

混雑時における駅構内の歩行環境と待ち行列
Queuing of Pedestrians during Peak Time at Railway Station

長谷川 教高^{**}, 鈴木 雅也^{***}, 島崎 敏一^{****}
By Noritaka Hasegawa^{**}, Masaya Suzuki^{***}, Toshikazu Shimazaki^{****}

1. はじめに

我が国の公共交通機関は、通勤、通学の交通手段として多くの人々が利用している。しかし、人口、産業等の集中化した大都市部においては、通勤通学時の混雑が、社会的に大きな問題となっている。

公共交通機関を利用し、目的地に到達するまでには、乗換が必要となることがきわめて多い。公共交通機関全体の利便性、快適性を向上させるには、乗換時の移動をスムーズにすることが必要であると考えられる。ターミナル駅では、複数路線が乗り入れており、乗り換えの際に長距離にわたって歩かされることがある。また、各ホーム間の移動には、跨線橋や地下道を利用するに伴い、階段の利用が多くなる。

本研究では、駅構内の歩行を移動時間により、階段下部での歩行者の待ち行列を階段の利用時間、階段利用者の到着時間間隔によりそれぞれ考察する。

2. 調査対象

JR 常磐線、新京成線は、千葉県北部、茨城県南部在住の多くの人々に通勤、通学の足として利用されている。JR 松戸駅は、それらの乗換駅となっており、1日平均乗降者数は335,218人(1992年度)である。JR 松戸駅の概略図を図-1に示す。

各ホームへは跨線橋により移動可能であり、朝の混雑時では、第2ホーム3番線の常磐線快速上り列車(上野行)、第3ホーム6番線の常磐線各駅停車上

り列車(代々木上原行)、新京成線間での乗換が行われる。その中で、常磐線各駅停車列車から同快速列車へ、新京成線から常磐線快速列車へ乗り換える人数が、その他と比較すると多い。

本研究では、常磐線快速上り列車(上野行)と常磐線各駅停車上り列車(代々木上原行)との間の乗換を対象とする。

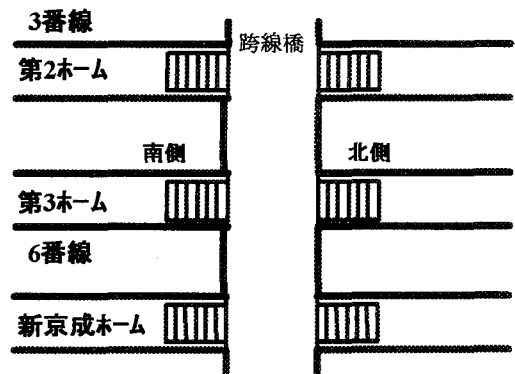


図-1 JR 松戸駅概略図

3. 調査方法

乗換時の移動を妨げる要因を把握するために、次の三つの計測を行った。

(1) 移動時間の計測

朝の混雑時および昼間の平常時に、第2、第3ホーム間において、階段別、方向別に、移動時間を計測した。移動時間は、計測者が階段下部より水平距離約25mの地点に立ち、到着列車の扉が開くのと同時に階段方向に歩き出し、その移動時間を計測することにより求めた。

(2) 降車人数と待ち時間の関係

階段下部から水平距離約45m、約65mの同方

*キーワード: 歩行者交通行動, 待ち行列
**学生員 日本大学大学院博士前期課程
(〒101 東京都千代田区神田駿河台1-8-14 TEL.&FAX.03-3259-0989)
***川田テクノシステム
(〒116 東京都荒川区東日暮里5-51-11 TEL.03-3806-0911)
****正会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科
(〒101 東京都千代田区神田駿河台1-8-14 TEL.&FAX.03-3259-0989)

向2地点に計測者A,Bの2人が立ち、到着列車の扉が開くのとほぼ同時に階段方向に歩き出す。その時の、①待ち行列に加わるまでのホーム上での移動時間、②待ち行列での待ち時間、③階段部での階段上昇時の移動時間（階段を上り始めてから上り終わるまでの時間）の3つを、降車人数（列車から降車しその階段を利用する人数）別に計測した。

(3)待ち行列把握のための計測

階段下部での到着分布、階段上部でのサービス時間分布を20人が到着、通過するまでのラップタイムを計測することにより、待ち行列を把握した。

4. 調査結果

(1)移動を妨げる要因

朝の混雑時において、各駅停車列車から快速列車に乗換える人の割合は、その逆の人数に比べ非常に多い。そのため、快速列車から各駅停車列車への乗り換え時には、快速に乗り換えるために逆流してくる多くの人との衝突を避けるために、立ち止まったり、蛇行したりしなければならない。

また、各駅停車列車から快速列車への乗り換え時には、移動方向へ多くの人が流れるため、歩行速度の落ちる階段下部で待ち行列が発生する。また、それに伴い待ち時間が発生する。

計測者A,Bによる移動時間の計測において、AはBに先行して移動するため周辺の歩行者の密度も小さく、Bに比べ短時間で移動することができる。計測者A,Bの移動時間の差（図-2）は、混雑による移動時間の増分を示す。これは、南側、北側階段（図

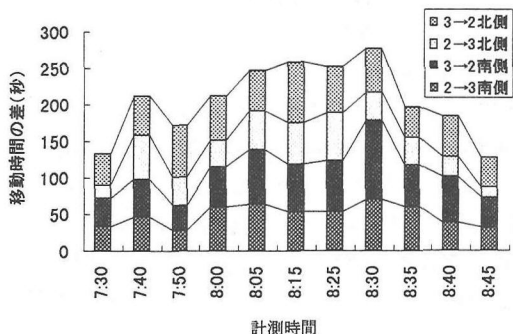


図-2 移動時間の差

1)の別に関わらず、第3ホームから第2ホームへの移動の方が、その逆の場合よりも多い。

降車人数別の第3ホームから第2ホームへの移動時間（図-3）をみると、降車人数の移動時間全体への影響は、行列での待ち時間に比べ、ほとんどない。

歩行速度は、周辺の密度に大きく影響を受けるため、ホーム上での移動時間は最大で41.4秒（最少で33.0秒）、行列での待ち時間は47.6秒（13.4秒）、階段部上昇時間は26.8秒（20.9秒）である。

以上は、移動時間は、人との衝突回避よりも、階段下部での待ち行列による影響が大きく、総移動時間に占めるその割合も大きいことを示す。

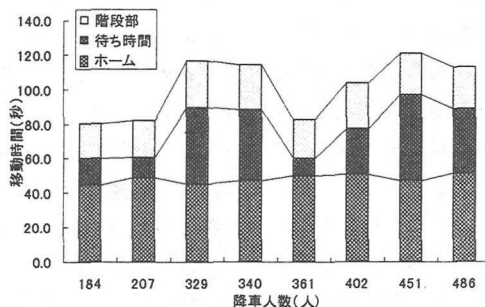


図-3 降車人数別移動時間

(2)待ち行列

(a)待ち行列理論式の適用

階段下部での待ち行列を把握するにあたり、窓口一つの待ち行列モデル式を適用する。階段なので、サービスは先着順に行われる。それに加え、到着時間の分布、サービス時間分布が得られれば待ち行列分布を求めることができる。

窓口1個の場合の待ち行列(M/M/1)のモデル式を適用するには、以下に示す平衡条件を満たさなければならない。

$$\rho < 1 \quad [(\lambda/\mu) = \rho]$$

$1/\lambda$; 平均到着時間間隔

$1/\mu$; 平均サービス時間

λ ; 到着密度 (人/s)

μ ; サービス速度 (人/s)

ρ ; 利用率

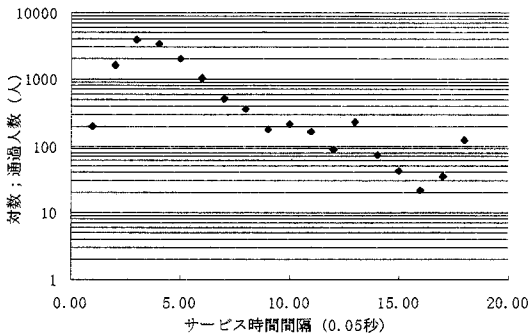


図-4 到着分布

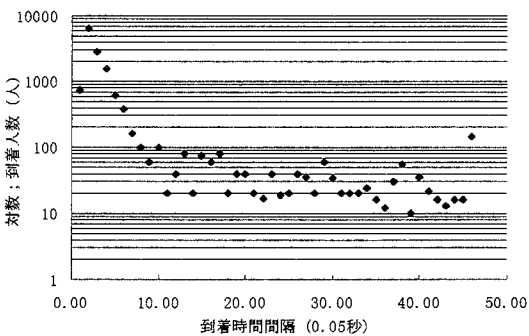


図-5 サービス時間分布

階段利用者 20 人毎の、到着時間間隔、階段利用時間について、54 回の計測を行った。その計測結果を図-4（到着分布）、図-5（サービス時間分布）に示す。図-4 はポアソン到着分布のかたちをしており、この階段下部への到着は、ポアソン到着といえる。図-5 のサービス時間分布は指数分布にしたがっている。

このとき、一人当たりの到着時間間隔は 0.310 (秒)、サービス時間の平均値は 0.347 (秒) であり、到着密度 $\lambda = 3.226$ (人/s)、サービス速度 $\mu = 2.882$ (人/s) であった。これは、平衡条件である $\rho < 1$ を満たしておらず、到着密度 λ が、サービス速度 μ を上回ることを示す。これは、計測時間を比較的待ち行列ができていない間にとったためであると考えられる。もし、現実に次々に列車が到着し、乗客が上記の到着率で階段下部に到達すれば、行列は永遠に続くことになる。

常盤線各駅停車列車の朝の混雑時(午前 7 時 30 分～午前 8 時 30 分)のダイヤ間隔は、約 3 分である。

そこで、到着分布に一人当たりの到着時間間隔の長い時間帯を加える。

このとき、一人当たりの到着時間間隔は 1.060 秒、サービス時間間隔は 0.472 秒であり、到着密度 λ は 0.943 (人/s)、サービス速度 μ は 2.119 (人/s) であった。これは平衡条件の $\rho < \lambda / \mu = 0.445 < 1$ を満たしている。

さらに、待ち行列の系内数の平均値 $L1$ は、

$$L1 = \rho / (1 - \rho) = \lambda / (\mu - \lambda)$$

= 0.802 である。

また、待ち行列の系内数の分散 V は、

$$V = \rho / (1 - \rho)^2 = \lambda \mu / (\mu - \lambda)^2$$

= 1.445 である。

また、行列の長さの平均値（サービス中の人は含めない） $L2$ は、窓口が 1 つの場合は、

$$L2 = L1 - \rho = \rho^2 / (1 - \rho) = \lambda^2 / \mu (\mu - \lambda)$$

= 0.356 である。

順番がくるまで行列に並んで待っている待ち時間の平均値を $W1$ 、系の中で費やす全時間の平均値を $W2$ とすると、 $L1$ 、 $L2$ との間には次の関係が成り立つ。

$$L1 = \lambda W2$$

$$L2 = \lambda W1$$

よって、 $W1 = 0.378$ 、 $W2 = 0.850$ 、である。

任意の客の待ち時間が、任意時間 t を超える確率分布は、

$$P(\gamma > t) = \rho e^{-\mu t} e^{\rho \mu t} = \rho e^{-(1-\rho)\mu t}$$

で表される。

よって、5.0 秒以上待つ確率 $P(\gamma > 5)$ は、

$$P(\gamma > 5) = 1.243 \times 10^{-3}$$

また、10.0 秒以上待つ確率 $P(\gamma > 10)$ は、

$$P(\gamma > 10) = 3.476 \times 10^{-6} \text{ となる。}$$

この待ち時間の分布は、混雑時における 11 回の計測値により求めたものである。よって、混雑していない間の計測値を追加すれば、必然的に到着密度は低下すると思われる。

(b) 流体近似による待ち行列

待ち行列分布、待ち時間分布を、階段下部での到着分布、階段上部でのサービス時間分布により流体近似の考え方で求め、降車人数別に図-6、図-7

に示す。また、現在の階段の幅を広げて、サービス率を増加（サービス率 3.6 (人/s) → 5.4 (人/s)）させた時の待ち行列分布、待ち時間分布を同様に示す。

グラフ上の数式は回帰分析により求めた多項近似式であり、 R^2 は決定係数である。

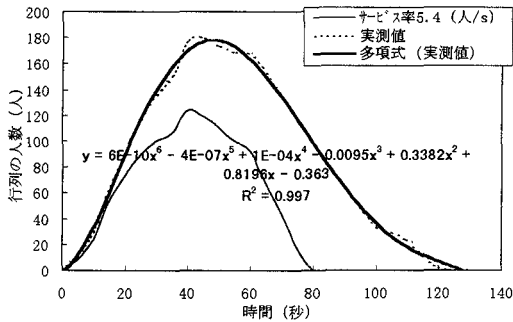


図-6 待ち行列分布

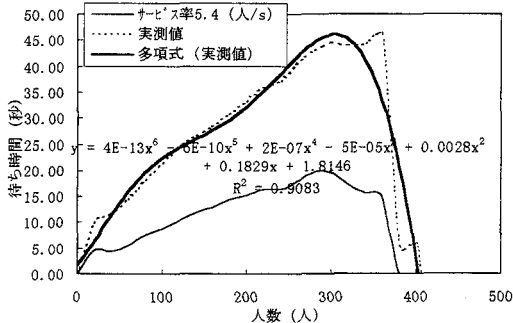


図-7 待ち時間分布

(c)降車人数別の待ち行列

多項式近似式をもとに、降車人数別の行列の継続時間、行列の平均値、行列の最大値、待ち時間の平均値、待ち時間の最大値を求めたものを表-1に示す。表-1より、(e)を除いて、行列の継続時間、行列の平均値、行列の最大値、待ち時間の平均値、待ち時間の最大値は、降車人数の増加に伴い増加することから、ほぼ比例関係にあるといえる。午前8時40分前後では、階段の両側部分(約1.5m)を下る客はほとんどいなくなることから、階段の昇り幅が増えることになる。つまりサービス率が増加することになる。(e)の計測時間は午前8時40分を過ぎていたためにサービス率が増加しており、降車

人数に対するそれぞれの値が小さくなっている。そのときの値を表-2に示す。

上記のサービス率の増加により、増加前に比べて行列の継続時間は最大で45.79秒(最小で15.34秒)、行列の平均値は44.39人(23.79人)、行列人数は56人(29人)、待ち時間は26.25秒(8.04秒)、待ち時間の平均は16.52秒(5.93秒)の短縮が得られた。

表-1 降車人数別待ち行列(サービス率増加前)

	降車人数 (人)	行列の継続時間 (秒)	行列の平均値 (人)	行列の最大値 (人)	待ち時間の平均値 (秒)	待ち時間の最大値 (秒)
(a)	168	70.34	37.63	73	16.27	25.93
(b)	203	80.99	63.28	126	25.21	41.74
(c)	265	88.61	80.82	161	27.51	45.04
(d)	331	96.60	89.68	170	25.94	43.93
(e)	355	80.69	77.83	140	17.74	28.95
(f)	406	122.04	87.26	180	28.03	45.99

表-2 降車人数別待ち行列(サービス率増加後)

	降車人数 (人)	行列の継続時間 (秒)	行列の平均値 (人)	行列の最大値 (人)	待ち時間の平均値 (秒)	待ち時間の最大値 (秒)
(a)	168	39.25	13.84	41	5.21	8.04
(b)	203	50.25	35.21	97	11.21	18.04
(c)	265	60.00	53.26	128	13.30	21.36
(d)	331	64.40	47.20	116	11.60	19.50
(e)	355	65.35	52.89	111	11.81	20.91
(f)	406	76.25	42.87	124	11.51	19.74

5. まとめ

待ち行列は、階段下部への到着密度 λ (人/s)が、階段の処理するサービス速度 μ (人/s)を上回るときに発生する。よって、待ち行列を解消するためには、到着率を減少、またはサービス率を増加させれば良い。前者は時差通勤通学の推進、列車本数の増加などにより、後者は階段の増設などにより実現できる。

今後、駅ホーム内に複数の階段が設置されている場合の利用者の階段選択選好について、利用者の到着率、階段のサービス率、階段の配置等との関係から調査する必要がある。

【参考文献】

- 1) 森村 英典, 大前 義次:「応用待ち行列理論」, 1975
- 2) 松本 嘉司, 伯野 元彦:「土木解析(2)」, 1975