

## 都市鉄道におけるホームドア設置が列車遅延に及ぼす影響：数理モデルを用いた分析

東京工業大学大学院 学生会員 ○菊池 恵和  
東京工業大学大学院 正会員 福田 大輔

## 1. 目的

近年、ホームドアを設置する駅が増加している。ホームドアには人身事故を防止する効果があるが、設置により、列車の駅停車時間の増加につながるため、利用者の効用が低下する可能性がある。

しかし、ホームドアが列車のドアと同時に閉まり始め、列車のドアが閉まる直前の駆け込み乗車を防げると仮定すると、ホームドア設置で列車の運行ダイヤの信頼性が向上することも一つの仮説として考えられる。

そこで、本研究では数理モデルに基づきホームドア設置が単一路線における列車の定時運行性に影響を与えるのかについて基礎的考察を行うことを目的とする。

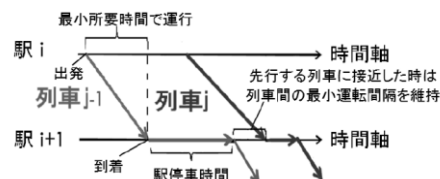


図2 駅間走行時間の表現

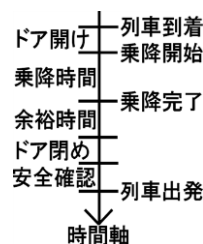


図3 駅停車時間の内訳

## 2. 分析方法

本研究では、齋藤(2011)を拡張的に応用し分析を行う。齋藤では様々な条件下で、図1の様な単一路線で運行ダイヤの定時性の点から相互直通運転の効果を比較した。一方、本研究ではホームドア設置に対応する様にモデルシステムを改良し、利用者や列車本数が多い路線でホームドア設置が遅延現象に与える影響を考察する。

## (1) 駅間列車走行時間の表現

ある隣接駅*i*と駅*i+1*間を走行する列車は図2の通り表現される。先行列車がいなければ駅間の最少所要時間で運行し、先行列車に接近した場合は列車間の最少運転間隔を維持するとする。このことは、混雑時の先行列車の遅延が後続列車にも波及すること(knock-on delay: Carey, 1994)を表せている。

## (2) 駅停車時間の不確実性

図3は駅停車時間の内訳を表している。本研究ではCarey(1994)に従い、式(1)のように定式化する。

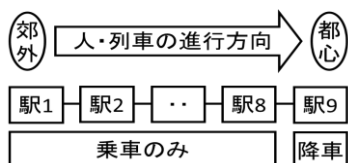


図1 想定とする単一路線(多起点・一終点)

$$t_{i,j}^w = t_0 + g(X_{i,j}, Y_{i,j}, Z_{i,j}) + \varepsilon(X_{i,j}, Y_{i,j}, Z_{i,j}) \quad (1)$$

式(1)中の  $g(\cdot)$  はその駅での乗車客数・降車客数・既に乗車している人数  $X_{i,j}, Y_{i,j}, Z_{i,j}$  の単調増加関数で、駅での乗降客がいなければ0となるよう設定する。

一方、 $\varepsilon(\cdot)$  は、ドアが閉まる直前で不規則に列車に駆け込み乗客を表し、利用者数・混雑状況によらず一定の確率分布に従うとする。本研究ではホームドアの設置がこの確率分布を有意に変化させると仮定する。また、乗降が完了した時刻がダイヤ上出発時刻より早ければ定刻まで駅で待機し、遅れていた場合はすぐに発車するものとする。

## (3) 利用者の出発時刻選択行動

本研究では、旅行時間が不確実に変動する中で日々出発時刻選択を繰り返す利用者の各駅からの平均的な出発時刻選択行動を記述する。個人の総期待不効用  $E$  は式(2)の通り混雑不効用  $E_r$ 、所要時間不効用  $E_c$ 、希望到着時刻乖離の不効用  $E_d$  の和で表される。

$$E[U](i, i', t_i^0) = E_r + E_c + E_d \quad (2)$$

利用者全員がもはや出発時刻を変更する動機を持たない安定状態では、式(3)の通り出発旅客が存在する全ての時間帯で総不効用が等しくなる。本研究では、この利用者均衡を仮定し出発時刻分布を求める。

キーワード ホームドア，都市鉄道，ラッシュアワー，出発時刻選択，Knock-on delay

連絡先 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-M1-11 東京工業大学土木工学専攻 福田研究室 TEL 03-5734-2577

$$\begin{cases} E[U](i, i', t_i^0) \geq E_0(i, i') & \text{if } x_{i,i'}(t_i^0) = 0 \\ E[U](i, i', t_i^0) = E_0(i, i') & \text{if } x_{i,i'}(t_i^0) > 0 \end{cases} \quad (3)$$

### 3. システムの改良

駅停車時間の表現を変更するため、東京メトロ丸の内線西新宿駅で朝混雑時間帯の乗降所要時間を調査した。また、ホームドアを設置している各路線の駅でドア開閉方法の違いについて調査を行った結果、以下の3つの基本傾向が確認された。

- 乗降所要時間は乗車人数が多いほど増加する
- 階段・改札に最も近いドアの乗降時間が最長
- 車内混雑時は不混雑時より乗降所要時間が長い

この結果は、齋藤(2011)が仮定した条件と同じため、本研究で標準乗降所要時間の表現方法を変更する必要はないと考えられる。

また、乗降時間の内、確率項の所要時間を計測した結果、所要時間が7秒となる結果が最も多く、それ以降の発生回数は減少していた。その為、確率項についても指数分布の様な簡単な表現で表すものとする。

本研究では、ホームドアは列車のドアと同時に閉まり始めるが、閉まる速度が列車のドアより遅く、ドアが閉まるのにかかる時間が増加するものとする。この時、分散が小さくなり運行定時性が向上すると考え、表1の様にパラメータを設定する。なお、ホームドアがない場合の設定は齋藤(2011)を参照している。

### 4. ネットワークを対象とした試算

今回、小規模路線(全9駅：図1)で朝の混雑時間帯の7時30分から9時の間に駅1を40本の列車が発車し、毎日同じ客数が利用するとした。列車の運行条件は表2の通りで、ホームドア設置による列車遅延量・総不効用の変化を比較する。駅間最少所要時間と列車間最少運転間隔は各駅間で同じで、利用者の駅9希望到着時刻は朝8時30分、時間評価値は屋井ら(1993)に従い設定する。

表1 確率項部分のパラメータ

|        | $t_0$ | $\varepsilon(\cdot)$ |
|--------|-------|----------------------|
| ホームドア有 | 15秒   | 平均6秒, 標準偏差6秒         |
| ホームドア無 | 6秒    | 平均12秒, 標準偏差12秒       |

表2 列車の運転条件

| 本数  | 駅間所要時間 | 列車間最少運転間隔 | 定員    |
|-----|--------|-----------|-------|
| 40本 | 1分30秒  | 1分15秒     | 1500人 |

また、各駅の利用者が12000人の時の不効用を表3に、駅9に到着するときの平均列車遅延量を図4に記す。

ドア開閉所要時間の増加に伴い、列車の遅延量の最大値は1分程度大きくなった。しかしホームドア設置により、希望到着時刻付近に到着する最も混雑する列車を避ける行動が顕著になったので、最混雑列車での混雑不効用を小さくし、総不効用の増加は20円/分程度に抑える様な状況となった。これより、利用者が受ける負担の増加は必ずしも大きくないことが示唆される。

### 5. まとめと今後の課題

本研究では、ホームドア設置による列車遅延量及び総不効用の変化を数理モデルによるシミュレーションを通じて比較した。ドア設置により列車遅延量は増加するものの、利用者が分散して列車選択を行うことにより、利用者の移動の不効用は必ずしも有意に大きくならない可能性があることが示唆された。

今後の課題として全時間帯で均衡が保障される計算アルゴリズムの開発、駅ごとに利用者数を変更したより現実に近いモデルシステムの検討などが挙げられる。

### 参考文献

- 1) 齋藤洋平：都市鉄道の相互直通運転と列車遅延に関する数理的研究，東京工業大学大学院修士論文，2011
- 2) Carey, M.: Reliability of interconnected scheduled services, *European Journal of Operation Research*, Vol.79, pp.51-72, 1994.
- 3) 屋井鉄雄，岩倉成志，伊東誠：鉄道ネットワークの需要と余剰の推計法について，土木計画学研究・論文集，Vol.11, pp.81-88, 1993.

表3 各駅からの1人辺りの総不効用(単位:円/分)

|            | 駅1   | 駅2   | 駅3   | 駅4   |
|------------|------|------|------|------|
| ホームドア有(全駅) | 1512 | 1401 | 1281 | 1153 |
| ホームドア無     | 1492 | 1380 | 1260 | 1130 |
|            | 駅5   | 駅6   | 駅7   | 駅8   |
| ホームドア有(全駅) | 1011 | 853  | 638  | 354  |
| ホームドア無     | 987  | 828  | 636  | 349  |

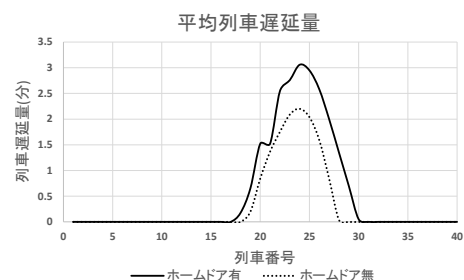


図4 駅9到着時の列車遅延量