平均値

統計量	最大遅延時間[秒]
最小値	110
最大値	130
平均値	121

全体的な遅延の傾向を把握するために、最も大きな遅延が発生したパターンを例に、遅延時間の推移を確認する。図 4 に、上り方面における、駅別、列車別の遅延時間のヒートマップを示す。図の各列は駅であり、数字は通し番号を表す。ここで、図の各行は列車を表しており、時間軸は列車の始発時刻を意味する。各駅における列車の遅延時間をセルの濃淡で表す。色が濃いほど遅延が大きい。

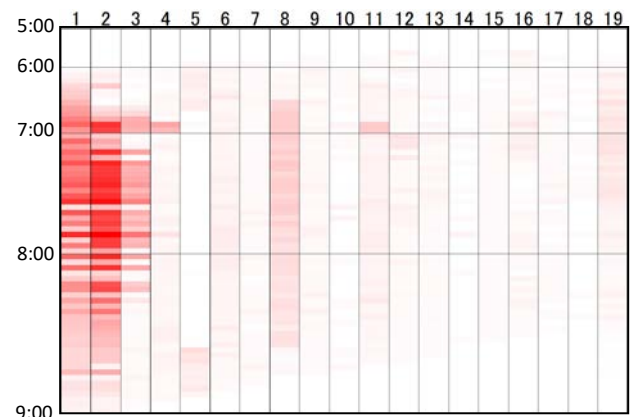


図 4 駅別、列車別遅延時間 (5:00～9:00)

図 4 を見ると、駅 1 で出発が遅延した後、駅 2 で遅延が更に拡大するものの、その後 2～3 駅で遅延がほぼ回復していることがわかる。しかし、現実の遅延挙動を考えた場合に、これほど早急に遅延が回復することは考えにくい。また、移動需要データから集計した上り方面における各駅の乗降者数(表 4)より、乗降者数の多い駅 5 や駅 7 でも大きな遅延が発生することが想定される一方で、大きな遅延は発生していない。

以下では、最も大きい遅延が発生した列車を例として、遅延の回復状況について考察する。当該列車における実績ダイヤと計画ダイヤとの差異を図 5 に示す。駅間の間隔は実際の駅間の距離に対応する。

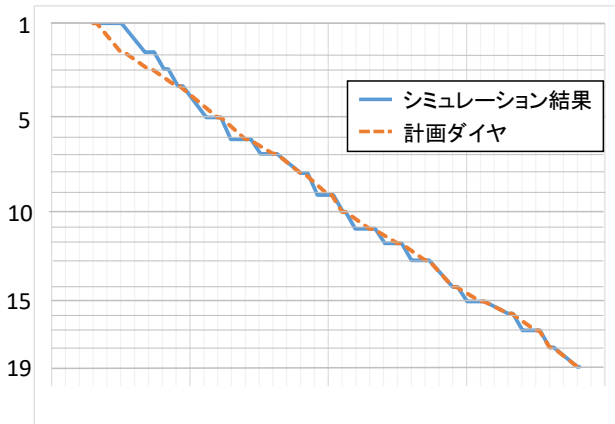


図 5 実績ダイヤ（最も大きい遅延が発生した列車）

図 5 を見ると、計画ダイヤ上の到着予定時刻よりも列車が早く到着する駅が複数あることがわかる。これは 3.4 節に示す 1 点目の制約、すなわち、本シミュレータでは列車が到着予定時刻よりも早く駅に到着することを制限できないという制約に起因する。この制約により、本シミュレータでは列車が到着予定時刻通りに到着しようとする挙動を再現できない。そのため、列車の到着が予定よりも早いと出発予定時刻まで時間の余裕が生じ、乗降時間の超過による遅延が発生しにくくなっているものと考えられる。実際に、乗降者数の多さから大きな遅延が発生すると考えられる駅 5 や駅 7 では列車が予定よりも早く到着しており、大きな遅延は生じていない。

以上から、シミュレーションによって実際に列車の遅延が発生し、遅延が移動需要のばらつきにより変化することを確認した。一方で、遅延の規模については実際に生じるものよりも小さくなっていると考えられる。

5.2 移動需要人数に対する列車遅延の変化

本節では、移動需要人数を変動させた場合における列車遅延の変化として、最大遅延時間の変化について評価する。移動需要人数を変動させる際には、発着駅毎の旅客数を一律で定数倍し、発着駅毎の人数比に変化がないようにする。

移動需要人数別の最大遅延時間を図 6 に示す。移動需要人数が 0.1 倍から 1.0 倍の間は人数の増加に伴って最大遅延時間が増加し、1.0 倍以降は 120 秒前後で推移している。

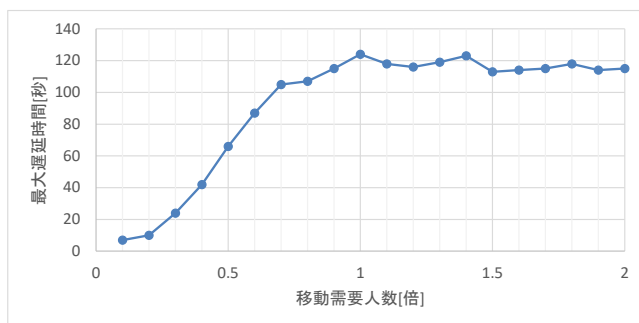


図 6 最大遅延時間（移動需要 0.1 倍～2.0 倍）

上記の結果について、移動需要人数が 1.0 倍前後で最大遅延時間が一定の値に収束するという傾向が見られた。しかしながら、実際の列車を考慮すると、移動需要人数が増えた際に最大遅延時間も増加し続けるのが正しい挙動であると考えられる。正しい挙動になっていない原因として、本シミュレータでは列車がほぼ満員であっても旅客の乗車時間が一定であるため、満員に近い列車で旅客の乗車時間が極端に遅くなる挙動が再現できない（3.4 節の 2 点目の制約）ことが挙げられる。また、上記と関係して、現実の列車には明確な満員が存在しないため旅客は強引に列車に乗車しようとする一方で、本シミュレータにおける列車には明確な満員が存在し、旅客は列車が満員になると乗車を行わなくなる。そのため、本シミュレータでは、満員に近い列車では乗車可能な旅客が少なくなり、遅延がより発生しにくくなると考えられる。

6. 結論

本書では、実際の移動需要を模擬した仮想のデータを作成し、計画ダイヤにおける小規模な遅延の再現、移動需要を変動させた場合の列車遅延の変化の確認を目的としてシミュレーションを実施した。結果は以下のとおりである。

計画ダイヤにおける小規模な遅延の再現について、シミュレーション上で実際に遅延が発生し、移動需要のばらつきによって遅延時間が変化することを確認した。移動需要を変動させた場合の列車遅延の変化について、移動需要人数が少ないうちは移動需要人数の増加に伴い遅延時間が長くなることを確認した。このように、現実で想定される遅延挙動の一部は、本シミュレータで再現可能であった。

一方で、本シミュレータのベースとなる OSS の交通シミュレータである MATSim の仕様に伴う制約により、本来発生すると考えられる遅延が抑制されている可能性があることが分かった。制約を解消するためには OSS の実装を変更するか、或いは独自にシミュレータを開発する必要がある。

今後は、シミュレータの遅延挙動を改善し、駅構内の混雑解析と組み合わせた評価を行う。

参考文献

- [1] “東京圏の鉄道路線の遅延「見える化」(平成 29 年度)”, <https://www.mlit.go.jp/common/001269352.pdf>
- [2] 武内陽子, 坂口隆, 熊澤一将, 國松武俊, 佐藤圭介. “高機能な列車運行・旅客行動シミュレータの開発と列車運行の多面的評価”. 電気学会論文誌 D (産業応用部門), Vol.135, No.4, pp.411-419.(2015.04)
- [3] “MATSim.org”, <https://www.matsim.org/>
- [4] “第 12 回大都市交通センサス調査結果集計表”, http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/sosei_transport_tk_000035.html