複数交通モード間の乗り継ぎを含む長距離旅行行動の分析

内田　光俊[1]・山口　裕通[2]

[1]学生非会員　金沢大学大学院　自然科学研究科　地球社会基盤学専攻（〒160-0004 石川県金沢市角間町）
E-mail: mitten.uchida@stu.kanazawa-u.ac.jp

[2]正会員　金沢大学准教授　理工研究域地球社会基盤学系（〒920-1192 石川県金沢市角間町）
E-mail: hyamaguchi@se.kanazawa-u.ac.jp

本研究では，航空，鉄道，バスの各交通モードを相互に組み合わせた，各交通モードを乗り継ぐ移動の経路選択行動に着目し，全国幹線旅客純流動調査を通じてその移動実態の解明を試みた．その結果，全国の長距離幹線交通では，複数の交通モードを組み合わせた移動が流動全体の 5%程度と，少数ではあるが無視できないほど観測されていることがわかった．さらにそれら乗り継ぎ行動の傾向の地域ごとの偏在の特徴を明らかにした．また，乗り継ぎを含む経路選択行動の数理モデルにより，乗り継ぎ抵抗大きさを推計し，さらに同モデルから地域間の交通網に対する利便性の差異を議論できることを明らかにした．

Key Words: *Inter-Regional Travel Survey, Inter-Modal Transfer, Multinominal Logit Model*

1.　はじめに

日本の交通政策においては，首都圏を始めとする大都市から地方都市への放射状のネットワークが重点的に整備されてきた．そのため，地方都市や大都市の衛星都市の相互間の移動は，経路の中途において大都市での乗り換えを必要とする場合が多い．その中には，鉄道と航空，バスと航空といったような複数の交通モードを乗り継ぐような混合経路も考えうる．このような移動は都市内交通の分野で数多く研究[注 1)]されており，今年開業した芳賀・宇都宮 LRT のように実際の交通現場においてもその研究成果が活用されている．

しかしながら，日本の長距離旅行行動の研究においては，直接的に需要を予測できる乗り換えを含まない単純な移動のみを対象とし，乗り換えを含む複雑な移動はこれまであまり考慮されてこなかった．乗り換えを含む複数の経路を扱った研究として，杤元ら [1)]は鉄道と航空それぞれの形成するネットワーク内で乗り換えを含む複数の経路を生成し，それぞれへの経路選択をモデル化することで各ネットワークを評価している．また，柴田ら [2)]は日本国内の長距離旅行行動について，鉄道同士の乗り換えあるいは鉄道と航空など他の交通モードを乗り継ぐ経路を複数設定し，それら経路相互の重複性を考慮した上で経路選択行動を説明する，C-Logit モデルを基とした幹線の需要予測モデルを提唱した．柴田らの研究は長距離移動の経路選択行動に初めて乗り継ぎを含む混合経路を考慮し[注 2)]，また経路の重複を選択確率に反映できる経路選択モデルという点で特筆すべきものである．しかしどちらの研究においても，複数の交通モードを組み合わせて移動する際の乗り継ぎそのものが利用者に与える効用には着目していない．

そこで本研究では，航空，鉄道，バスの各交通モードをいずれか 1 種類のみ利用する移動だけでなく，それらを相互に組み合わせた移動の経路選択行動に着目し，都市間の乗り換え・乗り継ぎを含む移動の実態を解明することを目指す．またその過程において，近年急速に発展した新乗合高速バスをはじめとする新たなモビリティサービスが既存の交通機関に与えた影響と，今後の展望について考察する．

2.　利用データの概説

本研究では全国の長距離旅行を分析するにあたり，全国幹線旅客純流動調査（以下，純流動調査）[3)]を用いる．これは国土交通省によって 1990 年から 5 年毎に行われている長距離旅客流動の定量的かつ網羅的な把握を目的とした調査である．このうち，本研究では 2015 年調査の休日 1 日個票データを用いて旅行行動の分析を行う[注 3)]．個票データにはアンケートから得られた旅行者の属性と幹線交通機関の移動経路が含まれ，これに拡大係数を乗ずることで OD 間の正味

表-1 純流動調査のデータの概要

系列名	(人/日 または 個)
総流動量 (各幹線交通の乗客数の総和)	1,322,343
純流動量 (正味の旅行者数)	1,247,322
うち，代表交通機関航空	305,641
うち，代表交通機関鉄道	870,727
うち，代表交通機関幹線バス	145,975
個票数	361,895

の流動量(以下，純流動)および交通モードごとの流動量(以下，総流動)を算出できる．

純流動調査では航空，鉄道[注 4)]，幹線旅客船，幹線バス(以下，バス)，乗用車の 5 種の幹線交通機関を対象としている．このうち，本研究では公共交通でない乗用車と，流動量や利用可能な区間が他交通機関に比べてわずかである幹線旅客船の 2 種を除いて分析を行う．つまり，航空，鉄道，バスの 3 種の幹線交通機関(以下，幹線交通)を取り扱う．

なお，「幹線交通機関」とは，純流動調査において出発地から目的地までの間に，前述の 5 種の交通機関により県境をまたぐ旅行について，その移動経路で用いた交通機関を意味する．そのため，本研究で扱う「複数モード間の乗り継ぎ行動」として，新幹線から在来線特急へといった同種の交通モード同士の乗り換えや，幹線バスから自家用車へといった幹線交通でない交通機関の乗り継ぎ，県内で完結する移動などは対象に含まれない．

3. 日本における乗り継ぎ旅行行動の概況

(1) 全国の集計量

純流動調査より全国の幹線交通において，異種の交通モードを乗り継ぐ旅行の純流動量を集計したものを図-1 に示す．Direct は幹線交通間の乗り継ぎが 0 回，Transferred Once は 1 回，Transferred Twice は 2 回以上を示す．

全国において約 9 割の旅行者が同種の幹線交通のみで出発地から目的地まで移動している一方で，5%以上の旅行者は異種の幹線交通を組み合わせた移動を選択していることがわかる．一方で，2 回以上の乗り継ぎは純流動量全体のわずか 0.2%である．ただし集計の都合上 3 回以上の乗り継ぎを行った場合は，その超過した乗り継ぎ回数分だけ純流動量を過大に計上している可能性もあることに注意されたい．

なお一般に幹線交通を乗り換える旅行行動では，新幹線と特急のような同種の交通モード間で乗り継ぐ行動も考えうる．しかし，本研究ではこれらと異種の交通モード間の乗り継ぎを区別して扱い，図-1 は前者を含まない．また，幹線交通でない，通勤電車や市内バスなどの幹線交通に対して 2 次交通とされる交通機関からの乗り継ぎも図-1 は含まない．そのため，乗り継ぎ回数が一般的な旅行行動で想定される回数よりも少ないことに注意が必要である．

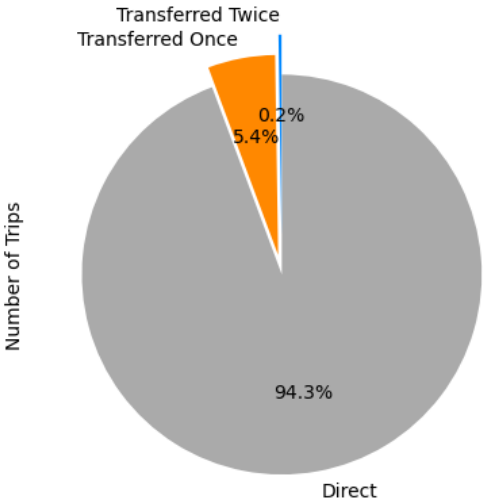


図-1 幹線交通間の乗り継ぎ回数別 純流動の割合

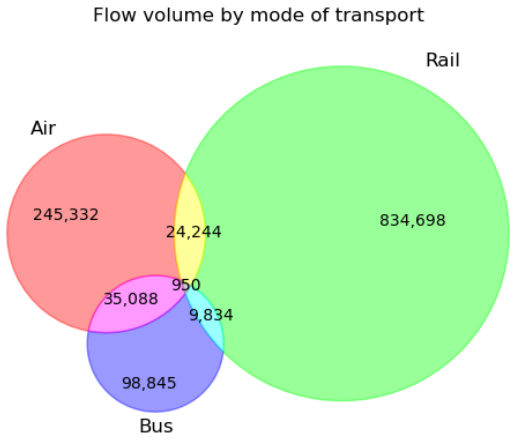


図-2 幹線交通 3 種の純流動量(人/日)による分担状況

続いて，幹線交通の分担状況を図-2 に示す．図内の数値は各交通モードあるいは組み合わせの休日の純流動量(人/日)を示すが，整数へ丸め処理を行っている．乗り継ぎを行わない純流動量は鉄道が他 2 種に比べて多い．その一方で，交通モードを組み合わせた移動だけをみると，航空&バスの純流動量がそれぞれ鉄道との組み合わせより大きい．この結果は航空とバスの結びつきが極めて強いことを示唆しており，ネットワークとしてバス交通を考える際に航空との関係を無視できないことを示している．また，3 種の交通モードを組み合わせる移動は他と比べ 2 桁以上少なく僅かであった．

このことから，鉄道を利用する場合は他の幹線交通を含めずに旅行が完結することが多く，一方で航空を利用する場合は他の幹線交通を組み合わせた旅行が多いといえる．

(2) 地域別の幹線交通の利用状況

a) 到達交通機関の地域比較

本稿では，目的地までの旅行において，最後に用いた幹線交通を「到達交通機関」と定義する．到達交通機関の目的地ごとの分担率を示したものが図-3 である．なお，ここでは幹線交通でない交通機関（以下，2 次交通）による移動の影響を排除するため，目的地の地域と幹線交通を降車・降機した地域が一致するもののみ取り出した．そのため，例えば香川県を目的地とする旅行で最後に移動した幹線交通の利用区間が広島県までだった場合は，このグラフには含まれない．なお首都圏や近畿圏など表-2 に示す一部の地域では，その域内で完結する旅行が純流動調査において無視されるため，ゾーン相互間やゾーン外の地域と単純な比較ができないことに注意が必要である．

表-1 のとおり鉄道の総流動が大きいため，多くの地域で鉄道の割合が大きくなった．鉄道の割合が 1 位でない地域は，本土との鉄道の接続がない沖縄県のほか，高速鉄道網から離れた宮崎県や四国など，一般に鉄道が不便と思われる地域に集中している．

高速鉄道の整備された地域間で比較すると，東北新幹線・東海道新幹線沿いでは鉄道の割合が極めて高い一方で，九州地方では航空の割合が目立つ結果となった．これは九州地方が多くの旅行客が見込まれる首都圏から離れていることと，他地域と比べて域内に離島空港が多く，したがってコミューター便などの航空利用が多いと考えられることが要因として挙げられる．

またバスの割合が他地域と比較した際に高い地域として，山陰，徳島県，茨城県や山梨県が挙げられる．これらの地域では，隣県からの移動にバスを使うことが一般的な選択肢として認知されていると考えられる．特に徳島県ではバスの割合が全体の 5 割を占めており，バスによる移動が広く一般的に行われていると考えられる．

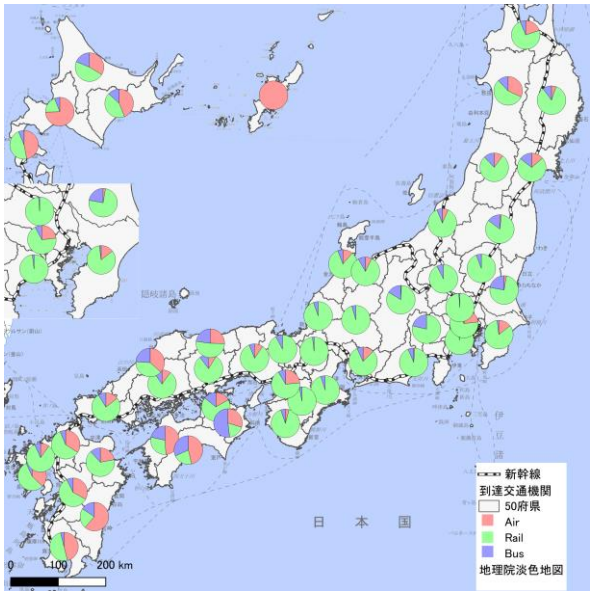


図-3 到達交通機関の分担率

表-2 域内移動が無視される都道府県ゾーン

ゾーン名	対象50府県名
北海道	道北，道東，道央，道南
首都圏	東京都，神奈川県，千葉県，埼玉県
中京圏	愛知県，岐阜県，三重県
近畿圏	大阪府，京都府，兵庫県，奈良県

b) 地域別の幹線交通の乗り継ぎ状況

主に東京駅・羽田空港を中心とした，日本の長距離交通網の構造をふまえると，地方都市を出発地として，ある都市を目的地として移動する場合，目的地が東京へのルート上にない場合は，乗り継ぎを行う必要性が出てくるケースが多いと想定される．そこで，純流動調査の 50 府県地域ごとにその地域を目的地とした旅行のうち 1 回以上の異種幹線交通の乗り継ぎを含む割合を求めた．すべての出発地を平均した結果を図-4 に示す．また東京を起点とする交通網として，2015 年におけるフル規格新幹線の路線網を図-4 に合わせて示した．

全国を俯瞰して，人口の少ない地域のほか，紀伊半島や四国など，新幹線の経由しない地域では乗り継ぎを含む移動が多くなりやすい傾向が見られる．また地域別では北海道の 4 地域や沖縄県など他都府県と交通事情の異なる地域で割合が高くなった．沖縄県は前節の通り，すべての旅行客が航空を到達交通機関としている．そのため，沖縄に到達する飛行機が出発する空港までのアクセスに，幹線鉄道や幹線

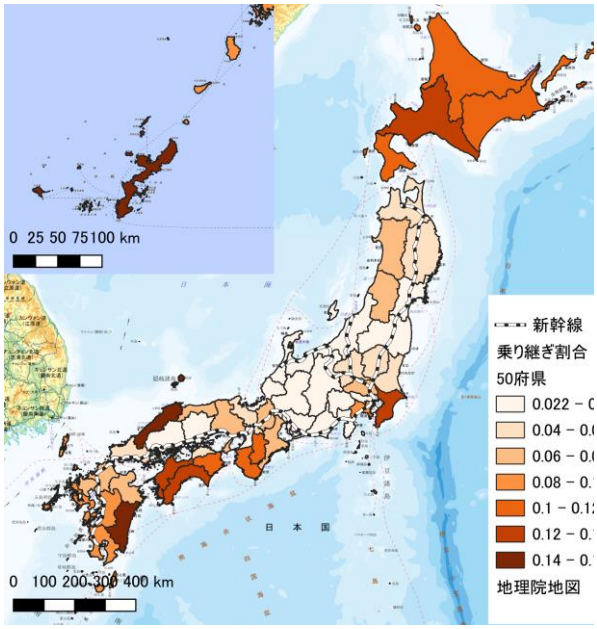


図-4 目的地別の純流動量における 1 回以上乗り継ぎをした旅行が占める割合

バスを使用した場合，本研究の乗り継ぎの定義によって必ず乗り継ぎが発生することが，沖縄の割合が高い要因と考えられる．

(3) 距離帯別の幹線交通の乗り継ぎ状況

前節では地域間の交通利用の比較の際，大都市からの距離によって影響を受ける可能性が示唆された．これを受けて，旅行者の移動距離によって幹線交通の選択にどのような差異が見られるか比較した．なお移動距離は出発地～目的地間について，楕円体近似により直線距離を算出し，これを 200km ごとの距離帯に分けてサンプリングを行った．各距離帯のサンプル数を表-3 に示す．

旅行者が出発地から目的地までの間に用いた幹線交通について，各距離帯でその純流動量を集計したものを図-5 および図-6 に示す．なお，図-6 では各距離帯の純流動の総和を 1 として，幹線交通またはその組み合わせごとに割合を積み上げ棒グラフで示した．

交通モードを組み合わせない移動経路については一般的に言われる通り，200km までの短距離においてはバスが，800km までの中距離では鉄道が，それ以上の長距離では航空が多い結果となった．例として東京広島間が直線距離で約 700km かつ山陽新幹線で 4 時間程度であることを考えると，図-6 ではちょうど 800km 前後を境に鉄道と航空の分担率が入れ替わっている.なお，図-5 では隠れているが，純流動調査のパンフレット [4]で既に指摘されているとおり，バスのみの移動についても 1000km 未満まで一定の流動量を観測している．

複数の交通モードを組み合わせた移動について見ると，航空を組み合わせた移動については，鉄道バスともに比較的長距離での流動量が大きくなった．特に航空とバスの組み合わせの分担率は 400km 以上でバス単体の移動よりも大きくなり，その後は 1800km 近くの長距離に至るまで一定のシェアをもつ結果となった．3.(1)より鉄道と他幹線交通との組み合わせの分担率が鉄道単体の分担率と比べてあまり大きくないことを考えると，これはとくに長距離帯においてバスが航空に対する二次交通機関として鉄道よりも密接にネットワークとして接続されていることを示唆している．

表-3 各距離帯のサンプル数

距離帯	サンプル数
[0, 200)	62,465
[200, 400)	65,163
[400, 600)	63,169
[600, 800)	52,388
[800, 1000)	92,506
[1000, 1200)	20,271
[1200, 1400)	11,875
[1400, 1600)	20,779
[1600, 1800)	2,430
[1800, 2000)	612
[2000, 3000)	1,800
総サンプル数	393,458

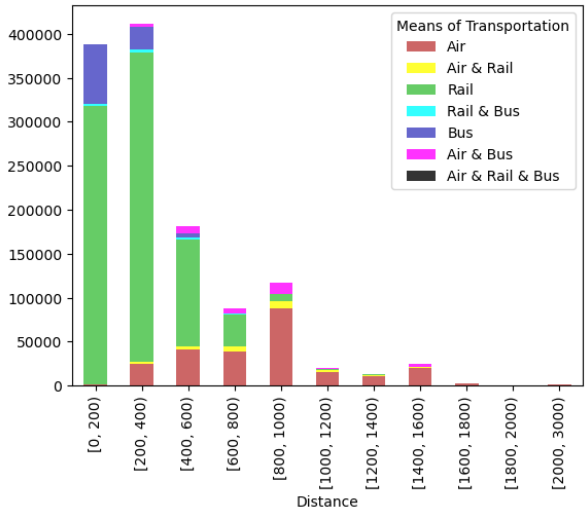


図-5 距離帯別の幹線交通流動量(人/日)

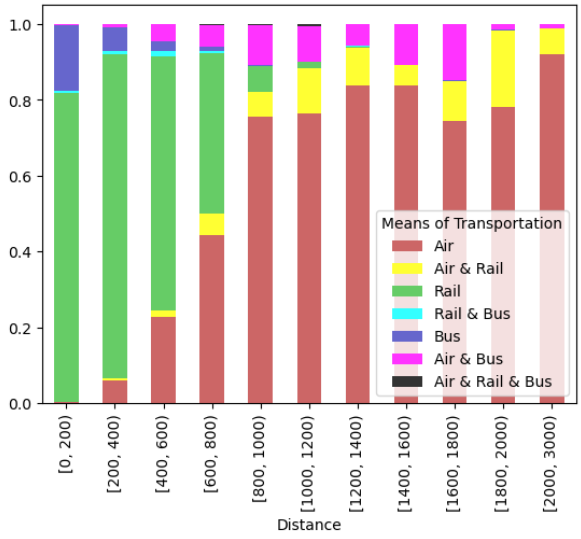


図-6 距離帯別の幹線交通分担率

(4) 徳島県を目的地とする旅行を対象としたケーススタディ

ここで，地方都市での長距離交通の現況をより細かく把握するために，徳島県を取り上げて，その長距離旅行の特徴を確認していこう．徳島県を目的地とする長距離旅行は，3.(2)に示したとおりバスの利用が特に多い特徴を持つ．徳島県の交通条件としては，徳島空港から東京都と福岡県に対しそれぞれ直行便が運航されているほか，明石海峡大橋を通じて近畿圏の各方面へ高速バスが運行されている．一方で，本土の高速鉄道網からは離れており，東海道新幹線方面からのアクセスには岡山駅まで遠回りを強いられるなど，鉄道の

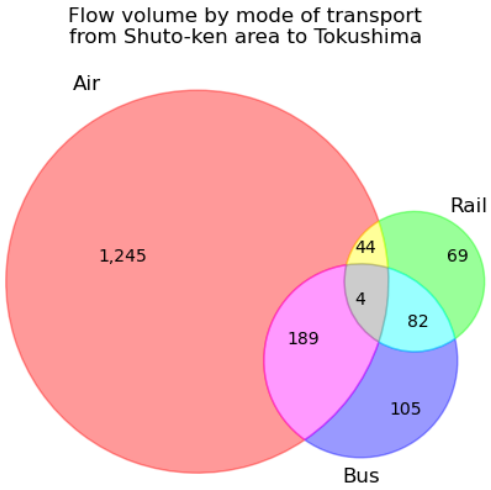


図-7 首都圏対徳島県の流動における幹線交通 3 種の分担状況

みでの長距離移動は，比較的不便な地域といえる．

c) 首都圏から徳島県への幹線交通の流動

大都市から地方都市への旅行の例として，首都圏から徳島県への旅行について，図-2 と同様の処理を行ったものを図-7 に示す．全国の傾向とは異なり，鉄道の分担率が小さく，一方で航空の分担率が極めて大きくなっている．この地域間では羽田空港から徳島空港まで直行便が出ており，これが航空の純流動量の多さにつながっていると思われる．また，バス単体による移動が一定数存在するほか，航空とバスを組み合わせた移動が航空利用の全体の 2 割近くを占めている．東京と徳島はおおむね直線距離で 500km 離れており，これらの傾向は 3.(3)で示した航空とバスの関係に近い．

純流動調査より幹線交通の利用区間を OD 表として取り出したものを表-4 に示す．各行は幹線交通の乗車または搭乗地である 50 府県地域，各列は幹線交通の降車地を示す．ここでは各個票から幹線交通の乗降地点が特定できるもののみ取り出したため，図-7 とは数値が一致しない．

表-4 の各行について，首都圏の東京都を除く 3 県から幹線交通に乗車した人数は，東京都と 3 県の人口を考えると極めて少ない．そのため，ほとんどの旅行客が東京都まで 2 次交通によって移動し，そこから幹線交通に乗車したと考えられる．その他に，埼玉県から兵庫県へ，千葉県から東京都へ，それぞれ幹線交通を乗車する流動が一定数見られた．

続いて旅行客が幹線交通の乗り継ぎを行った地域について考える．ここで各列の都府県は幹線交通を目的地の徳島県よりも手前で降車した地点であることから，列の和をとることで乗り継ぎをその地域で行ったおおよその人数を把握できる．この結果から，東京都のほか大阪府や兵庫県といった近畿圏，またわずかではあるが香川県内でも乗り継ぎが行われていることがわかった．ただし香川県については徳島県への流動量が極めて少ないことから，その多くが自家用車など本稿で分析対象としていない交通に乗り継いでいると考えられる．

表-4 首都圏対徳島県にかかる旅行の OD 表(人/日)

総流動	東京	大阪	兵庫	徳島	香川	高知
埼玉県	0	0	19	0	0	0
千葉県	16	0	0	0	31	0
東京都	0	19	34	1505	40	3
神奈川県	0	0	5	9	0	0
大阪府	0	0	0	8	0	0
兵庫県	0	0	0	42	0	0
徳島県	0	0	0	9	0	0
香川県	0	0	0	3	0	0

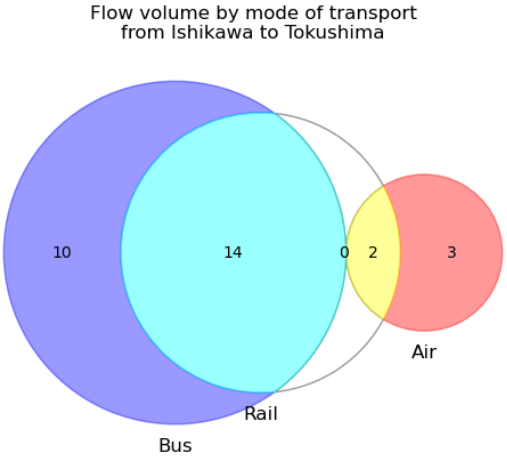


図-8 石川県対徳島県の流動における幹線交通 3 種の分担状況

d) 石川県から徳島県

続いて複雑な経路となりうる地方都市間の例として，石川県から徳島県の旅行について図-2 と同様の処理を行ったものを図-8 に示す．

石川県と徳島県は直線距離で約 300km と首都圏よりも距離が近いが，直接アクセスできる交通手段が自家用車のほかに存在せず，必ず乗り換えが必要である．また新幹線は金沢以西が未開業のため，比較して速達性に劣る在来線特急に頼らざるを得ない．そのため，鉄道のみによる旅行は検出されず，さらに旅行者の過半数が異種の交通機関を乗り継ぐ結果となった．

一定量の流動が見られたバスと鉄道の組み合わせについて，乗り継ぎをした地域を調査したところ，そのほぼすべてが大阪府で乗り継いでいた．これは前述の特急が大阪府発着かつ，大阪府から徳島県までは高頻度で高速バスが運行されているためと考えられる．

4. 徳島県を目的地とした経路選択モデルの検討

(1) 経路選択モデルの設計

移動経路上の乗り継ぎ行動について，本研究で着目している異種の幹線交通の乗り継ぎを含んだ経路選択モデルを作成する．ここでは，同一の幹線交通の乗り換えと比較して，複数モード乗り継ぎという選択肢は，利用者の選択行動おいてどの程度の抵抗で認識されているのか数値的解析を試みた．

ある出発地から目的地へ移動する旅行者tについて，経路iの選択確率を式(1)の多項 Logit モデルで求める．このとき，経路の確定効用V_iは経路の所要時間・運賃・乗り継ぎ回数による式(2)のとおり表せるとする．また出発地と目的地が旅行者と一致する経路のみを，その旅行者が使用できることを表す変数として式(3)を導入する．さらに乗り継ぎについて，同一幹線交通どうしの乗り換えと異なる幹線交通種間の乗り継ぎの効用を比較するため，後者にはそれぞれに乗り継ぎダミーとして変数を与える．よって，これに対する係数β_{dtf}は特に負の場合において旅行者の異種モード間乗り継ぎに対する負の効用，つまり乗り継ぎ抵抗とみなすことができる．

$$p_{t,i} = \frac{y_{t,i}\exp(V_i)}{\sum_{k\in I} y_{t,k}\exp(V_k)} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} V_i = {} & \beta_{\mathrm{time}}x_{\mathrm{time},i} + \beta_{\mathrm{fare}}x_{\mathrm{fare},i} \\ & + \beta_{\mathrm{transfer}}x_{\mathrm{transfer},i} + \beta_{\mathrm{dtf},l,m,n}x_{\mathrm{dtf},i,l,m,n} \end{aligned} \tag{2}$$

$$y_i = \begin{cases} 1, & i \text{ is available to } t \\ 0, & \text{else} \end{cases} \tag{3}$$

$i \in I$：i 番目の経路
V_i: 経路iの効用関数の確定項
x_{time}：所要時間(分)
x_{fare}：運賃(円)
x_{transfer}：同種交通機関どうしの乗り継ぎ回数
$x_{\mathrm{dtf},l,m.n}$：地点lでの幹線交通種mからnへの乗り継ぎ回数
$\boldsymbol{\beta}$：各説明変数に対する係数ベクトル

(2) 経路データの生成

この経路選択モデルを用いて，表-5 に示す OD の集合について経路選択行動の推定を行った．モデルの計算には python の Biogeme パッケージ[5]を用いた．経路集合についてはデータ処理の都合上，純流動調査から得られた経路のうち，異種の幹線交通の乗り継ぎが 1 回以下であるものを抜き出した．このため，純流動調査で観測されなかった経路と，異種の幹線交通の乗り継ぎ回数が 2 回以上の経路については集合に含まれない．また純流動調査では各経路の旅行者数が小数で表されるが，モデルでは各個人の経路選択確率の計算のためサンプルサイズとなる旅行客数を経路ごとに整数へ丸めている．

表-5 モデルの推定に用いた出発地・目的地一覧

出発地			
50府県	代表駅名	空港名	旅行客数
宮城県	仙台	仙台空港	17
埼玉県	大宮	大宮駅	140
千葉県	千葉	成田空港	203
東京都	東京	羽田空港	1143
神奈川県	横浜	横浜駅	212
石川県	金沢	小松空港	27
愛知県	名古屋	中部国際空港	138
滋賀県	大津	大津駅	26
京都府	京都	京都駅	228
大阪府	大阪	伊丹空港	943
兵庫県	三ノ宮	神戸空港	507
目的地			
50府県	代表駅名	空港名	旅行客数
徳島県	徳島	徳島空港	3584

なお各経路の説明変数は，Yahoo!乗り換え検索による 2023 年 10 月時点の検索結果からデータを取得した．なお所要時間には同種の幹線交通または 2 次交通[注5]の待ち時間が含まれるが，経路内で1つ目に乗車した交通機関の待ち時間および，幹線交通種を乗り継いだ際の乗り継ぎ待ち時間は含まれない．

経路の説明変数の取得を軽減するため，次のように経路の統合を行った．まず各経路を幹線交通ごとに 1 本または 2 本の区間経路へ分割した．この際，幹線交通でない何らかの交通で 50 府県地域を跨ぐ移動を行っているものについてはアクセス，イグレスそれぞれに追加の区間経路を設定した．つまり 1 トリップの経路には 1 本から 4 本の区間経路が含まれる．次に，各 50 府県地域の代表駅を定めた上で，幹線交通の乗降地域が一致する区間経路は図-9 のように代表駅間の乗り換え回数の最も少ない区間経路 1 本に統合した．ただし航空については代表駅や市街地から空港まで離れている場合が多く，2 次交通の影響を排除するために都道府県内で最大の規模の地方空港を基準に区間経路をまとめた．さらに，アクセス・イグレスの区間経路については幹線交通を極力使用しない所要時間最短の経路を Yahoo!乗り換え検索により求めている．なお集計の都合上，空港に国内定期便の発着がない，あるいは空港の存在しない県については航空の区間経路を検索する際に府県内の空港ではなく代表駅を代わりに用いたが，これらを使用する区間経路は検出されなかった．

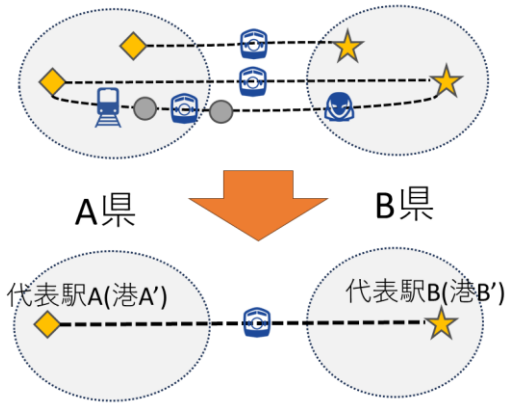


図-9 区間経路の統合の概念図

したがって，A 県から B 県へ結ぶ区間経路は幹線交通ごとに 1 本のみ設定され，B 県で幹線交通を乗り継いで C 県に向かう場合もこの 1 本の区間経路を使用したという仮定が行われている．このため，例えば金沢から特急により名古屋まで向かう場合は，全員が名古屋駅まで乗り通すとみなされ，米原駅で新幹線に乗り継ぐ経路は成立しないことに注意が必要である．

(3) 乗り継ぎを区別しないモデル

まず単純な乗り換え回数による経路選択行動への影響を調べるため，前後の幹線交通の種類や乗り継ぎ地点に関わらず，乗り換え 1 回あたりの効用は一定，つまり$\beta_{\mathrm{transfer}} = \beta_{\mathrm{dtf}}$としてモデルの推定を行った．推定を行った結果を表-6 に示す．

表-6a より，擬似 R^2 値から推定結果がさほど悪くないことが分かる．その上で，各係数について全てマイナスであることから，運賃・所要時間・乗り換え or 乗り継ぎ回数が大きいほど経路が選択されにくくなる，つまり抵抗となるという結果が現れ，これは一般的な経路選択の想定と一致する．なお，参考として経路の説明変数の平均値を係数にかけたものを平均効用として表に掲載した．この結果から概ねどの係数も経路に一定の効用を与えていると考えられる．

(4) 乗り継ぎ地点ごとに異種幹線交通の乗り継ぎを区別するモデル

続いて，異種交通機関の乗り継ぎについて，その乗り継ぎを行った地点lごとに乗り継ぎダミー$\beta_{dtf,l}$を置いてモデルの推定を行った．結果を表-7 に示す．

$\beta_{\mathrm{dtf},l}$について$\beta_{\mathrm{transfer}}$と比較すると，同じ 1 回の乗り換えであっても，乗り継ぎ抵抗の大きさが一般的な乗り換えと異なり，またその傾向も地点によって異なるという結果が得られた．ただし代表駅から空港への 2 次交通による移動をモデル内では考慮していないため，例えば東京都内で新幹線から飛行機に乗り継ぐ場合，東京駅から羽田空港までの 2 次交通の負担が乗り継ぎ抵抗β_東京都として表れている可能性に注意が必要である．

表-7c の分換算の列は，各係数の推定値をβ_{time}で割った値であり，乗り継ぎ1回の効用を所要時間(分)に換算した場合の大きさを示す．例えば，大阪府で鉄道から航空に幹線交通を乗り継いだ場合の旅行者の感じる負担は 95 分といえる．また，同じ幹線交通種の乗り換え 1 回が同様に分換算で 42 分であることから，乗り継ぎ地点が大阪府の場合，異種の幹線交通の乗り継ぎは同種の幹線交通の乗り換えより大きい．

表-6a 乗り継ぎを区別しない場合のモデルの推定結果
(尤度・AIC)

指標名	値
NULLモデルの対数尤度	−5000.34
モデルの最終対数尤度	−3008.19
$\bar{\rho}^2$値(調整済み疑似R^2値)	0.398
AIC	6022.379

表-6b 乗り継ぎを区別しない場合のモデルの推定結果
(係数の推定結果)

係数名	推定値	標準偏差	p値	平均効用
β_{fare}	−3.72E−05	4.11E−06	0	−0.99
β_{time}	−0.00876	0.000403	0	−2.37
$\beta_{\mathrm{transfer}}$	−0.800	0.0336	0	−0.79

表-7a 乗り継ぎ地点ごとのモデルの推定結果
(尤度・AIC)

指標名	値
NULLモデルの対数尤度	−5000.34
モデルの最終対数尤度	−2963.46
$\bar{\rho}^2$値(調整済み疑似R^2値)	0.406
AIC	5942.923

表-7b 乗り継ぎ地点ごとのモデルの推定結果
(運賃・所要時間・乗り換えダミーの係数)

係数名	推定値	標準偏差	p値	平均効用
β_{fare}	−4.70E−05	5.72E−06	0	−0.94
β_{time}	−0.0114	0.00057	0	−2.35
$\beta_{transfer}$	−0.48	0.0348	0	−0.89

表-7c 乗り継ぎ地点ごとのモデルの推定結果
(地点ごとの乗り換え抵抗値)

β 乗継地点	推定値	標準偏差	p値	時間換算(分)
東京都	−1.989	0.097	0	174
京都府	−2.525	0.752	0.00079	221
大阪府	−1.087	0.338	0.00128	95
兵庫県	−0.387	0.164	0.01824	34
徳島県	−1.256	0.124	0	110

表-8a 乗り継ぎ地点・幹線交通ごとのモデルの推定結果
（尤度・AIC）

指標名	値
NULLモデルの対数尤度	−5000.34
モデルの最終対数尤度	−2838.82
$\bar{\rho}^2$値（調整済み疑似R^2値）	0.429
AIC	5709.639

表-8b 乗り継ぎ地点・幹線交通ごとのモデルの推定結果
（運賃・所要時間・乗り換えダミーの係数）

係数名	推定値	標準偏差	p値	平均効用
β_{fare}	−5.38E−06	7.43E−06	0.469	−0.14
β_{time}	−0.0065	0.00061	0	−1.76
$\beta_{transfer}$	−0.924	0.0429	0	−0.92

表-8c 乗り継ぎ地点・幹線交通ごとのモデルの推定結果
（地点ごとの乗り換え抵抗値）

β			推定値	標準偏差	p値	時間換算
地点	元	先				
東京都	鉄道	航空	−3.591	0.333	0	552
東京都	鉄道	バス	1.168	0.668	0.08	−180
東京都	バス	航空	−1.351	0.105	0	208
東京都	他	航空	−2.881	0.181	0	443
東京都	他	鉄道	−1.52	0.588	0.01	234
京都府	鉄道	バス	−2.098	0.851	0.014	323
大阪府	航空	バス	−1.741	0.602	0.004	268
大阪府	鉄道	バス	−0.604	0.576	0.294	93
兵庫県	鉄道	バス	−0.044	0.178	0.804	7
徳島県	航空	バス	−2.424	0.587	0	373
徳島県	航空	他	−2.495	0.215	0	384
徳島県	鉄道	航空	−2.078	0.776	0.007	320
徳島県	鉄道	バス	−0.025	0.159	0.875	4

(5) 乗り継ぎ地点・幹線交通ごとに区別するモデル

前節では乗り継ぎ前後の幹線交通の選択によって乗り継ぎ抵抗の大きさが異なる可能性が指摘された．このため，乗り継ぎ地点l，乗り継ぎ元幹線交通m，乗り継ぎ先幹線交通n全てにそれぞれ乗り継ぎダミー$\beta_{\mathrm{dtf},l,m,n}$を置き，モデルの推定を行った結果を表-8 に示す．

前 2 つのモデルと異なり，複数の係数で標準偏差が大きくなるなど当てはまりが悪化した．特に経路の運賃に関する係数は極端な p 値の悪化と効用に対する影響の低下が見られる．これは経路の本数に対して乗り継ぎダミーの数があまりにも大きいことにより，一部の乗り継ぎダミーと経路が 1 対 1 で結びついてしまっているため，乗り継ぎダミーとしての適切な推定が行われていないことによる問題と考えられる．

乗り継ぎダミーについてそれぞれの大きさを比較する．東京都においては鉄道から航空への乗り継ぎ抵抗が，バスから航空への乗り継ぎ抵抗に対して明らかに大きいことがわかった．よって，航空とバスが，鉄道と比べてより密接にネットワークとして結びついていることが，利用者の経路選択行動からも推定することができた．しかしながら，多くの乗り継ぎダミーの係数で有効水準 5%を満たせなかったため，あくまで一部の地点でそのような傾向が示唆されたに過ぎず，また前 2 つのモデルと比較してこのモデルそのものの妥当性についても疑問である．

5. まとめ

本研究では，航空，鉄道，バスの各交通モードを排他的に選択する移動だけでなく，それらを相互に組み合わせた移動の経路選択行動に着目し，純流動調査を通じてその移動実態の解明を試みた．その結果，全国の長距離幹線交通では，複数の交通モードを組み合わせた移動が，全体の 5%以上と少数派ではあるが流動として無視できないほど観測されていることがわかった．とくに地方都市間の移動においてはわずかなサンプルではあるが，幹線交通の乗り継ぎを必要とする場合が多いことが示唆された．一方で長距離旅客にとって，これら幹線交通間の乗り継ぎは負担となっていることが数理モデルによる解析で明らかになった．この結果は，全国への高速交通網の整備が進んだ 2015 年現在においても，地方都市 と大都市の間で依然として交通ネットワークの利便性に格差が生じていることを示唆している．

さらに，2015 年から純流動調査の対象となった新高速乗合バスをふくむ幹線バスは，航空との結びつきが鉄道と比較して強く，ネットワークとしてこの 2 つを考える際は，これらのネットワークの接続性について考慮する必要があることがわかった．

本研究の課題として，旅行者の移動経路や流動量を純流動調査による統計データから算出しているため，すべての結果が純流動調査に依存することが指摘される．純流動調査は年間のうち 2 日のアンケート調査によって行われているため，石川県～徳島県のように流動量が少ない地方都市間においては調査によってある移動経路が偶然補足された，あるいはされなかったという問題が生じている可能性が考えられる．このような少数のサンプルによる問題を解決するためには，徳島着だけではなく，より多くのデータを適用した推定を行うことが望ましい．この点については，今後改良を進めていく予定である．

これに付随して，4.で用いた多項 Logit モデルでは経路の重複性を考慮していないため，日比野ら [6]によって指摘されている IIA 特性の問題について何ら手立てを講じておらず，実用に耐えるモデルとは言い難い．さらに本研究では純流動調査で捕捉されている旅行客の年齢やグループ構成といった個人属性や出発時間，到着時間を考慮していない．そのため今後は純流動調査だけでない移動経路の推定や，さ

らに個人属性を考慮した経路選択モデルへの発展させる予定である.

謝辞:本研究は, 科学研究費補助金 20H02270, 20H02267, 21H01455, 22H00222 として支援を受けた研究活動による成果の一部です. また, 本研究にあたり経路選択行動や純流動調査の取り扱いについて助言いただいた, 東北大学 奥村研究室・広島大学 塚井研究室・埼玉大学 須ヶ間研究室の皆様にこの場を借りてお礼申し上げます.

NOTES

注1) 例として, 鈴木ら [7]によるバス・タクシー間の乗り継ぎ意思に関する研究や, 高橋ら [8]による市中心部での公共交通への利用者誘導に関する実証実験などが挙げられる。

注2) 柴田, p.47

注3) この他に平日の個票データとそれらを集計した都道府県間流動表や OD 別交通サービス水準などが提供されている.

注4) いわゆる新幹線や有料特急列車を指し, 通勤電車やローカル線は純流動調査の対象外である.

注5) 例えば東京都から大阪府までの鉄道の区間経路は代表駅の東京駅から大阪駅までで乗り換え検索を行ったため, 新大阪駅から大阪駅までの 2 次交通である普通電車の運賃と東海道新幹線からの乗り換え待ち時間が含まれる.

REFERENCES

1) 杤元 淳平, 塚井 誠人, 奥村 誠:複数経路を考慮した鉄道・航空ネットワークの評価, 土木計画学研究・論文集, 土木学会, 20 巻, p. 255-260, 2003. [Hazemoto, J. and Tsukai, M. and Okumura, M.: Evaluation of Rail/Air Network Considering Alternate Paths, *INFRASTRUCTURE PLANNING REVIEW*, 2003, Volume 20, Pages 255-260]

2) 柴田 宗典, 奥田 大樹, 鈴木 崇正:交通機関の乗継を考慮した幹線鉄道の需要予測モデル, 鉄道総研報告, 鉄道総合技術研究所, 28 巻, 4 号, p.47-52, 2014-04. [Shibata, M. and Okuda, T. and Suzuki, M.: Demand Estimation Model of Inter-Regional Railway Passengers Considering Multi-Mode Route Alternatives, *RTRI report*, Vol. 28, Issue 4, p.47-52, 2014-04.]

3) 国土交通省:全国幹線旅客純流動調査, 第 6 回, 2015. [Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: Survey on Trunk Passenger Flow, *Japanese Government Statistics*, 6th, 2015.]

4) 国土交通省:幹線旅客純流動の実態, 全国幹線旅客純流動調査, 第 6 回, 2015. [Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: Inter-Regional Travel Survey in Japan, *Survey on Trunk Passenger Flow*, 6th, 2015.]

5) Michel Bierlaire: A short introduction to Biogeme, *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*, 2023.

6) 日比野 直彦, 兵藤 哲朗, 内山 久雄:高密度な鉄道ネットワークへの実適用に向けた非 IIA 型経路選択モデルの特性分析, 土木学会論文集, 土木学会, 2004 巻, 765 号, p. 131-142, 2004. [Hibino, N. and Hyodo, T. and Uchiyama, H.: A Study on Characteristics of Non-IIA Route Choice Models on High Density Railway Network, *DOBOKU GAKKAI RONBUNSHU*, Volume 2004, Issue 765, Pages 131-142, 2004.]

7) 鈴木 雄, 日野 智, 西 颯一郎, 山崎 基浩:タクシーとバスの乗り継ぎ施策に関する意識分析, 交通工学研究発表会論文集, 交通工学研究発表会, 42 巻, p. 831-836, 2022. [Suzuki, Y and Hino, S. and Nishi, S and Yamazaki, M.: A Consciousness Analysis Regarding Taxi and Bus Transit Policy, *Proceedings of the Conference of Japan Society of Traffic Engineers*, Vol. 42, p. 831-836, 2022.]

8) 高橋 洋二, 久保田 尚, 尾座元 俊二:市民参加による鎌倉市・公共交通乗り継ぎシステム実験, 都市計画論文集, 34 巻, p. 937-942, 1999. [Takahashi, Y. and Kubota, H. and Ozamoto, S.: Experiment of Eco-free Thicket System in Kamakura City, *Journal of the City Planning Institute of Japan*, Vol. 34, p. 937-942, 1999.]

(Received October 13, 2023)
(Accepted ? ?, ????)

ANALYSIS OF INTER-REGIONAL TRAVEL BEHAVIOR INCLUDING TRANSFERS BETWEEN MULTIPLE MODES OF TRANSPORTATION

Mitsutoshi UCHIDA and Hiromichi YAMAGUCHI

In this study, we focused on the route selection behavior of inter-regional travelers who combining with air, rail, and bus transportation modes, and attempted to clarify the actual situation based on the Inter-Regional Travel Survey. The results showed that combinations of multiple transportation modes are observed in not a small proportion of all long-distance flows in Japan, and that the trends of these transfer behaviors are different between region to region. Also, we make mathematical modeling of route choice behavior including transit confirms the existence of transit resistance, and that suggest regional disparities in the convenience of the transportation network in Japan.