【土木計画学研究・講演集 No.12 1989年12月】

鉄道の乗り換え抵抗に関する研究

A Study on Impedance of Transfer at Railway Station

内山 久雄* 武藤 雅威** 桜井 章生***
by Hisao UCHIYAMA, Masai MUTO and Akio SAKURAI

A network system of railway has been supplied densely in metropolitan area in Japan. In this context, transfer at the station between different lines becomes more inconvenient not only in horizontal distance but also in vertical.

This paper aims at the derivation of magnitude of the impedance such transferring activity in detail as horizontal walk, going up and down on foot and escalator.

110 OD pairs which possess two routes by railway from suburban station to CBD station in Tokyo are selected. Then route choice models of aggregate approach are calibrated.

The paper summarizes that (1) whole transfer time corresponds to 1.4 times of line-haul time, (2) going up on foot measured simply in minute is equivalent to 8 times of horizontal walk, (3)going down on foot measured in recovery time of heart vibration is most critical and so on.

1.はじめに

近年の首都圏への業務機能の過度の集中をはじめとして、首都圏における鉄道交通網の整備を必要とする課題は多く、今後も新たな鉄道施設の供給が必要である。しかし、既存路線が錯綜する首都圏中心部においては、将来予定されるリニアモーターカーなどの新たな鉄道路線を含め、より地下深く建設されることになる。そのため、これら今後の新規地下鉄道の需要量を左右する要因として、駅構内における乗り換え抵抗を予め検討しておく必要がある。そこで本研究では、従来鉄道駅における乗り換え抵抗要因として考えられてきた所要時間や費用といった変数に加え、上下移動の影響をも考慮した行動量を表す変数を用いた経路選択モデル構築を行い、その影響が現実にどの程度であるのかを見いだすことを試みる。

鉄道利用者の、実行動に即した鉄道乗り換え抵抗を定量化することを考慮し、乗り換え時の移動に伴う「疲労度」を経路選択要因の一つとしてとして導入する。本研究では、「疲労度」は移動形態の違いにより歩行疲労度、昇り階段疲労度、降り階段疲労度等に分類する。これにより、駅構造形態の影響により異なる疲労の度合をより詳細に記述することが可能となる。また最後にいくつかのモデルの推計結果を通じて、将来の駅構造のあり方に関して乗り換え時の移動からみた考察を試みる。

2.疲労度に着目した交通抵抗の計測

従来、鉄道駅乗り換え抵抗の要因としては乗り換えにかかる所要時間や乗り換え回数など、駅構造を反映し得るものが考慮されることは少なかった。本研究では駅構造に起因する乗り換え抵抗要因を詳細に捉えることを目的に、疲労度に着目した新たな変

* 正会員 工博 東京理科大学助教授 土木工学科
(〒278 千葉県野田市山崎 2641)
** 正会員 工修 鉄道総合技術研究所
*** 学生員 東京理科大学大学院 土木工学専攻

数を作成する。

（1）疲労度の定義

『疲労とは生体の種々の変化から推定される一つの抽象的な概念である』[1]とされるように、疲労度に関する尺度の定義も従来より様々なものが提案されている。本研究ではこれらのうち、乗り換え抵抗の主要な要因であると考えられる階段昇降の疲労度が定義可能であることから、「エネルギー代謝率」（RMR: Relative Melabolic Rate）[2]を疲労度尺度として採用する。RMRは以下の式で定義される、種々の動作、労働や運動のエネルギー消費量を表す尺度である（表－1）。

$$RMR = \frac{T-R}{B} \qquad (1)$$

T：エネルギー消費量[cal/(Kg·分)]
B：基礎代謝量[cal/(Kg·分)]
R：安静時代謝量[cal/(Kg·分)]
T－R：エネルギー需要量

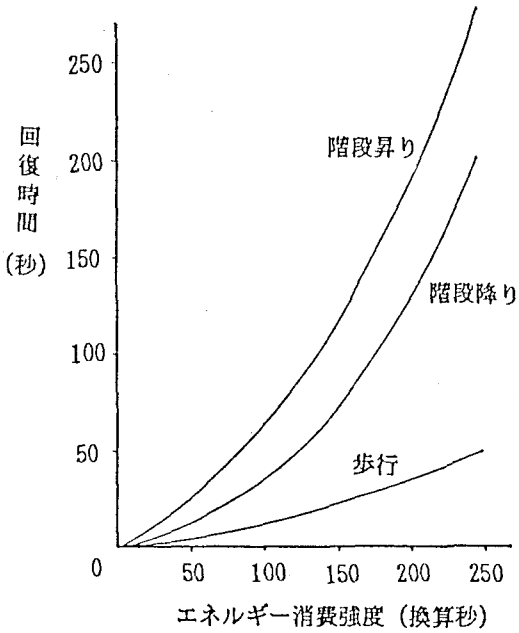
表－1　主なRMR値（参考文献(2)より抜粋）

	RMR		RMR
立位	0.5	マラソン	15.6
歩行(普通)	2.1	力泳(ｸﾛｰﾙ)	34.0
階段(昇り)	6.5	重量あげ(ﾌﾞﾚｽ)	88.0
階段(降り)	2.6	野球(投手)	5.5
自転車	2.6	テニス(ｼﾝｸﾞﾙｽ)	10.9
休憩・談話	0.2	スキー(ｽﾗﾛｰﾑ)	23.4
机上事務	0.6	サッカー(前衛)	7.5
草むしり	2.0	相撲(試合)	27.1

（2）実験による疲労度の推定

(1)で示したRMR値は運動量に正比例する疲労度尺度であった。しかし、経験的に、例えば階段を1階分昇るのと3階分昇るのとでは、後者の方が3倍以上の疲労を覚えることが想像される。よって運動量が増大するにつれて疲労度は線形の比例関係以上の増加を示すという仮説をおくことにする。しかし、既往の文献で運動量と疲労度との非線形関係を明確に示した例はなかったため、本研究では実験によりその関数関係を測定することにする。

疲労度の計測方法は前述したように種々のものが提案されているが、ここでは実験の容易さを考慮し、運動終了直後の脈拍が正常時の脈拍に戻るまでの回復時間を疲労度の尺度とする。実験は7人の被験者の実際の運動を通じて行う。階段の昇降はビルの1



図－1　運動種類別の回復時間曲線

階～9階までの昇降について各々脈拍の回復時間を測定する。また歩行については1分～4分について同様に脈拍回復時間を測定する。線形式を仮定するRMR値との対比を行うため、運動量にRMRを掛け合わせて得られるエネルギー消費強度を横軸にとり、測定された回復時間を回帰させたグラフを図－1に示す。図－1より、本研究で疲労度を表す尺度として定義した回復時間は運動量の増加にともない指数関数的に増加することが示される。なお、本研究では疲労度の指数関数的増加率を算出することを目的とするため、縦軸の切片を運動量が0のときに回復時間も0となるよう修正している。

以上の実験結果により得られた回復時間関数を用いた駅乗り換えに関する疲労度関数を以下のように定義する。

－歩行

$$Z = \exp[0.003363t + 3.521] - 33.82 \qquad (2)$$

－階段昇り

$$Z = \exp[0.008475D + 4.360] - 78.26 \qquad (3)$$

－階段降り

$$Z = \exp[0.003401D + 3.528] - 34.06 \qquad (4)$$

Z：回復時間(疲労度)[秒]
t：歩行時間[秒]　D：階段段数[段]

なお、エスカレータ利用時の疲労度は、疲労の度合

表－２(1)　疲労度（回復時間）の大きい乗り換え駅

順位	駅名	乗換前	乗換後	歩行(秒)	昇段数	降段数	ｴｽｶﾚｰﾀ(秒)	所要時間(秒)	疲労度
1	渋谷	新玉線	山手線	110	120	0	0	164	153
2	大手町	三田線	丸ノ内線	396	56	50	0	439	148
3	新宿	西武線	丸ノ内線	332	51	145	0	406	134
4	永田町(赤坂見附)	有楽町線	銀座線	407	33	20	164	593	127
5	有楽町(日比谷)	山手線	千代田線	305	30	144	0	369	105
6	新宿	京王線	中央線	134	85	17	0	178	104
7	東京(大手町)	東海道線	東西線	349	0	139	0	398	96
8	大手町	東西線	丸の内線	195	66	19	0	231	92
9	新橋	浅草線	銀座線	200	55	28	0	234	82
10	上野	常磐線	日比谷線	310	0	132	0	356	81

表－２(2)　疲労度（回復時間）の小さい乗り換え駅

順位	駅名	乗換前	乗換後	歩行(秒)	昇段数	降段数	ｴｽｶﾚｰﾀ(秒)	所要時間(秒)	疲労度
1	日本橋	東西線	銀座線	42	0	20	52	101	7.5
2	東銀座	浅草線	日比谷線	49	0	34	0	61	10.2
3	霞が関	日比谷線	丸ノ内線	65	0	21	41	113	10.7
4	銀座	丸ノ内線	日比谷線	78	0	21	41	126	12.6
5	江戸橋(日本橋)	浅草線	東西線	67	0	34	0	79	12.7
6	西日暮里	山手線	千代田線	62	0	40	36	112	12.8
7	市ヶ谷	中央線	有楽町線	66	0	41	50	130	13.4
8	銀座	銀座線	日比谷線	86	0	20	43	136	13.7
9	五反田	池上線	山手線	84	0	23	0	92	13.8
10	池袋	東上線	丸ノ内線	52	0	60	0	73	14.1

が極めて微小であり回復時間が測定できないため、ここでは変数から除いている。この点は長時間のエスカレータ利用から生じる精神的な疲労度を定義し、定量化する必要があろう。

参考のため、式(2)～(4)を用いて、都内主要乗り換え駅の乗り換え疲労度を算出した例を表－２に示す。表－２は、本研究で乗り換え距離、階段段数などを測定した１２４駅に関する比較結果であり、実際には推計値以上の疲労度を伴う駅も存在し得る。計算結果より、乗り換え所要時間が短くとも階段数が多いために疲労度が大きい例が見られる。これより、乗り換え抵抗を疲労度で測ると、単純に所要時間のみを抵抗値とする場合に比べ、駅間の抵抗値の大小関係が大きく異なることが指摘される。

３.通勤鉄道経路選択モデルの構築

（１）分析対象経路の抽出

本研究ではトリップ数の多さと、経路に対する合理的選択が仮定できることを考慮し、分析対象として首都圏における通勤・通学鉄道トリップをとりあげる。首都圏における駅間のＯＤペアは無数に存在するため、本研究では都心から放射状に伸びる都市鉄道のうち、乗車客が多いと認められる駅を発駅に、都心の最終下車駅として降車人数の多い任意の地下鉄駅を着駅とした。対象とする発着駅を表－３に示す。また、経路はこれらの発着駅の組合せのうち、利用者数の多いＯＤペアについて各々２経路を設定する。最終的に分析対象として 110 ＯＤペアを抽出している。

表－３　分析対象経路の発駅と着駅

発駅（１８駅）	
京浜川崎(京浜急行線)	成増(東武東上線)
横浜(東海道線)	登戸(小田急線)
旗の台(東急池上線)	高島平(都営三田線)
自由が丘(東急東横線)	大宮(東北･高崎線)
二子玉川園(東急新玉線)	松戸(常磐線)
春日部(東武伊勢崎線)	明大前(京王線)
上石神井(西武新宿線)	京成船橋(京成本線)
大泉学園前(西武池袋線)	吉祥寺(中央線)
京成高砂(京成押上線)	船橋(総武線)

着駅（２７駅）	
三越前(銀座線)	神谷町(日比谷線)
日本橋(銀座線)	六本木(日比谷線)
京橋(銀座線)	茗荷谷(丸の内線)
新橋(銀座線)	銀座(丸の内線)
虎ノ門(銀座線)	霞が関(丸の内線)
赤坂見附(銀座線)	赤坂見附(丸の内線)
青山一丁目(銀座線)	麹町(有楽町線)
外苑前(銀座線)	早稲田(東西線)
人形町(日比谷線)	飯田橋(東西線)
茅場町(日比谷線)	日本橋(東西線)
八丁堀(日比谷線)	茅場町(東西線)
築地(日比谷線)	新お茶の水(千代田線)
東銀座(日比谷線)	赤坂(千代田線)
銀座(日比谷線)	

（２）経路選択モデルの構築

(1)で作成したデータを用いて、集計ロジットモデルを構築した。パラメータの推計式は以下の式に関する最小自乗法により行う。

$$\log\left(\frac{P_{n1}}{1-P_{n1}}\right)=\sum_{k}\theta_k(X_{n1k}-X_{n2k})+\varepsilon_n \qquad (5)$$

P_{n1}:n番目のﾃﾞｰﾀの経路１分担率
X_{n1k}:説明変数　θ_k:パラメータ　ε_n:誤差項

説明変数としては、前述した乗り換えに関わる所要時間、疲労度の他、運賃や混雑度といった多様な変数を設定し、いくつかのモデルを構築する。パラメータ推計結果を表－４、５、６に示す。なお、モデル推計精度の評価指標として相関係数を算出しているが、これは推計パラメータを用いて求められる分担率と、観測分担率との相関係数である。

４.乗り換え時間に関する考察

（１）所要時間表現の乗り換え抵抗

表－４は基本的に運賃と所要時間によって乗り換えがなされているという前提に立った時の分析結果を示している。ただし所要時間についてはラインホール時間と乗り換え時間に分け、乗り換え時間を、総乗り換え時間（所要時間モデル１）、エスカレータに乗っている時間及び垂直移動と水平移動を併せた歩行時間（所要時間モデル２）、さらに階段の昇り、降り、水平の３つに分けた歩行時間とエスカレータに乗っている時間（所要時間モデル３）の３つの場合について分析している。

ラインホール時間と通勤定期代のパラメータよりラインホール時間１分はそれぞれ４８６円、４３３円、４４９円の一ヶ月通勤定期代に相当し、快速運行のある高速の通勤電車のラインホール時間１分あたりの実際の通勤定期代（例えば東海道線東京－大船間４３５円、常磐線上野－取手間４５５円）とほぼ等しく、緩行電車の実際の通勤定期代（例えば山手線一周２５５円）に対してはラインホール時間によりウェイトを置いて経路を選択していることが示される。

乗り換え時間とラインホール時間の関係は全体的には乗り換え時間はラインホール時間の１.４倍のウェイトがあることが示される（モデル１）。また乗り換え時間を構成要素別に見ると、モデル２より歩行時間とエスカレータ時間はラインホール時間のそれぞれ１.９倍、４.７倍とエスカレータ時間の経路選択への影響の大きさが見いだせる。さらに詳細に見ると、モデル３より階段昇り歩行時間、階段降り歩行時間、水平歩行時間、エスカレータ時間はラインホール時間のそれぞれ８.１倍、３.５倍、１.５倍、６.１倍となっており、水平歩行時間そのもののウェイト必ずしも大きいとは言えないものの、水平歩行を基準にとると昇り５.４倍、降り２.３倍、エスカレータ４.１倍と水平歩行以外の乗り換え行動に対してかなりの抵抗感を持っていることが指摘できる。階段の昇りや降りに対するここで得られた抵抗感は直感的にも理解できようが、エスカレータに対する抵抗感が意外な程大きいことは特筆すべきであろう。

表－4　所要時間モデル推計結果　()内ｔ値

変数名		モデル1	モデル2	モデル3
乗り換え時間	昇り歩行時間（分）			-1.4921 (12.3)
	降り歩行時間（分）			-0.6463 (7.96)
	水平歩行時間（分）			-0.2753 (19.7)
	昇り+降り+水平歩行時間（分）		-0.3449 (42.5)	
	エスカレータ（分）		-0.8525 (31.1)	-1.1165 (27.5)
	総乗り換え時間（分）	-0.2508 (51.3)		
ラインホール時間（分）		-0.1791 (40.1)	-0.1815 (43.8)	-0.1833 (42.0)
通勤定期代（千円／月）		-0.3684 (36.7)	-0.4192 (41.4)	-0.4084 (38.0)
相関係数		0.755	0.799	0.793
サンプル数		110	110	110

表－5　回復時間モデル推計結果　()内ｔ値

変数名		所要時間モデル	回復時間モデル	水平歩行換算モデル
回復時間	階段昇り（回復秒）		-0.01764 (16.8)	
	階段降り（回復秒）		-0.07260 (22.1)	
	水平歩行（回復秒）		-0.01047 (9.36)	
乗り換え時間	昇り歩行時間（分）	-1.9157 (15.0)		-0.1864 (15.0)
	降り歩行時間（分）	-1.3622 (16.4)		-0.4770 (16.5)
	水平歩行時間（分）	-0.2171 (14.8)		-0.2131 (14.4)
	エスカレータ（分）	-0.8481 (20.2)	-0.9544 (22.0)	-0.8568 (20.2)
ラインホール時間（分）		-0.1603 (35.2)	-0.1672 (35.7)	-0.1597 (35.0)
相関係数		0.752	0.733	0.751
サンプル数		110	110	110

またモデル1、モデル2、モデル3と乗り換え行動を詳細に説明する変数の増加に伴ってパラメータ間の比の値が拡大するのは、乗り換え行動を構成する個々の要素が経路選択にきわめて大きく影響していることの表れと言えよう。

（2）回復時間表現の乗り換え抵抗

図－1の実験曲線から得られる階段昇り歩行時間、階段降り歩行時間、水平歩行時間に対する回復時間が表－5に示されている。ここでは乗り換え行動を構成する個々の要素間の影響を見るため、通勤定期代は説明変数から除外する。また、比較のため所要時間モデルも併せて掲載しておく。なお水平歩行時間換算モデルとは、階段の昇り降りの回復時間に相当する水平歩行時間を説明変数とした場合のモデルである。またエスカレータに対しては回復時間が0であるため、その所要時間を説明変数としている。

表－5の3つのモデルを見ると、エスカレータ時間はラインホール時間のそれ

表－6　各種要因を含むモデル推計結果　()内ｔ値

変数名		モデル1	モデル2	モデル3	モデル4
回復時間	階段昇り（回復秒）	-0.01312 (13.1)	-0.01733 (16.4)	-0.01694 (18.4)	-0.01813 (16.9)
	階段降り（回復秒）	-0.03941 (12.2)	-0.07043 (20.8)	-0.07817 (24.0)	-0.07393 (22.2)
	水平歩行（回復秒）	-0.01699 (15.8)	-0.01156 (9.66)	-0.01209 (10.9)	-0.01033 (9.17)
	エスカレータ（分）	-1.1455 (27.6)	-0.9523 (21.9)	-0.8435 (19.2)	-0.9269 (20.6)
ラインホール時間（分）		-0.1887 (42.2)	-0.1660 (35.1)	-0.1856 (37.6)	-0.1701 (35.1)
通勤定期代（千円／月）		-0.4075 (36.4)			
混雑度（%）			-0.006777 (2.81)		
始発駅数				0.2815 (10.2)	
歓楽街通過数					0.08558 (2.60)
相関係数		0.776	0.735	0.749	0.733
サンプル数		110	110	110	110

ぞれ5.3倍、5.7倍、5.4倍でありその大きさからみる限り概ね同様の傾向を示しているといえる。回復時間モデルを見ると、水平歩行時間に対する昇り階段から見た回復時間では1.7倍、同様に降り階段から見た回復時間では 6.9倍となっている。このことは単純に実験によって得られた回復時間以上の負荷を経路選択に際して課しているということを示している。特に、降り階段に対して昇り階段よりも4.1倍もウェイトをおいているということは注目に値する。同様な分析は水平歩行時間換算モデルに対しても行われているが、そこでは水平歩行時間に対する昇り階段の換算時間では0.9倍、降り階段の換算時間では2.2倍となっている。換算水平歩行時間で見ると昇り階段での換算は疲労度やエネルギからも妥当であると言えようが、降り階段では、降ると言う行為に対しての負荷が、昇ると言う行為に対する負荷よりも2倍以上であることは指摘されねばならない重要な側面であろう。回復時間モデル、水平歩行換算時間モデル共に降り階段のウェイトが高いということに関しては様々なことが考えられ得るが、より詳細な降り階段に対する分析の必要性を今後の課題として挙げておくにとどめておく。回復時間に対する完全な実験曲線が得られているならば、理論的には昇り、降り、水平歩行ともに同一の値を持つパラメータになる筈であるからである。

いずれにしても降り階段に対する抵抗が乗り換え行為に対して支配的な要素である可能性が高いことには言を俟たない。

（3）その他の乗り換え抵抗

表－6は回復時間を中心とする説明変数をベースとしたその他要因の寄与の程度を知ろうとしたモデルである。これによれば回復時間を用いてもラインホール時間1分はパラメータの比から通勤定期代463円、エスカレータ時間6.1分に相当し、前述の結果と大差のないことが示されている（モデル1）。従ってこのモデルを中心に、座れる可能性をインプリシットに表現する始発駅数、その駅での降車を促す例えば六本木駅などと言う歓楽街通過数、その経路の電車の混雑度などの経路選択に少なからず影響を及ぼすと考えられる要因のの寄与の程度を見ることにする。

経路途中に始発駅が1つあることはラインホール時間にして1.5分の短縮効果しかもたらさないものの、乗り換えに対しては例えばエスカレータ時間のウェイトがラインホール時間の4.5倍であることをはじめとして乗り換え全体に対する影響をやや小さくしている（モデル3）。一方歓楽街通過数や混雑度の相関係数やt値は低く、例えば歓楽街通過数1つはラインホール時間0.5分の短縮にしか相当せず、乗り換え全体に対する影響も例えばエスカレータ時間のウェイトがラインホール時間のそれぞれ5.7倍（モデル2）、5.4倍（モデル4）とモデル1のそれに近く、経路選択の支配的な要因であるとは言い難い。

5.おわりに

本研究は大都市交通センサスデータを利用しての鉄道の経路選択要因抽出の集計分析であり、必ずしも乗り換え行動を詳細に分析することに適したデータであるとは言えないかも知れない。また現実には狭い地下空間での圧迫感など精神心理的な要因の影響も見逃すことはできないのかも知れない。しかしながら少なくともここで得られた結果、すなわちエスカレータの設置が必ずしも乗換の抵抗を軽減させる方向に作用していないこと、垂直移動の抵抗が想像以上に大きいことを明かにし得たことは、大深度地下空間の利用を含めて今後の用地制約下にある大都市圏での鉄道乗り換え施設計画のあるべき方向を示唆していると言えよう。

<<参考文献>>
(1)スポーツと疲労・栄養、スポーツ科学講座4：大島正光、山岡誠一：大修館書店、pp12.
(2)スポーツとエネルギー・栄養：長嶺晋吉：大修館書店、pp83.