

高速軌道系交通システム導入における交通需要変動リスクに関する研究*

A study on metrization of traffic demand fluctuation risk of high-speed railway system*

内田賢悦**・本波和也***・杉木直****・加賀屋誠一*****

By Ken'etsu UCHIDA**・Kazuya MOTONAMI***・Nao SUGIKI****・Seiichi KAGAYA*****

1. はじめに

航空と競合関係になるような高速軌道系交通システムを検討する場合、その便益あるいは採算を推計するために、需要予測を行う必要がある。交通需要予測は、将来人口といった、将来の社会指標を用いて行われることになるが、通常、こうした指標もまた予測値となるため、推計誤差が含まれていると考えるのが自然である。したがって、それらから予測される交通需要にも誤差が含まれることになるが、需要予測において、こうした影響まで考慮されることはあまりない。その代わりに、簡便的な社会指標に関する感度分析を行う場合があるが、こうした検討も行われない場合も多い。一方、航空と競合することを考えた場合、軌道系交通システムの交通需要は、そのサービスレベルだけではなく、航空のサービスレベルの影響も受けることになる。したがって、航空運賃を現在の値に固定した上で、道系交通システムの需要予測を行う場合、価格競争の影響を無視することになるため、過大評価される可能性が残る。本研究では、北海道新幹線を例にとり、その交通需要推計を行うが、ここでは、需要変動リスクを定量化すると共に、航空との価格競争の影響も考慮する。

2. 需要推計モデルの定式化

(1) 基本交通需要推計モデル

起点終点 (OD) ペア od 間の交通需要 q_{od} は、式(1)で与える。

$$q_{od} = \beta_0 \cdot \frac{(n_{od}^{\max})^{\beta_2} \cdot (n_{od}^{\min})^{\beta_3}}{(c_{od})^{\beta_1}} \quad \forall od \in \Pi. \quad (1)$$

ここで、 n_{od}^{\max} 、 n_{od}^{\min} は、それぞれ OD の人口の内大きい方と小さい方であり、また c_{od} は od 間の一般化費用であり、2.(3)で定式化する。 Π は OD ペアの集合であり、 $\beta_0 \sim \beta_3$ はパラメータである。

(2) 経済成長の影響

経済成長は、交通需要に影響を与えると考えられるため、ここでは、その影響を定式化する。ある年 t の総公共交通利用者数は、式(2)で与えられると仮定する。

$$q(t) = a \cdot b^{g(t)}. \quad (2)$$

ここで $g(t)$ は、 t 年の GDP であり、 a, b はパラメータである。 t_B を基準年とし、予測対象年を t_T と表わすことにする。このとき、基準年から予測対象年までの公共交通利用者数増加率は、式(3)で与えられる。

$$r(t_T; t_B) = \frac{q(t_T)}{q(t_B)}. \quad (3)$$

ここで、式(1)より推計される基本交通需要は、経済成長が 0 である場合の交通需要と考えることにする。そこで、経済成長を考慮した予測対象年 t_T の交通需要を式(4)で与えることにする。

$$q_{od}(t_T) = r(t_T; t_B) \cdot q_{od} \quad \forall od \in \Pi. \quad (4)$$

(3) 交通機関選択モデル

本研究で扱う交通機関は、軌道系交通と航空であるため、本研究では、2 項ロジットモデルを適用して交通機関選択行動を表現する。OD ペア od 間の旅行者が交通機関 $m \in \{t, p\}$ を利用するときの効用 v_{od}^m を式(5)で表わすことにする。

$$v_{od}^m = \alpha_1 \cdot t_{od}^m + \alpha_2 \cdot f_{od}^m + \alpha^m \quad \forall od \in \Pi, \forall m \in \{t, p\}. \quad (5)$$

ここで t, p は、それぞれ軌道系交通、航空を表わしている。 t_{od}^m, f_{od}^m は、それぞれ移動時間、運賃、また $\alpha_1, \alpha_2, \alpha^m$ はパラメータを表わしている。このとき、OD ペア od において、交通機関 $m \in \{t, p\}$ を選択する確率は、旅行者は自己の期待効用を最大化すると仮定すると、式(6)で与えられる。

$$p_{od}^m = \frac{\exp(v_{od}^m)}{\exp(v_{od}^t) + \exp(v_{od}^p)} \quad \forall od \in \Pi, \forall m \in \{t, p\}. \quad (6)$$

その結果、予測対象年 t_T に、OD ペア od において、交通機関 $m \in \{t, p\}$ を利用する旅行者数は、式(7)で与えられる。

$$q_{od}^m = p_{od}^m \cdot q_{od}(t_T) \quad \forall od \in \Pi, \forall m \in \{t, p\}. \quad (7)$$

*キーワード 交通需要予測、推計誤差、価格競争

**正会員 博(工) 北海道大学大学院工学研究科

(札幌市北区北13条西8丁目, Tel 011-706-6211, Fax 011-706-6211)

***正会員 修(工) JR 東日本

****正会員 修(工) 株式会社

*****フェロー 学博 北海道大学大学院工学研究科

(札幌市北区北13条西8丁目, Tel 011-706-6210, Fax 011-706-6211)

以上の定式化を踏まえ、2.(1)に示した一般化費用は、期待最小費用として、式(8)で与えることにする。

$$c_{od} = \left(\ln \sum_{m \in \{t, p\}} \exp(v_{od}^m) \right) / \alpha_2 \quad \forall od \in \Pi. \quad (8)$$

3. 需要変動リスクの計量化

(1) リスクファクター

本研究では、交通需要予測値のばらつきを需要変動リスクと捉える。また、ばらつきの指標としては、分散または標準偏差を想定する。こうした交通需要のばらつきに影響を与えるリスクファクターとしては、人口および経済成長を仮定する。すなわち、第2章では、これらの指標を確定的な値と想定した定式化を行ったが、以下では、これらの指標が正規分布として表現される場合を想定し、需要変動リスクを計量化する。

(2) 軌道系交通システムの需要変動リスク

ODペア2地域の人口および予測対象年 t_T のGDPから構成されるベクトル $\mathbf{F} = (N_{od}^{\max} \quad N_{od}^{\min} \quad G(t_T))'$ を考える。ここで、ベクトルに付された上付きの記号「 \cdot 」は、転置操作を意味する。ここでは、それぞれの指標が大文字で表記されているが、これは、各指標が確率変数として表わされていることを示している。すなわち、大文字で表記される場合は確率変数、小文字で表記される場合はその平均を表わすものとする。この表記法は、以下の議論においても適用される。 \mathbf{F} は式(9)に示す多変量正規分布となり、式(10)に示す平均ベクトル、式(11)に示す分散共分散行列によって特徴付けられる。

$$\mathbf{F} \sim MVN(\mathbf{f}, \Sigma), \quad (9)$$

$$\mathbf{f} = (n_{od}^{\max} \quad n_{od}^{\min} \quad g(t_T))', \quad (10)$$

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{N_{od}^{\max}}^2 & \sigma_{N_{od}^{\max}, N_{od}^{\min}} & \sigma_{N_{od}^{\max}, G} \\ \sigma_{N_{od}^{\max}, N_{od}^{\min}} & \sigma_{N_{od}^{\min}}^2 & \sigma_{N_{od}^{\min}, G} \\ \sigma_{N_{od}^{\max}, G} & \sigma_{N_{od}^{\min}, G} & \sigma_G^2 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

ODペア od 間において、軌道系交通の確率的交通需要 Q_{od}^t の変動は、分散を指標とした場合、式(12)で与えられる。

$$\text{var}(Q_{od}^t) = \delta' \Sigma \delta, \quad (12)$$

$$\text{where } \delta = \begin{pmatrix} \frac{\partial Q_{od}^t}{\partial n_{od}^{\max}} & \frac{\partial Q_{od}^t}{\partial n_{od}^{\min}} & \frac{\partial Q_{od}^t}{\partial g(t_T)} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

式(13)に示したベクトルの最初と最後の要素は、それぞれ式(14)、(15)で表わされる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{od}^t}{\partial n_{od}^{\max}} &= \frac{\partial (p_{od}^m \cdot r(t_T; t_B) \cdot q_{od})}{\partial n_{od}^{\max}} \\ &= \frac{\partial p_{od}^m}{\partial n_{od}^{\max}} \cdot r(t_T; t_B) \cdot q_{od} + p_{od}^m \cdot \frac{\partial r(t_T; t_B)}{\partial n_{od}^{\max}} \cdot q_{od} \\ &\quad + p_{od}^m \cdot r(t_T; t_B) \cdot \frac{\partial q_{od}}{\partial n_{od}^{\max}}, \end{aligned} \quad (14.a)$$

$$\text{where } \frac{\partial p_{od}^m}{\partial n_{od}^{\max}} = \frac{\partial r(t_T; t_B)}{\partial n_{od}^{\max}} = 0, \quad (14.b)$$

$$\frac{\partial q_{od}}{\partial n_{od}^{\max}} = \frac{\beta_0 \cdot \beta_2 \cdot (n_{od}^{\max})^{\beta_2 - 1} \cdot (n_{od}^{\min})^{\beta_3}}{\left(\frac{\ln(\exp(v_{od}^t) + \exp(v_{od}^p))}{\alpha_2} \right)^{\beta_1}}. \quad (14.c)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{od}^t}{\partial g(t_T)} &= \frac{\partial (p_{od}^m \cdot r(t_T; t_B) \cdot q_{od})}{\partial g(t_T)} \\ &= \frac{\partial p_{od}^m}{\partial g(t_T)} \cdot r(t_T; t_B) \cdot q_{od} + p_{od}^m \cdot \frac{\partial r(t_T; t_B)}{\partial g(t_T)} \cdot q_{od} \\ &\quad + p_{od}^m \cdot r(t_T; t_B) \cdot \frac{\partial q_{od}}{\partial g(t_T)}, \end{aligned} \quad (15.a)$$

$$\text{where } \frac{\partial p_{od}^m}{\partial g(t_T)} = \frac{\partial q_{od}}{\partial g(t_T)} = 0, \quad (15.b)$$

$$\frac{\partial r(t_T; t_B)}{\partial g(t_T)} = \frac{g(t_T) \cdot b^{g(t_T) - 1}}{b^{g(t_B)}} = g(t_T) \cdot b^{g(t_T) - g(t_B) - 1}. \quad (15.c)$$

また、式(14)に示した方法により、式(13)に示したベクトルの2番目の要素も同様に計算することができる。

4. 価格競争の定式化

競合する軌道系交通システムが開業した場合、航空会社は旅客数を確保するため、運賃の値下げを行う可能性がある。こうした可能性を踏まえた場合、これを無視して推計される交通需要あるいはその変動リスクには、大きなバイアスがかかることが考えられる。そこで本章では、航空と軌道系の運賃競争(TCP)を定式化する。はじめに、分析を簡単にするため、各ODペア間に2つの交通機関の運営会社があると仮定する。さらに、航空会社と軌道系交通システムを運営する会社は、それぞれの純収益を最大化するように運賃を変化させることを仮定する。これに対して旅行者は、交通の一般化費用を考慮して交通行動をとるか否かを決定し、交通行動をとる場合は、第2章で示したように、自己の期待効用を最大化するように交通機関選択を行うものとする。こうした関係を考えて、交通機関運営会社は、運賃を高く設定することが最適とはならない。なぜなら、運賃を高く設定した場合、その機関選択率が下がらただけではなく、ODペア間の旅行者数も同時に減少するからである。

OD ペア od 間において、交通機関 $m \in \{t, p\}$ の運営会社は、もう一方の交通機関 $m' \neq m$ の運営会社はその運賃を $f_{od}^{m' \neq m}$ と設定した場合、式(16)に示す最適化問題を解くことによって、純収益を最大化する運賃を決定することができる。

$$\max z_m (f_{od}^m; f_{od}^{m' \neq m}) = (f_{od}^m - e_{od}^m) \cdot q_{od}^m \quad \forall od \in \Pi, \forall m \in \{t, p\}, \quad (16)$$

w.r.t. $f_{od}^m > 0$. ここで e_{od}^m は、旅行者 1 人当たりの運営コストである。本研究では、運賃を変更することによって、旅行者数は変動するが、交通機関の便数を増減させるほどの変化はないと仮定し、総運営コストは一定と考えることにする。総運営コストを $o_{od}^m \quad \forall od \in \Pi, \forall m \in \{t, p\}$ とすると、 e_{od}^m は、式(17)で与えることができる。

$$e_{od}^m = \frac{o_{od}^m}{q_{od}^m} \quad \forall od \in \Pi, \forall m \in \{t, p\}. \quad (17)$$

いま、他の交通機関 $m' \neq m$ の運営会社はその運賃を $f_{od}^{m' \neq m}$ と設定した場合、交通機関 $m \in \{t, p\}$ の運営会社の最適運賃を $\varphi(m; f_{od}^{m' \neq m})$ と表わすことにしよう。このとき、交通機関 $m \in \{t, p\}$ の均衡運賃 $f_{od}^{m*} \quad \forall od \in \Pi, \forall m \in \{t, p\}$ は、式(18)に示す不動点問題の解として与えられる。

$$f_{od}^{m*} = \varphi(m; \varphi(m' \neq m; f_{od}^{m*})) \quad \forall od \in \Pi, \forall m \in \{t, p\}. \quad (18)$$

ここで均衡運賃とは、ある交通機関の運営会社は、その運賃を変更することによって、純収益を増やせない状態にある運賃であり、式(18)は、2つの交通機関の運営会社が同時にそうした状況にある場合を示している。

5. モデルパラメータの推計

(1) 推計法

式(1)および式(6)に示した推計モデルでは、変数変換を施すことにより、重回帰分析を適用して関係パラメータを推計することは可能であるが、交通量と交通機関選択の一連の交通行動を考えた場合、整合的な推定量とはなっていない可能性がある。そのため、交通量推計と交通機関選択確率推計を表現した問題の中でパラメータの同時推計を行なうことにする。すなわち、OD ペア od 間の交通量および新幹線利用者数それぞれの観測値および推計値を $\hat{q}_{od}(t_T), q_{od}(t_T)$ および \hat{q}_{od}^t, q_{od}^t として、式(1)および式(6)のパラメータ値の同時推計問題を式(19)-(22)に示す最適化問題として定式化した。

$$\min z = \sum_{od \in \Pi} \frac{(\hat{q}_{od}(t_T) - q_{od}(t_T))^2}{q} + \frac{(\hat{q}_{od}^t - q_{od}^t)^2}{q^t}, \quad (19)$$

w.r.t. $\alpha_0 \sim \alpha_2, \beta_0 \sim \beta_3$, where

$$q = \sum_{od \in \Pi} q_{od}(t_T) / |\Pi|, \quad (20)$$

$$q^t = \sum_{od \in \Pi} q_{od}^t(t_T) / |\Pi|, \quad (21)$$

$$\alpha_0 = \alpha^t - \alpha^p. \quad (22)$$

Π: OD ペア数。

ここで、式(19)で表される目的関数の右辺第 1 項および第 2 項の分母にある項は、それぞれ全 OD ペアの交通量および軌道系交通量の平均値であり、交通量および新幹線交通量に関するばらつきの違いを補正するために導入している。式(19)に示した最適化問題は、単純な最小二乗法とはなっていない点に注意が必要である。したがって、パラメータ値の t 値等、統計的な有意性検討が困難であるが、本研究では、パラメータ値から得られる時間価値から妥当性を判断することにした。一方、経済成長モデルに関しては、式(23)に示すように式(2)の両辺に対数変換を施し、重回帰分析を適用して関係パラメータの推計を行なうことにする。

$$\ln q(t) = \ln a + \ln b \cdot g(t) = c + d \cdot g(t) \quad (23)$$

where $c = \ln a, d = \ln b$.

上述の交通量モデルと経済成長モデルは独立的に扱っても問題が少ないため、通常適用される重回帰分析により、パラメータ推計を行なっても問題はないと考えられる。

(2) パラメータ推定結果

パラメータ推定の対象区間は、道内 4 地域（道北、道東、道央、道南）一都府県間、各既設新幹線（東北、上越、東海道・山陽）の沿線都府県間とし、鉄道シェアが 0 または 1 以外となり、さらに、青森県および道内 4 地域区分に関係する交通量データを用いてパラメータ推定を行なった。すなわち、軌道系交通、航空の両方が利用可能であり、さらにそれらが競合関係にある区間のデータを用いている。その結果、パラメータ推計におけるデータ数は 78 となった。各モデルのパラメータ推定に用いたデータは表-1 に示す通りである。パラメータ推定結果を表-2 に示す。交通量推計モデルにおいては、交通量の実績値と推計値の相関係数は 0.95 となった。交通機関選択モデルにおいては、軌道系交通量の実績値と推計値の相関係数が 0.98 となった。以上から、総交通量および鉄道交通量ともに高い精度で現況再現ができていることが分かる。さらに、機関選択モデルのパラメータ (α_1, α_2) より、時間価値は式(24)のように求められ、この結果からも、概ね良好な推計が行なわれたものと推察される。

$$\tau = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = 40.0 \text{ (yen/min)}. \quad (24)$$

一方、経済成長モデルに関しては、決定係数、各パラメータの t 値ともに高く、符号条件も問題なく、統計的に有意な

モデルが得られた。

表-1. パラメータ推計用データ

データ	データ出典・内容
交通機関別交通量	国土交通省「全国幹線旅客流動調査」(2005年): 都道府県間旅客流動量(鉄道・航空)
所要時間・費用	ヤフー(株)「Yahoo!路線情報の経路検索サービス」: 相互県庁所在地間時間距離および費用(鉄道(新幹線利用), 航空)
人口	総務省「国勢調査」: 都道府県別人口(2005年)
全国公共交通機関交通量	運輸経済研究センター「全国旅客地域流動調査」(1975年~2004年)
GDP	内閣府経済社会総合研究所「県民経済計算年報」(1975年~2004年)

表-2. モデルパラメータ推定結果

・機関選択・交通量推計モデル: N=78

パラメータ名	パラメータ値
α_0 : 定数項	1.36
α_1 : 所要時間差	-9.00×10^{-4}
α_2 : 運賃差	-3.61×10^{-2}
β_0 : 定数項	2.34
β_1 : 一般化費用	2.57
β_2 : 人口(大)	1.46
β_3 : 人口(小)	1.61

・経済成長モデル: $R^2=0.91$ N=30

パラメータ名	パラメータ値	t 値
c : 定数項	16.5	726.0
d : GDP	8.96×10^{-7}	16.7

6. 結果

ここでは、北海道新幹線が開業した場合を想定し、ODペアとして札幌-東京間を対象に得られた分析結果を示す。現在の札幌-東京間における航空の選択率は、ほぼ100%となっている。分析では、札幌-東京間を軌道系交通で移動する場合、すべての旅行者は北海道新幹線を利用するものと仮定した。基準年は2005年、予測対象年は2020年とした。北海道新幹線の移動時間は、東北新幹線のものを参考に設定し、航空の移動時間は、現在のものと変わらないと仮定した。一方、運賃に関しては、現在の公共交通のそれを参考に、北海道新幹線、航空それぞれについて、21,000円、26,000円と仮定した。運営コストに関しては、北海道新幹線、航空それぞれについて、14,000円、16,000円と仮定した。前者は、営業係数を0.7とし、後者は、収益率を17.4(円/mile/人)と仮定して得られたものである。また、予測対象年におけるGDPの成長率は、基準年のものと同一であると仮定した。需要変動リスクに関しては、各リスクファクターが5(%)に相当する標準偏差を持つものとしたが、デー

タの制約から、リスクファクター間の相関はないものと仮定した。

表-3は、TCPなしとありの場合の分析結果を示している。TCPを考慮した場合、考慮しない場合と比較して軌道系交通のシェアが16(%)低下し、さらに、需要変動リスクが減少することがわかる。図-1は、正規分布に従うと仮定した場合の北海道新幹線の純収益を示しており、TCPなし、ありの場合、それぞれについて $N(155,69^2)$ 、 $N(26,53^2)$ (単位: 億円/年)の正規分布となっている。図-2は、交通整備による消費者余剰の増分を示しており(式(25))、北海道新幹線整備を例に式(4)、(8)を用いてこれを推計した結果、価格競争なしの場合では470(億円/年)、ありの場合では660(億円/年)となった。図-2では、上付きの $w.o.$ 、 $w.$ はそれぞれ、整備なし、ありを示している。

表-3. 分析結果

	TCPなし		TCPあり	
	軌道	航空	軌道	航空
運賃(円/人)	21,000	26,000	15,800	20,900
選択率(%)	44	56	28	72
交通需要(千人/年)	2,435	3,144	2,354	5,916
需要変動リスク	340		334	

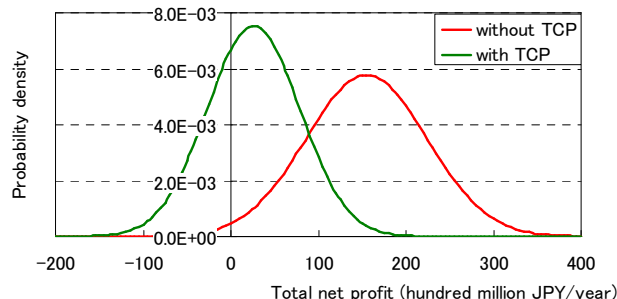


図-1. 純収益の分布

$$S = \sum_{od \in \Pi} \frac{(c_{od}^{w.o.} - c_{od}^{w.}) \cdot (q_{od}^{w.o.}(t_T) + q_{od}^{w.}(t_T))}{2} \quad (25)$$

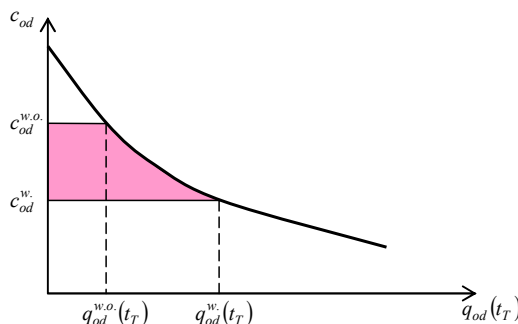


図-2. 消費者余剰の増分