

乗客車内行動モデルによるライトレールサービスの定量検討手法

熊本市交通局の高床ステップ付きおよび低床ノンステップライトレール営業車両における乗客行動観察と車庫内定置乗降実験、並びに東京大学生産技術研究所の実物大ライトレール車内空間モックアップにおける着席・乗降実験を通じて、着席行動と乗降行動の物理モデルを構成し、着席行動モデルから快適性評価値を、乗降行動モデルから乗降容易性評価値をそれぞれ導出するライトレールサービス定量検討手法を構築した。その結果、車両ノンステップ化や運賃車外収受化という異なる次元のライトレールサービス改善シナリオの導入効果が、営業車両で事業者が比較的容易に取得可能な乗降客数データを用いて快適性向上と速達性向上の両視点から定量検討可能となった。

キーワード | ライトレール, 車内空間デザイン, 行動モデリング, 快適性評価, 速達性向上

平沢隆之

HIRASAWA, Takayuki

博(工) 東京大学生産技術研究所特任研究員

松岡茂樹

MATSUOKA, Shigeki

修(工) 東急車輛製造株式会社経営企画部長

須田義大

SUDA, Yoshihiro

工博 東京大学生産技術研究所教授

1—はじめに

持続可能な交通まちづくりを推進する上で、利便性の高いマイカーの交通需要を、制約の多い公共交通へ円滑に転換させることが不可欠である。そのためには、交通移動手段の選択時に環境低負荷型の交通モードがより自然に選択されるよう利用者の意識に働きかける「モビリティ・マネジメント(藤井¹⁾ほか)」等との相補的な方策として、交通需要を受入れる公共交通の側で、利便性・快適性・信頼性等の観点で十分に魅力的なサービスを提供できることが重要である。

既存の道路インフラを活用して比較的廉価にシステム導入できる都市型の公共交通としてLight Rail Transit(ライトレール)が我が国でも着目されて久しい。バリアフリー推進観点から熊本市交通局で低床ライトレール車両9700形が導入された(1997年7月:図一1)(宮崎²⁾)のを皮切りに、各地で低床ライトレール車両が導入されてきた(三浦ほか³⁾)。最近では、鉄道の廃止路線を活用する形で富山ライトレールが開業し(2006年4月)(野崎ほか⁴⁾)、電池駆動型ライトレール車両の開発研究が推進される(深山ほか⁵⁾)など、ライトレールは今後のまちづくりを担う都市型公共交通モードとしての大きな期待を集めている^{注1)}。今後の更なる普及促進に向けて、ライトレール導入メリットを最大限引き出すには、運賃・運行パターン・車内空間寸法などの条件を所与とした場合にライトレール車内空間の有効な利用方法を提案できる工学的な検討手法が求められる。ところが、藤原らによる仮想評価法を用いた低床ライト

レール車両の導入効果評価の検討⁶⁾を超えて、著者らの研究(Hirasawa et al^{7), 8)}を除いては、乗客のマイクロ行動分析に基づくライトレールサービス改善シナリオ評価手法は提案されていない。



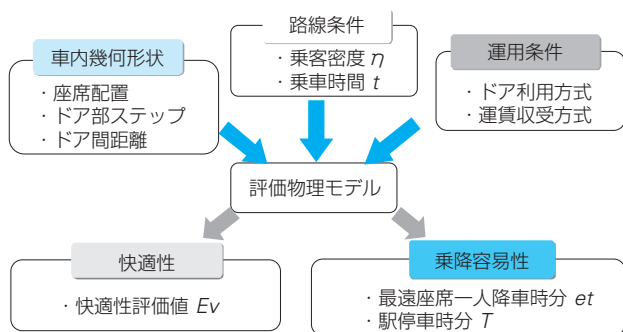
■図一1 日本初の低床ライトレール車両(熊本市交9700形)

そこで本研究では、通勤鉄道車両を対象に開発された須田ら⁹⁾の車内空間評価モデルを拡張して、車内空間の利用条件を可変パラメータに事業者が営業車両で比較的容易に取得可能なデータを用いて快適性と速達性の両観点から改善シナリオを検討可能な、ライトレールサービスの評価手法を構築した(2章)。熊本市交通局の従来型の高床ステップ付きおよび新型の低床ノンステップのライトレール営業車内と東京大学生産技術研究所の実物大ライトレール車内空間モックアップを用いた乗客行動観察・被験者行動実験を通じて各評価モデルのパラメータを同定(3章)し、モデルの妥当性検証を行うと共に車両ノンス

テップ化・車外運賃收受化のライトレールサービス改善シナリオの導入効果定量評価に適用した(4章). なお, 本研究で主な検討対象とするのは, ピーク時間帯に見られる混雑状況ではなく, オフピーク時間帯に“どこまでの快適なサービスが実現可能か”というゆとりある利用状況である^{注2)}.

2——ライトレール車内空間評価モデル

本研究では, 営業ライトレール車内の乗客行動観察に基づいてモデリング対象とする乗客行動を規定し, 着席行動物理モデルから快適性評価指標, 乗降行動物理モデルから乗降容易性評価指標をそれぞれ導く(図—2).



■図—2 ライトレール車内空間評価モデルのコンセプト

2.1 モデリング対象とする乗客行動の規定

ライトレールを利用する各乗客は, 乗車電停で乗車及び着席行動, 降車電停で降車行動を行う. 各電停における乗客乗降の結果として着席状況が変化するため, これら各場面でのライトレール車内乗客行動の記述には, 乗客間あるいは乗客—車内環境間相互の影響を考慮に入れた生態心理学(佐々木ほか¹⁰⁾)的な行動分析が厳密には必要となる. しかし, 実用上はサービスシナリオを構成する各変数の差が定量表現可能なレベルでのモデル表現で十分であるため, 営業車両における乗客行動観察から抽出される代表的な利用状況^{注3)}をモデリング対象に定め, その着席行動(席選択行動)及び乗降行動(乗車時あるいは降車時の車内移動)に限定して車内空間構成要素で物理的に表現する簡易な定量モデル式を導出する. 各電停における乗客車内行動を説明する物理モデルに用いる指標から, 乗客一人当たりの快適性評価値と乗降時間で表現される乗降容易性評価値とを出力するものとする(図—2).

2.2 ライトレール車内空間利用形態の分類

ライトレールでの運賃收受方式には, 車内收受方式と車外收受方式がある. 国内で一般的な^{注4)}車内收受方式

は, ドア利用方式との組み合わせによりさらに3通り程度に分けられる. 車内で確実にワンマン運賃收受を行うため, 均一運賃を前ドアで前払いする方式(都電荒川線など)と対距離/対区間運賃を降車時に前ドアで後払いする方式(本検討当時の熊本市交通局単車など)が主流で, その他に接続車両ではツーマン運賃收受も行われる(本検討当時の熊本市交通局接続車など).

ライトレール車内空間評価モデルは, 表—1・2に分類される車内幾何形状(座席配置, 乗降ドア部ステップ, ドア間距離)・路線条件(乗客密度, 乗車時間)・運用条件(車内運賃收受方式, ドア利用方式)の入力に対して, 後節で定義する快適性・乗降容易性評価値を出力するものとする. その際, 通勤鉄道車両を対象に開発された須田ら⁹⁾の車内空間評価モデル(乗降ドア部ステップ:無し, 乗客密度:100%, 車内運賃收受:無し, ドア利用方式:両ドア乗降)^{注5)}をライトレール車両用にモデル拡張することとする.

■表—1 ライトレールの代表的な^{注6)}運賃收受方式とドア利用方式

	前ドア乗車・中ドア降車 ワンマン均一運賃前払い (東京都交通局荒川線など)
	中ドア乗車・前ドア降車 ワンマン整理券後払い (熊本市交通局単車など)
	両ドア乗降 ワンマン運賃車外收受 (欧州の標準的方式)
	中ドア乗車・両ドア降車 ツーマン整理券後払い (熊本市交通局接続車など)

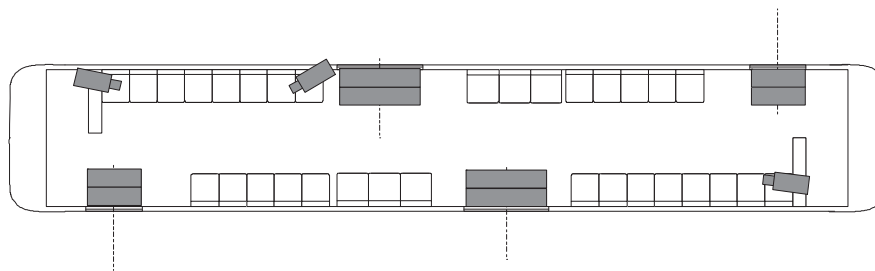
* ¥マークは(整理券受け取りを含む)運賃收受を表す

■表—2 ライトレール車両の分類

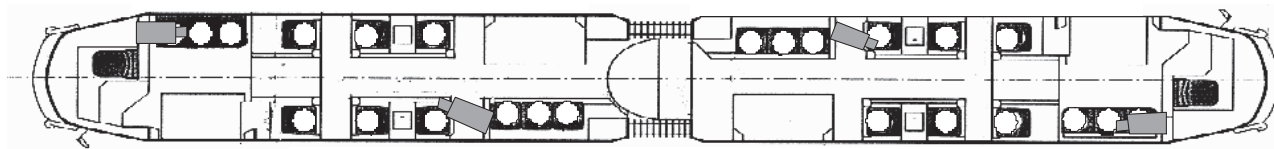
車両長	ドア部ステップ	ドア利用方式
S: 単車	S: ステップ付き	1: 中ドア乗車・前ドア降車
L: 接続車	N: ノンステップ	2: 両ドア乗降
		3: 前ドア乗車・中ドア降車

2.3 ライトレール営業車内乗客行動観察

高床ステップ付き車両と低床ノンステップ車両の混在する熊本市交通局において, ステップ付き・ノンステップ各1編成の車内上部にビデオカメラ数台をクランプ固定して, 1997年10月下旬の晴天平日各1日間, 朝ピーク時間帯から夕方ピーク時間帯までの4往復の車内乗客行動を撮影した(図—3)(須田ら¹²⁾). ステップ付き車両は9200形(床面高さ815[mm], 車体長13.3[m])とノンステップ車両



(a) ステップ付きライトレール車両 (9200形)



(b) ノンステップライトレール車両 (9700形)

■図-3 ライトレール2車種へのビデオカメラ設置位置

は9700形(床面高さ360[mm], 車体長18.5[m])とした。撮影は着席行動観察用の広域アングル数台と運賃收受行動観察用のドア位置スポットアングル1台で行い、結果を目視解析・集計した。

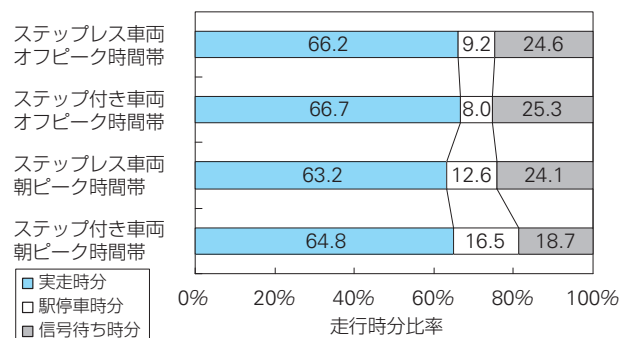
本研究の対象路線では、検討当時^{注7)}対距離区間運賃制を採っていた。ワンマン運転のステップ付き車両では中ドア乗車・前ドア降車の整理券後払い方式、ツーマン運転(中ドア付近の車掌が同乗する)ノンステップ車両では中ドア乗車・両ドア降車の整理券後払い方式であった^{注8)}。これらを表-2の分類に照らすとステップ付き車両(9200形)はSS1、ノンステップ車両(9700形)は変則的だが着席行動自体は両ドア乗降の場合に近似可能とみなしてLN2、にそれぞれ分類できる。

日本では、ワンマン車内運賃收受方式の都合から、一般に均一運賃制では乗車時、対距離/対区間運賃制では降車時に前方の運転手位置で確実に運賃收受を行うため、乗降時の利用ドアが指定される^{注9)}。一方、欧米のライトレールではゾーン運賃制で抜き打ち検査時の高額罰金^{注10)}を前提とした自己改札方式(信用乗車方式)¹³⁾を採るため両ドア乗降方式が一般的である^{注11)}。これら運賃收受方式に由来するドア利用区分の差が与える快適性・速達性への影響は、本研究で構築するモデルを用いて後に数値的に明らかにされる。

さて、ビデオ観察の結果、オフピーク時間帯は最大でも定員の半分程度の利用状況であった。よって、通勤車両モデルに対して乗客密度50%を基準とするモデリングを想定する。また、オフピーク時間帯の各乗客の平均乗車時間は、ステップ付き車両午前上り方向で16.1分(サンプル数:42, 標準偏差:9.3分)、ノンステップ車両午前上り方向で17.0分(サンプル数:67, 標準偏差:9.3分)であり、乗車時間を15分程度とみなすことができる。また、通勤鉄道車両の降車行動モデリングに際して仮定した「一路線走

行の所要時間を説明しうる途中の大きな乗換え電停」は観察されなかった^{注12)}ため、各電停ごとの乗降所要時間分析が新たに必要と言える。

上り方向各走行の走行時分を実走時分・駅停車時分・信号待ち時分に分類して集計すると、各時間帯に共通して概ね実走時分:7割, 駅停車時分:1割, 信号待ち時分:2割, という内訳になった(図-4)。



■図-4 観察されたライトレール走行時分の内訳

ここで、駅停車時分は電停で乗降のために停止してから動き出すまで、信号待ち時分は前方の赤信号や先行車両との間隔調整のために停止してから動き出すまでの時間、それ以外を実走時分とした(つまり、駅停車・信号待ち停止のための加減速は実走時分に含み、乗降のない電停を通過する場合、その電停では駅停車時分が計上されない)。各電停での駅停車時分を一路線ぶん集計・分析することで、後述のようにライトレール車両の運用方式に係わるサービスパラメータを考慮に入れた表定速度向上シナリオの比較検討が可能となる。

図-4からは車両の低床ノンステップ化による時間短縮が定期券利用の多い朝ピーク時間帯だけにしか見られず、集計済みデータからはこれ以上の細かな議論ができない。そこで、各電停における駅停車時分を所要時間

構成要因に分解して、車両のノンステップ化と運賃收受方式の差を表現しうる駅停車時分説明モデルをライトレール用に新規導入する。このモデル式説明のため、ビデオ映像から各電停で各ドアを通過して乗降した人数と各乗客の運賃支払い方式(現金釣りなし・回数券あるいは定期・乗替後現金)をドアごと・乗降列ごとに目視集計した。

2.4 着席行動モデリングと快適性評価指標

2.4.1 ライトレール快適性評価モデルのコンセプト

通勤鉄道車両についての須田らの先行研究⁹⁾では、「乗客はとりうる席に対し、その快適性を評価し、その中で最も評価値の高い席を選ぶ」という乗客の着席行動原理を定め、乗客一人当たり平均の快適性評価値 $Ev[m]$ として定員乗車状況における各種座席配置の快適性を定量表現した。ライトレール車両においても、乗客が各席の快適性を評価できる状況を想定できれば^{注13)}、通勤鉄道車両と異なる部分をモデル拡張することで、この快適性最大化行動原理を踏襲できる。

$$Ev = (\sum \max(ev[i][j])) / n \quad (1)$$

$ev[i][j]$: i 番目の乗客による j 番席の快適性評価値
 n : 乗客総数

通勤鉄道車両と異なるライトレール車両固有の各要素について、次節の通りモデル拡張を行う。

2.4.2 ライトレール快適性評価モデルの新規パラメータ降車寄与率 ϵ

ワンマン車内運賃收受の都合から乗車時と降車時で利用可能なドアに制限を設ける「乗降経路不一致」の場合、両ドア乗降可能な場合と比べて追加歩行が生じるための心理的距離延長に加えて、乗客がドアから席までの経路アクセス性を乗車時と降車時で異なる重要度で認識すると考えられることに対する評価重み付け(降車寄与率)の表現が必要である¹¹⁾。

$$Uad = (1+d) \cdot \{(1-\epsilon) \cdot Ua + \epsilon \cdot Ud\} \quad (2)$$

Uad : 乗降経路の快適性値, Ua : 乗車ドアから座席までの経路快適性, Ud : 座席から降車ドアまでの経路快適性, d : ドア利用制限による心理的距離延長比率, ϵ : 降車寄与率($0 < \epsilon < 1$)

ドア利用制限による心理的距離延長率 d

ドア利用制限による心理的距離は、乗客密度 η と乗降ドア間距離 L の増加関数と考えられる。簡単のため両者の影響が独立に線形的に作用すると考えると、その距離延長率 d は次式で与えられる:

$$d = A \cdot (\eta - 1) + B \cdot L \quad (3)$$

ドア部ステップ昇降による心理的抵抗

ドア部ステップを乗車時に上り、降車時に下りる際の心理的抵抗は、着席行動には影響しないが全席に一律に追加される快適性値の減退として表せる。昇・降段の各心理的抵抗は、同じ垂直方向の移動である二階建て通勤鉄道車両の車内階段昇降時の心理的抵抗^[10]と同等に扱えば、その値は次式で与えられる:

$$-\delta_u \cdot Nu - \delta_d \cdot Nd \quad (4)$$

δ_u : 昇段ステップ当りの心理的抵抗, δ_d : 降段ステップ当りの心理的抵抗, Nu : 昇段ステップ数, Nd : 降段ステップ数

他の乗客による通路閉塞の心理的抵抗

通勤鉄道車両に比べて一般的に通路幅の小さいライトレール車両では、通路に立つ乗客が脇を歩行通過する他の乗客にとって通路閉塞要因となる。通勤鉄道車両においても、同種の水平方向移動に係わる追加的心理抵抗として通路閉塞箇所当たりの心理的抵抗を導入していたが、通勤鉄道車両とライトレール車両では通路幅が異なるため迂回所要時間が異なると考えられる。よって、箇所当たりの追加歩行時間を通路狭隘抵抗 $narrowPhs$ として新たに導入し、通勤鉄道車両にて導入した補正係数 α との積により心理的抵抗として次式の通りに席ごとに表現して Uad に足し込む(式(2)の右辺に下記を追加する):

$$-\sum \alpha \cdot narrowPhs \quad (5)$$

以上の定義によって拡張された座席・立席・準立席(座席前の立席)の快適性評価式($ev_1; ev_2; ev_3$)は、下記の通り表現される:

$$ev_1[i][j] = Uad[i][j] + \beta \cdot Cs[i][j] \cdot t[i] - \delta_u \cdot Nu - \delta_d \cdot Nd \quad (6)$$

$$ev_2[i][j] = Uad[i][j] + \gamma \cdot Us[i][j] \cdot t[i] - \delta_u \cdot Nu - \delta_d \cdot Nd \quad (7)$$

$$ev_3[i][j] = Uad[i][j] + \gamma \cdot Us[i][j] \cdot t \cdot (1-p) + \beta \cdot \overline{Cs} \cdot t[i] \cdot p - \delta_u \cdot Nu - \delta_d \cdot Nd \quad (8)$$

Cs : 座席自体の快適性値, Us : 立席自体の快適性値, β , γ : 補正係数, p : 着席確率(座席前の立席(準立席⁹⁾)において後に座席が獲得できる確率^{注14)}

乗車ドア付近の立席A, 降車ドア付近の立席C, 両者の中間位置の座席Bの中から1席を選択する場合を対象に、拡張された着席行動モデルの物理的意味を解説する(図-5)。A~C各席の快適性値 ev_2A, ev_1B, ev_2C は、y切片に乗降経路の快適性(歩行距離 $\times (-1)$)で表現、乗車時間 t の一次関数として傾きに席自体の快適性(座席は正の値, 立席は負の値)をとった一次関数で表現されている。簡単のためノンステップ車両で通路閉塞がない場合で、乗車時の経路アクセス性を最大限重視する完全乗車基

準($\epsilon=0$)と降車時の経路アクセス性を最大限重視する完全降車基準($\epsilon=1$)の両状況を考える(現実はこちらの中間と考えられる)。各乗客のとるべき最適な行動は、快適性値最大の空席(図5の太線)を順次選択することである。

両図から、 ϵ の大小によってAとCのy切片の上下関係が決まっていることが確認できる。すなわち、 ϵ :大(>0.5)の場合は乗車時間によらずCがAより大きな快適性を示すので、常に座席Bと立席Cの間の比較選択になる。これに拠れば、乗車時間の短い場合は降車に便利な立席Cが選択され、境界時間 tb 以上の乗車時間では着座の快適性がより重要視されて座席Bの選択される様子が確かに説明できる。

なお、各評価式は $\eta=1(100\%)$, $d=0$, ϵ :任意, $Nu=Nd=0$ とすることで通勤車両の場合を表現するため、通勤鉄道車両との比較が可能である。

2.5 乗降行動モデリングと乗降容易性評価指標

2.5.1 ライトレール乗降容易性評価モデルのコンセプト

通勤鉄道車両を対象とする須田らのモデル⁹⁾では、途中の大きな乗換え駅(降車駅)を想定して、定員乗車状態から任意の半数が降車する半数降車時分と線形関係にある最遠座席一人降車時分 et (最も降車が困難な席から一人の乗客が他の乗客を掻き分けて降車する所要時間)を乗降容易性の評価指標としていた(式9)。

$$et = Lr / V \cdot \delta + phs \quad (9)$$

Lr :ドアから席までの距離, V :乗客歩行速度, δ :ドア部ステップを含む経路上の抵抗による補正係数, phs :座席まわりの物理抵抗値^{注15)}

前述のように当該車両ではこれに相当する状況は観察されなかったが、同じ運用を行う通勤鉄道車両と同列で車内空間形状で決まる乗降流動性能を表し得る乗降容

易性の評価指標として有効なため、引き続き et を採用する。

2.5.2 駅停車時分説明モデル

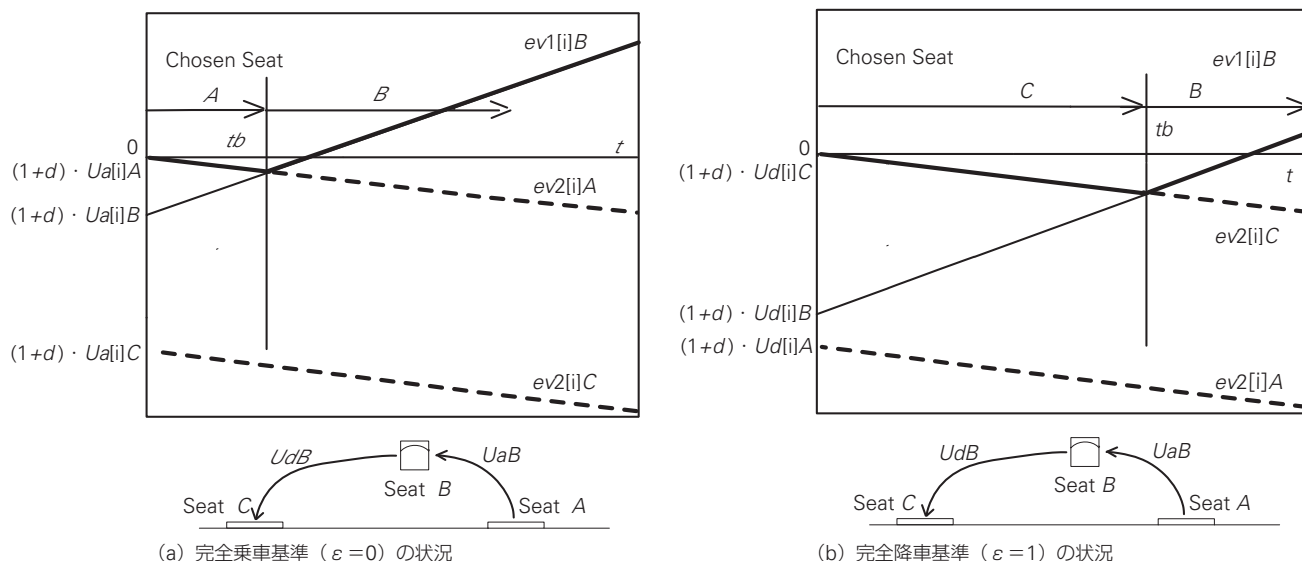
一方、営業車内ビデオ撮影結果を確認すると、電停到着前に乗客が降車ドア付近に歩み寄って事前待機していた。この場合、駅停車時分に与える座席配置の影響は実質的に無くなり、列を成す乗降客のドア部ステップ通過や車内運賃収受の所要時間のみで駅停車時分が説明される。単純に各要素時間を足し合わせた回帰モデルでは列を成す乗客の前後間の行動調整による所要時間の微妙な変化を表現できないので、ライトレール車両の運用方式に係わるパラメータを組み込んだ乗降各ドアにおける時空間パス(図6)上で、ボトルネックとなる要素時間を足し合わせた物理モデルとして駅停車時分説明モデルを新たに構築する。

前ドア(Aドア)・中ドア(Bドア)を利用する場合、乗車客列は車両外側乗車ドア位置、降車客列は車内降車ドア付近に列を成して待機している状態から乗客(たとえば、*Passenger1*~*Passenger3*の3名)が整然と列を成して乗降する状況を考える。各電停の駅停車時分 T は、車両ドア開閉と運転手の安全確認の和であるドア開閉時間 $Tloss$ と、ドアA・Bの乗降時間($TA;TB$)の大きい方の値との和で表される(式(10))。各ドアの乗降時間は、前ドアA(B)降車客列の捌け時間 $TAoff(TBoff)$ 、降車客列が捌けた後の乗降列入れ替え時間 Tch ^{注16)}を挟み、中ドアA(B)乗車客列の捌け時間 $TAon(TBon)$ までの所要時間である(式(11),(12))。

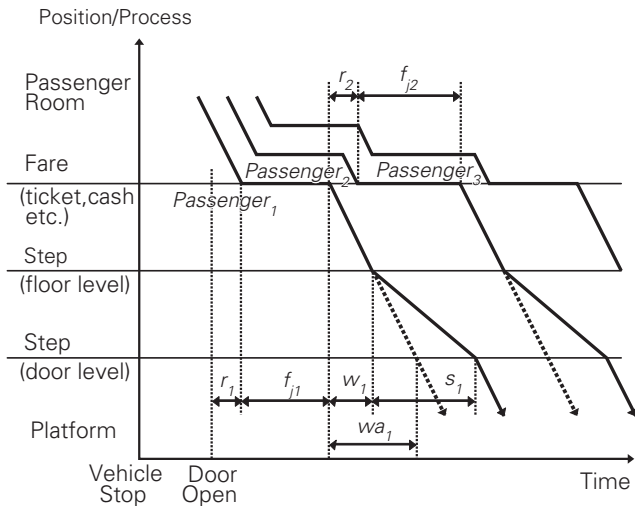
$$T = \max(TA, TB) + Tloss \quad (10)$$

$$TA = TAoff + Tch + TAon \quad (11)$$

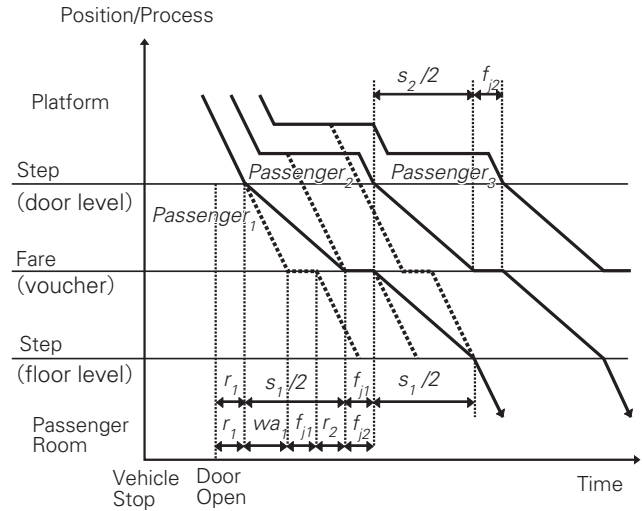
$$TB = TBoff + Tch + TBon \quad (12)$$



■図5 ライトレール車両快適性評価モデルの図解



(a) ステップ付き前ドアからの降車客列



(b) ステップ付き中ドアからの乗車客列

■図-6 乗降ドアにおける時空間パス(SS1の場合)

具体的に、中ドア乗車時に整理券をとり、前ドア降車時に運賃を支払うライトレール車両(ステップ付き:SS1, ノンステップ:SN1)の場合を対象に、前ドア降車客列・中ドア乗車客列をそれぞれ定式化してみる。図-6にて、横軸が経過時間、縦軸が乗客一人ずつの位置と行動プロセスを表す(下付き添え字は、列で何番目の乗客かを表す)。各乗降客列は、それぞれ以下のようにモデル化される:

前ドア降車客列

先頭客はドアの開閉、後続客は前の乗客の運賃支払い終了に時間 r で反応して、次の乗客が運賃支払いとドアステップ降段を始める。次の乗客の運賃支払い処理時間には前の乗客がドア部ステップ上段までの通路を歩き終わり、前の乗客がステップを降り始めるまでは次の乗客が支払いを始めないとすれば、前ドアA降車客列の捌け時間 $TAoff$ は、

・ステップ付き(SS1)の場合、

$$TAoff(f, s) = (r_1 + f_1) + \sum_{i=2}^n \max\{w_{i-1}, (r_i + f_i)\} + w_n + s_n$$

$$= \sum_{i=1}^n (r_i + f_i) + w_n + s_n \quad (\text{where } w_i \ll r_i + f_i) \quad (13)$$

・ノンステップ(SN1)の場合、

$$TAoff(f) = \sum_{i=1}^n (r_i + f_i) + wa_n \quad (14)$$

中ドア乗車客列

ステップ途中の発券機で整理券をとって乗車する際に、前の乗客がステップを1段昇って券をとると次の乗客がつづいてステップを昇り始め、その時間に前の乗客が残りの1段を昇り終えて車内を歩き始めるとすれば、中ドアB乗車客列の捌け時間 $TBon$ は、

・ステップ付き(SS1)の場合、

$$TBon(f, s) = (r_1 + s_1/2 + f_1) + \sum_{i=2}^n \max\{s_{i-1}/2, (s_i/2 + f_i)\} + s_n/2$$

$$= r_1 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{s_i}{2} + f_i\right) + \frac{s_n}{2} \quad (15)$$

・ノンステップ(SN1)の場合、

$$TBon(f) = wa_1 + \sum_{i=1}^n (r_i + f_i) \quad (16)$$

と表される。

ここで、各変数の定義は下記の通り:

r (乗客反応時間): 前の乗客が次の行動に移るため空いた一人一人分の距離(30cmと仮定する)を次の乗客が歩行して進む所要時間で表す。先頭一人には共通して作用し、後続客の運賃收受や追従歩行時に発生するが、ステップ通過の前後には発生しないものとする。

f (運賃收受抵抗): 乗車時の整理券取りと、降車時の釣りなし現金投入・回数券投入あるいは定期券提示・両替後現金投入のいずれかの、運賃收受所要時間。

w (車内歩行時間1): ステップのある時は w 、ステップのない時は車体幅が広がって wa だけ余計に運賃収受箱からドア部までの歩行に要する歩行時間。

s (ステップ歩行時間): ドア2箇所における乗車あるいは降車の歩行所要時間。

q (車内歩行時間2): 車外運賃收受の場合、ドアから車内消印機までの歩行時間。

3—実験による各モデルパラメータの同定

3.1 実物大ライトレール車内空間モックアップ実験

通勤鉄道車両実物大車内空間モックアップの車内幅を当該低床ライトレール車両と同じ2250[mm]に調整し、立

席位置に吊革を備えた実物大ライトレールモックアップ(図—7:車体長10.16[m])において、快適性評価モデル式のパラメータを求める着席行動実験, 乗降容易性評価式の各パラメータを求める降車行動実験を行った(須田ほか¹⁰⁾).



■図—7 実物大ライトレールモックアップ実験の風景

3.1.1 モックアップ着席行動実験

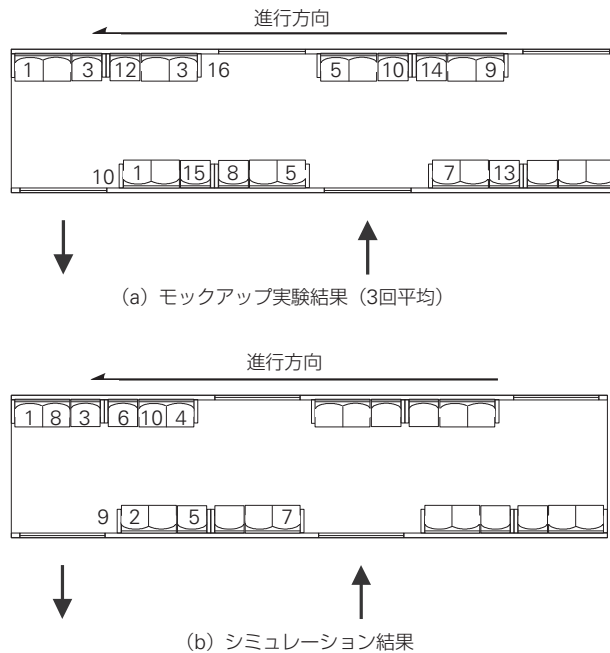
乗客密度・乗車時間・ドア利用方式を表—3の通りに設定して被験者26名による順次着座実験を行った。各条件3回の着座順平均を最もよく説明するよう $d; \epsilon; A; B$ の値を順次探索した。乗客密度70; 90[%]の状況は、ダミー人形を必要数配置することで実現した。

■表—3 着席実験条件

実験番号	ドア利用方式	乗車時間 [分]	乗客密度 [%]
1	中ドア乗車・前ドア降車	15	90
2	中ドア乗車・前ドア降車	15	70
3	中ドア乗車・前ドア降車	15	50
4	中ドア乗車・前ドア降車	5	50
5	前ドア乗車・中ドア降車	15	70
6	両ドア乗降	15	50

一駅程度の短い乗車時間状況(実験番号4)では、乗客は完全な降車基準($\epsilon=1$)で着席行動するとみなせる。先頭10名の着席順が実験結果と一致する d を-1から1の間0.1刻みで探索すると、 $d=-0.3$ と求められた(図—8)。

同様に、これと乗客密度の同じ条件(実験番号3,5)では d が共通なので、 $d=-0.3$ の下で先頭の10名の着順が実験結果と一致する ϵ を0から1まで0.1刻みで探索すると、前ドア乗車・中ドア降車の場合が $\epsilon=0.5$; 中乗り前降りの場合が $\epsilon=0.7$ で、乗車時間15分程度では降車時アクセス性が乗車時アクセス性と同等かより重視されるとい



■図—8 実験とシミュレーションの着席順序 (SN1, $\eta=50\%$, $t=5$ [分])

う着席行動傾向が確認できた。

さらに、実験番号6($L=0, \epsilon$:任意)の着座順をよく説明する d の値は-0.5と求められた。これと実験番号3を比較すると、ドア利用区分の有無の影響は(ドア間距離 $L=5.09$ [m]の場合に) d の差0.2に相当し、乗客密度 η の100%から50%への変化による d の差0.5よりは小さいことがわかる。

ドア利用方式(中ドア乗車・前ドア降車)と乗車時間(15分)を固定して乗客密度を変化させた場合(実験番号1, 2, 3), 乗客密度 $\eta=50, 70, 90$ [%]に対して降車寄与率 $\epsilon=0.5, 0.5, 0.7$ と求められ、 η の増加に伴う ϵ の増加傾向が数値的に確認できる。

3.1.2 モックアップ降車行動実験

ドア利用方法3通りに対して、定員乗車状態で最遠座席一人降車時分を測定する降車実験を行った。ドアから最も遠い座席に座る被験者がドアまで降車する時間を2名の青年男性に対して測定し、その平均値を通勤鉄道車両モデルと比較することにより、箇所ごとの通路狭隘抵抗 $narrowPhs$ が1.00[s]と求められた。

3.2 ライトレール車庫内定置乗降実験

ライトレール車庫内にステップ付き在来車両とノンステップ低床車両各1編成を留置して、各種の運賃収受・ドア利用方式(表—4)を想定して仮設ホームから前述の青年健常男子2名が乗降する所要時間を各4回測定し、その平均値を用いて駅停車時分説明モデルを構成する各要素時間を算出した。ドア開閉装置や運賃収受装置が営業

走行中と同様に動作するよう、この実験は車両通電状況で行った。

■表—4 車庫内設置実験の実験条件

運賃收受方式	ドア	乗/降車	支払い行動
均一運賃 前払い	前	乗車	均一運賃投入
	中	乗車	均一運賃投入
整理券 後払い	中	乗車	整理券受け取り
	前	降車	整理券+運賃投入
	前	降車	両替後、整理券+運賃投入
	前	降車	定期券提示

ステップ付き在来車両と低床ノンステップ車両のドア部通過時間の比較から、乗車時に1[s]程度、降車時に0.5[s]程度の値で、各ドアの乗/降車時ステップ抵抗が算出された(表—5)注17)。

■表—5 ステップ抵抗の計測結果

ドア	乗/降車	抵抗 [s]
前	乗車	0.78
前	降車	0.21
中	乗車	1.40
中	降車	0.73

運賃收受抵抗は、定期券または回数券投入の場合で約0.6[s]、釣り無し現金払いの抵抗が2[s]弱、両替時の抵抗が10[s]強であった(表—6)。

■表—6 運賃收受抵抗の計測結果

收受方式	ドア	支払い行動	抵抗 [s]
均一運賃 前払い	前/中ドア	均一運賃投入	1.48
	乗車		
整理券 後払い	中ドア乗車	整理券受け取り	0.30
	前ドア降車	整理券+運賃投入	1.85
	前ドア降車	両替後、整理券+運賃投入	11.99
	前ドア降車	整理券+回数券投入	1.02
	前ドア降車	定期券提示	0.09

4—考察

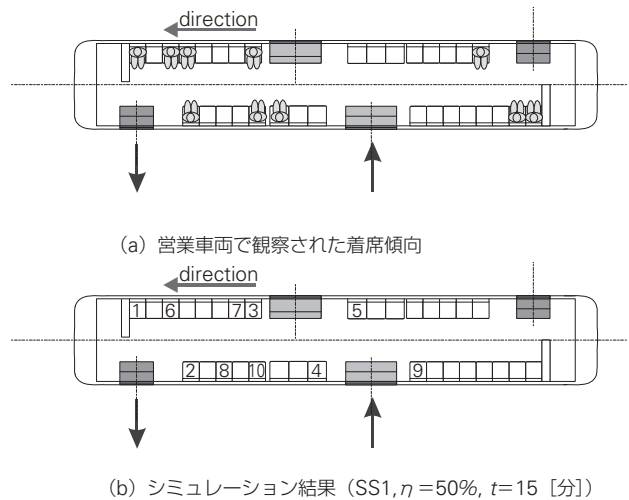
前章までの手続きで構築した快適性・乗降容易性の各評価モデルの妥当性を検証したうえ、車体低床化とドア利用方法のサービス改善シナリオ導入効果を定量的に評価する。

4.1 各評価モデルの妥当性検証

4.1.1 快適性評価モデルの妥当性検証

ステップ付き営業車両(SS1)で観察された午後オフピーク時間帯下りの着席順集計結果を、構築した着席行動モ

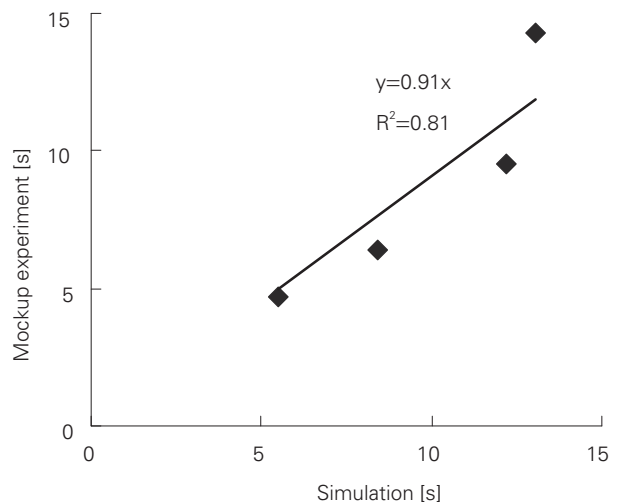
デルによるシミュレーション結果と比較する。ここで、営業車両では乗客ごとに乗車時間がばらつき、グループでの利用や途中電停での乗降も発生するうえ、乗客は知覚ミスにより快適性最大の席を必ずしも順次選択できないことから、選択された先頭10名の着席傾向を集合として着目し、営業車両で観察された着席傾向と最もよく一致する降車寄与率 ϵ を求めると0.7で、前章の実験条件3の結果と一致した(図—9)。よって、快適性評価モデルは、本研究で対象とした条件内での平均的な着席行動の表現に一定の妥当性が確認されたと言える。



■図—9 営業車内とシミュレーションの着席傾向比較

4.1.2 乗降容易性評価モデルの妥当性検証

モックアップで定員乗車状態を実現し、任意の半数を指定して測定した実験における半数一斉降車時分は、通路狭隘抵抗*narrowPhs*を考慮した新たな降車行動モデルによるシミュレーションでよく説明された(図—10)。よって、乗降容易性評価モデルは、通勤車両と同様にライトレール車内空間の評価にも適用できると言える。



■図—10 半数一斉降車時分の測定・計算結果

4.1.3 駅停車時分説明モデルの妥当性検証

ステップ付き在来営業車両(SS1)で観察された午後オフピーク時間帯下りの一路線駅停車時分 T_{obs} を、構築した駅停車時分説明モデルによるシミュレーション結果と比較する。各電停における乗降人数(券種別)と前章で同定した各要素時間パラメータを駅停車時分説明モデルに適用して算出される一路線駅停車時分 T_{sim} と比較すると、両者は回帰係数 $k=1.11$, $C=4.92$ (データ数60, $R^2=0.75$)で対応づけられた^{注18)}。

$$T_{obs} = k \cdot T_{sim} + C \quad (17)$$

これより、営業車内乗客平均に対する定置実験被験者の歩行速度比が11%増、ドア開閉時間(T_{loss})が5秒程度であり、駅停車時分説明モデルの妥当性が確認できる。また、ノンステップライトレールの実測データと比較して、乗降列入れ替え時間 $T_{ch}=4.11$ [s]が得られた。

4.2 サービス改善シナリオの定量的評価

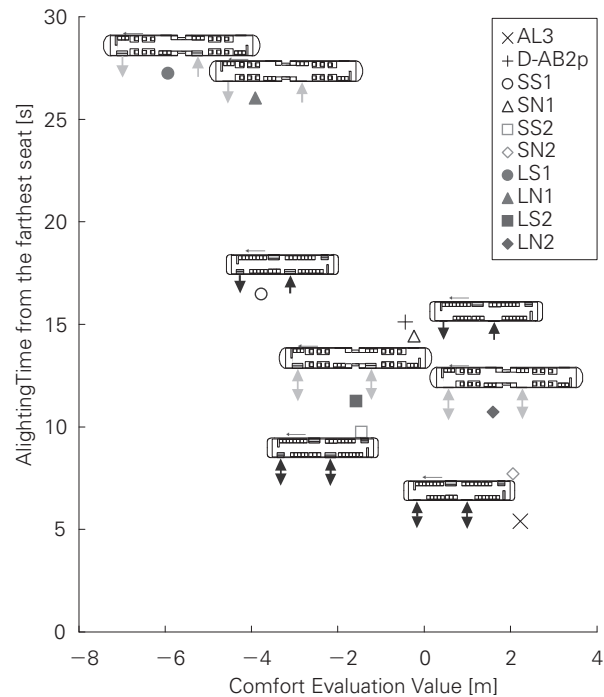
4.2.1 快適性・乗降容易性を両立するシナリオの評価

車体低床化, および運賃収受方式で規定されるドア利用方法改善を単独あるいは同時に実施する場合の効果, 快適性・乗降容易性の向上および駅停車時分短縮による速達性向上両観点で評価する。

乗客密度50[%], 乗車時間15[分]の条件で, 中ドア乗車・前ドア降車ステップ付き車両(SS1)と中ドア乗車・両ドア降車ノンステップ車両(LN2)の改善シナリオについて, 車体寸法的・ドア利用方式にほぼ等しいロング配置の3扉通勤電車車両(AL3), ボックス配置の二階建て二扉通勤電車車両(D-AB2P)とシミュレーションにより快適性・乗降容易性を比較する^{注19)}。横軸に快適性評価値, 縦軸に乗降容易性評価値を充てた快適性評価値-乗降容易性評価ダイアグラム(図-11)において, 右下に配置されるのが望ましいライトレール車内空間運用条件である。

まず, 車体低床化あるいはホーム嵩上げによるノンステップ化での大きな快適性向上と運賃車外収受化を想定した両ドア乗降化による大きな乗降容易性の向上, および両者の相乗効果が読み取れる。なおここでは, 着目する低床化・ドア利用方法改善の効果を明確化するため, 完全降車基準($\epsilon=1$)かつドア利用区分による心理的距離延長のない場合($d=0$)として計算した。

図-11で, ステップ付きライトレール車両の最高条件(SN2), ノンステップライトレール車両の最高条件(LN2)とも, 相当する通勤車両のAL3より幾分劣っている。これは, 想定するライトレール車両が利用者数に比べてドア数が少なく歩行距離が長いことと, 車体幅が小さく座席数が多く取れないことが理由と考えられる。よって, 逆にライトレール車両において通勤鉄道車両AL3並みの快適性・乗



■図-11 ライトレール車両の快適性・乗降容易性評価ダイアグラム

降容易性を実現しバリアフリー以外に健常利用者の観点からも利用価値を見出すためには, ノンステップ化と運賃車外収受化に加えて, 乗降ドアを増やして車内歩行距離を減らしたり, 一方向運転を導入して片側ドア部にも座席を設けたりする追加的な措置が必要と言える。

4.2.2 速達性向上シナリオの評価

現状のドア部ステップあり・運賃車内収受ありの場合の駅停車時分を基準に, 代表的な時間短縮シナリオの導入効果を定量的に検討する。車両ノンステップ化以外に, 欧州で見られるように車内運賃収受を廃止した場合(「車外運賃収受化^{注20)}」と呼ぶことにする)を考え, それぞれの単独効果・複合効果を算出してみる。

ノンステップ化と運賃車外収受化を単独あるいは同時に採用した場合の駅停車時分は, 以下の式で表される。

車内運賃収受方式のままノンステップ化する場合

$$TBon(f) = r_1 + \sum_{i=1}^n \max\{(wa_{i-1} + q_{i-1} + r_{i-1} + f_{i-1}), (r_i + wa_i)\} \quad (18)$$

$$TAoff(f) = (r_1 + f_1) + \sum_{i=2}^n (r_i + f_i) + wa_n \quad (19)$$

ステップ付き車両のまま運賃車外収受化する場合

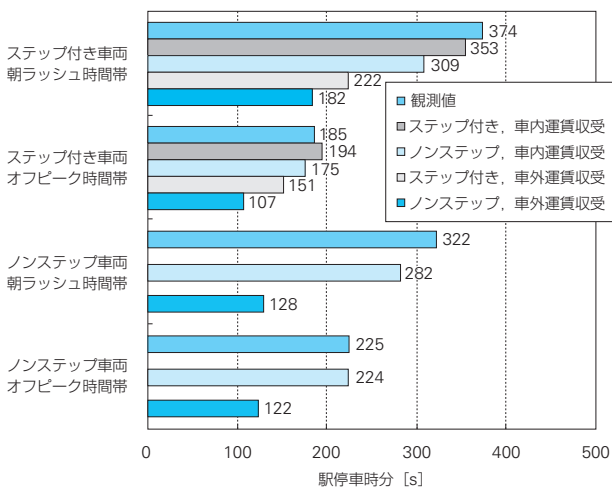
$$TBon(s) = (r_1 + s_1 / 2) + \sum_{i=2}^n \max\{s_{i-1} / 2, s_i / 2\} + s_n / 2 \quad (20)$$

$$TAoff(s) = (r_1 + s_1 / 2) + \sum_{i=2}^n (r_i + s_i / 2) + s_n / 2 \quad (21)$$

ノンステップ化と車外運賃収受化を同時に行う場合

$$TBon(non) = TAoff(non) = \sum_{i=1}^n r_i \quad (22)$$

これらを用いて、各ドアを利用する乗客数が営業車両観察結果と同じ場合の駅停車時分を計算した。現状のドア部ステップあり・運賃車内収受ありの場合の駅停車時分を基準にとると、ノンステップ化のみで1~1.5割、運賃車外収受化のみで2~4割、ノンステップ化と運賃車外収受化の両方を行う場合で5割程度駅停車時分が短縮されると計算された(図-12)。つまり、速度向上に対する効果は車両ノンステップ化やホームの嵩上げによるノンステップ化に比べると運賃収受方式を変えるシステム上の変更の方が大きく、両者を同時に導入することで相乗効果も期待できると言える。なお、運賃車外収受化の場合、乗降が前/中いずれのドアでもよいので各ドアを利用する乗客人数が均されるため、実際には計算値以上の時間短縮が期待できる。



■図-12 駅停車時分のシミュレーション結果

さらに、一路線実走時分の2割程度を占める信号待ち時分を削減できる場合、上記の1割程度を占める駅停車時分の削減に比べてより大きな表定速度の効果が期待できる。ライトレール車両の接近を検知して優先通過させる電車優先信号を導入して理想的にすべての信号待ち時分を削減できた場合、ノンステップ化、運賃車外収受化、電車優先信号をすべて採用するとステップ付きライトレールの表定速度は現状の約13[km/h]から約19[km/h]に向上し、欧州ライトレール並みの速達性を実現できる注21)。なお、運行ダイヤ管理や車両の加減速性能向上の検討により、一路線実走時分の大半を占める実走時分を短縮して更なる速度向上も期待できる。

5 おわりに

本研究では、営業車両における行動観察に基づき、設定した標準的な状況を対象にした着席・乗降行動の簡便なモデリングを通じて、快適性と乗降容易性を数値出力

できるライトレール車内空間デザイン手法を構築した。モデルの各パラメータは営業車両の車庫内定置実験と実物大モックアップ車両における被験者実験を通じて同定し、対象とした条件内でのモデル説明力を確認した。

ライトレール車両のノンステップ化・運賃収受方式に伴うドア利用方式改善という異なる次元のライトレール車内運用に係わるサービス改善シナリオの快適性・速達性に与える影響が、事業者が非接触型ICカード等を駆使して比較的容易に取得可能な注22)乗降客数データを用いて定量検討可能となった。

駅停車時分説明モデルの導入により、各電停での乗降人数・利用券種を定めた場合の、ライトレール車両のノンステップ化・運賃収受方式に伴うドア利用方式改善による表定速度向上の精密な検討も可能となった。乗降ドア位置における乗客カウンタや非接触型ICカードを用いた効率的な乗降客数計測と組み合わせることで、より迅速にライトレールの精密なネットワーク運行計画も支援可能と考えられる注23)。本論文では定員乗車以下の設計目標状態について取り扱ったが、今後は、提案モデルの汎用性確保注24)や評価シミュレータのインターフェース整備注25)にも鋭意取り組んで参りたい。

謝辞: 本研究の遂行に際して実験フィールドを提供いただいた熊本市交通局、実験にご協力いただいた(独)交通安全環境研究所をはじめとする各位に感謝申し上げます。

注

注1) 本論文では、従来型の高床ステップ付き路面電車から新型の低床ノンステップライトレール車両までを同列に「ライトレール車両」として捉える。低床ノンステップライトレール車両としては、全低床車両(100%低床)のみを取り扱うが、主要な評価結果は乗降ドア部分だけを低床化した部分低床車両にも適用可能である。

注2) つまり、混雑軽減のような「不快の除去」ではなく、運行事業者が利用者向けサービス形態を検討する場合に、乗降容易性を損なうことなく与えられた一定の車内空間を最大限どのくらいの快適さを提供できるかを、定量的に検討する。

注3) モデル化対象の代表性確認はより長期間の車内行動観察に基づくことが望ましいが、今回取得した晴天平日オフピーク時間帯の2編成ぶんの観測データは、車内空間所与の場合に最大限のパフォーマンスを追求する上では十分に代表性を持つものと考えられる。

注4) 朝ピーク時間帯の広島電鉄広島駅など、我が国でも混雑対策として例外的に車外電停での運賃収受が行われる事例もある。

注5) 通勤鉄道車両では、定員乗車状況のみを想定したモデリングがなされていた。

注6) 他にも、中ドアが車両末尾付近に付いている後ドア利用方式(熊本市交通局にも該当車両あり)や、以前整理券後払い方式だったのが均一運賃になったため中ドア乗車前ドア降車のままの運賃後払い方式(最近の熊本市交通局も該当)、全ドアにカードリーダーを備えたツーマン運賃後払い方式(広島電鉄の連接車など)もある。ここに掲げたのは、本研究で対象とする2車種とその派生利用形態の分類である。

注7) プリペイド式磁気カードの導入と均一運賃制への移行に伴い、現在は乗車時の整理券は廃止している。

注8) 車両導入同時の運用方法。現在は、本研究の成果を踏まえて両ドア乗降

方式に移行済みである。

注9) 富山ライトレールでは、非接触型ICカード利用者の朝ラッシュ時間帯に限り乗降ドア利用の制限を撤廃するという信用乗車方式にはほぼ等しい運用も実現されている。

注10) 欧州ライトレールの不正乗車時罰金は一ヶ月定期運賃程度、市内中心部1ゾーン一回運賃の30倍以上となる。日本で信用運賃方式が進まない理由の一つとして、罰金限度の低さもよく指摘される。

注11) 欧州では、車外購入済みチケットを乗客自らが消印機に通し運賃処理を車内で一切取り扱わない信用乗車方式が一般的である。日本でも各地で非接触型ICカードを用いた自己改札方式の導入が進んでいるが、完全移行前は車内運賃取り扱いも併行するため、本研究で導入する駅停車時分説明モデルが必要となる。

注12) 一路線の停車時分を代表しうるような、駅停車時分の長い特徴的な電停がなかった、ということ。

注13) 車内空間設計目標としては妥当な設定と言える。

注14) 簡単のため、ここでは50%と仮定する。

注15) 通路狭隘抵抗を含む。

注16) 乗車のみ・降車のみで利用するドアではゼロとなる。

注17) ドア幅の広い中ドアのほうが抵抗値は大きく、車体低床化の効果が大きいように読み取れる。これは、ドアステップ単体の通過時間ではなく、乗降客がドア中心部を通る車内進行方向のある地点までの歩行時間を計測したため、ドア幅の広い中ドアの横移動ぶんが計上されたためである。

注18) データの信頼性は、車庫内定置実験と実物大モックアップ実験の双方に参加可能な被験者が2名だったことに制約を受ける。

注19) 利用条件の異なる交通モード間の厳密な比較を意図しない。今回評価した最良のライトレール利用条件ですら通勤車両並みの条件に満たないことが定量的に示唆されることを、運行事業者にもわかりやすく示すための対照である。

注20) 乗降ドアの反対側に消印機を置きドア脇で列を成す運賃処理が行われない状況を想定した。非接触型ICカードによる車内運賃収受でも、乗客全員が非接触型ICカードを利用し乗降いずれか1回だけの自己改札方式が実現できれば、同じ状況とみなせる。

注21) ドア部乗降客列の捌け時間だけの問題なので、部分低床車両によってもこれらの数値を十分実現できる。

注22) 各乗客の運賃種別を含むODデータを必要とする。

注23) 新規路線への導入と車両更新に伴う場合とで議論を丁寧に分ける必要があるため、シナリオ導入に関する費用便益分析は今後の検討課題に残した。

注24) 天候(雨)、季節(日差し)、時間帯、進行向き(都心・郊外)、平休日(学校)の別、トリップ目的(通勤通学・買い物・観光など)、今回取り扱わなかった乗客密度・運賃収受方式など。

注25) 乗降カウンタ、磁気カード、非接触型ICカードなど、事業者ごとに取得可能な乗降客データの質に応じた評価シミュレーション環境の整備も課題である。

参考文献

- 1) 藤井聡[2007], “総合的交通政策としてのモビリティ・マネジメント”, 「運輸政策研究」, 10巻(1号), pp. 2-10.
- 2) 宮崎輝明[1997], “熊本市交通局低床式LRV9700形導入の経緯と車両の概要”, 「鉄道車両と技術」, 26号, pp. 13-20.
- 3) 三浦幹男・服部重敬・宇都宮浄人[2008], “世界のLRT”, JTBパブリッシング.
- 4) 野崎雄一郎・鈴木武海・藤井康正・大熊栄一[2007], “燃料電池電車走る”, 「電気学会誌」, 127巻(7号), pp. 397-400.
- 5) 深山剛・加藤浩徳・城山英明[2007], “なぜ富山市ではLRT導入に成功したのか?”, 「運輸政策研究」, 10巻(1号), pp. 22-37.
- 6) 藤原章正・杉志頼寧[2000], “仮想評価法を用いた低床式路面電車の評価”, 「日本都市計画学術研究論文集」, pp. 577-582.
- 7) T. Hirasawa, S. Matsuoka, Y. Suda [2009], “Comfort and Accessibility Evaluation of Light Rail Vehicles”, *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, Vol.2, No.1, pp.13-22.
- 8) T. Hirasawa, S. Matsuoka, Y. Suda [2009], “Simulation of LRT Travel Time Reduction Scenarios Bases on Passenger Behavior Modeling”, *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, Vol.2, No.1, pp.23-30.
- 9) 須田義大・松岡茂樹・小川雅[1997], “快適性と乗降容易性による通勤車両の座席配置の客観的評価方法”, 「日本機械学会論文集(C編)」, 63巻(611号), pp. 141-148.
- 10) 佐々木正人・三嶋博之[2005], 『生態心理学の構想』, 東京大学出版会.
- 11) 須田義大・西村隆一・平沢隆之[1997], “ライトレール用低床車両の乗降容易性の定量的評価”, 「J-Rail'97講演論文集」, pp. 411-414.
- 12) 須田義大・平沢隆之・松岡茂樹[1998], “低床ライトレール車両の快適性・乗降容易性定量評価実験”, 「生産研究」, Vol.50, No.6, pp. 225-228.
- 13) LRTシステム技術調査専門委員会[2001], “日本におけるライトレールシステム開発の可能性”, 電気学会技術報告, 第821号.

(原稿受付 2008年12月8日)

Quantitative Evaluation Method of Light Rail Services based on In-Vehicle Passenger Behavior Modeling

By Takayuki HIRASAWA, Shigeki MATSUOKA and Yoshihiro SUDA

Quantitative evaluation models of light rail services for average passenger density and travel time are developed through physical modeling of passenger's seat-taking behaviors and boarding and alighting behaviors. The parameters of comfort and accessibility evaluation models have been identified from in-vehicle behavior observation at light rail vehicles in commercial operation and experiments at depot of Kumamoto municipal transport and full-scale mockup at the University of Tokyo. The developed models have enabled smoother comparison of service improvement scenarios of abolishing steps at passenger doorways and door usage methods to enhance passenger's comfort and line operation speed with easily available data by operators.

Key Words : *light rail service, evaluation model, behavior modeling, comfort evaluation, accessibility evaluation*