

都市鉄道輸送改善シミュレータの試案

Basic Study on the Improvement of Urban Railway Transportation System

岩倉成志* 森地 茂** 伊東 誠***

By Seiji IWAKURA Shigeru MORICHI Makoto ITOH

1. はじめに

運輸政策審議会7号答申および13号答申において首都圏の鉄道混雑率を180%以内とする計画目標が示された。この目標値に向けて、新線整備や複々線化、車両投入等の輸送力増強が図られ、混雑緩和の方向へ向かっている。また最近では、運輸省、労働省によって快適通勤推進協議会が設置され、オフピーク時間帯の時差通勤を利用者へ依頼している。このように車両内の混雑緩和については、供給側、需要側の両面から対策が図られている。

一方で、運行本数の増加によって、列車密度が過密化し、運行速度が低下している線区がある¹⁾。この結果、通勤のピーク時において、最も混雑が激しく、かつ最も走行時間がかかるという問題が生じている。その一例として、小田急線の新百合ヶ丘駅-新宿駅間の所要時間を時刻表を用いて描いたものが図1である。オフピーク時には26分程度の所要時間がピーク時には、46分程度かかっており、20km強の駅間にもかかわらず、20分もの差が生じている。

上記の現状から混雑緩和と速度向上とがトレードオフの関係にあると仮定すると、混雑緩和のための輸送力増強は、はたして利用者にとっての効用水準の増加につながるのであろうか。図2は、大都市交通センサスデータから作成された経路選択モデルの効用関数²⁾を用いて、所要時間と混雑率の無差別曲線を描いたものである。所要時間30分で混雑率200%の状態と等価なサービスは、所要時間31分で混雑率155%、所要時間29分で混雑率24

0%となる。モデルの混雑率にかかるパラメータが小さいきらいもあるが、実際に通勤時の急行と緩行の混雑状況の差異に見られるように、利用者の所要時間短縮に対する選好は存外大きいと考えられる。

以上の問題意識の下に、本稿は都市鉄道の輸送改善のための基礎的研究として、輸送力増強と列車運行速度の関係を分析するためのモデル開発を試みたものである。

2. 列車運行挙動の定式化

列車の運行速度低下の主要な要因に、乗降時分と前列車の追従によるダンゴ現象が挙げられる。このような現象を扱った既存研究として、山崎ら³⁾が山手線の自動運転評価シミュレーションシステムを構築している。乗降客数から実停車時分を算出できるようにしているが、論文には定式化の方法は記述されていない。一方、バスの運行挙動については研究事例が数多く見られ⁴⁾、バスの遅延現象については緻密な定式化がなされている。

本稿では、既存文献⁴⁾を参考としつつも、需要データや運行データ等の制約条件を鑑み、より簡略化した定式を作成した。

列車の運行速度低下をダイアグラム上に表現したものが図3である。駅 $i-1$ を列車 $j-1$ と $\Delta t_{i-1,j}$ の間隔で発車した列車 j は、列車 $j-1$ が駅 i で要する乗降時分 $\Delta t_{i,j-1}$ によって間隔がつまり、駅 i における乗降時分 $\Delta t_{i,j}$ によって間隔が離れる。また、列車 j は駅 $i, i-1$ 間で、速度をあげて遅れを取り戻す。この結果、駅 i での発車間隔が $\Delta t_{i,j}$ となることを表現している。この現象は次のように定式化できる。

列車 j が駅 i において必要とする時間 $\Delta t_{i,j}$ は、(積み残しが無いとすれば)列車 j と前列車 $j-1$ との運転間隔の間に到着した利用者が列車に乗り込むのに

キーワード：輸送計画、鉄道計画

*正会員 工博 (財)運輸経済研究センター

(東京都港区虎ノ門3-18-19 TEL03-5470-8405)

**正会員 工博 東京大学工学部土木工学科

***正会員 運輸政策研究所

必要とする時間と、列車 j で降りる人が要する時間によって決まる。1 人当りの乗車必要時分を a 分／人、駅 i における単位時間乗客発生量を λ_i 人／分、1 人当りの降車必要時分を b 分／人、駅 i における列車 j の降車人数を $\omega_{i,j}$ 人とすれば、 $\Delta_{i,j}$ は次式のように表される。

$$\Delta_{i,j} = a\lambda_i\Delta t_{i,j} + b\omega_{i,j} \cdots \cdots (1)$$

駅 i における列車 $j-1$ の乗降に要する時分 $\Delta_{i,j-1}$ は、 $\Delta_{i,j}$ 同様に次式で表される。

$$\Delta_{i,j-1} = a\lambda_i\Delta t_{i,j-1} + b\omega_{i,j-1} \cdots \cdots (2)$$

次に、駅 $i, i-1$ 間において列車 j が列車 $j-1$ に追従する状況を定式化する。列車 j と列車 $j-1$ との運行間隔が本来の運行間隔から広がってくると、本来の運行間隔に戻すために列車 j は、列車 $j-1$ に追いつこうとする。この状況を図 4 にダイアグラム上で示す。

列車 $j-1$ と追従状態になるまでの列車 j の走行速度とを各々 v_{j-1} 、 v_j とすると駅 $i-1$ を出発し、 L km 地点での両列車の到達時刻は、以下のように表せる。

$$t_{L,j-1} = L/v_{j-1} + t_{i-1,j-1} \cdots \cdots (3)$$

$$t_{L,j} = L/v_j + t_{i-1,j} \cdots \cdots (4)$$

よって L km 地点での列車 $j-1$ と列車 j との間隔は、

$$t_{L,j-1} - t_{L,j} = L(v_{j-1} - v_j)/(v_{j-1}v_j) + \Delta t_{i-1,j} \cdots (5)$$

となる。当然、列車 $j-1$ と列車 j とは、閉塞区間以上に接近することは無く、閉塞区間が最接近距離となり、その後は追従走行となり列車 $j-1$ と同じ速度となる。

列車 j の速度 v_j は、列車 $j-1$ に接近するまで、自由速度で走行できると仮定した。自由走行速度関数は、駅間距離 d に変数とする次式を用いる。

$$v_j = -112.99 + 143.08d^{0.1075} \cdots \cdots (6)$$

式 (6) は、オフピーク時の東海道線、横須賀線、小田急線、京王線、日比谷線、東急東横線の時刻表

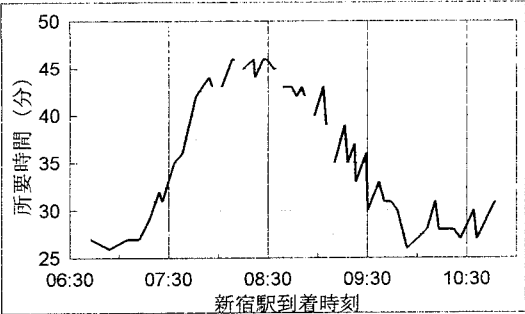


図 1 小田急線新百合ヶ丘駅新宿駅間の所要時分

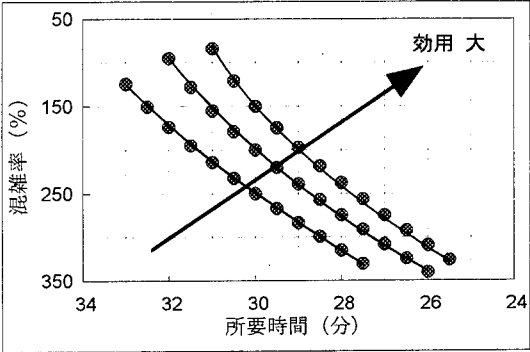


図 2 乗車時間と混雑率の無差別曲線

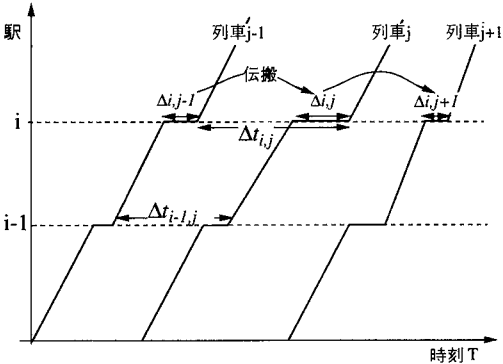


図 3 列車の運行挙動のダイアグラム上での表現

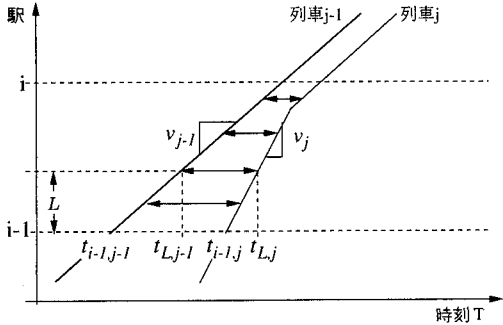


図 4 列車 j の追走状況

から推定した。式(6)は、図5に示すようなカーブを描き、相関係数0.92を得ている。

式(1)、(2)及び式(5)から列車運行挙動は、以下のように定式化される。

$$\Delta t_{i,j} = \Delta t_{i-1,j} + a\lambda_i \Delta t_{i,j} + b\omega_{i,j} - a\lambda_i \Delta t_{i,j-1} - b\omega_{i,j-1} + L_{i-1,j}(v_{j-1} - v_j)/(v_{j-1}v_j) \cdots \cdots (7)$$

以上の定式化において、車内の混雑状況が乗降時分に与える影響は考慮していない。また降車時分については、列車の運行間隔が降車客量に及ぼす影響を考慮していない。前者について若干の分析を試みたが有意な結果が得られなかった。後者については、検討の余地が残されている。

3. モデル構築

ここでは、小田急線新百合ヶ丘駅から新宿駅間を対象としてモデル化した結果を示したい。

(1) 利用したデータ

運行間隔 $\Delta t_{i,j}$ は、時刻表⁵⁾を用いて、新百合ヶ丘駅発 6:16-10:16、新宿着 6:48-10:47 の急行および準急のデータを収集した。

当該線区は、優等列車を優先するダイヤ設定となっているため、各停はピーク時、オフピーク時とも所要時間に差が見られないため除外した。新百合ヶ丘駅・新宿駅間では急行、準急は平行ダイヤとなっているため、特に両列車の種別は行わずにデータ化した。時刻表よりデータ化したため、1分単位の精度しか得られておらず、駅間の短い区間の誤差が大きくなっている。

単位時間乗客発生量 λ_i および列車別降車人数 $\omega_{i,j}$ は、平成2年大都市交通センサスデータを用いて、6:00-11:00にわたる30分刻みの各駅の方向別乗車客数および降車客数を算出した。各停列車の乗降客数は各時間帯の運行本数に応じて除いているが、列車種別に応じた配分比率は設定していない。

駅間距離 d および列車速度 v_{j-1} は、時刻表からデータ化した。列車速度は、駅間距離を列車ことの駅間所要時間で除して表定速度を算出した。

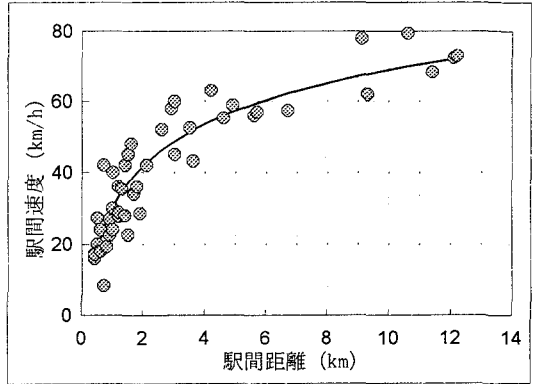


図5 駅間速度と駅間距離の関係

(2) モデル作成結果

モデル構造は式(7)をもとに以下の式形とした。

$$\Delta t_{i,j} = \Delta t_{i-1,j} + a_1\lambda_i \Delta t_{i,j} + b_1\omega_{i,j} - a_2\lambda_i \Delta t_{i,j-1} - b_2\omega_{i,j-1} + cL_{i-1,j}(v_{j-1} - v_j)/(v_{j-1}v_j)$$

式(7)において、未知パラメータは a 及び b であるが、追走の影響の度合を考慮するためにパラメータ c を追加した。パラメータは重回帰分析によって求めることができる。

パラメータの推定結果を表1に、駅間ごとの相関係数を表2に示す。本モデルの式形は駅間ごとに独立であるため、駅間ごとにモデルを作成することができるが、駅間によってはパラメータ符号が不整合な場合もあるため、ここでは、全ての駅の運行間隔をサンプルを対象とした推定結果を提示した。

推定結果からは、乗車時分および追走状況を表すパラメータが有意であり、降車時分のパラメータは有意な結果が得られていない。前節で述べたように降車時分に関する変数の設定を再考する必要があると考える。モデル全体の精度としては、あまり有意な結果が得られていないと言える。本モデルは運行間隔の変動が前駅から次駅に伝播する式形となっているため誤差が伝播し、累積する。今回得られた程度の相関係数では、十分に現況を再現することは困難であった。例えば、図6に見られるように初期に発生した大きな誤差が保存され、全体としての相関が低下してしまう。

なお、シミュレーションを行う際には $\Delta t_{i,j}$ を内生

化しているため、最適化計算を行って、 $\Delta t_{i,j}$ を求めてやる必要がある。

5. おわりに

以上、都市鉄道の輸送改善を評価するための列車運行挙動のモデルの試案を紹介した。現在までのところ精度が低く、精度向上が進める必要がある。またモデル構造の精緻化についても検討を行う必要があると考えている。以下では、モデルの精度向上、構造の精緻化を図るための課題を列举したい。

今回紹介した列車運行挙動式は、平行ダイヤの線区のみを対象したものであり、追い越しが列車の運行速度に影響する状況を表現していない。運行速度の改善に大きく影響を与える閉塞区間の設定や信号制御方式の影響を取り入れていない。また輸送力設定にかかわる線路容量、終端駅の容量等を組み込まれていない。

データについては、時刻表を用いているために運行間隔および列車速度の精度が落ちている。ダイヤグラムを利用すれば、20秒程度の精度でデータ化できる。ただし、ダイヤグラムは実際の運行とは異なっている可能性があり、ダイヤグラムからの遅延を考慮できないため、実測する必要性もあろう。今回、利用した乗降人数のデータは平成2年であり、時刻データ年次とのマッチングがされていない。平成7年度に実施された大都市交通センサスによってデータを更新する必要がある。

モデルについては、式(7)をそのままモデル化しているため、誤差伝播が起きている。パラメータ推定の際に、駅ごとの運行間隔を被説明変数とするのではなく、各駅での運行間隔の変動を累積した値を被説明変数としてモデル化することで、予測精度は向上するものと思われる。

輸送改善評価のためのシミュレーターとしては、利用者側の評価を取り入れる必要がある。経路選択モデルや出発時刻選択モデルによって乗車時間と混雑率とを変数とする効用関数を作成し、列車運行挙動のシミュレーションと併せて効用水準の変動を分析する必要がある。

以上の課題に対応することができれば、運行本数増加や複々線化等の輸送力増強の効果、駅間距離の

表1 パラメータ推定結果

	パラメータ	t値
a1	0.005153	11.5
a2	0.003206	6.8
c	11.16	9.2

表2 各駅間での相関係数

発駅	着駅	相関係数
新百合ガ丘	→ 向ヶ丘遊園	0.72
向ヶ丘遊園	→ 登戸	0.79
登戸	→ 成城学園前	0.83
成城学園前	→ 下北沢	0.85
下北沢	→ 代々木上原	0.94
代々木上原	→ 新宿	0.93

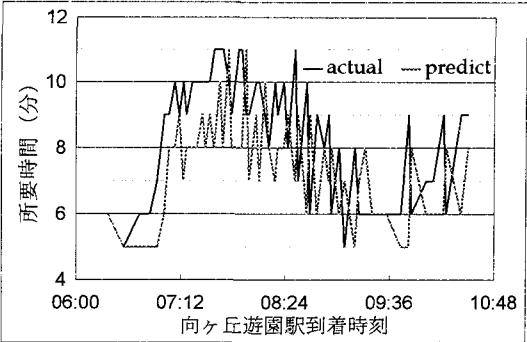


図6 新百合ヶ丘駅向ヶ丘遊園駅間の現況再現結果

設定による影響、オフピーク通勤が進展した際の乗降時分の変動影響など、輸送力改善施策の評価を行うことができる。

参考文献

1) (財)運輸経済研究センター(1996)オフピーク通勤推進のためのマーケティング調査報告書
2) 屋井、岩倉、伊東(1993)鉄道ネットワークの需要と余剰の推定法について、土木計画学研究・論文集 No.11, pp.81-88
3) 山崎、安藤、関(1970)列車運行シミュレーションと通勤電車の時隔制御、第7回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム予稿集、pp.321-329
4) 例えば森地、岩井、鈴木(1975)バス輸送改善のための基礎的考察、土木学会論文報告集、第238号、pp.61-68
5) 小田急電鉄(1996)小田急時刻表'96ダイヤ改正号