

旅客の競争・優先関係を内生化した 通勤列車運行計画評価モデル

家田 仁*・古川 敦**

大都市圏の通勤鉄道改善策として、列車運行計画の適切な設定は有効な手段の一つである。本研究では列車運行計画を時空ネットワーク化し、利用者均衡原理により乗客の流れを表現し、便益を評価するため、特に座席獲得行動を考慮するときに必要となる乗客間の競争・優先関係をモデルに内生化し、これを考慮した列車運行計画評価を可能とした。さらに本研究のモデルを実線区に適用し、その実用性を確認した。

Keywords : commuter train, user equilibrium, priority of seat acquisition

1. はじめに

大都市の交通混雑対策の一環としての通勤鉄道輸送力の増強は、新線建設・線路増設など鋭意進められてきたが、用地取得や財源確保の困難などから必ずしも円滑に進んでいるとはいえない現状にある。これに対し列車の本数、列車種別とその構成比、停車駅設定などによって特徴づけられる列車運行計画を適切に設定して利用者の受ける便益を向上することも、近年、鉄道事業者の通勤列車運行計画改善への関心の高まりとともに長期的大規模投資を補完する中短期的な施策として重要視されるようになってきた。しかし、実際の運行計画策定は多分に経験的技能に依存している現状にあり、特に利用者便益の観点からの列車運行計画の合理的かつ客観的評価のための能率的な方法論の開発が実務面からも要請されている。また同時に、ある列車運行計画、駅施設、あるいは車両設備のもとにおける乗換、列車待ち行列形成等を含めた各列車各駅、各駅間の旅客流動状況を的確に予測することも有限な空間的制約の中での、能率的な設備改良の点から強く望まれている。そこで、本研究では列車運行計画に対応した旅客の流動パターンの予測と運行計画の利用者便益の立場からの客観的な評価を行うための方法論を開発するとともにその実線区への適用を図るものである。

2. 研究の経緯と本研究の位置付け

列車運行計画の客観的な評価法やそれに基づく運行計画の適切な設定方法に関する研究は現状では少ない。主要なものとして文献1)は、運行計画を時空ネットワークとして表現し、利用者均衡配分法を用いて混雑状況下

のリンクフローとリンクコストを推定し、利用者の被る総損失およびその偏在性から資源配分の効率性と公平性を評価する方法を提案したものである。その他の研究としては、優等車両導入という個別施策の評価を仮想的な意識調査から試みたもの²⁾や、運行計画の最適解を直接求めようとする試みもあるが^{3),4)}、いずれも限定された状況におけるアドホックな方法論か、または極度に簡略化された状況でのみ可能な方法であり、現実規模の通勤線区における一般的な問題解決の方法論とはなっていない。

文献1)をさらに進めた研究としては、首都圏、関西圏の通勤線区のリンクコスト関数を実データから推定し、その移転可能性、パラメーターの感度などについて分析し、混雑によるコストの交通量依存性、実用的精度での不効用関数の相互の移転可能性を確認したもの⁵⁾、首都圏、関西圏の15の通勤線区に同一の不効用関数を適用し、所与の輸送需要のもとにもたらされる利用者便益を評価し、各線区の評価結果の特性、現状における運行計画の典型的特性や不効用構成要素の諸特性を把握したもの⁶⁾があげられる。さらに文献7)は、運行計画検討の初期段階で広範多数の代替案を効率的に評価する必要があるという目的意識から、実用的な利用者便益(損失)の簡便評価式を見出すとともに、モデルケース分析により輸送需要パターンと列車運行計画パターンの適合性を解析したものである。

以上のような経緯から、時空ネットワークを用いることによる列車運行計画の評価および旅客流動の推定に関する基本的な枠組みと、運行計画策定および評価の初期レベルにおける実用的な方法が得られ、多数の運行計画案を少数に限定することが可能となった。そこで本研究では、さらに詳細な評価分析を行って運行計画案を選定する際や、駅施設改良設計の際等に要求される、駅ホームでの滞留旅客数を含めた詳細な旅客流動予測や、その

* 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科
(〒113 文京区本郷7-3-1)

** 正会員 工修 (財)鉄道総合技術研究所

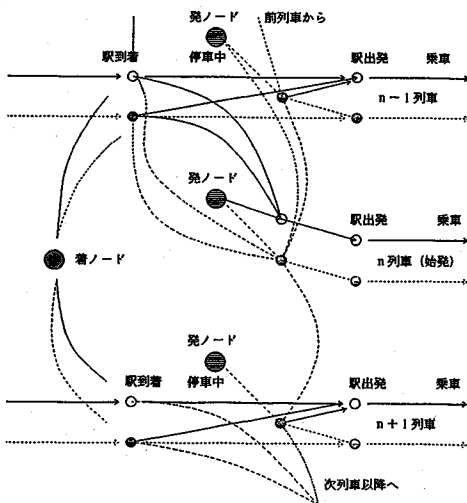


図-1 時空ネットワークの構造

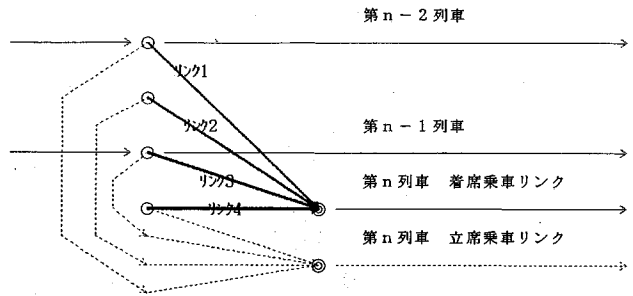


図-2 始発列車への着席乗車に関するリンク、ノード

利用者便益評価の方法を開発する。ここでは、これまで明示的に扱われてこなかった利用者の座席獲得行動という、リンク間の優先関係を伴った競争的行動を内生化した通勤旅客流動予測/評価モデルを構築し、さらに実線区への適用からモデルの推定を行うとともに輸送改善計画の評価への適用を試みる。

3. 旅客の競争・優先関係を内生化した通勤列車運行計画評価モデル

(1) 列車運行計画のネットワーク表現

ある列車運行計画に対して利用者は発駅から着駅まで乗換を含めて無数の経路（たとえば、各駅停車直行、各停+途中から急行乗換、急行+途中始発列車乗換等…）から、乗車時間や待ち時間の大小、乗換の難易、座席獲得の可否、混雑の程度など種々の要因を総合的に判断してそれぞれの経路を決定していると考えられる。この複雑多岐にわたる利用者の行動結果としての旅客流動を表現するため、文献1)では列車運行計画を“時空ネットワーク”として表現し解析する方法を提案した。これは横軸に時間（時間）、縦軸に空間（距離）をもつ列車運行計画を乗車リンク、待ちリンク、乗換リンク等によって構成される平面上のネットワークとして表現し、乗車時間、待ち時間、混雑、乗換等に対応した利用者の被る不効用を各リンクのリンクコストとして対応させ、さらにこのネットワーク上で交通量配分計算を行い利用者の列車選択パターンをネットワークのリンクフロー推定問題としてとらえるものである。この場合、混雑に関する不効用は乗車人数に依存するのでフローディペンデントな問題となる。本研究においてもモデルの基本的な枠組みはこの時空ネットワークを踏襲する。図-1に本研究で用いたネットワークの一部を示す。

文献1)に加えて、本研究では大都市圏における混雑現象の重要性に鑑み、利用者の座席獲得行動をも明示的に内生化して扱うため、同一列車の同一駅間乗車を表すリンクでも座席に着席した場合とそうでない場合を区別して表現する。図-1では実線が着席乗車リンク、破線が立席乗車リンクを表す。

次に、利用者の座席獲得は、座席の定員まで時間的な先着順に座席を獲得していく現象であるが、ここではこの利用者の座席獲得行動をネットワーク上で表現することを考える。最も単純な場合として、ある駅を始発する第 n 列車への利用者の座席獲得行動を表現するためのネットワーク構造について例示する。図-2は、図-1からある駅における始発列車第 n 列車への乗車に関するリンク、ノードを抽出したものである。

この図でリンク1は第 $n-2$ 列車から始発列車の n 列車に乗り換える利用者、リンク2は第 $n-2$ 列車と第 $n-1$ 列車の間に当駅に到着した（つまり当駅発生の）利用者のうち第 n 列車の座席を獲得しようとする利用者、リンク3は第 $n-1$ 列車から第 n 列車に乗り換える利用者、リンク4は第 $n-1$ 列車と第 n 列車の間に当駅に到着した利用者のうち第 n 列車に着席する利用者の流れを表す。座席獲得できない利用者は点線のリンクを経由し立席乗車リンクへと流れることになる。本研究のように座席獲得を明示的に扱う場合には時間的に早く待ち行列に並んだ利用者に座席獲得の優先権を与える必要があるので、上記のネットワーク上で配分計算を行う場合、従来の方法と異なり、リンク1, 2, 3, 4の順に優先的に交通量が配分されるよう工夫する必要がある。また、各列車の座席には定員が定まっているので、リンク1, 2, 3, 4のフローの総和が座席定員を越えないようにするのは当然である。さらに一般的な場合として途中駅での座席獲得行動について述べれば上記の座席定員の替わりに座席定員から当該列車の継続着席乗車フローを差し引いたものとし、さらに最優先リンクを当該列車立席乗車リンクからの座席獲得リンクとすればよい。図-3に途中駅での着席乗車に関するリンク、ノード群を示す。

(2) 旅客流動の配分原理

本研究で対象としている現象は大都市の通勤混雑問題である。この場合利用者行動に対する混雑の影響が著しいため、利用者行動モデルとして、3.(1)で述べたようにリンクフローに依存した混雑不効用を考慮する必要がある。また3.(4)で述べる座席獲得リスクも待ち行列を通じてリンクフローに依存する。このようにリンクコストがリンクフローに依存した関数で表される場合の交通量配分手法として本研究では利用者均衡配分原理を用いる。通勤行動は日々の定常的な行動であり、通勤者は日々の経験から十分な情報を取得し自らにとって列車選択等を含めた最適な通勤経路を選択していることを考えると利用者均衡配分法を用いることは妥当であろう。

(3) 立席・着席を区別した混雑不効用関数

リンクコストを構成する不効用要素としては、ここでは乗車時間不効用、混雑不効用、乗換不効用(乗換1回当たり)、待ち時間不効用、乗換時の待ち時間不効用をとりあげ、単位を乗車時間にとり、各項の重み付け線形和として表す。ここで混雑不効用は乗車時間に比例するものとしている。従来の研究1)~6)では、単位乗車時間当たりの列車乗車中の混雑による不効用は、空車時を基準として着席者、立席者を区別しない全利用者の1人当たり平均混雑不効用関数として、図-4のような単調増加関数として表されてきた。これをべき乗式を用いて表すと、単位乗車時間当たり(平均)混雑不効用は

$$AC(x) = p \cdot (x/Cap)^q \dots\dots\dots (3-1)$$

となる⁵⁾。

ただし、 x :乗車人数(人)、 Cap :列車定員(人)

p, q :パラメーター(無次元)

しかし現実には、利用者の被る限界混雑不効用(乗客が単位量増加したときの混雑不効用の増分)を考えるとこれは図-5のように明らかに座席定員の前後で不連続な関数となる。図-5で c は、着席時を基準とした場合の、1人目の立席乗客の限界不効用を表すものである。こうしたとき立席時の限界混雑不効用は、立席旅客の増加に従って増大する。これをここでは以下のようなべき乗式で表すこととする。

$$MC(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq Caps) \\ a \cdot \{(x - Caps)/Cap\}^b + c & (x > Caps) \end{cases} \dots\dots\dots (3-2-1)$$

$$\dots\dots\dots (3-2-2)$$

$Caps$:座席定員(人)

a, b, c :パラメーター(無次元)

なお限界不効用 MC と平均不効用 AC の間には一般に次に示すような関係がある、

$$x \cdot AC = \int MC \cdot dx \dots\dots\dots (3-3)$$

よって、単位乗車時間当たり混雑不効用を平均混雑不

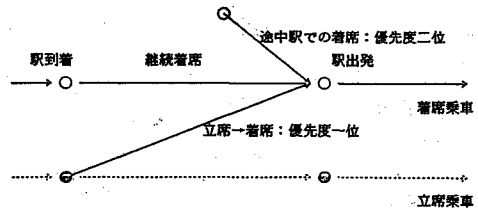


図-3 途中駅での着席乗車に関するリンク、ノード

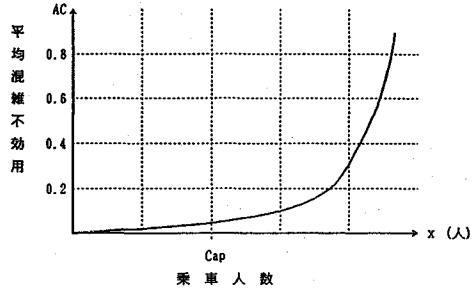


図-4 全利用者についての平均混雑不効用関数

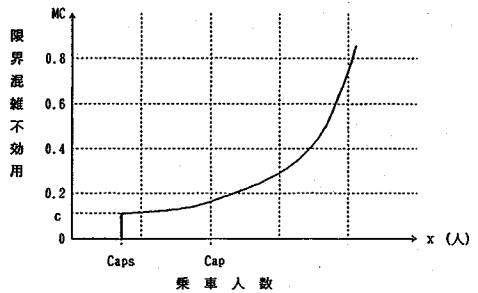


図-5 全利用者についての限界混雑不効用関数

効用として、着席乗車リンクおよび立席乗車リンクのおののについて示すと次のようになる。ただし、 x_{se}, x_{st} はおのののリンクフローである。

着席乗車リンク

$$AC(x_{se}) = 0 \quad (x_{se} \leq Caps) \dots\dots\dots (3-4-1)$$

立席乗車リンク

$$AC(x_{st}) = \frac{a}{b+1} (x_{st}/Cap)^b + c \dots\dots\dots (3-4-2)$$

(4) 優先度を考慮した座席獲得リスク関数の導入

3.(1)で述べたように、座席獲得行動を表現する際には、着席(希望)者の待ち行列中の位置に応じた着席優先度を考慮する必要がある。このため本研究では、座席獲得確率に応じた座席獲得リスクという概念を導入し、上記の着席優先度を表現する。

列車の座席獲得確率は、座席獲得のための待ち行列長の関数で、図-6のような単調減少関数となっている⁸⁾。利用者は座席を獲得するために、この座席獲得確率に対応したリスクを負っていることになる。このリスクは待ち行列の先頭の利用者にとっては0で、利用者の待ち行

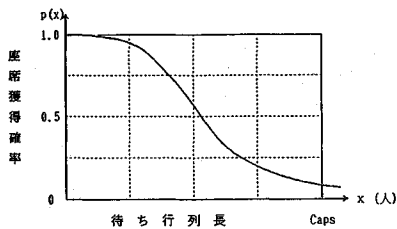


図-6 座席獲得確率関数

列中の位置が後方になるほど増大する。上のことから本研究では x 人目の利用者の座席獲得確率を $p(x)$ としたとき、限界座席獲得リスクを以下のように定義する。

$$MCR(x) = 1/p(x) - 1 \dots\dots\dots (3-5)$$

この限界座席獲得リスクとは、待ち行列の人数が x から単位量増加したとき、その利用者が受ける座席獲得のためのリスクの大きさを表す。

また式 (3-3) より最も優先度の高い座席獲得リンクのリンクフローを x_1 としたとき、このリンクの平均座席獲得リスクは次のようになる。

$$ACR_1(x_1) = \frac{1}{x_1} \int_0^{x_1} MCR(x) dx \dots\dots\dots (3-6)$$

同様に n 番目に優先度の高いリンクのリンクフローを x_n としたとき、このリンクの平均座席獲得リスクは次のようになる。

$$ACR_n(x_n) = \frac{1}{x_n} \int_{X_{n-1}}^{X_{n-1}+x_n} MCR(x) \cdot dx \dots\dots\dots (3-7)$$

ここで、 $X_n = \sum_{i=1}^n x_i$

$p(x)$ には、ステップ関数⁸⁾や一次式⁹⁾を用いた例があるが、本研究では関数の操作性を考慮して次のような曲線を用いる。

$$p(x) = \{(Caps - x) / Caps\}^2 \dots\dots\dots (3-8)$$

式 (3-8) を (3-5) に代入すると第 n 番目優先度のリンクの限界座席獲得リスク関数は以下のようになる。

$$MCR_n(x_n) = \left\{ \frac{Caps}{Caps - X_{n-1} - x_n} \right\}^2 - 1 \dots\dots\dots (3-9)$$

同様に第 n 番目の平均座席獲得リスク関数は式 (3-7) から、

$$ACR_n(x_n) = \frac{Caps^2}{(Caps - X_{n-1} - x_n) \cdot (Caps - X_{n-1})} - 1 \dots\dots\dots (3-10)$$

この ACR を時間のタームで重み付けした関数を図-2 に表した座席獲得リンクのリンクコスト関数として用いる。

次に、上の座席獲得リスクを用いて座席獲得の優先度がどのように表現されるかを説明する。単純な例としてある途中駅始発列車に対して、先着、後着 2 本の列車からの乗換客を考える。おのおのの列車からの乗換人数を

x_1, x_2 , それぞれの待ち時間を t_1, t_2 , とする。限界座席獲得リスク関数を図-7 のように仮定すると式 (3-9) より、おのおのの乗換者に対する限界座席獲得リスクは図-8 (a), (b) のようになる。

乗換の際の待ち時間は先着の乗換の方が長く、両者の平均座席獲得リスクは図-9 (a), (b) となる。本研究では前述のように利用者行動原理を利用者均衡状態と仮定しているが、均衡状態では両者の ACR が一致するように x_1, x_2 が決定される。このようにして、待ち時間の大小を考慮しつつ先着の座席獲得希望者に優先的に座席が与えられることとなる。

4. 旅客流動モデルの解法

本研究で用いるリンクコスト関数のうち、座席獲得リスク関数は式 (3-10) のように、あるリンクのリンクコストが他のリンクのリンクフローの影響を受ける形になっている。これは、実際の利用者行動で考えるとたとえばある列車から途中始発列車へ座席獲得のため乗り換える利用者が被るリスクは、同じ列車からの乗換者数のみならず、他の列車からの乗換者数あるいはその駅発生の利用者数に依存するということである。

このような場合、すなわちリンク a のリンクコスト関数がリンクフローベクトルの関数である場合の均衡配分問題 (相互干渉付き利用者均衡配分問題) の場合、リンク a のリンクコスト関数は一般に以下のように表される。

$$t_a = t_a(x) = t_a(x_1, x_2, \dots, x_a, \dots, x_n) \dots\dots\dots (4-1)$$

相互干渉付き利用者均衡配分問題は、一般の利用者均衡配分問題とは異なり数理的最適化計画問題として定式化することはできない。またリンクコスト関数のヤコビアンが正定でない場合、数学的には解が唯一となる保証がない。本研究で用いる座席獲得リスク関数のヤコビアンは正定ではないので、リンクフローパターンを唯一に定めることはできないが、リンクフローの定義域ならば実際の利用者行動を鑑みて合理的な均衡解を求めることを考える。

相互干渉のある場合の利用者均衡配分のヒューリスティックな解法はいくつか提案されているが¹⁰⁾⁻¹³⁾、本研究ではこのうち対角化法を用いる。対角化法のアルゴリズムは以下のとおりである。

Step. 0

初期解の設定 $i=0$ (i は繰返し回数)

Step. 1

$i=i+1$

リンク a のリンクコスト関数を、 x_a 以外のリンクフローを $i-1$ 回目の値に固定することにより相互干渉のない配分問題として近似する。(対角比) すなわち

$$t_a(x_i) \approx t_a(x_i^{i-1}, x_j^{i-1}, x_a^i, x_n^{i-1}) \dots\dots\dots (4-2)$$

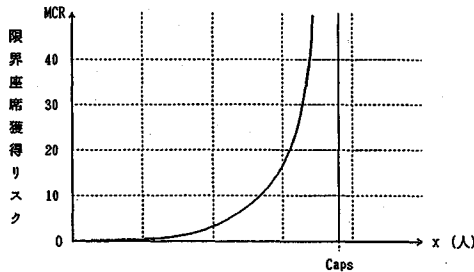


図-7 限界座席獲得リスク関数

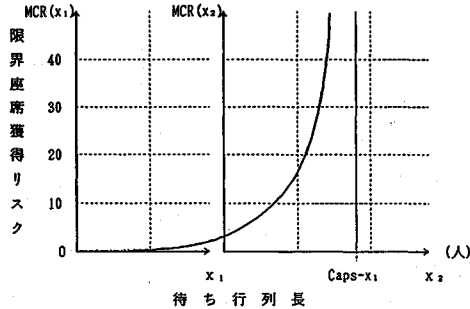


図-8 先着者、後着者の限界座席獲得リスク関数

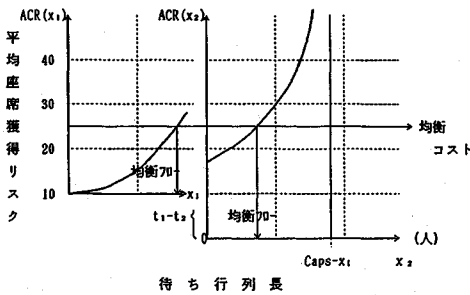


図-9 先着者、後着者の平均座席獲得リスク関数

る場合には立席者はいない。」状態を仮定した初期解である。さらに、均衡配分の収束計算過程で立席者、着席者とも再配分されて均衡状態に収束することとなる。この解法は、現実のラッシュ時の状態が旅客数の少ない状態から次第に混雑してくる結果であることを考えると妥当なものであると考えられる。

5. リンクコスト関数のパラメーター推定

(1) 平均混雑不効用のパラメーター推定

列車運行計画をネットワーク化したときのリンクコスト関数は、道路ネットワークの場合のQV曲線等の所要時間特性とは異なりそれを直接外的に測定することはできない。従来の研究においては、実際のリンクフローの観測値(列車別駅間交通量)と配分計算により得られたリンクフローの推定値との誤差が最小となるように混雑不効用関数のパラメーターを推定した。その結果得られた(平均)混雑不効用関数が図-4のようになったわけである。この図-4は、立席乗車と着席乗車を区別しておらず全利用者についての平均混雑不効用関数である。ところで、立席者と着席者を区別した場合の限界混雑不効用は式(3-2)のようになるわけだが、この限界混雑不効用関数から式(3-3)により全利用者についての平均混雑不効用を求めると以下のようになる。

$$AC(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq Caps) \dots\dots\dots (5-1-1) \\ a \cdot \frac{((x-Caps)/Cap)^b}{x \cdot (b+1)} + \frac{c}{x} & (x > Caps) \dots\dots\dots (5-1-2) \end{cases}$$

(注:式(3-4-1),(3-4-2)は立席者、着席者おののについての平均混雑不効用,式(5-1-1),(5-1-2)は利用者全体についての平均混雑不効用関数である。)

この関数型を図-10(実線)に示す。こうしたとき図-4の関数(図-10中の破線)は、図-10の関数を、着席者と立席者を区別せずに扱うことによって、平均的に近似したものであると考えることができる。そこで、着席者と立席者を区別した限界混雑不効用関数中のパラメーターa, b, cは、式(3-1)と式(5-1-1),(5-1-2)の曲線の乖離度が最小となるように推定した。ここで乖離度は、両曲線の平均不効用差の二乗和とした。式(3-1)の関数パラメーターp, qについては文献5)で求められている5線区の値を用いた。その結果各線区の限界混雑不効用関数のパラメーターは以下ようになった。

| | p | q | a | b | c |
|---------|-------|-----|------|-----|-------|
| 西武池袋線 | 0.007 | 5.8 | 0.33 | 4.6 | 0.015 |
| 東急東横線 | 0.019 | 4.5 | 0.45 | 3.6 | 0.026 |
| 東急田園都市線 | 0.103 | 3.5 | 1.39 | 2.8 | 0.110 |
| 南海本線 | 0.030 | 4.5 | 0.70 | 3.6 | 0.045 |
| 南海高野線 | 0.011 | 5.5 | 0.42 | 4.4 | 0.024 |

Step. 2

次の最適化問題を解く。

$$\min \sum_a \int_a (w_a^i) dw_a^i \dots\dots\dots (4-3)$$

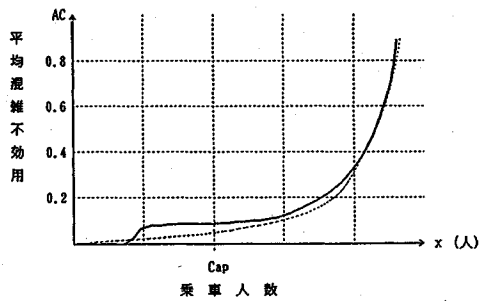
Step. 3

収束判定

$|x_a^i - x_a^{i-1}| < \epsilon$ for $a=1$ to N ならば終了。

さもなければ Step. 1へ戻る。

先に述べたように本研究で扱う問題は数学的には均衡解が唯一に定まらない。そこで、現実の利用者行動に即して次のように初期解を設定する。通常の(相互干渉のない利用者均衡配分)の場合、初期解としてフロー0の場合のリンクコストによる最短経路配分の結果を用いるが、本研究では着席リンクには容量いっぱいまでフローを流し、オーバーフローした交通量を混雑不効用0のもとで立席リンクに最短経路配分した結果を初期解とする。これは着席者と立席者の関係でいえば、「空席があ



図—10 立席者と着席者を区別して求めた平均混雑不効用関数

ただし、 p, q は、式 (3-1) の曲線のパラメーター。各パラメーターはすべて無次元量である。

後の適用計算には、パラメーターとしては上の結果の平均的な値として以下を用いた。

$$a=0.40, b=4.0, c=0.10$$

(2) 座席獲得リスクのパラメーター推定

3.(4) で述べたように、本研究では利用者は座席獲得の際に、その利用者の座席獲得の優先度に応じたリスクを負担していると仮定し、そのリスク関数型を導いた(式 (3-10))。これを実際のネットワーク上のリンクコスト関数として用いるには乗車時間を基準とした座席獲得リスクの重みを表すパラメーターを推定する必要がある(つまりこのパラメーターの次元は sec.)。しかし、これも前節の混雑不効用関数と同様直接測定することは困難である。そこで本研究では、やはり前述の混雑不効用関数と同様、実際の利用者行動の観測値と配分計算の結果求めたリンクフローとの誤差が最小となるようにリスク関数のパラメーターを推定した。実際の利用者行動の観測値としては、途中始発駅における座席獲得のための乗換者数といった、座席獲得に直接かかわる利用者行動のデータを用いるのが望ましいが、JR 東日本の協力により中央線三鷹駅における朝ラッシュ時の上り快速線から三鷹駅始発の緩行線および営団地下鉄東西線直通列車への乗換者数、ならびにこれらの列車の三鷹駅発車時の乗車人数のデータが得られたので(1989年春)、パラメーターの推定にはこれらのデータを用い、また後の適用計算においても中央線の輸送改善案に対する評価を試みた。

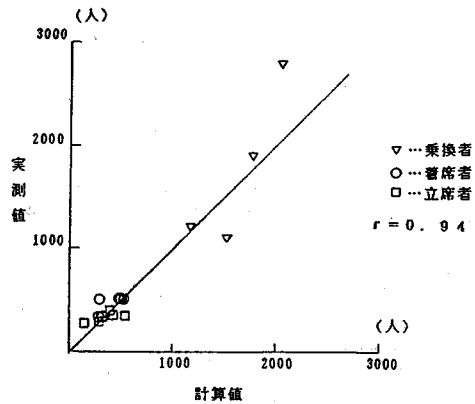
具体的には、以下の最小化問題を解くことによりパラメーターを求めた。

$$\min \sum_a (x_a - \tilde{x}_a)^2 / x_a$$

ただし、 x_a ：リンク a の交通量の観測値

\tilde{x}_a ：リンク a の交通量の利用者均衡配分法による計算値

(上の目的関数には変数であるパラメーターが明示的に含まれていないが、 \tilde{x}_a を計算する際の利用者均衡配分



図—11 フロー計算値と実測値の相関

の目的関数の中に含まれる。)

この結果、座席獲得リスク関数の重みは約 50 (sec.) となった。

このときの、パラメーター推定に用いたリンク群(三鷹駅発車時点での緩行の着席者数、立席者数、および三鷹駅での上り快速→緩行への乗換者数)のフローの実測値と計算値を図—11 に示す。さらに中央線の3断面(高円寺→中野、大久保→新宿、代々木→千駄ヶ谷)における緩行線、快速線の輸送分担率の実測値と計算値を比較した結果、両者が良く一致していることが確認された(たとえば代々木→千駄ヶ谷間では計算値(快速)63%に対して実測値66%となっている)。

これらの結果から考えて、この座席獲得リスク関数の重みを含めたパラメーター群は実際の計算に用いるのにおおむね妥当な値であると考えられる。

6. 実線区における輸送改善計画案評価への適用

(1) 列車運行計画の評価法

上に述べたモデルを用いることにより列車運行計画が与えられたときの利用者の選択行動パターンフローと、これに対応して利用者が費やす所要時間、雑による不効用、その他の不効用を定量的にとらえることができる。

こうした利用者便益という観点からの評価のほかに、事業者の費用(これは運賃を通じて利用者に転嫁される)という点からの評価が考えられる。さらにまた利用者便益についても、評価の視点として利用者全体を考えたときの資源配分の効率性、あるいは利用者間の公平性などが考えられる¹⁾。本研究ではこのうち算出の容易な事業者の費用はひとまずおき、利用者の不効用に着目して、特に利用者全体でみた効率性の観点から列車運行計画を評価する。

(2) 中央線の現状と輸送改善案

本研究で提案した計算手法により、各駅間列車別乗車人数や各駅における乗換人数等が算出され、利用者の行

動を再現または予測することができる。また推定された利用者数すなわちリンクフローとリンクコストの積和を計算することにより、利用者が実際にどの程度の損失を被っているのか時間の単位で定量的に評価することができる。そこで、次に本研究の手法を実際の通勤鉄道路線の輸送改善案評価に適用することにより、その実用性を確認する。適用計算はJR東日本会社の中央線の朝ラッシュ時1時間について行う。中央線は東京から高尾までの53.1kmの路線で途中御茶ノ水～三鷹間は複々線となっており、朝ラッシュ時には中央線快速、総武線直通の緩行電車ならびに営団地下鉄東西線直通列車が運行されている。快速の停車駅は御茶ノ水、四谷、新宿、中野および中野以西各駅である。ただし、御茶ノ水駅を除きいわゆる列車種別々複々線となっており快速電車と緩行電車の乗換は階段の昇り降りを伴う不便なものとなっている。緩行電車は、途中の三鷹および中野を始発駅としており、これらの駅では始発列車に着席するために快速電車から乗り換える利用者も多数みられる。列車は営団直通列車の一部を除きすべて10両編成で定員は約1400名、うち座席定員は約540名である。朝ラッシュ時1時間の運行本数は快速電車27本、緩行電車は三鷹始発11本、中野始発10本、三鷹始発の営団直通12本となっている(昭和63年12月1日改正)。

適用においては、将来の中央線の輸送形態を鑑み、次の8つのケースについて計算を行った。

- 1) 現状再現(昭和63年12月ダイヤ改正時点)
 - 2) 吉祥寺～中野間配線変更(方向別複々線化)
 - 3) 快速停車駅変更(三鷹～中野間で、吉祥寺、荻窪のみ停車)
 - 4) 配線変更かつ停車駅変更
 - 5) 列車本数増発(快速1時間27本→30本、緩行21本→26本)
 - 6) 配線変更かつ停車駅変更かつ本数増発
 - 7) 座席定員2倍(床面積一定)
 - 8) 座席定員半分()
- 2)の配線変更は現在種別々複々線となっている中央線の水道橋～三鷹間のうち中野～吉祥寺間を方向別複々線とすることにより快速と緩行の乗換の便の向上を図ろうとするものである。朝ラッシュ時最混雑区間の快速の混雑率は約250%、一方、緩行のそれは約100%とひどいアンバランスとなっており、これを是正し乗車率を均等化することは混雑緩和策の一つとして有用であるかもしれない。配線変更は快速から緩行への乗換を便利にすることにより上の目的を達成しようとするものである。
- 3)の停車駅変更は快速の停車駅を減らし速達性を向上することにより利用者の便を図るものである。また、7)と8)は、1990年3月よりJR東日本山手線に導入された無座席車両のように、座席数を変化させたときの影

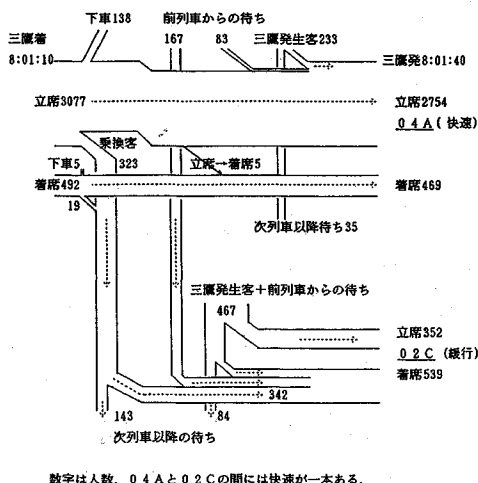


図-12 三鷹駅における旅客流動図

響を評価しようとするものである。

(3) 旅客流動状況および評価の結果

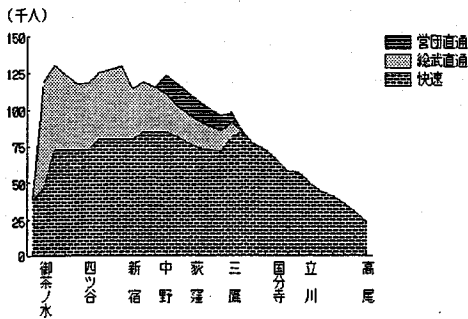
以上の8ケースについてそれぞれの列車運行計画を時空ネットワーク化し、前章で推定したモデルにより配分計算を行った。

まず、図-12に三鷹駅における現状再現結果の旅客流動の一部を示す。快速の04Aから緩行の02Cへの乗換の様子がこの図からわかる。本研究の手法によって利用者の座席獲得行動を含めた詳細な旅客流動をとらえることができる。

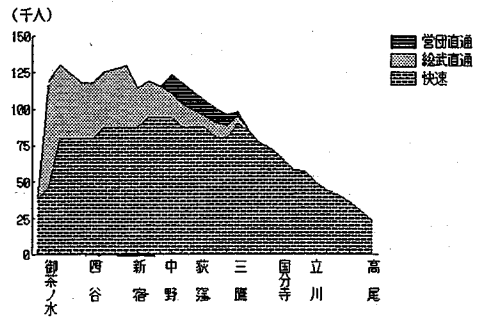
次に、図-13～16にケース1), 2), 3), 5)における列車種別々駅間交通量を示す。また図-17に各ケースにおける総不効用とそのうち乗車時間と混雑不効用の内訳を示す。輸送計画の代替案を定量的に比較評価するためには本図による検討が必要である。さらに、図-17のその他の項目のうち、特に乗換について、各ケースの乗換不効用の総和と一人当たり乗換不効用を図-18に示した。

(4) 考察

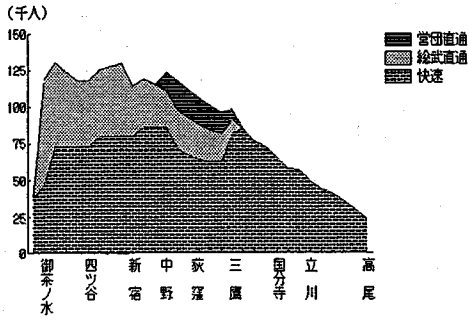
以上の各ケースについて計算結果を考察する。まず2)の配線変更の場合であるが、吉祥寺～中野間では緩行の分担率が1割程度増加するが、逆に緩行利用者の中野での快速への乗換が増えるため中野以東では分担率は現状とほとんど変わらない。吉祥寺～中野間で快速と緩行の乗車率がやや均等化されるため混雑不効用は減少する。また乗換が便利になるため1人当たりの乗換不効用は減少するが、反面乗換旅客数が増えるため乗換不効用の総和は増加する。トータルとして利用者便益は現状に比べ5%程度悪化する。これは、混雑現象というある種の外部効果を伴う利用者の自由な行動結果は必ずしも全体にとっての最適状態とはならないこと、すなわち個々の利



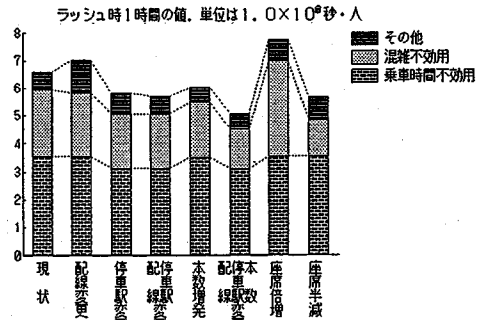
図一13 列車種別々駅間交通量（現状）



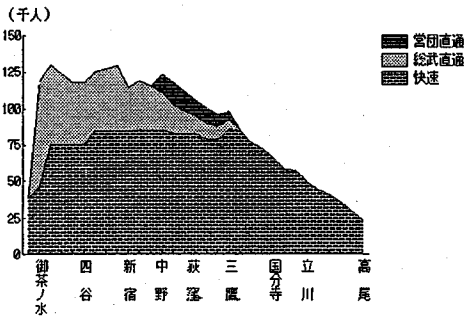
図一16 列車種別々駅間交通量（すべて変更）



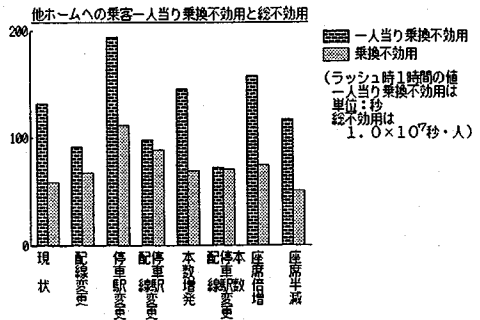
図一14 列車種別々駅間交通量（配線変更）



図一17 各ケースにおける不効用の内訳



図一15 列車種別々駅間交通量（停車駅変更）



図一18 各ケースの乗換不効用

用者便益の向上のみに着目した施策は必ずしも全体の便益向上にはつながらないことを示している。

次に停車駅変更の場合であるが、速達性向上のため乗車時間が減少し、これに伴って混雑不効用も減少する。快速の利便性が増すため快速の分担率は現状より2~7%増加する。しかし、快速の通過駅の利用者については緩行←→快速の乗換の機会が増えるため、乗換不効用は増加する。トータルとして利用者便益は現状より5%ほど改善される。これは、快速と緩行がそれぞれの役割を適切に果たしているケースであろう。配線変更と停車駅変更を同時に行った場合は、乗換の利便性向上により、総不効用は停車駅変更のみの場合と比較して1%程度改善される。この場合快速の速達性が向上するため配線変更のみの場合と比較して、混雑回避（座席獲得も含む）

のために快速から緩行に乗り換える利用者はあまり多くなく、乗換不効用の増分も、その分少なくなっている。また現状と比較すると総不効用で約6%の低減となっている。以上のことより、輸送力一定の場合、快速の停車駅を減らすのが輸送改善策として有効であり、さらに合わせて配線変更を行うのが効果的であると考えられる。ただし、停車駅を変更する場合も本研究の停車駅パターンが最適とは限らず、いくつかの代替案を比較検討する必要があるのは当然である。

次に、列車本数を増加する場合は、11%程度の輸送力増強に対し、総不効用は3%ほどの減少となる。また快速の輸送力が増加する分、その分担率も増加する。総不効用も現行と比較して減少する。配線変更、停車駅変

更、本数増加のすべてを行った場合、快速の分担率は7~10%ほど増加している。

最後に7)と8)の座席定数の変更の場合であるが、座席数が相対的に増加した場合は立席床面積が減少するため混雑不効用が大幅に増加し、逆に座席数が減少した場合は混雑不効用が減少する。総不効用でみても中央線程度の輸送量/輸送力の場合、座席数を低下させて立席の混雑不効用を低減させるのが効果的であるのがわかる。輸送力を増強した場合には、当然相対的に座席の比率を向上させるのが有利となろう(この点に関する詳細な検討は文献14)を参考にされたい)。また、上記のような現実の輸送改善計画評価に対しては時間価値を想定して、現行からの改善便益を貨幣タームに変更し、いわゆる費用便益分析へと結びつけることも可能となろう。

7. 結論および今後の課題

本研究から得られた結論は以下のとおりである。

(1) 乗車時間、混雑、座席獲得等の列車選択要因を考慮した利用者の行動を時空ネットワーク上の相互干渉付き利用者均衡配分モデルとして表現し、詳細な旅客流動の予測や、列車運行計画の利用者便益評価を行うことが可能であることを明らかにした。そこでは従来の研究で明示的に区別されていなかった、着席と立席の混雑不効用関数を区別して扱い、また座席獲得リスクの概念を導入し、先着の利用者に対する座席獲得の優先性を表現した。

(2) 限られた観測データと線区ではあるが、モデルを適用した結果、パラメーターの概略値を得、モデルの再現性を確認した。

(3) 上記のモデルを現実規模の輸送改善計画に適用し、各種代替案評価を行った。またそれらの代替案の諸特性を明らかにした。

また、今後の課題として以下のことが挙げられる。

(1) 本研究で適用計算を行った中央線のネットワークでは、リンク数約14,000、ノード数約6,000の膨大なものとなるが、効率的なアルゴリズムの開発を行うことが有効である。

(2) 実際の運行計画評価に際しては、文献7)に挙げた多数代替案を対象とする概略的実用評価法と本研究で提案した詳細モデルとを有機的に結合した段階的評価システムを開発することが実用上有用であろう。

(3) 本研究ではデータの制約からリンクコスト関数のパラメーター推定は概略的にしかできなかったが、詳細な調査データを用いることにより、より信頼性の高いモデルとすることが可能であろう。

8. あとがき

本研究の実施にあたっては、中央線に関する調査や、実際の輸送改善評価に対応した列車運行計画の策定や実務上のアドバイスなどJR東日本の方々に大変お世話になった。また野村総研の赤松隆氏にはモデルの解法の検討などに対しご協力をいただいた。あわせて謝意を表したい。

参考文献

- 1) 家田・赤松・高木・畠中：利用者均衡配分法による通勤列車運行計画の利用者便益評価，土木計画学研究・論文集，No.6，pp.177~184，1988年11月。
- 2) 肥田野・篠原：鉄道サービスの質の評価に基づいた都市間通勤輸送におけるハイグレードカーの導入可能性に関する研究，土木学会論文集，No.413/IV-12，pp.57~66，1990年1月。
- 3) 森津：最適交通網構成手法に関する研究，京都大学博士論文，1984年2月。
- 4) 赤松・古川・家田：利用者便益からみた列車ダイヤ最適化に関する基礎的研究，土木計画学研究・講演集，No.11，pp.243~250，1988年11月。
- 5) 志田・古川・赤松・家田：通勤鉄道利用者の不効用関数パラメータの移転性に関する研究，土木計画学研究・講演集，No.12，pp.519~525，1989年12月。
- 6) 古川・高木・家田：列車ダイヤパターンと利用者便益との関連性に関する分析，土木計画学研究・論文集，No.7，pp.131~138，1989年12月。
- 7) 家田・志田・永井：モデルケース分析による通勤列車運行計画の利用者便益特性の分析とその実用評価法，土木学会研究・論文集，No.8，pp.217~224，1990年11月。
- 8) 家田・松本：列車選択行動における着席効用の定量的評価，土木学会論文集，No.365/IV-4，pp.69~78，1986年1月。
- 9) 玉石・家田・神宮：長距離都市間鉄道旅客における着席効用の評価，土木計画学研究・講演集，No.11，pp.79~86，1988年11月。
- 10) Sheffi, Y. : Urban Transportation Networks, Prentice-Hall, pp.214~229, 1985.
- 11) Florian, M. and Spiess, H. : The Convergence of Diagonalization Algorithms for Asymmetric Network Equilibrium Problems, Transportation Research B, Vol.16B, No.6, pp.477~483, 1982.
- 12) Fisk, C. and Nguyen, S. : Solution Algorithms for Network Equilibrium Model with Asymmetric User Costs, Transportation Science, Vol.16, No.3, pp.361~380, 1982.
- 13) Fukushima, M. : A Modified Frank-Wolfe Algorithm for Solving the Traffic Assignment Problem, Transportation Research B, Vol.18B, No.3, pp.169~177, 1984.
- 14) 家田・古川・永井：利用者総便益から見た通勤列車車両における座席定員の最適化，土木学会第45回年次学術講演会，1990年10月。

(1991.1.21 受付)

AN EVALUATION MODEL OF COMMUTER-TRAIN SCHEDULE CONSIDERING PASSENGER'S COMPETITIVE AND PREFERENTIAL BEHAVIOUR

Hitoshi IEDA and Atsushi FURUKAWA

Train scheduling is nowadays regarded as one of the most effective ways to improve user's benefit on commuter railways with heavy congestion in highly populated metropolitan region. In this study, train scheduling plan is expressed as time-space network, and user equilibrium theory is adapted to simulate passenger flow and to evaluate user's benefit. In this model, passenger's competitive behaviour including their preferential order is considered explicitly, which has very important roll when factors of passenger's seat acquisition cannot be neglected. To solve this model numerically, the asymmetrizing method is adopted. For a case study the actual commuter line in Tokyo metropolitan district is selected and several possible alternatives which may improve user's benefit are evaluated quantitatively.
