

京都大学大学院工学研究科  
都市社会工学専攻修士論文  
平成24年2月28日



Master's Thesis  
Department of Urban Management  
Graduate School of Engineering  
Kyoto University  
February 28, 2012

---

## 地域ソーティングを通じた 都市構造の内生的形成

京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻

都市社会計画学講座 計画マネジメント論分野

福井 浩

## 要 旨

人々は交通モード選択の際、各モードの持つ客観的特性だけでなく、各モードを利用することで得られる心理的効用も考慮して選択を行っている。人々が自分の好む交通モードが利用しやすい居住地を選択する傾向にあるとき、居住地ソーティングが起こっているという。この居住地ソーティングを通じて都市構造が大きく変わる可能性があるが、交通モードに対する選好とソーティングに関する研究はいまだ十分な研究がなされていない。

本研究では人々の交通モードに対する選好を明示的に扱うシミュレーションモデルを構築し、ソーティングのメカニズムと都市構造への影響について分析する。その上で人々の選好に影響を与えるような政策の役割についての考察を行う。さらにパーソントリップ調査データに基づく実証分析によって現実でのソーティングについて検証する。

# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 本研究の背景	1
1.2 本研究の目的	4
1.3 本論文の構成	5
<b>第2章 従来の研究と本研究の位置づけ</b>	<b>6</b>
2.1 従来の研究	6
2.1.1 ソーティング	6
2.1.2 交通モード間の競合における複数均衡解	9
2.1.3 都市形成メカニズム	10
2.1.4 Tieboutモデル	10
2.2 本研究の方針	12
<b>第3章 計量経済学における内生性</b>	<b>13</b>
3.1 内生性	13
3.1.1 内生性バイアス	13
3.1.2 内生性発生メカニズム	14
3.1.3 交通分野における内生性	15
3.2 内生性への対処方法	16
3.2.1 操作変数法推定量(IV推定量)	16
3.2.2 離散選択モデルにおける内生性対処	17
3.3 BLPアプローチ	18
3.3.1 パラメータ推定	19
3.4 コントロール関数アプローチ	21
3.4.1 ブートストラップ法による標準誤差の補正	25
3.5 ソーティングと内生性	25

<b>第4章</b>	<b>モード選好を考慮した地域・交通選択モデル</b>	<b>27</b>
4.1	基本モデル	27
4.1.1	モデル化の前提条件	27
4.1.2	通勤費用の定式化	28
4.1.3	家計の行動	28
4.1.4	地域政府の行動	29
4.1.5	地域移動・モード変更	29
4.1.6	同質家計の均衡状態	30
4.1.7	数値シミュレーション	31
4.2	選好異質性モデル	34
4.2.1	分析目的	34
4.2.2	交通モードに対する選好の異質性	35
4.2.3	心理的効用関数	35
4.2.4	家計の行動	35
4.3	数値シミュレーション	36
4.3.1	セットアップ	36
4.3.2	選好強度の違いによる均衡変化	36
4.3.3	心理的選好と都市構造の関係	38
4.3.4	ハード面の政策の効果	39
4.3.5	居住地移転費用を考慮したモデル	40
4.4	政策的含意	41
<b>第5章</b>	<b>ソーティングの検証</b>	<b>45</b>
5.1	分析目的	45
5.2	分析の仮定と課題	45
5.3	対象地域とデータ	46
5.4	モデル	46
5.5	操作変数	47
5.6	推計結果及び考察	48
5.7	政策的含意	49
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>50</b>

参考文献

55

附录 A 导出过程

付-1

# 第1章 序論

## 1.1 本研究の背景

地球環境問題の深刻化，都市のスプロール化，自動車依存といった問題を受け，近年先進国を中心に持続可能な都市形成のための施策が検討されている．コンパクトシティという概念はヨーロッパで提唱され，現在における持続可能な都市構造を議論する上で欠かせないものとなっている．スプロール化の進んだ米国においてはニューアーバニズム，スマートグロースといった概念の基，高密度でコンパクトな都市形成へ転換し都市の効率的開発を目指している．具体的には Transit Oriented Development(TOD; 公共交通指向型開発)を軸に政策が進められている．これらの基本的な考え方は公共交通機関を基盤として人々の生活行動圏をコンパクトにすることであり，自動車トリップの発生を抑え，公共交通，徒歩や自転車といった交通手段に転換を図っている．<sup>1)2)</sup>人口減少，高齢化が進展する日本においても，持続可能なまちづくりの達成，都市経営の効率化を目標とした集約型都市構造が重要な課題となっている<sup>3)4)</sup>．近年では「低炭素都市づくりガイドライン」が整備され，各地方自治体における低炭素都市づくり施策の検討を支援している．その中でも交通・都市構造分野に分野における低炭素対策の例として集約型都市構造への転換，公共交通の整備が挙げられており，具体的取り組みとして富山市の公共交通沿線居住推進事業や富山ライトレールの整備が挙げられている．集約拠点と都市圏内のその他の地域を公共交通ネットワークで有機的に連携させる「集約型都市構造」を実現することで、都市圏内の多くの人にとっての暮らしやすさと当該都市圏全体の持続的な発展を目指している．

ところで，都市のコンパクト化推進により自動車依存型都市構造を脱却するというような議論は居住地環境が交通行動に影響を与えるという，一方向の因果関係を前提としている．しかし，居住地を選択する時点で，居住地移転後の交通行動を考慮している可能性も当然考えられる．

一般的な交通モード選択モデルは各モードが有する交通サービス水準によって行動が大部分決定される仕組みになっている．つまり各モードの道具的機能を重

視したモデルになっていた。しかしDittmar<sup>5)</sup>は物的財産の保持・利用には道具的機能 (instrumental functions) 象徴的機能 (important symbolic) 情緒的機能 (affective functions) の3つが存在することを提唱している。道具的機能はある財の保持・利用により保持者・利用者が利便を得ること、象徴的機能はある財の保持・利用により保持者・利用者の所属する集団・階級を表明すること、情緒的機能は或る財の保持・利用により保持者・利用者の情緒的満足感が得られることをそれぞれ意味する。本研究では象徴的機能と情緒的機能から得られる効用を心理的効用と呼ぶ。この部分に関して既存の交通モード選択モデルは明示的な取り扱いをしていなかった。しかし居住地選択時において交通行動を考慮する場合、道具的機能から得られる効用だけでなく、象徴的機能・情緒的機能から得られる心理的効用も考慮に入れている可能性がある。よって、分析においても心理的効用を明示的に取り扱うべきであろう。そうすることで、意味ある政策的示唆が得られるだけでなく、計量経済学的見地からもパラメータ推定バイアスを防ぐという利点が生まれる。

人々は各交通モードに対して実際にその交通モード利用を選択したとき得られる心理的効用の度合いを事前に把握している。選択したモード利用により、道具的機能から得られる効用に加えてその度合いだけ心理的効用を獲得する。居住地選択時点において、居住地選択後に利用する交通モードを考慮する場合、この心理的効用の存在も意思決定に係る要素となる。この場合、居住地域の選択肢の中でも、人々は自分が選好を持つ交通モード(最も大きな心理的効用を獲得できる交通モード)のインフラ整備水準が高い地域に居住する可能性は高くなると考えられる。つまり、公共交通を好む人々は公共交通のインフラ整備水準の高い地域に居住する割合が高くなり、逆に車利用がしやすい郊外地では車に対して選好を持つ人々が居住する割合が高くなる。このような「棲み分け」現象が起こる可能性は十分に考えられる。本研究ではこのような現象をソーティングと呼び、そのメカニズムを理論的に分析し、実データを用いて検証を行う。このように交通モード選択における心理的効用の存在が居住地ソーティングを通じ都市構造を変えていくというシナリオが考えられる。このとき、公共交通利用を中心とした集約型都市の実現を目指す場合、公共交通を利用することに対する心理的効用の度合いを高めていく政策は極めて重要となるであろう。

行動者の心理的効用に働きかけるソフト面の交通施策の代表的な活動として、モビリティ・マネジメントが挙げられる。モビリティ・マネジメントとは一人一人の

移動が、社会にも個人にも望ましい方向に自発的に変化することを促す、コミュニケーションを中心とした交通施策のことであり、既に多くの取り組みとその成果報告がなされている。モビリティ・マネジメントのコミュニケーションプログラムの中でもTFP(トラベル・フィードバック・プログラム)は海外をはじめ日本でも実務面での実績が積み重ねられている。TFPは「人々が、自動車利用抑制などの協力的行動を自主的に実行するようになることを目的として、いくつかのコミュニケーション技術を組み合わせることにより構成された、複数回の接触と双方向の情報のやりとりを前提としたコミュニケーション・プログラム」<sup>6)</sup>と定義される。その具体的コミュニケーション技術としては協力的行動を呼びかける「依頼法」、協力的行動の実行についての情報提供を行う「アドバイス法」、協力的行動のための具体的行動プランを要請する「行動プラン法」、過去のコミュニケーションによって得られた情報をフィードバックする「フィードバック法」などが挙げられる。モビリティマネジメントの取り組みは日本では国や地方自治体が主体となっているが、交通事業者が主体となったモビリティ・マネジメントも今後発展していく必要がある。谷口<sup>7)</sup>はボローニャ市交通局とウィーン市交通局のモビリティマネジメントの取り組みを報告している。その取り組みは主に顧客対応システムの整備、公共交通利用に関するイメージアップ戦略であり、人々が公共交通を利用する際の心理的効用を高める努力をしているといえる。モビリティ・マネジメントの他にも今後進展する可能性のある新たな取り組みとして、主にwebマーケティング分野で注目されている「ゲーミフィケーション<sup>8)</sup>」が挙げられる。ゲーミフィケーションの定義は応用対象などに応じいくつか存在するが、「ゲームでない分野にゲームの要素・メカニズムを応用することでユーザエンゲージメント、顧客満足・顧客ロイヤリティの向上を図ること」として一般に捉えられる。近年、webサイトへの応用だけでなく、実社会にまでその応用範囲は広がっている。実社会にゲーミフィケーションの考えを応用し例として、スウェーデンで導入された自動車運転速度抑制対策「The Speed Camera Lottery」が挙げられる。制限速度を守ったドライバーの中から抽選で選ばれた人に、違反者から徴収したお金を宝くじ形式でプレゼントする仕組みである。3日間、2万4000台の車を対象に実施した結果、平均速度が22%減少したという報告がなされている。ゲーミフィケーションの考えを導入し、公共交通利用の活性化を促す取り組みも既に存在する。2010年11月よりロンドン市内で開始された「Chromaroma」と呼ばれるサービスである。ロンドンの非接触型



ICカードOyster Card（オイスターカード）を使った位置連動サービスの一種であり、地下鉄の改札やバスの乗車時にカードを使用するごとに位置情報を記録する。移動頻度などに応じてポイントが加算され、他のユーザと競い合うことができる。様々なミッションも用意されるなどゲーム性を持ち込んでいることが特徴である。このような取り組みは公共交通自体のサービスの改善ではなく、利用者の心理に働きかけるものであり、ソフト面での交通施策の一環としても捉えることができる。従来のモビリティマネジメント施策が知識移転を重点としていたのに対し、Chromaromaは公共交通利用自体に「新たな」刺激・楽しみを持たせる意味で異なる方向性といえる。

以上のように、交通サービス水準を改善するハード面の施策ではなく、利用者心理に訴えかけるソフト面の施策が進展している。

人々が各人の交通モードに対する選好に基づき居住地を選択するという棲み分け現象が現実に起こっているとすれば、人々の選好に訴えかけるソフト面の交通政策が都市政策としても機能することになる。特にモビリティマネジメントのように公共交通利用を促進するような施策は人々の公共交通に対する選好を強化し、公共交通インフラ整備が整った地域に棲み分けを行う人口が増加するシナリオが予想される。つまり、公共交通利用を軸とするコンパクトシティの実現において、ソフト面の交通施策は非常に有効となりうる。こうしたTFPによるコミュニケーション施策、人々の心理に訴える公共交通業者のエモーショナルキャンペーン、ブランド戦略といった施策が長期的には都市構造変化をもたらす可能性があることは既にいくつかの先行研究からも指摘されている<sup>9)10)</sup>。しかし、その都市構造変化のメカニズムについて理論的な分析はなされていない。

## 1.2 本研究の目的

本研究では交通モードに対する心理的効用を明示的に取り扱った数理モデルを構築する。このモデル上において、居住地移転の際もこの心理的効用項を考慮して選択を行っているという行動仮説を設ける。数値シミュレーションを通じ、心理的効用の存在と都市構造変化の関係について分析を行う。分析結果から、都市構造変容プロセスにおいてソーティング行動が重要な働きを持つことを明らかにする。次に、パーソントリップデータを用いた実証分析を行うことで、家計の

ソーティングが現実に起こっている可能性を指摘する．これにより理論モデルでの家計の行動仮説が支持され，ソフト面の交通施策が都市構造変化をもたらすというシミュレーション結果に妥当性を持たせることが可能となる．

### 1.3 本論文の構成

本論文は6章から構成される．本章では，コンパクトシティの議論において，人々の心理的効用に訴えるソフト面の交通施策の重要性について述べた．**第2章**では従来の研究についてソーティングとモデル分析手法を中心に文献調査を行い，既存の研究結果，分析の方法論について特徴を整理する．それに基づき本研究の分析の方針を明らかにする．**第3章**では交通モード選択における心理的効用の存在がもたらす内生性の問題について整理を行う．内生性によって通常モデル推定ではパラメータ推定にバイアスがかかってしまうという問題が生じる．計量経済学的見地からそのメカニズムを明らかにし，内生性対処方法についてBLPアプローチ，コントロール関数アプローチの2つを取り上げ整理する．**第4章**では心理的効用を明示的に考慮した理論モデルを構築し，シミュレーション分析を行う．これによりソフト面の交通施策が都市構造変化をもたらすメカニズムについて示唆を得る．**第5章**ではコントロール関数アプローチによって家計のソーティング行動について検証を行う．これにより**第4章**のシミュレーション結果の妥当性を確認する．最後に，**第6章**にて本研究で構築した各モデルの特徴を整理するとともに，これらの分析を通じて得られた知見を総括する．そして今後の研究に残された課題について言及する．

## 第2章 従来の研究と本研究の位置づけ

### 2.1 従来の研究

まず, 本研究でポイントとなるソーティングについてレビューを行い, ソーティングの定義と本研究での取り扱いを明確化する. 次に, モデル化するにあたりこれまでの交通・都市経済理論について既存の方法論, 結果を整理する. その上で本研究の分析方針を定める.

#### 2.1.1 ソーティング

都心部では公共交通利用の割合が高まり, 郊外地では車の利用が高まるなど一般に異なる地域には交通行動の違いが観測される. このような交通モード分担率の違いを生み出している理由として, 地域毎の提供する交通サービス水準, 地域アメニティなどの外的環境が人々の交通モード選択に影響を与えていることが考えられる. 一方, 先に言及したように個々人があらかじめ交通モードに対して選好を持っており, この選好を所与とした上で居住地選択を行っていることも考えられる. つまり, 自分の好む交通モードが利用しやすい居住地を選択する傾向にあるという可能性である. このような仮説は家計の居住地自己選択あるいは居住地ソーティングとして知られる. 本研究ではこのような行動仮説を一貫してソーティングと呼ぶことにする. 一般に, 個々人が異なるグループにランダムに振り分けられずに「意思をもって」そのグループを選択する状況が背後にあるとき, データ上観察されるグループ間の性質の違いはソーティングとして説明される. このようなソーティングの可能性を考慮せずにパラメータ推定を行うと, バイアスのかかった推定となってしまう. ある居住地区が提供する交通インフラ整備水準が家計の交通モード選択に及びず影響を推定する場合を考えよう. 自分の好む交通モードのインフラ整備が整った居住地を既に選択しているとき, ソーティングが発生している. この場合, 家計がある交通モードを選択するとき, その要因は交通インフラ整備水準がもたらす効果とソーティング効果が考えられるで

あろう。しかしソーティングを考慮しない場合交通インフラ整備水準の効果を過大評価してしまうことになる。

ソーティングは一般的に「社会経済変数」と「態度」によって引き起こされるものとして考えられる<sup>11) 12)</sup>。ここで態度には様々な定義がなされうるが、本研究で態度と言うときは、既に言及したDittmar<sup>5)</sup>の象徴的機能、情緒的機能から生まれる心理的効用として捉え、特に交通モードに対象を限定する。

社会経済変数によるソーティングの例として、収入が低く車を保有していない家計が公共交通サービスの整った地域に住むことを選択する場合などが挙げられる。「態度」によるソーティングの例としては、環境負荷を考え公共交通利用に対して協力したいと考える家計は公共交通サービスが整備された地域に住もうとする傾向が考えられる。また逆に車の運転が好きで自由トリップに比較的便利な郊外地に住むことも考えられるであろう。

地域間の交通行動の違いが各地域の交通インフラ整備水準とソーティングによって説明されるとき、それぞれがどの程度その違いに寄与しているのかを把握することは、政策を検討する場合にも重要となる。近年実証研究が様々なアプローチによりソーティングについての実証研究が蓄積されているが、それぞれの結果にはばらつきがある。

Cerveroら<sup>13)</sup>は通勤目的の交通手段選択を対象に、居住地選択と交通手段選択を同時に推定するNested Logitモデルを構築し分析を行っている。公共交通付近に居住者と公共交通から離れた居住者間でオッズ比を比較することにより、居住地ソーティングが鉄道による通勤手段選択の約40%を説明することを示唆した。Cao<sup>14)</sup>はHeckmanのサンプルセレクションモデルを用いて交通インフラ整備水準が車両走行距離に与える影響を分析した。ソーティングを考慮して推定した結果、地域差がもたらす走行距離に与える影響の76%が交通インフラ整備水準によってもたらされるという結果を得ている。

ソーティング効果の説明力が支配的であり、交通インフラ整備水準が交通行動に及ぼす影響は大きくないとする結果も存在する。Kitamuraら<sup>15)</sup>はSan Francisco Bay Areaの5つの地域を対象とし、生活にかかわる態度因子を明示的に組み入れた多変量解析を行った。交通インフラ整備環境の要素は弱い説明力しか持たず、態度因子が重要であると結論づけ、態度変容を働きかけなければ土地利用政策は交通行動を変化できない可能性を示唆した。Bagley<sup>16)</sup>らは態度を明示的に構造方程

式モデル組み込み，ソーティング効果の分析を行った．態度やライフスタイルに関する変数が交通行動に対して強い影響を持っており，ソーティング効果が制御された場合，インフラ整備水準はわずかな影響しかもたないといった結果を得ている．

一方，交通インフラ整備環境が交通行動に大きな影響を持ち，ソーティングの影響はさほど大きな問題とならないという報告も存在する．Chatman<sup>17)</sup>は異なる交通手段におけるトリップ頻度の違い負の二項モデルを用いて分析を行った．調査の結果大部分の家計が居住地選択の際交通アクセスを考慮していることがわかったが，ソーティングの存在は交通インフラ整備水準の推定結果にそれほど大きな問題を及ぼさないことを主張している．すなわち，ソーティングは推定バイアスを発生させるが，そのバイアスはそれほど大きくないと主張している．

日本の土木計画分野においても，本研究と同様の立場をもった研究がある．島岡ら<sup>9)</sup>はコンパクトな都市環境を整備したとしても，そこでの居住者が交通行動変容の意図を顕在化できなければ，交通環境負荷や市街地の賑わいは何も対策を打たない場合に比較してほとんど改善されない可能性を指摘している．藤井らは<sup>7)</sup>コンパクトシティ実現に向けた交通政策のあり方を考えるうえで，人々の交通行動と居住地選択行動の因果関係に関する実証分析を行った．自動車利用傾向の強い個人は居住地選択において都市の郊外化を促進するように居住地の選択を行い，自動車利用傾向の弱い個人はコンパクトシティを形成を促進するように居住地選択を行うという仮説を立て，特定地域への転入者を対象としたアンケート調査をもとに相関分析を行っている．分析の結果この仮説は統計的に支持されることが示され，これまで交通政策の文脈で議論されてきたモビリティマネジメント施策が都市政策の一環として議論されうることを示唆した．

Mokhtarian and Cao<sup>11)</sup>やCaoら<sup>12)</sup>によって，ソーティングの存在に対処する方法論の整理と実証研究の詳細なレビューが行われている．Caoら<sup>12)</sup>の分類に従えばソーティングに対する分析の方法論は直接調査法，統計管理手法<sup>15)</sup>，操作変数法<sup>48)</sup>19)，サンプルセレクションモデル，同時選択モデル，構造方程式モデル<sup>16)</sup>20)，縦断的デザイン，傾向スコア解析<sup>21)</sup>，相互依存選択モデルの9つに分類される．このように，居住地ソーティング効果の検証について様々なアプローチが取られてきた．本研究では第5章においてソーティングの検証を行うが，その方法論としてBoarnet<sup>48)</sup>，Khattakら<sup>19)</sup>と同様に操作変数法を用いた計量経済学的手法を採用する．ただし

Boarnetらはトリップ頻度数を従属変数とした線形回帰式内で内生性に対処したのに対し、本研究では交通モード選択を対象とした離散選択モデルの枠組みの中で内生性対処を試みる。居住地ソーティング効果は人々の交通行動に対する潜在意識によって変わると考えられ、各国で慎重に検討されるべきであるが日本において実証研究の事例の蓄積はほとんど進んでいない。

### 2.1.2 交通モード間の競合における複数均衡解

交通サービスの供給は他の有形財やサービスと異なり特徴的な経済的特性をもつ。交通サービスが場所の移動を伴うことから、大規模な投資が必要となることがそのひとつとして挙げられる。つまり、固定費の割合が大きくなる。鉄道の場合、全体の費用の半分以上が固定費用である。この固定費の存在は規模の経済を生み出す要因となる。鉄道利用者が多くなれば経営効率が改善する。この特徴はバスなど他の公共交通にもあてはまる。一方、道路利用にあたっては利用者が増加しすぎると混雑という外部不経済が生じてくる。このような特性を持った交通モード間の競合では複数均衡解が生じることが既存の研究より報告されている。Kitamura<sup>22)</sup>はモータリゼーションの自己組織化メカニズムについて社会的ジレンマ構造とポジティブフィードバックをその要因として指摘した。居住地域と就業地域がひとつずつ存在し、地域を結ぶひとつの道路が存在する単純な都市を想定し自家用車とバスのモード間での競合を分析している。数値シミュレーションの結果、自家用車利用者の割合が65パーセント以下の場合、自家用車の方が一般化費用が小さいという結果が得られている。一方で自家用車利用者とバス利用者を合計した通勤者一人当たりの一般化費用は、自家用車利用者が27パーセント付近で最小となっていることが判明した。この結果より、各個人が自分にとって望ましい自家用車を利用することで社会全体の平均費用が増加するという社会的ジレンマの状況が発生することを指摘した。また時間軸に沿ったシミュレーション分析により、バス利用者の減少に伴い運行頻度が減少し待ち時間が増加することと、運営費用の固定費用をより少ない利用者で負担することで運賃が上昇することによってさらにバス利用者の減少を加速させるというポジティブフィードバックの構造を指摘している。松島<sup>23)</sup>はバス市場に介在する外部経済性として道路混雑、固定費用、待ち時間、手段補完性を挙げたうえで、固定費用と手段補完

性は規模の経済性の原因となることを指摘した。手段補完性とは往路トリップと復路トリップにおいて、一方のトリップにおける交通手段選択の結果がいま一方のトリップの手段選択に制約条件として機能するメカニズムとして定義される。バス市場に規模の経済性が存在する場合市場には複数均衡が存在する可能性があり、一度効率性の悪い金公開に到達すればその状態にロックインされそこから抜け出すのは容易ではない。非効率均衡脱却施策について、ポジティブフィードバックの原因となっている手段補完性そのものを解消する代替化施策が提案されている。

### 2.1.3 都市形成メカニズム

都市形成メカニズムについては都市経済学分野を中心に多くの研究成果がある。なかでも、都市集中が起こる要因として比較優位、規模の経済、集積の経済のいずれかが存在することが条件として挙げられている<sup>24)</sup>。比較優位とは天然資源や生産要素が不均一に分布していたり、生産技術に差があるために、生産において地域間に優劣が生じることであり、その結果ある地域に特定の産業が集中することになり都市集中が起こる。規模の経済は一企業の生産が収穫逓増であることである。集積の経済は企業間取引の外部性より生じるもので、外部性を内部化することで規模の経済を発生させる。内部化される範囲が産業内の場合地域特化の経済、都市全体の範囲が都市化の経済として捉えられる。本研究で構築するモデルでは集積の経済の特性は扱わない。

### 2.1.4 Tiebout モデル

人々のソーティングを考慮した分析を行うために、本研究ではTieboutモデルの枠組みを基礎に据え置く。公共財の供給について、Samuelson<sup>25)</sup>は公共財は私的財と異なり、人々が選好を的確に顕示しないため、異質な選好を持つ人々への効率的供給は困難であるとした。これに対し、Tiebout<sup>26)</sup>は多くの公共財はそのサービスの便益が特定の地域に限定されることから、その地域に居住しない人々にとっては排除原則が適用されることに着目した。このため、人々が自由に地域間を移動することで、その移動結果が地方公共財への需要を顕示していることになり、こ

の足による投票(voting with one's feet)を通じて効率的供給がなされることを提唱した。このTieboutモデルが成立する諸前提として以下の条件が仮定されている。

1. 人々は地域間を制約なく自由に移動でき(移動コストゼロ), 各自の選好に最も合う地域に居住する。
2. 人々は各地方政府が提供する公共サービスの内容について完全な情報を持っている。
3. 人々の各選好を満足させる公共サービスを提供する地方政府が十分な数存在している。
4. 人々は勤務地の関係で居住地が制約されることはない。利子・配当所得で生活してもよいとする。
5. 地方政府間に公共サービスの便益のスピルオーバーもスピルインもないものとする。
6. 公共サービスの供給にあたっては, 居住者一人当たりの供給費用を最小にするという意味での最適人口規模が存在する。
7. 地方政府の首長は最適人口規模を上回る場合には人口を減少させようとし, 下回る場合には人口を増加させようとする。

このTieboutモデルを発展させた地域間人口配分に関する研究は既に膨大な蓄積がある。この中で, 人々の異質性表現において心理的選好の異質性に着目した研究としてMansoorian<sup>27)</sup>, 坂下<sup>28)</sup>が挙げられる。特定地域とりわけ各自のふるさとに居住することによる直接的満足感から得られる心理的効用を分析に明示的に取り入れ分析を行っている。Mansoorianは地方政府が戦略的行動をとることを想定しているが, 坂下は地方政府は近視眼的行動を取る仮定をおいている。心理的効用項を明示的に導入するという点でこれらの研究は本研究と共通するところがあるが, これらは一般的公共財供給問題を扱い交通モード選択の問題を考えていない。本研究では地域愛着の心理的効用は考えず, 交通モードに対する心理的効用項を考え, 交通モード選択問題を明示的に取り扱ったモデルを構築する。



## 2.2 本研究の方針

Kitamura<sup>15)</sup>はモータリゼーションの自己組織化のメカニズムを分析したが、本研究ではモータリゼーションの進展により到達した非効率な均衡状態から脱却するための条件とその脱却プロセスを探ることに焦点を置く。そこで、経済学理論に基づいた数理モデルを構築しシミュレーション分析を行う。モデル構築においてソーティングが発生可能な環境を用意するために2地域経済モデルを考える必要がある。Tieboutモデルを基礎とし交通モード選択の問題を導入することで、交通モード選択、居住地選択の問題を同時に考えることができる。その上で各個人の効用関数に交通モードに対する心理的効用項を明示的に導入することでソーティングが発生可能なモデルとなる。さらにシミュレーション結果の各均衡に対して心理的効用項に対する感度分析が可能となり、モビリティマネジメントなど人々の心理面に働きかける政策の評価を行うことができる。

## 第3章 計量経済学における内生性

本章は第5章にて実証分析を行う際に議論の中心となる内生性問題について、その定義、対処方法、本研究との関連性について述べる。

### 3.1 内生性

回帰モデル、離散選択モデルなどのパラメータ推定の際に置かれる基本的仮定として、説明変数と誤差項の間に相関が存在しないことが挙げられる。しかし社会科学分野におけるパラメータ推定では、この仮定がみたされない場面にしばしば直面する。一般に説明変数と誤差項の間に相関があるとき、その説明変数は内生変数と呼ばれる。説明変数が内生変数であるにも関わらず外生変数としてパラメータ推定を行うとバイアスがかかった推定結果となる。このような問題は内生性(endogeneity)問題として知られている。内生性は社会科学分野固有の観測データ特性によって生じる問題であり、計量経済学において膨大な研究蓄積がある。近年では内生性対処方法自体の進展とともに、様々な分野において内生性問題について見直され各推定手法の適用例も拡大している。後に検証を行うソーティング現象もこの内生性問題を有している。

#### 3.1.1 内生性バイアス

誤差項と説明変数が相関を持つとき、その説明は内生変数と呼ばれ、これを考慮せずに推定を行うと推定パラメータにバイアスが生じる。この歪みは内生性バイアスと知られている。内生性バイアスが発生している結果に基づく政策提言もまた誤ったものとなるため、分析者は常に内生性の存在に注意を払わなければならない。

数式的に内生性バイアスを把握する目的で、線形回帰モデルを例に説明をしておく。以下の重回帰モデルを考える。

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\epsilon} \quad (3.1)$$

$\mathbf{y}$  は  $(n \times 1)$  の被説明変数ベクトル,  $(n \times k)$  行列の  $\mathbf{X}=(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2)$  は説明変数行列,  $\epsilon$  は  $(n \times 1)$  の誤差項ベクトルを表す. 通常最小二乗法により推定パラメータベクトル  $\hat{\beta}$  の条件付き期待値は

$$\begin{aligned} E[\hat{\beta}|\mathbf{X}] &= (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'E[\mathbf{y}|\mathbf{X}] \\ &= \beta + (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'E[\epsilon|\mathbf{X}] \end{aligned} \quad (3.2)$$

と導出できる. ここで誤差項と説明変数の外生性の仮定  $E[\epsilon|\mathbf{X}] = \mathbf{0}$  が成り立つ時, 一致推定量となる.

しかし一部の説明変数  $X_2$  ( $(n \times k_2)$  行列) が誤差項と相関を持つとき, つまり  $E[\epsilon|\mathbf{X}_2] \neq \mathbf{0}$  であるとき, 推定パラメータは一致性を持たなくなる. このとき  $X_2$  は内生説明変数である.

### 3.1.2 内生性発生メカニズム

内生性発生要因として, 観測誤差, 除外変数, 同時性の3つが主要な要因として知られている.

#### 観測誤差

分析者の得られるデータは多くの場合正確な値でなく, 平均をとってあたり近似値であったり観測誤差を含んでいることが多い. 観測する説明変数に観測誤差が存在する場合, 観測される説明変数行列を  $\tilde{\mathbf{X}}$ , 真の説明変数行列を  $\mathbf{X}$ , 観測誤差ベクトルを  $\mathbf{u}$  で表すと,

$$\tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{X} + \mathbf{u} \quad (3.3)$$

の関係が成り立つ. このとき以下の関係を推定する場合,

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\beta + \epsilon \quad (3.4)$$

観測誤差データにより

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \tilde{\mathbf{X}}\beta + \epsilon - \mathbf{u}\beta \\ &= \tilde{\mathbf{X}}\beta + \tilde{\epsilon} \end{aligned} \quad (3.5)$$

の関係式により推定することになる。このとき誤差項 $\tilde{\epsilon}$ は式(3.3)より、説明変数 $\tilde{X}$ と相関している。よって内生性の問題が生じ、推定パラメータ $\hat{\beta}$ はバイアスがかかる。観測誤差による内生性が生じている時、通常の推定を行うと推定パラメータは絶対値レベルで0に近づくようにバイアスがかかってしまうこと( attenuation と呼ばれる現象)が知られている( attenuation と呼ばれる)<sup>30)</sup>。

## 除外変数

以下の関係を関係を考える。

$$y = X\beta + U\alpha + \epsilon \quad (3.6)$$

ただし $E[\epsilon|XU] = \mathbf{0}$ が成り立っている。ここで $U$ が観測されず除外変数となる場合を考えよう。このとき誤差項は $\tilde{\epsilon} = U\alpha + \epsilon$ となり、 $\alpha = 0$ でなく、 $U$ と $X$ が相関を持つとき内生性の問題が生じ、 $\beta$ の推定にバイアスがかかる。

## 同時性

被説明変数と少なくともひとつの説明変数が同時に決定される時、内生性の問題が生じる。例えば伝統的な需要と供給の方程式などにこのような同時性を見ることができる。同時決定構造を無視して個々の方程式のパラメータ推定を行うと内生性の問題により推定バイアスが生じる。

### 3.1.3 交通分野における内生性

交通分野でまず考えられる内生性発生要因は除外変数(omitted variable)の存在である。観測されない変数が説明変数と相関を持つ時、内生性バイアスが発生する。この現象は居住地自己選択(residential self-selection)問題として知られており、都市環境と交通行動の文脈で研究の蓄積が進んでいる<sup>11) 12)</sup>。除外変数による内生性は以下の式で表現される。

$$TB = g(R(AT), X) + \epsilon(AT) \quad (3.7)$$

ここでTBは交通行動、Rは居住地変数(内生変数候補)、Xは観測変数、ATは交通行動に対する態度、をそれぞれ表している。分析者が観測不可能な個々人の「交通行動に対する態度(AT)」が「居住地変数(R)」の説明変数となっている。居住地選

人は人々が交通行動に関わる居住地変数(例:駅までのアクセス距離)の組を決定することと見なせるため,この式は交通行動に対する態度(公共交通利用志向など)を所与として居住地選択を行う居住地自己選抜を表現している.この場合明らかに誤差項と居住地変数は相関を持つため,外生性の仮定は成り立たず内生性バイアスが生じる.

除外変数に観測誤差による内生性も考えられ,特に非集計モデルなど個人レベルでのデータを用いる場合,PT調査データに基づく推定では観測誤差バイアスが生じている可能性が高い.しかし観測誤差による内生性の事後的対処方法は一般に困難であるため,推定手法による内生性対処ではなく,データ収集自体の改善によって内生性を克服することが望まれる.近年開発・研究が進展しているプローブ調査手法は,観測誤差による内生性バイアスを改善するという役割も期待される.

## 3.2 内生性への対処方法

### 3.2.1 操作変数法推定量(IV推定量)

伝統的な線形回帰モデルにおいて内生性を考慮した推計方法として最も一般的な手法が操作変数法である.操作変数法により推定を行う際,まず分析者は操作変数(IV:Instrumental Variable)を見つけなければならない.後に述べるBLPアプローチやコントロール関数アプローチなどの離散選択モデルにおける枠組みでも,操作変数は中心的な役割を果たす.操作変数は以下の二つの条件を満足しなければならない.

(I) 誤差項と無相関である

(II) 内生変数と(強い)相関をもつこと

以下で表される単回帰モデルを考えよう.

$$Y_i = \beta X_i + \epsilon_i, i = 1, \dots, n \quad (3.8)$$

ここで説明変数  $X_i$  が誤差項  $\epsilon_i$  と相関を持っているとする.このとき通常のOLS推定を行ってパラメータ推定を行うと内生性バイアスが生じる.そのため分析者は

上記二つの条件を満たす変数  $Z_i$  を入手し操作変数推定を行う。操作変数の条件 (I) より,

$$\frac{1}{n} \sum Z_i(Y_i - \beta X_i) \quad (3.9)$$

が成り立ち、これより操作変数推定量は

$$\begin{aligned} \beta^{IV} &= \frac{\sum(Z_i - \bar{Z})(Y_i - \bar{Y})}{\sum(Z_i - \bar{Z})(X_i - \bar{X})} \\ &= \beta + \frac{s_{Z\epsilon}}{s_{ZX}} \end{aligned} \quad (3.10)$$

で定義される。操作変数推定量の確率極限をとると条件 (I)(II) より

$$\begin{aligned} plim\beta^{IV} &= \beta + \frac{Cov(Z, \epsilon)}{Cov(Z, X)} \\ &= \beta \end{aligned} \quad (3.11)$$

よって操作変数推定量は一致性を満足する。操作変数法で問題となるのはどのデータを操作変数として用いるかという問題である。操作変数を用いて居住地自己選択に取り組んだ既存の文献の内、Boarnet<sup>48)</sup>は黒人の割合、ヒスパニックの割合、1940年前の家の割合、190年前の家の割合を採用している。Vance<sup>29)</sup>は1945年以前に建てられた建物の割合、1945年から1985年の間に建てられた建物の割合、65歳以上の居住者の割合、外国人居住者の割合を操作変数として挙げている。Khattak<sup>19)</sup>は居住地環境に対する態度(例えば、周辺環境の安全さは重要である、子供のために大きな庭が重要であるなど)の度合いを操作変数として扱っている。

### 3.2.2 離散選択モデルにおける内生性対処

一般に離散選択モデルにおける内生性はモデル自体の非線形性によって、前節で述べた操作変数法の適用が直接適用できない。これを克服するために離散選択モデルの枠組みで内生性を考慮した推計方法の研究が進展している<sup>31)</sup>。中でもBLPアプローチ、コントロール関数アプローチの二つが主要な方法として挙げられる。

### 3.3 BLPアプローチ

内生性に対処する方法として最も広く使われている手法がBerry<sup>32)</sup>, Berry, Levinsohn, Pakes<sup>33)</sup>(以下, BLPと呼ぶ)によって開発された方法である. BLPモデルは離散選択モデルを基礎に, 製品差別化された財の購入に関し消費者行動を推計する. このモデルでは消費者のもつ特性の確率分布が既知であれば個人の購入履歴に関するデータがなくとも理論的に需要関数が推計することができる.

以下, BLPモデルについてNevo<sup>34)</sup>を参考に説明を行う. マーケット $m = 1, \dots, M$ にある財が企業 $j = 1, \dots, J$ によって供給されているとしよう. マーケット $m$ に居住する家計 $n$ が製品 $j$ を選択するときの効用は以下で表される. 各マーケットの消費者 $n$ はその財をひとついづれかの企業から購入するものとする. マーケット $m$ において企業 $j$ の製品を購入するときの効用は次式で表される.

$$u_{njm} = \alpha_n q_{jm} + x_{jm} \beta_n + \xi_{jm} + \epsilon_{njm} \quad (3.12)$$

ここで $q_{jm}$ は購入価格,  $x_{jm}$ は観察可能な財の特性,  $\xi_{jm}$ は観察不可能な特性,  $\alpha_n$ ,  $\beta_n$ は推計する未知パラメータ  $\epsilon_{njm}$ は誤差項を表す.

係数 $\alpha_n, \beta_n$ は次のように表される

$$\begin{pmatrix} \alpha_n \\ \beta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} + \Pi D_n + \Sigma v_n \quad (3.13)$$

ここで $D_n$ は家計の社会経済変数についての $d$ 次元列ベクトルであり,  $\Pi$ は $(K+1) \times d$ の行列である.  $v_n$ は観察不可能な家計の特性を表す $(K+1)$ 次元列ベクトルであり,  $\Sigma$ は $(K+1) \times (K+1)$ のスケール調整行列である.

$\theta = (\theta_1, \theta_2)$ を推計する全てのパラメータを含んだベクトルとする.  $\theta_1 = (\alpha, \beta)$ ,  $\theta_2 = (\Pi, \Sigma, \eta)$ である.

式(3.12)は以下のように書き換えられる.

$$u_{njm} = \delta_{jm}(q_{jm}, x_{jm}, \xi_{jm}; \theta_1) + \nu_{njm}(q_{jm}, x_{jm}, D_n, v_n; \theta_2) + \epsilon_{njm} \quad (3.14)$$

ここで,  $\delta_{jm}$ ,  $\nu_{njm}$ は以下の式で表される.

$$\delta_{jm} = x_{jm} \beta + \alpha q_{jm} + \xi_{jm} \quad (3.15)$$

$$\nu_{njm} = [q_{jm}, x_{jm}](\Pi D_n + \Sigma v_n) \quad (3.16)$$

$\delta_{jm}$  はマーケット  $m$  に居住する家計が製品  $j$  を購入するときの平均効用水準を意味している。これはマーケット内の家計で全て同一の値をとる。

また各家計は分析対象とするブランド以外の製品を購入することも可能である。このとき、その家計は *outsidegood* を選択したことになる。この際得られる効用を以下のように基準化しておく。

$$u_{n0m} = \epsilon_{n0m} \quad (3.17)$$

家計は最も高い効用をもたらす製品を購入すると仮定する。このときマーケット  $m$  において製品  $j$  を購入するような個人特性の集合を次のように定義する。

$$\begin{aligned} & A_{jm}(x_{\cdot m}, q_{\cdot m}, \delta_{\cdot m}; \theta_2) \\ &= \{(D_n, v_n, \epsilon_{n0m}, \dots, \epsilon_{nJm}) \\ & \quad | u_{njm} \geq u_{nlm} \quad \forall l = 0, \dots, J\} \end{aligned} \quad (3.18)$$

ここで  $x_{\cdot m} = (x_{1m}, \dots, x_{Jm})$ ,  $q_{\cdot m} = (q_{1m}, \dots, q_{Jm})$ ,  $\delta_{\cdot m} = (\delta_{1m}, \dots, \delta_{Jm})$  である。また  $D$  と  $v$ ,  $\epsilon$  は独立であると仮定する。このときマーケット  $m$  における製品  $j$  の市場シェアは以下のように計算される。

$$\begin{aligned} & s_{jm}(x_{\cdot m}, q_{\cdot m}, \delta_{\cdot m}; \theta_2) \\ &= \int_{A_{jm}} dP(D, v, \epsilon) \\ &= \int_{A_{jm}} dP_\epsilon(\epsilon) dP_v(v) d\hat{P}_D^m(D) \end{aligned} \quad (3.19)$$

ここで  $P$  はそれぞれの母集団分布を示しているが、 $D$  の分布については各ゾーン内で観察されるデータより推定したものをを用いるためと上付き文字  $m$  を付けている。また二つ目の等式は独立性の仮定より成立する。

$\epsilon_{njm}$  は i.i.d. でガンベル分布に従うと仮定すると、

$$\begin{aligned} & s_{jm}(x_{\cdot m}, q_{\cdot m}, \delta_{\cdot m}; \theta_2) = \\ & \int_\lambda \int_v \int_D \frac{\exp(\delta_{jm} + \nu_{njm})}{1 + \sum_{l=1}^J \exp(\delta_{lm} + \nu_{nlm})} \\ & d\hat{P}_D^m(D) dP_v(v) \end{aligned} \quad (3.20)$$

### 3.3.1 パラメータ推定

推計するモデルには様々な観測不可能な要因が含まれていたが、式(3.20)において  $(D_n, v_n, \epsilon_n)$  は積分されているため推計にあたっての誤差項は  $\xi_{jm}$  のみが残っている。



る。マーケット  $m$  における観測できない要因  $\xi_{jm}$  は内生変数  $q_{jm}$  と相関を持っている。このため内生性を考慮した推定が必要である。BLPアプローチによるパラメータ推定の利点は内生性の問題を明示的に扱える点である。推計に当たり、操作変数行列  $Z$  を用意する。これは以下の条件式を満たす。

$$E[Z'\omega(\theta^*)] = 0 \quad (3.21)$$

ここで  $\omega(\cdot)$  はモデルのパラメータの関数であり、誤差項を表している。 $\theta^*$  はパラメータの真の値である。このモーメント条件のもと GMM 推定量は次式で定義される。

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \omega(\theta)' Z \Phi^{-1} Z' \omega(\theta) \quad (3.22)$$

ここで  $\Phi$  は  $E[Z'\omega\omega'Z]$  の一致推定量である。これはウエイト行列と呼ばれるモーメントの分散共分散行列の逆行列であり、これを用いることで分散の大きいモーメントに対する重みを小さくしている。

式(3.28)により GMM 推定量を求めるためには、誤差項をパラメータの関数として表す必要がある。誤差項の定義であるが、Berry<sup>32)</sup> はモデルの誤差項を実際に観測されるシェア  $S$  と推定されたシェア  $s$  の差で定義せず、 $\xi_{jm}$  を誤差項として扱っている。 $\xi_{jm}$  を誤差項として用いる利点のひとつとして、その経済学的解釈が行いやすいことが挙げられる。式(3.16)で定義したように、 $\xi$  は平均効用水準に線形の形で入っている。このため  $\xi_{jm}$  を得るには平均効用水準  $\delta_{jm}$  を求める必要がある。このために各ゾーンにおいて実際に観測される製品シェアと推計される製品シェアが等しくなるという条件を解く。この条件は以下の連立方程式によって規定される。

$$s_{\cdot m}(x_{\cdot m}, q_{\cdot m}, \delta_{\cdot m}; \theta_2) = S_{\cdot m} \quad m = 1, \dots, M \quad (3.23)$$

これを解くために2つのステップを踏む。まず、式(3.23)の左辺を計算する。左辺にあたる式(3.20)は解析的に解けないため、数値シミュレーションによって近似解を求める必要がある。その際先に求めておいた家計の特性分布を用いる。

$$\begin{aligned} & s_{jm}(x_{\cdot m}, q_{\cdot m}, \delta_{\cdot m}; \theta_2) \\ &= \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} \frac{\exp(\delta_{jm} + \nu_{njm}(x_{jm}, q_{jm}, D_i, v_i; \theta_2))}{1 + \sum_{l=1}^J \exp(\delta_{lm} + \nu_{nlm}(x_{jl}, q_{lm}, D_i, v_i; \theta_2))} \end{aligned} \quad (3.24)$$

第2のステップは実際に連立方程式(3.23)を解くことであるが、ランダム係数モデルの場合これは非線形連立方程式となるため解析的に解くことはできない。これを解くためにBLP<sup>33)</sup>は収縮写像(contraction mapping)を用いた求解方法を提案した。これは以下のような繰り返し計算によって求められる。

$$\delta_m^{h+1} = \delta_m^h + \ln S_m - \ln s_{jm}(x_m, q_m, \delta_m; \theta_2) \quad (3.25)$$

$$m = 1, \dots, M, \quad h = 0, \dots, H \quad (3.26)$$

適当な $\theta_2$ のもとで平均効用水準の初期点 $\delta_m^0$ を決める。その後ステップ1の計算と式(3.26)を繰り返して $\delta_m$ を新たな点に更新していく。これを $\|\delta_m^{h+1} - \delta_m^h\|$ が充分小さくなるまで繰り返す。許容点に収まる最少の繰り返し回数が $H$ であり、このときの $\delta_m^H$ が $\delta_m$ の近似解となる。

以上の2ステップによって平均効用水準が得られ、誤差項を次式によって計算することが可能となる。

$$\omega_{jm} = \delta_{jm}(S_m; \theta_2) - (x_{jm}\beta + \alpha q_{jm}) \equiv \xi_{jm} \quad (3.27)$$

これにより式(3.22)で示されるGMM推定量を求めることができる。

実際の推計にあたり有効となる部分を記しておく。GMM推定量は次式で定義された。

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \omega(\theta)' Z \Phi^{-1} Z' \omega(\theta) \quad (3.28)$$

$\theta_1$ は後のGMM目的関数に線形の形で入っているが、 $\theta_2$ は非線形の形で組み込まれている。一階条件より、 $\theta_1$ の推計値は $\theta_2$ の推計値の関数として以下のように記述することができる(導出過程については付録1)を参照)。

$$\hat{\theta}_1 = (X' Z \Phi^{-1} Z' X)^{-1} X' Z \Phi^{-1} Z' \delta(\hat{\theta}_2) \quad (3.29)$$

これを利用することで $\theta_2$ に関してのみ非線形パラメータ探索問題を解けばよいことになる。

### 3.4 コントロール関数アプローチ

コントロール関数法の理論的基礎付けはHeckman<sup>35)</sup>, Hauman<sup>36)</sup>まで遡り、Heckman and Robb<sup>37)</sup>がこれらの概念にコントロール関数という用語を定義し、この分野で

一般的に使われるようになった。Blundell and Powell<sup>38)</sup>は二項選択におけるセミパラメトリック推定法の議論の中でコントロール関数法について言及している。コントロール関数法は推定が比較的容易なうえ、BLPアプローチでは推定できない状況でも適用可能であるという利点を持つ。BLPアプローチは市場シェアが小さいサンプリング誤差で観察可能であることを要求するため、製品一つ当たりの購入量が少数のとき適用はできない。また近年開発が進む需要予測モデル<sup>39)</sup>などにおいて、モデルの仮定がBLPの枠組みと整合性を持たない場合、モデルが複雑なためBLPによる推定が適用できない場合が存在する。このような場合、コントロール関数アプローチの適用が有効である。コントロール関数法はその扱いやすさから、コントロール関数法を利用した多くの応用研究が進展している。居住地選択モデルに関する実証研究は時折、推定された居住価格に対する反応係数が低い、統計的に有意でない、さらには正であるとまで結論づけている報告もある。これは家計が居住価格や税に反応的でないことを示唆することになるが、直感に反する結果であるし、モデルを政策分析に有効に使えなくするものである。Guevara<sup>69)</sup>らはこのような結果は価格の内生性から生じていることを指摘し、居住地選択における価格の内生性を考慮したモデルを構成し分析を行った。内生性に対処する方法について近年の手法の進展を述べた上で、居住地選択モデルにおける内生性への対処方法としてはコントロール関数法が優れていることを主張している。その主な理由としてコントロール関数法は個人レベルの内生性に対処できることを指摘している。各居住地はそれぞれユニークな特性を持つため、個人レベルの内生性が発生しやすい。分析の結果、居住地選択モデルにおいて価格の内生性が有意に現れることを確認し、コントロール関数法によって居住選択モデルの内生性の問題に十分に対処できたことを述べている。

以下では主にPetrin<sup>41)</sup>に従い、コントロール関数法の概要を見ていく。消費者nはJの選択肢から一つ選択するものとする。選択肢jを選択したとき得られる効用は以下で表される。

$$U_{nj} = V(y_{nj}, \mathbf{x}_{nj}, \boldsymbol{\beta}_n) + \epsilon_{nj} \quad (3.30)$$

ここで $y_{nj}$ は観測される内生変数(価格など)であり、 $\mathbf{x}_{nj}, \boldsymbol{\beta}_n$ はそれぞれ観測される外生変数、嗜好パラメータベクトルを表す。 $\epsilon_{nj}$ は観測不可能な誤差項である。内

内生変数  $y_{nj}$  と観測不可能な誤差項  $\epsilon_{nj}$  は相関を持つものとする。

コントロール関数法の背後にあるアイデアは内生変数  $y_{nj}$  が観測不可能な誤差  $\epsilon_{nj}$  と相関する部分について代理変数をつくりだす手続きである。これによって内生変数の残りの部分は観測不可能誤差と独立となり、通常の推定方法が妥当性を持つ。

まず、内生変数  $y_{nj}$  は全ての外生変数、操作変数、誤差項の関数として表されると考える。

$$y_{nj} = W(\mathbf{x}_n, \mathbf{z}_n, \boldsymbol{\mu}_n) \quad (3.31)$$

ここで  $\boldsymbol{\mu}_n, \epsilon_{nj}$  は  $\mathbf{x}_n, \mathbf{z}_n$  と独立であるが、 $\boldsymbol{\mu}_n, \epsilon_{nj}$  同士は独立でないものとする。これは  $y_{nj}$  と  $\epsilon_{nj}$  は相関を持つという当初の想定からきている。

ここでは観測不可能な誤差項が加法的で一つの要素  $\mu_{nj}$  で表されるシンプルなケースを考える。

$$y_{nj} = W(\mathbf{x}_n, \mathbf{z}_n; \gamma) + \mu_{nj} \quad (3.32)$$

$\gamma$  は関数を規定するパラメータである。操作変数は外生変数の条件を満たすので、

$$\begin{aligned} E[\epsilon_{nj}|y_{nj}] &= E[\epsilon_{nj}|W(\mathbf{x}_n, \mathbf{z}_n; \gamma) + \mu_{nj}] \\ &= E[\epsilon_{nj}|\mu_{nj}] \end{aligned} \quad (3.33)$$

が成り立つ。つまり、誤差項  $\mu_{nj}$  は内生変数  $y_{nj}$  の  $\epsilon_{nj}$  と相関している部分を全て説明している。

今、観測不可能なランダム効用  $\epsilon_{nj}$  を条件付平均と平均周りの乖離に分離する。

$$\epsilon_{nj} = E[\epsilon_{nj}|\mu_{nj}] + \tilde{\epsilon}_{nj} \quad (3.34)$$

ここで  $\epsilon_{nj}$  の条件付平均  $E[\epsilon_{nj}|\mu_{nj}]$  はコントロール関数と呼び、 $CF(\mu_{nj}; \lambda)$  で表す。

$$CF(\mu_{nj}; \lambda) = E[\epsilon_{nj}|\mu_{nj}] \quad (3.35)$$

ここで  $\lambda$  は推定するパラメータである。このとき  $j$  を選択するときの効用は

$$U_{nj} = V(y_{nj}, \mathbf{x}_n, \boldsymbol{\beta}_n) + CF(\mu_{nj}; \lambda) + \tilde{\epsilon}_{nj} \quad (3.36)$$

で表される。これより選択肢  $j$  の選択確率を求める。で  $\tilde{\epsilon}_n = \langle \tilde{\epsilon}_{nj} \forall j \rangle$ ,  $\mu_n = \langle \mu_{nj} \forall j \rangle$  で表し、同時密度関数を  $f(\cdot)$  とすると、個人  $n$  の選択肢  $j$  の選択確率は

$$P_{nj} = \text{Prob}(U_{nj} > U_{nk})$$

$$\begin{aligned}
&= \int \int I(V_{nj} + CF_{nj} + \tilde{\epsilon}_{nj} > V_{nk} + CF_{nk} \\
&\quad + \tilde{\epsilon}_{nk} \forall k \neq j) f(\beta_n, \tilde{\epsilon}_n) d\tilde{\epsilon} d\beta_n
\end{aligned} \tag{3.37}$$

で表される．ここで

$$\begin{aligned}
V_{nj} &= V(y_{nj}, x_{nj}, \beta_n) \\
CF_{nj} &= CF(\mu_{nj}, \lambda)
\end{aligned} \tag{3.38}$$

である．式(3.37)は新たに説明変数としてコントロール関数が入ったことを除き，一般的な選択モデルの選択確率を表している．注目すべきは式(3.37)の積分が元々のランダム効用 $\epsilon$ についてではなく， $\tilde{\epsilon}$ の条件付き分布で行っている点である．元々のランダム効用 $\epsilon$ は内生変数 $y_{nj}$ と相関があったが， $\tilde{\epsilon}$ は $y_{nj}$ と相関をもたない．

このモデルの推定は次の手順で行う．

1. コントロール関数 $CF(\mu_{nj}; \lambda)$ を特定化
2. 残差 $\mu_{nj}$ を推定
3. コントロール関数を説明変数に導入した式(3.37)を推定

コントロール関数 $CF(\cdot; \lambda)$ の特定化において最も単純なケースを挙げる． $\epsilon_{nj}$ と $\mu_{nj}$ が平均ゼロの多変量正規分布に従うと仮定すると，正規分布の性質から

$$CF(\mu_{nj}; \lambda) = E[\epsilon_{nj} | \mu_{nj}] \tag{3.39}$$

$$= \lambda \mu_{nj} \tag{3.40}$$

が成り立つ．このとき $j$ を選択するときの効用は

$$U_{nj} = V(y_{nj}, \mathbf{x}_n, \beta_n) + \lambda \mu_{nj} + \tilde{\epsilon}_{nj} \tag{3.41}$$

となる．式(3.41)のパラメータ推定にあたり， $\mu_{nj}$ をデータとして得る必要があるが，この真の値は観測不可能であるため $\mu$ の推定値 $\hat{\mu}_{nj}$ によって代替する．まず，式(5.3)において内生変数 $y_{nj}$ を被説明変数とみなし，外生変数と操作変数を説明変数として回帰する．その回帰による残差 $\hat{\mu}_{nj} = y_{nj} - W(\mathbf{x}_n, \mathbf{z}_n; \hat{\gamma})$ (ここで $\gamma$ も推定値である)をデータとして用いる．以上により，式(3.37)の推定を行える．

### 3.4.1 ブートストラップ法による標準誤差の補正

コントロール関数法では二段階目の推定において $\mu$ の代わりにgenerated regressor<sup>42)</sup>である $\hat{\mu}$ を用いているため、通常どおりの標準誤差の導出では、すべての推定パラメータの標準誤差を過小評価してしまう。このため通常通り求められる標準誤差に加えて、generated regressorを代用したことによる追加的誤差の影響を考慮しなければならない。本研究ではPetrin<sup>65)</sup>と同様にブートストラップ法を利用して標準誤差の補正を行う。

この方法はブートストラップ標本を得て残差を計算し、残差を加えた二項選択モデルのパラメータ推定を行うことを繰り返し、複数得られた推定パラメータの分散を各パラメータ毎に求めることで実行される。具体的には以下のような手順を踏む。

- (1) コントロール関数法の第一段階で $y_n = \gamma z_n + \mu_n, n = 1, \dots, N$ に対し(Nはサンプル数)最小二乗法を適用し、残差 $\{\hat{\mu}_n, n = 1, \dots, N\}$ を得る。
- (2) 残差の各点に $1/N$ の確率を付与した経験尤度分布 $\hat{F}$ を構成し、大きさ $N$ のブートストラップ標本 $\{\hat{\mu}_n^*, i = 1, \dots, N\}$ を抽出
- (3)  $y_n^* = \hat{y}_n + \hat{\mu}_n^*$ により、内生変数 $y_n$ のブートストラップ標本 $y_n^*, i = 1, \dots, N$ を作成。
- (4)  $\{\hat{y}_n^*, z_n\}, n = 1, \dots, N$ を用いてコントロール関数法の第一段階を行い、残差 $\{\hat{\mu}_n^*(b), n = 1, \dots, N\}$ を得る。
- (5) (4)で得た残差を説明変数として加え二項選択モデルのパラメータ推定を行う。得られた推定パラメータベクトルを $\hat{\beta}^*(b)$ とする。
- (6) (1)から(5)を $B$ 回繰り返すことで推定値 $\{\hat{\beta}^*(b)\}, b = 1, \dots, B$ を得る。各推定パラメータの分散 $V_k^*$ を $V_k^* = \frac{1}{B-1} \sum_{b=1}^B \{\hat{\beta}_k^*(b) - \hat{\beta}_k^*(\cdot)\}^2, K = 1, \dots, K$ により求める。ここで $K$ は推定パラメータの数、 $\hat{\beta}_k^*(\cdot) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B \hat{\beta}_k^*(b)$ である。

## 3.5 ソーティングと内生性

ソーティングとは人々が各々持つ交通モードに対する選好に基づきその選好を満足させるような居住地を選択することであり、個々人が享受する居住地域内の交

通インフラの整備水準はそれぞれが自ら選択した結果と解釈される。この場合、交通モードに対する選好は地域の交通インフラ整備水準を表す変数と相関をもつであろう。例えば鉄道利用が好きな人はその選好の度合いが大きいほど、鉄道インフラがより整った地域に居住する可能性が高いことが推測される。個人の各交通モードに対する選好は本人しか知ることができず、一般に客観的データとして得ることは困難である。つまり分析にあたってはこの選好を誤差項に含めざるをえない。このため地域の交通インフラ整備水準を表す変数をモデルの説明変数に加える場合、誤差項と相関を持つことになってしまう。よってバイアスのないパラメータ推定を行うにあたっては内生性を考慮した推定方法が必要になる。

ソーティングが内生性問題を引き起こす原因となることを述べたが、逆に内生性を考慮して推定パラメータに大きな改善が見られた場合、ソーティングが起こっていた可能性が高いと言えるであろう。よって実証分析では交通モード選択モデルを定式化し内生性を考慮した推定を行うことでソーティングの可能性を探ることにする。

## 第4章 モード選好を考慮した地域・交通選択モデル

### 4.1 基本モデル

#### 4.1.1 モデル化の前提条件

総人口が  $N$  で一定であり、全ての家計は地域外の CBD に通勤し所得を得るような 2 地域経済を考えよう。本研究では所得によるソーティング現象は扱わないため、所得は全ての家計で同一の  $w$  と仮定する。また両地域から CBD までの距離は等しく、地価も同一水準で固定であるとする。通勤に用いることができる交通モードは自動車と鉄道の二つのみであるとし、全ての家計は両モードを利用可能であるとする。本研究では自動車をモード 1、鉄道をモード 2 と定義する。地域  $i (i = 1, 2)$  に居住する家計がモード  $j (j = 1, 2)$  を利用するとき、家計は自分の選好に基づき  $(i, j)$  を選択していると捉えられる。

一般的な Tiebout モデルの枠組みでは各地域の税制度は人口移動における主要な要因として働く。しかし本研究では税制度による地域選択でなく、道路・公共交通の整備水準による地域選択に焦点を当てるため、地域間で等しい税額  $s$  が課されると仮定する。今回所得についても全ての家計で同一と仮定しているため、この税は人頭税と所得税のどちらと捉えても差し支えない。

家計は利用交通モードに対する異なる選好を有しており、自分の選好と実際に利用する交通モードが合致した場合、観測できない心理的効用項が発生する。このような要因が働く場合、自分の選好に合った交通モードが利用しやすい地域に居住地を置くという residential ソーティングが起こる可能性がある。本章ではベンチマークモデルとして、交通モードに対する選好の異質性がない同質な家計を仮定して分析をする。後に、異質性を持つ家計のケースを扱いソーティングメカニズムについて分析を行う。



### 4.1.2 通勤費用の定式化

地域選択にも大きな影響を与える通勤費用について定式化を行う。自動車については道路利用者が多くなるほど混雑が発生し、時間コストがかかる。一方、鉄道は利用者が多くなるほど、運行頻度の向上がなされ待ち時間の減少を通じ時間コストが減少する。このような特徴を捉え、各モードの通勤費用が定式化される。地域*i*からモード*j*で通勤する費用を $T_{ij}$ とすると、以下のように2変数の関数で表される。

$$T_{ij} = T_{ij}(m_{ij}, d_{ij}) \quad (4.1)$$

ここで $m_{ij}$ は地域*i*に居住しモード*j*を利用する人口、 $d_{ij}$ は地域*i*政府がモード*j*に対して行った投資 $c_{ij}$ が通勤費用に与える効果を表している。

自動車( $j=1$ )の通勤費用関数は混雑を考慮して以下の性質を満たす。

$$\begin{cases} T_{i1m_{i1}} > 0 & T_{i1m_{i1}m_{i1}} > 0 \\ T_{i1d_{i1}} < 0 & T_{i1d_{i1}d_{i1}} \geq 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

なお、下付き添え字は当該変数による偏微分を表している。鉄道( $j=2$ )の通勤費用関数は規模の経済を反映して以下の性質を満たす。

$$\begin{cases} T_{i2m_{i2}} < 0 & T_{i2m_{i2}m_{i2}} > 0 \\ T_{i2d_{i2}} < 0 & T_{i2d_{i2}d_{i2}} \geq 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

### 4.1.3 家計の行動

家計は2地域間を自由に移動可能であり、さらに通勤に用いる交通モードの変更も自由にできると仮定する。また各地域には価格1の合成財 $x$ が消費でき、家計は可処分所得をこの消費のみに用いるとしよう。地域間でこの財に対する効用関数の差はない。財 $x$ を消費したときの効用を $u(x)$ で表そう。今、地域*i*に居住しモード*j*で通勤する家計が得られる効用は以下で表される。

$$U(i, j) = u(w - s - T_{ij}) \quad (4.4)$$

全ての家計は $U(i, j)$ を最大化するように居住地*i*と利用モード*j*の組み合わせ $(i, j)$ を選択する。基本モデルにおいてこれは通勤費用を最小化するような $(i, j)$ を選択することに他ならない。

#### 4.1.4 地域政府の行動

各地域政府は政策に対する住民の地域間移動を考慮せず意思決定を行うような、近視眼的行動をとるものと仮定する。このために投資の意思決定時点での自地域の人口を所与として、道路整備と鉄道運営に対する投資額を決定する。投資額決定の際、自地域の社会厚生関数を最大化するように投資額を決定すると仮定する。

$$\max_{c_{i1}, c_{i2}} m_{i1}u(w - s - T_{i1}) + m_{i2}u(w - s - T_{i2}) \quad (4.5)$$

subject to

$$c_{i1} + c_{i2} = (m_{i1} + m_{i2})s \quad (4.6)$$

$$c_{i1} \geq 0, c_{i2} \geq 0 \quad (4.7)$$

地域毎の事情により、投資した結果がどれだけ効率性に通勤費用削減に働くかは変わってくるであろう。ここで、地域間の差異を表現するための以下の仮定を置く。「地域1は鉄道運営に対する投資効率の優位性を持つが、地域2は自動車のための道路整備に関して投資効率の優位性を持つ」これを表現するために、実際に投資された額 $c$ に対して通勤費用にもたらす効果 $d$ の関係を明確にしておく。地域 $i$ の政府がモード $j$ に対する投資を $c$ だけしたときの通勤費用にもたらす効果 $d_{ij}$ は以下のように $c$ のみの関数で表される。

$$d_{ij} = d_{ij}(c) \quad (4.8)$$

ここで以下が成り立つ。

$$\begin{cases} d'_{ij} > 0 & d''_{ij} \leq 0 \\ d_{ij}(0) = 0 & (d_{11}(c) - d_{21}(c)) < 0 \\ (d_{12}(c) - d_{22}(c)) > 0 & \forall c \end{cases} \quad (4.9)$$

課税額など地域間で同一としているので、本モデルでは政府の効率性関数の違いが地域間の唯一の差異となる。

#### 4.1.5 地域移動・モード変更

家計は自由に居住地を変更したり利用モードを変化させることができた。現状の居住地と利用交通モードの組み合わせが最適でなければ、より効用を高め

ることができる組み合わせを求めて行動を起こす. 家計がとり得る行動は以下の3つである.

- (1) 地域移動, モード変更なし
- (2) 地域移動なし, モード変更
- (3) 地域移動, モード変更

ある時点での全ての家計が居住地域とモード選択をした結果は  $\mathbf{m} = (m_{11}, m_{12}, m_{21}, m_{22}) \in \Omega$  で表される. ここで  $\Omega$  は以下で表される集合である.

$$\Omega = \{\mathbf{m} \mid \sum_i \sum_j m_{ij} = N, m_{ij} \geq 0 \ \forall i, j\} \quad (4.10)$$

地域移動・モード変更は  $\mathbf{m}$  の変化で表される. ここでは  $\mathbf{m}$  の変化量を次のように定義する.

$$\begin{aligned} \Phi_{a,b}(\mathbf{m}) = & \frac{\eta}{\sum_i \sum_j m_{ij} U_{ij}(\mathbf{m})} \\ & \left\{ \sum_i \sum_j m_{ij} [U_{ab}(\mathbf{m}) - U_{ij}(\mathbf{m})]_+ \right. \\ & \left. - \sum_i \sum_j m_{ab} [U_{ij}(\mathbf{m}) - U_{ab}(\mathbf{m})]_+ \right\} \end{aligned} \quad (4.11)$$

ここで  $\eta$  は移動速度を調整する正のパラメータである. 右辺括弧内第一項は地域  $a$  に居住し, モード  $b$  を利用する生活様式に変更してくる家計の数を反映しており, 第二項は地域  $a$  に居住しモード  $b$  を利用する家計が, 他の居住地と利用交通モードの組み合わせを求めて生活様式を変更する数を反映している.

#### 4.1.6 同質家計の均衡状態

家計はより高い効用を求め人口移動・モード変更を繰り返すが, これ以上地域移動やモード変更を行っても今の状態より改善されることがなく, せいぜい等しい効用しか得られないような状態に落ち着く. そのような状態を均衡状態と呼ぶ.

均衡状態  $\mathbf{m}^* \in \Omega$  は以下の条件式を満たす.

$$m_{ij}^* [U_{ab}(\mathbf{m}^*) - U_{ij}(\mathbf{m}^*)]_+ = 0 \ \forall (i, j) \quad (4.12)$$

ここで

$$[x]_+ \equiv \max\{x, 0\} \quad (4.13)$$

である.

#### 4.1.7 数値シミュレーション

##### セットアップ

数値計算を行うにあたって、関数形の特定化を行う。ここで行う数値シミュレーションはモデルが想定する環境でどのような均衡が生じるかを確認するためのものであり、そのために仮想的な関数形、パラメータを設定することで分析を行う。実証的に現象の説明を行うにあたっては実証分析を通じ関数形とパラメータの推計が必要になる。

効用関数

$$u(x) = x \quad (4.14)$$

投資効率関数

$$d_{ij}(c) = f_{ij}c \quad (4.15)$$

自動車通勤費用関数

$$T_{i1}(m_{i1}, d_{i1}) = k_{i1} + a_{i1}m_{i1}^{\alpha_{i1}} - \frac{d_{i1}}{e} \quad (4.16)$$

鉄道通勤費用関数

$$T_{i2}(m_{i2}, d_{i2}) = k_{i2} + a_{i2}m_{i2}^{\beta_{i2}} - \frac{d_{i2}}{e} \quad (4.17)$$

次に各パラメータを  $N = 100, w = 330, s = 20, \eta = 1, f_{11} = 0.6, f_{12} = 1.38, f_{21} = 1.38, f_{22} = 0.6, k_{11} = k_{21} = 40, k_{12} = k_{22} = 155, a_{11} = a_{21} = 1.3, a_{12} = a_{22} = 1, \alpha_{11} = \alpha_{21} = 1.2, \beta_{12} = \beta_{22} = 0.95, e = 100$  と設定した。

初期配分割合を次のように定義する。

$$\omega = (\omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{21}, \omega_{22})$$

$$\sum_{ij} \omega_{ij} = 1$$

$\omega_{ij}$  は地域  $i$  に居住しモード  $j$  を利用する人々の初期時点での割合を表す。

初期人口配分  $\mathbf{m}$  は以下のように計算される。

$$\mathbf{m} = N\omega \quad (4.18)$$

以上のセットアップのもと、下記のの計算フローに従ってシミュレーションを行う。

1. 初期配分割合  $\omega$  を設定し，初期人口配分  $m$  を決定する
2. 現在の人口配分のもと政府の最適投資水準決定問題より  $d_{ij}$  を計算
3. 通勤費用  $T_{ij}$  を計算
4. 動学プロセスの式に従い地域変更・モード変更が行われる
5. 新たな配分  $m$  が決まる
6. 均衡条件を満たすまで手順2から5を繰り返す

### シミュレーション結果

初期配分割合の違いにより，以下の2つのケースについてシミュレーションを行った．

- ケース1：鉄道・自動車均等利用社会  $\omega = (0.25, 0.25, 0.25, 0.25)$
- ケース2：自動車偏重型社会  $\omega = (0.45, 0.05, 0.05, 0.45)$

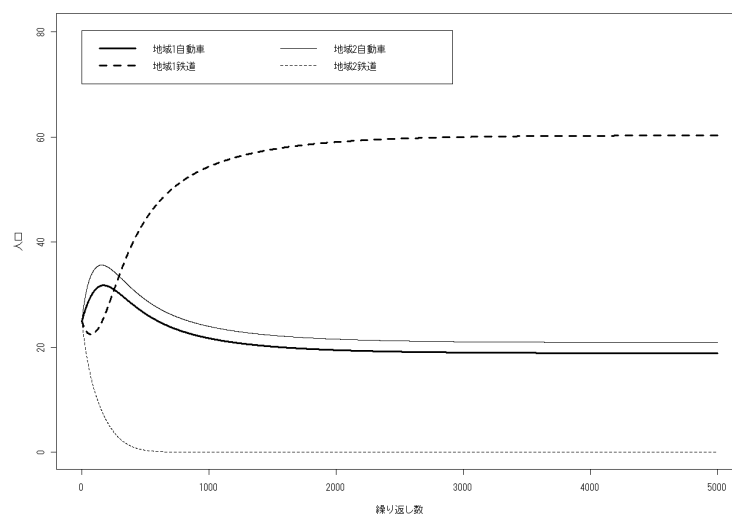


図-4.1 ケース1における都市構造変容

図-4.1，図-4.2はそれぞれケース1，ケース2のシミュレーション結果を示している．これらの図からわかるように，都市の形態，人々の交通行動には複数の均衡

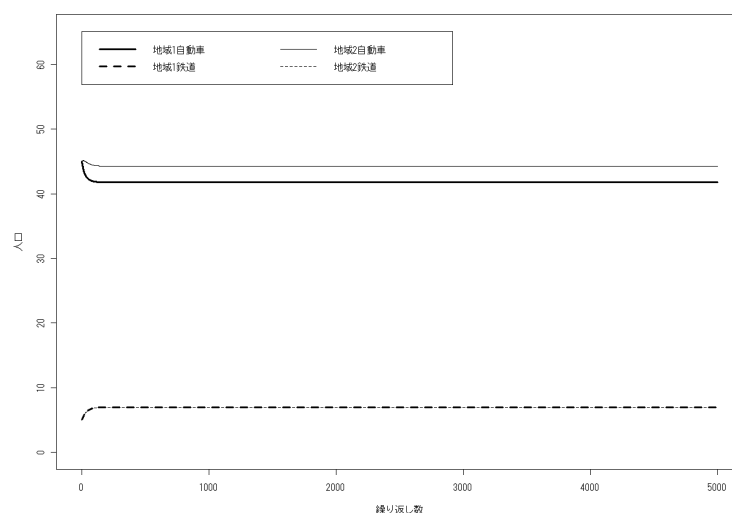


図-4.2 ケース2における都市構造変容

状態が存在し、どのような均衡に到達するかは初期人口配分に依存する。ケース1でははじめの段階で鉄道から自動車へのモード変更が見られるが、地域1では鉄道インフラ整備に優位性を持つためモード変更を行う家計は地域2に比べて少ない。そして地域2で鉄道を利用していた家計は自動車へのモード変更が渋滞の影響から魅力的でなくなり、地域1で鉄道を利用ようになる。こうして規模の経済が働きだし自動車利用者も鉄道へとモード変更を行いはじめポジティブフィードバックが働きだす。最終的に地域1に人口は集積し、鉄道利用と自動車利用がうまく共存している。ケース2では自動車の渋滞に耐え兼ねて鉄道利用に切り替える動きがはじめの方で見られるが、鉄道利用人数の少なさから両地域とも政府は全く鉄道へのインフラ整備投資を行わない。その結果道路渋滞があまり解消されない状態で自動車の通勤コストと低水準サービスの鉄道の通勤コストが早い段階でバランスし均衡となる。この場合両モードともコスト負担が高い均衡となっていて非効率な均衡状態といえる。

図-4.3は各ケースにおける合計社会厚生の変化を表したグラフであるが、ケース2では合計社会厚生がケース1に比べ低い水準にとどまっていることが確認される。

都市計画を考える際、ケース1のように各地域の特性を生かし自動車と鉄道利用がうまく共存する社会を目指すべきである。ケース1で鉄道社会が実現した要

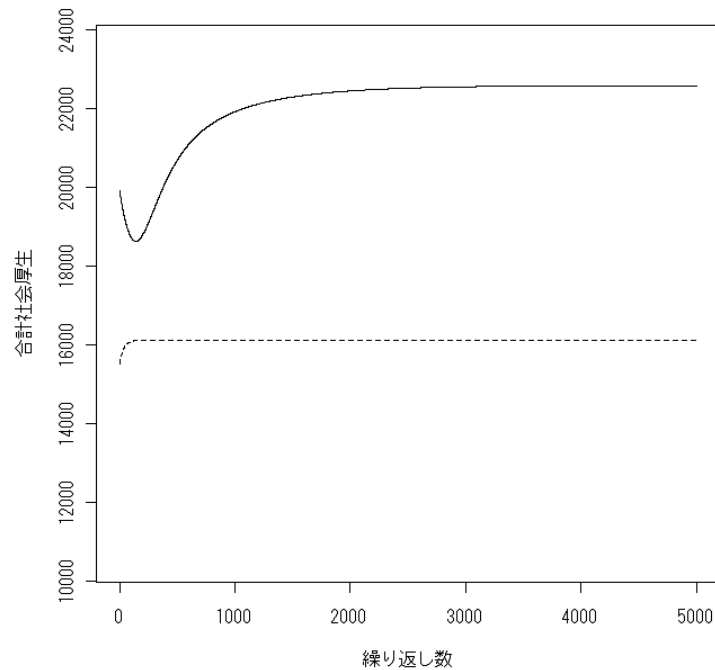


図-4.3 合計社会厚生と比較

因を今一度整理すると初期時点での一定の鉄道利用者がいたこと、地域1の鉄道インフラ整備の優位性、規模の経済が働いたことが挙げられるが、特に初期時点で一定の鉄道利用者が決定的な条件になっている。それでは今現在ケース2のように自動車偏重型社会になっている地域はケース1のような望ましい均衡点を目指すことはできないのであろうか。その可能性を探る分析を次章で行う。

## 4.2 選好異質性モデル

### 4.2.1 分析目的

前章では家計がモードに対して選好をもっていない同質家計を想定したモデルであったが、本章では各家計がモードに対する選好の異質性を考慮したモデルで分析を行う。モードに対する選好を考慮することでモビリティマネジメントのような政策と関連した議論が可能になる。ここでは特に前章ケース2のような自動車偏重型社会が陥る非効率な均衡からいかに脱却が図れるかに焦点を当てる。

## 4.2.2 交通モードに対する選好の異質性

定式化にあたって連続型と離散型が考えられるが、ソーティング現象を確認する目的のために離散型で定式化を行う。  $\mu (=1,2)$  を家計のタイプとする。  $\mu$  の値によって交通モードに対する選好の異質性が表現される。ここでは以下のように定義する。

- $\mu = 1$  のとき自動車利用に選好あり
- $\mu = 2$  のとき鉄道利用に選好あり

各タイプの分布は分析にあたり外生的に与える。また分析の単純化のため居住地移動・モード変更を行う期間の間この割合に変化はないものと仮定する。

## 4.2.3 心理的効用関数

心理的効用関数  $v_j(\mu)$  は以下で表される関数である。

$$v_j(\mu) = \begin{cases} \gamma_\mu & \mu = j \text{ の時} \\ 0 & \mu \neq j \text{ の時} \end{cases} \quad (4.19)$$

これはモード  $j$  に選好を持つ家計が選好と合致したモードを実際に利用している場合にのみ生まれる効用部分であることを示している。ここで  $\gamma_\mu$  はタイプ  $\mu$  の家計の心理的効用部分の強度を表すパラメータを表しており、  $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$  のとき選好の異質性はなくなり基本モデルと一致する。後に  $\gamma_\mu$  の変化による均衡の動きを分析する。

## 4.2.4 家計の行動

今、地域  $i$  に居住しモード  $j$  で通勤するタイプ  $\mu$  の家計が得られる効用は以下で表される。

$$U(i, j; \mu) = u(w - s - T_{ij}) + v_j(\mu) \quad (4.20)$$

全ての家計は  $U(i, j)$  を最大化するように居住地  $i$  と利用モード  $j$  の組み合わせ  $(i, j)$  を選択する。



## 4.3 数値シミュレーション

### 4.3.1 セットアップ

基本的に同質家計のモデルと同じ関数形，パラメータ設定でシミュレーションを行うが，選好の異質性導入にあたり新たに設定が必要となる部分を整理しておく．まずタイプ1家計の割合を0から1の値をとる $\theta$ で外生的に与えるさらにタイプ1, 2の家計の初期配分割合をそれぞれ $\omega_{\mu=1}$ ,  $\omega_{\mu=2}$ で表す．この時タイプ1家計の初期人口配分 $m_{\mu=1}$ とタイプ2家計の初期人口配分 $m_{\mu=2}$ はそれぞれ次のように表される．

$$\begin{aligned}m_{\mu=1} &= \theta N \omega_{\mu=1} \\m_{\mu=2} &= (1 - \theta) N \omega_{\mu=2}\end{aligned}$$

分析目的においても述べたように同質モデルでケース2のような社会から出発した均衡の動きを分析したいので，以後の全ての分析を通じて各タイプの家計の初期配分割合を以下で与える． $\omega_{\mu=1} = (0.45, 0.05, 0.05, 0.45)$ ,  $\omega_{\mu=2} = (0.45, 0.05, 0.05, 0.45)$

### 4.3.2 選好強度の違いによる均衡変化

まず自動車利用に選好を持つ家計の割合が高い $\theta = 0.7$ のケースを考え，選好の強度 $\gamma$ を変化させることで分析を進める． $\gamma$ の違いにより次の2つのケースの分析を行った．

- ケース3：  $\gamma_1 = 10, \gamma_2 = 10$
- ケース4：  $\gamma_1 = 10, \gamma_2 = 30$

図-4.4 図-4.5はそれぞれケース3, ケース4のシミュレーション結果を表している．すぐにわかるように，ケース4においては非効率均衡からの脱却に成功している．比較的選好強度が高いケースにおいてこのような現象が起こった理由は何であろうか．これを探るために図-4.6に着目してみよう．この図は地域1での鉄道利用者数の動きを各タイプ毎に示したものである．

まず地域1に居住する鉄道利用に選好を持つ家計が自動車から鉄道へモード変更を行い，一定の鉄道利用人数が確保されていく．鉄道投資に優位性を持つ地域

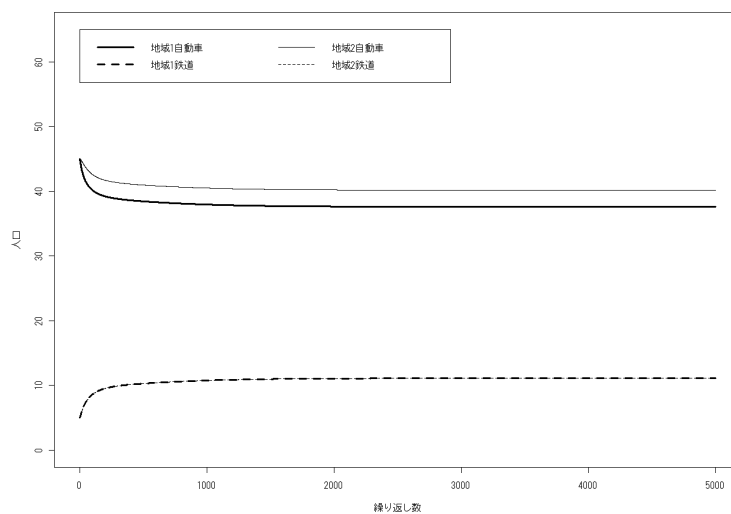


図-4.4 ケース3における都市構造変容

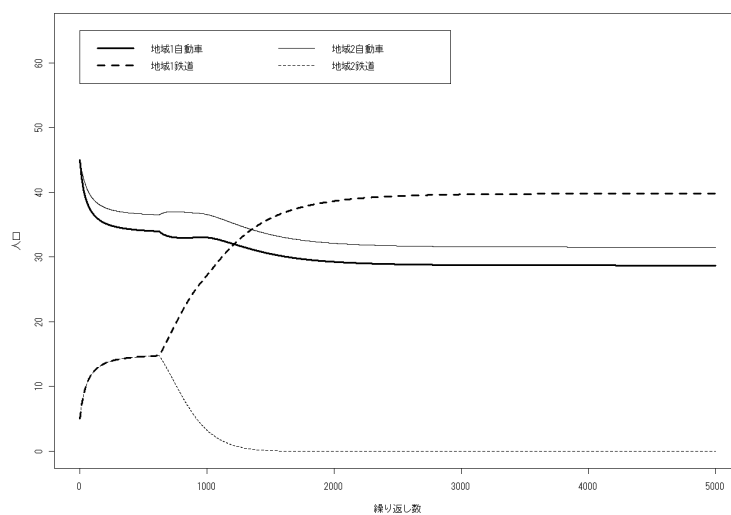


図-4.5 ケース4における都市構造変容

1 政府は鉄道インフラへの投資を始め、地域1鉄道の利便性が向上する。この結果、地域2に居住していた鉄道利用に選好を持つ家計が地域1へと居住地を移転し鉄道利用を行い始める。これはソーティング現象にほかならない。ソーティングによって地域1鉄道は規模の経済性を通じ運営コストが改善される。これにより自動車利用に選好を持つ家計も鉄道利用へモード変更を行うようになる。そしてさらに規模の経済性が働き、ポジティブフィードバックによる社会厚生の高い

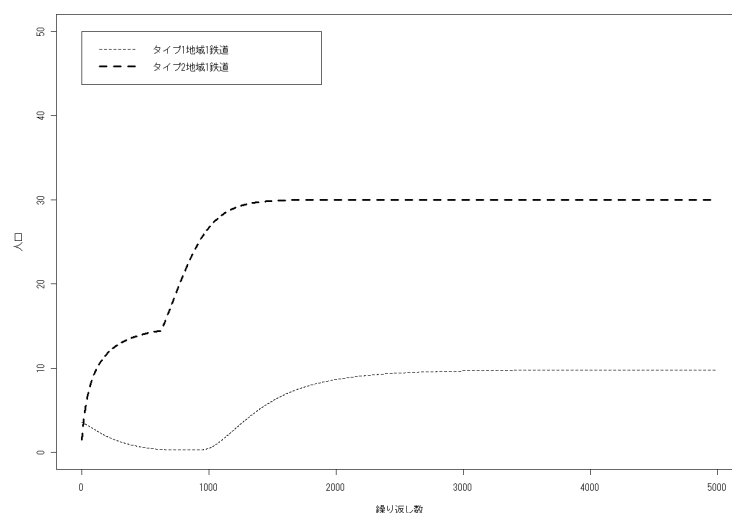


図-4.6 ケース4におけるソーティングと規模の経済

効率的均衡への収束が達成される。このような都市構造変化は鉄道利用に対する選好強度の高まりによって引き起こされており、ソーティングを通じ大規模な変化が実現される。つまり人々の各モードへの選好強度を変えるような政策は単に人々の交通行動に影響を与えるだけでなく、ソーティングを通じ人口集積、交通インフラ整備水準の変化など都市構造を変化させるといった都市政策としても機能する可能性がある。

### 4.3.3 心理的選好と都市構造の関係

選好強度パラメータ $\gamma$ と均衡変化の関係の理解を深めるため図-4.7に着目しよう。この図は各 $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ の組み合わせにおける均衡時合計社会厚生の高線を描いたものである。この図から $\gamma_1$ が低く $\gamma_2$ が高いとき社会厚生が上昇していることがわかる。この社会厚生の変化は都市構造変化に対応している。図-4.8に都市構造変化のプロセスに着目し3つの領域に選好強度の集合を分類した。領域1は両地域とも自動車依存型社会の状態にとどまっている。このため両地域の政府とも鉄道に対する投資は行わない。領域2は鉄道に対する選好強度の高まりに伴い鉄道整備に優位性を持つ地域1に鉄道利用者が一定数集まった結果、地域1政府は鉄道に対する投資を開始する。これにより地域1は地域2に比べ鉄道サービス水準が高くなる。地域2で鉄道を利用していた家計は地域1に居住地を移転し鉄道利

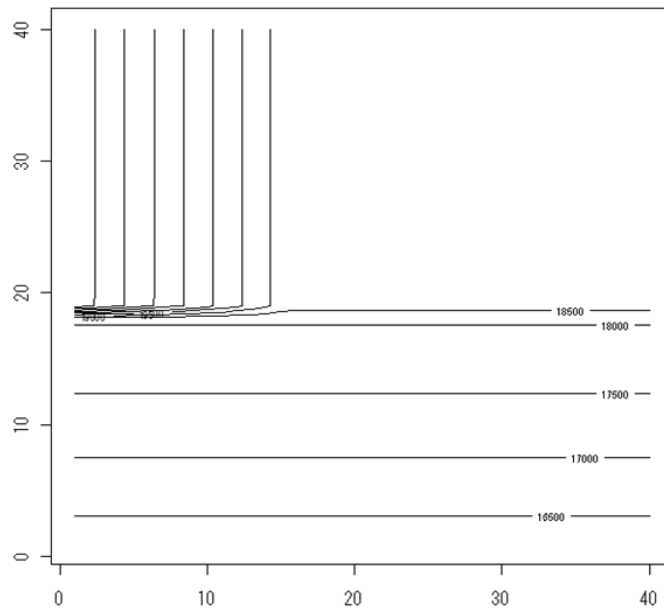


図-4.7 合計社会厚生等高線

用を行う。このようなソーティングによって地域1鉄道は規模の経済が発生する。しかし自動車に選好を持つ家計はその選好強度が比較的高い水準にあるため、鉄道利用へモード変更はなされない。領域3は自動車に選好を持つ家計の選好強度が低い水準にあるため、ソーティングによって発生した規模の経済の恩恵を享受するためモード変更を行う家計がでてくる。これによりポジティブフィードバックが両タイプの家計から引き起こされ地域1は鉄道整備が進み人口が集積する。さらに、両地域とも過度の自動車利用が解消されたため混雑は緩和し社会厚生は大きく上昇する。

#### 4.3.4 ハード面の政策の効果

新技術開発などコスト構造を変えるハード面の政策が均衡を変化させる選好領域にどのような影響を与えるかを分析する。

図-4.9は鉄道のコストを-5した場合の均衡時合計社会厚生の高線を表している。図-4.7と比較すると領域3が拡大していることがわかる。これは鉄道コス

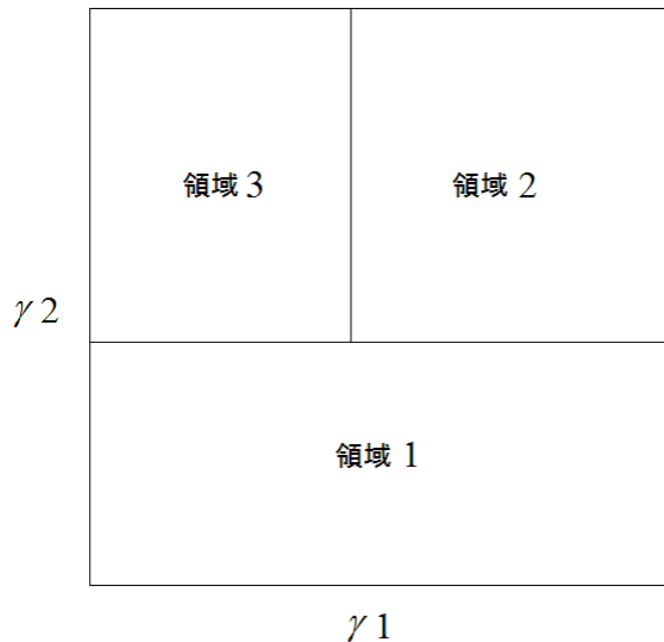


図-4.8 選好強度集合の分類

トの削減を行うことで、ソーティングを通じた規模の経済による非効率均衡状態からの脱却を実現しやすくなったことを意味する。さらに各領域における社会厚生も鉄道コスト削減以前と比較して増加している点にも着目できる。

図-4.10は自動車のコストを-5した場合の均衡時合計社会厚生の高線を表している。図-4.7と比較すると領域3が縮小していることがわかる。これは自動車コストの削減を行うことで、ソーティングを通じた規模の経済による非効率均衡状態からの脱却が実現しにくくなったことを意味する。さらに各領域の社会厚生が自動車コスト削減以前に比べて減少している点にも着目できる。

#### 4.3.5 居住地移転費用を考慮したモデル

これまでの分析は「人々は地域間を制約なく自由に移動でき(移動コストゼロ), 各自の選好に最も合う地域に居住する」という Tiebout モデルの仮定を置いていた。しかし現実の社会では居住地移転費用の存在により行動が制約されることが少なくない。ここでは居住地移転費用を  $\kappa$  で定義しこの費用の存在が及ぼす影響を分析する。ただしモード変更に伴う費用は引き続きゼロとする。

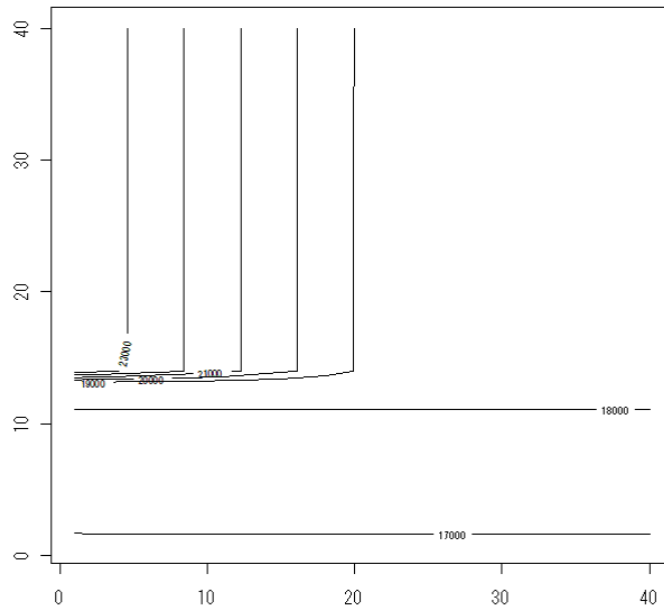


図-4.9 鉄道コスト削減の効果

図-4.11は居住地移転費用 $\kappa = 2.5$ の均衡時合計社会厚生等高線を示している。領域3は縮小していることがわかる。これは居住地移転費用の存在によりソーティングと規模の経済による人口集積が妨げられるためである。よって大規模に都市構造を変化させていくためにはソフト面の政策だけでなく居住地移転を支援するような政策も併せて考える必要があると言える。

#### 4.4 政策的含意

以上の分析から得られた結果と政策的示唆を整理しておこう。

まず、自動車偏重型社会からの脱却のためには、モードに対する選好を変化させる政策が有効であることを示す結果が得られた。都市構造変化のプロセスに着目し選好強度の集合は3つの領域に分類できる。領域1は両地域とも自動車依存型社会の状態にとどまっている状態であり、両地域の政府とも鉄道に対する投資は行わない。領域2は鉄道に対する選好強度の高まりに伴い鉄道整備に優位性を持つ地域1に鉄道利用者が一定数集まった結果、地域1政府は鉄道に対する投資

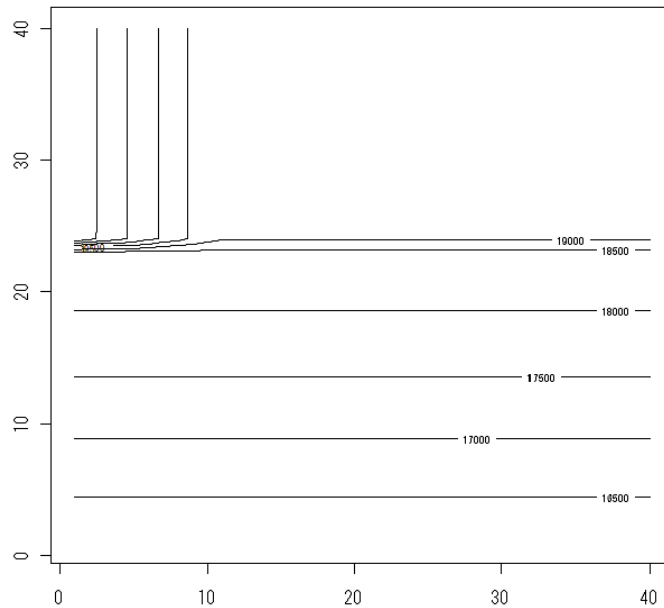


図-4.10 自動車コスト削減の効果

を開始する．これにより地域1は地域2に比べ鉄道サービス水準が高くなる．地域2で鉄道を利用していた家計は地域1に居住地を移転し鉄道利用を行う．このようなソーティングによって地域1鉄道は規模の経済が発生する．しかし自動車に選好を持つ家計はその選好強度が比較的高い水準にあるため，鉄道利用へモード変更はなされない．領域3は自動車に選好を持つ家計の選好強度が低い水準にあるため，ソーティングによって発生した規模の経済の恩恵を享受するためモード変更を行う家計がでてくる．これによりポジティブフィードバックが両タイプの家計から引き起こされ地域1は鉄道整備が進み人口が集積する．さらに，両地域とも過度の自動車利用が解消されたため混雑は緩和し社会厚生は大きく上昇する．鉄道に対して選好を持つ家計の選好度合いを上昇させることで領域1から領域2へ移行し，自動車に対して選好を持つ家計の選考度合いを減少させることで領域3に移行することができれば社会厚生の高い都市構造の実現が達成されるであろう．つまりソフト面の政策では鉄道のイメージアップキャンペーンと自動車に対するネガティブキャンペーンを同時に行うことが重要である．一方だけでは社会厚生最大化へとは向かわない．

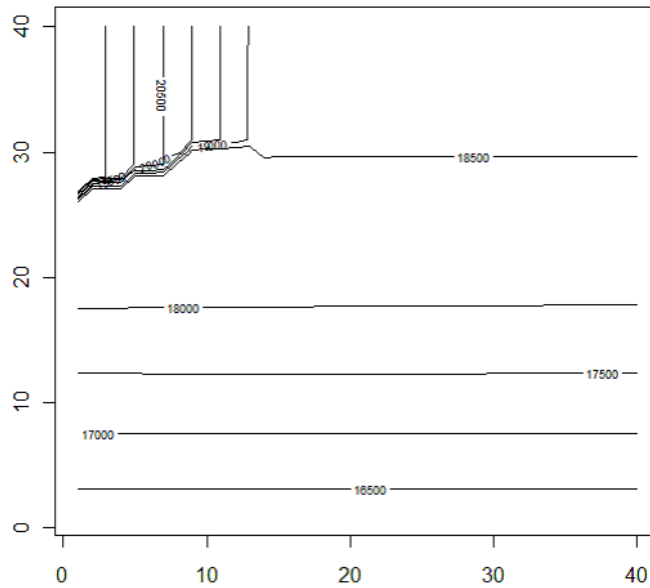


図-4.11  $\kappa = 2.5$

次に、交通モードのコスト構造を変化させるようなハード面の政策が、都市構造変化を及ぼす選好領域を変化させることが判明した。この結果はハード面の政策の評価に新たな視点を加えることになる。鉄道に関するハード面の政策はコスト構造変化を通じてソーティング現象を引き起こしやすくすることを理解しなければならない。つまりコスト構造を変化させるハード面の政策と選好強度を変化させるソフト面の政策は相乗効果を持つことになる。逆に言えばハード面の政策自体はソーティングを引き起こすと限らないため、ソフト面の政策も考慮しなければ期待した効果を生まない可能性が生じてくる。自動車に関するハード面の政策は鉄道のソーティングによる規模の経済を妨げる効果を持つだけでなく、全体の社会厚生まで下げてしまう可能性がある。鉄道利用を促進するためのソフト面の政策をいくら行っても、自動車に関するハード面の政策を伴うと期待する結果を得ることは難しくなってくる。

最後に、現実の社会では居住地移転費用の存在により行動が制約されることが少なくないため、居住地移転費用を考慮した分析を行った。その結果居住地移転費用の存在はソーティングと規模の経済による人口集積を妨げ領域3を縮小さ



せることがわかった．このため大規模に都市構造を変化させていくためにはソフト面の政策だけでなく居住地移転を支援するような政策も併せて考える必要がある．

## 第5章 ソーティングの検証

### 5.1 分析目的

第4章のモデルにおいて、人々が交通モードに対する選好が居住地域を選択する場合に影響を与える場合、最適化行動の帰結としてソーティングが起こりうることが示されている。そしてこのような行動原理を有するときソフト面が重要な役割を果たすことが示唆された。本章では現実のデータを用いて居住地域のソーティングの検証を行うことを目的とする。これにより理論モデルで得た政策的示唆が現実社会での政策を考えるうえでも妥当性を持ってくる。ソーティングの大規模な検証は一般的に困難であるが、本研究では計量経済学における内生性に着目することで分析を試みる。計量経済学的手法を用いる利点として多くの地域、データを用いることができることが挙げられる。人々の居住地点を駅までのアクセス時間により把握し、鉄道に選好を持つ家計がアクセス時間の短い地点に住むことを居住地点のソーティングとして捉え、内生性に対処することにより検証を行う。

### 5.2 分析の仮定と課題

ソーティングが起きている場合、モードに対する選好が誤差項に入ってくるため、内生性が必ず発生する。逆に、内生性が発生しない場合、ソーティングが発生していないことが言える。つまり内生性の検証を行うことで、ソーティングが起きている可能性が高いことが言える。内生性の発生はソーティング現象の必要条件であるが十分条件ではないためソーティングの存在を断定することはできないが、ソーティングへの理解を得るうえで意義ある試みと考える。

この方法論の課題として各家計の交通モードに対する選好が居住地選択を行った時点とPT調査時点において変化していないことを前提としていることが挙げられる。もし著しく変化をしている場合、分析目的であるソーティングの検証は今回の方法論では不可能となる。今回この前提に関する調査は行えなかったた

め、今後の課題とする。

### 5.3 対象地域とデータ

第4回京阪神都市圏PT調査データに基づき分析を行う。須磨区、垂水区、西区から中央区への通勤トリップを分析対象とし、利用可能性を考慮して交通手段としては車と鉄道の2つを考える。また自動車利用可能性の観点から、自動車免許保有者サンプルのみを抽出した。最終的なサンプル数は758となっている。PT調査におけるゾーン単位で推定で行う。本章では5桁の入力ゾーン単位レベルで分析を行った。

### 5.4 モデル

通勤トリップにおける鉄道(=1)と車(=2)間の代替を考えるため、二項選択モデルを適用する。個人 $n$ が鉄道を選択したときに得られる効用を $U_{n1}$ 、自動車を選択したときの効用を $U_{n2}$ とすると、鉄道が選択される確率は

$$P_n(1) = \text{prob}\{U_{n1} - U_{n2} > 0\} \quad (5.1)$$

で表される。効用はパラメータに関して線形であると仮定し

$$U_{nj} = V(y_{nj}, \mathbf{x}_{nj}, \boldsymbol{\beta}_n) + \epsilon_{nj} \quad (5.2)$$

ここで $y_{nj}$ は内生変数、 $\boldsymbol{\beta}$ は推定パラメータベクトル、 $\mathbf{x}_n$ は説明変数ベクトル、 $\epsilon_n$ は誤差項を表す。モデルの説明変数として性別ダミー変数(男0, 女1), 年齢ダミー変数(50歳未満0, 50歳以上1), 車保有ダミー変数(非保有0, 保有1), 総所要時間, アクセス時間, イグレス時間を考える。選択肢特性変数のうち総所要時間は共通変数, 車保有ダミーは車固有ダミー変数, アクセス時間, イグレス時間は鉄道固有変数とする。ここで**2.**で指摘したように, 人々は分析者には観測できない, 特定の交通モードに対する志向を保有しており, その志向を所与として当該モードが利用しやすい居住地を選択している, つまり居住地自己選択が起こっている可能性が考えられる。居住地自己選択メカニズムによって, 鉄道利用志向の人は, 車利用志向の人に比較して最寄駅までの距離が近い場所に居住していることが考えられ, アクセス時間が内生変数の候補として挙げられる。

内生変数に影響を与える観察不可能な誤差項が加法的で一つの要素 $\mu_{nj}$ で表され、 $\epsilon_{nj}$ と $\mu_{nj}$ が平均ゼロの多変量正規分布に従うと仮定すると、以下が成り立つ。

$$y_{nj} = W(\mathbf{x}_n, \mathbf{z}_n; \gamma) + \mu_{nj} \quad (5.3)$$

$$CF(\mu_{nj}; \lambda) = E[\epsilon_{nj} | \mu_{nj}] \quad (5.4)$$

$$= \lambda \mu_{nj} \quad (5.5)$$

このとき $j$ を選択するときの効用は

$$U_{nj} = V(y_{nj}, \mathbf{x}_n, \beta_n) + \lambda \mu_{nj} + \tilde{\epsilon}_{nj} \quad (5.6)$$

となる。つまりコントロール関数 $CF_{nj}$ が交通モード選択における心理的効用として捉えることができる。 $\mu$ は心理的効用を考慮した結果、アクセス時間選択に及ぼす影響を表している。

## 5.5 操作変数

内生変数の候補がひとつなので、内生変数以外の変数に加え、モデルの外部から少なくとも一つ上記の条件をみたす操作変数を見つけてくる必要がある。今回、操作変数として国土交通省地価公示・都道府県地価調査<sup>82)</sup>居住するゾーンの公示地価平均を用いた。

図-6.1は内生変数と操作変数の相関図である。地価が高いエリアは最寄駅までのアクセス時間が短いという負の相関を観察することができる。ここで地価2万円/m<sup>2</sup>前後に着目してみよう。図から明らかのように、同じ価格帯であっても駅までの平均アクセス時間は10分から20分と分布している。価格が同じで各居住地から駅までのアクセス時間が異なる居住地集合であると考えられ、この価格帯を所与とした各家計は各交通モードに対する選好を考慮して居住地を選択する。平均より短いアクセス時間を選んで人は鉄道利用を好んでいる可能性が高いことから、回帰の残差をモードに対する選好に係る変数と解釈する。正の残差、つまり平均より長いアクセス時間を選択する家計は車利用に選好を持ち、負の残差、つまり平均より短いアクセス時間を選択する家計は鉄道利用に選好を持っている可能性があるとして予想される。推定によって符号条件を確かめることでこの解釈の妥当性が検証される。

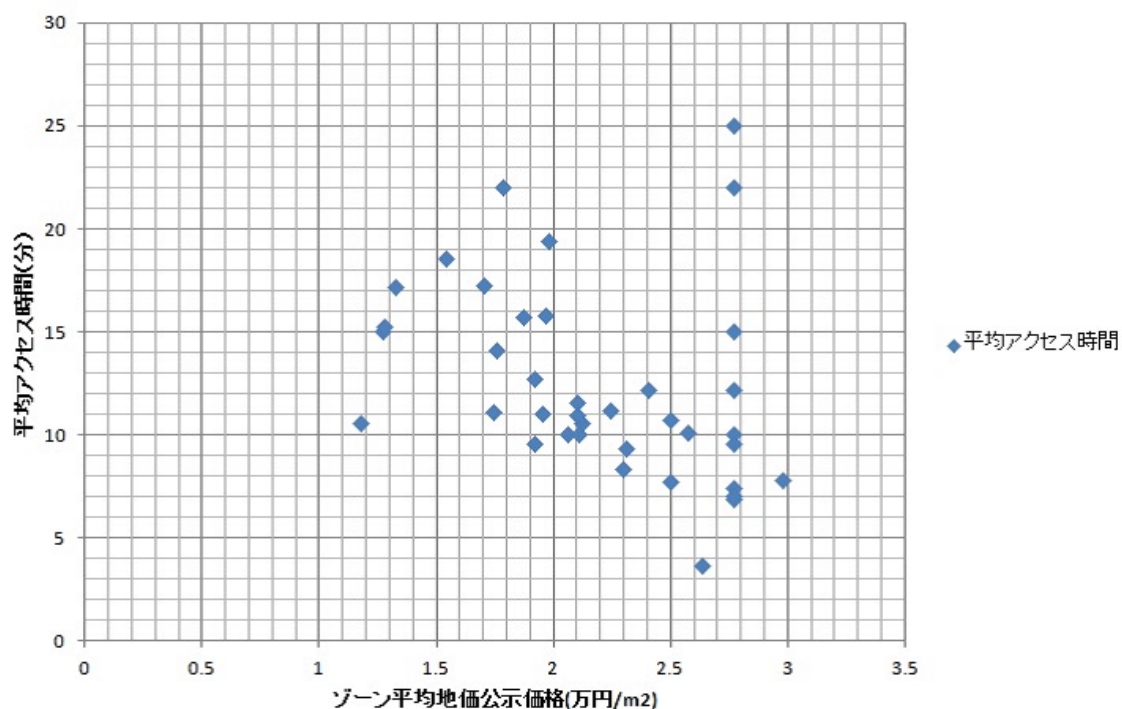


図-6.1 内生変数と操作変数の相関図

## 5.6 推計結果及び考察

表-6.1 通常推定方法とコントロール関数適用における推定結果の比較

	通常推定			コントロール関数法		
	推定パラメータ	標準誤差	t値	推定パラメータ	修正標準誤差	t値
性別 (女性=1)	1.55892	0.2954	5.2773	1.695575	0.3028823	5.6001
年齢 (50歳以上1)	0.24805	0.22456	1.1046	0.085623	0.2350493	0.3643
車保有 (保有1)	0.8981	0.36805	2.4401	1.023783	0.37354	2.7416
総所用時間	-0.34937	0.14113	-2.4755	-0.698391	0.1733696	-4.029
アクセス時間	-1.3833	0.16718	-8.2744	0.104146	0.286729	0.3633
イグレス時間	-0.20021	0.2231	-0.8974	-0.296346	0.2391848	-1.2392
定数項	4.17466	0.51286	8.1399	2.795957	0.5588326	5.0052
残差ミュー	—	—	—	-2.475519	0.4526737	-6.1529

表-1に通常推定と、内生性を考慮したコントロール関数法による推定結果を示している。内生変数の候補であったアクセス時間について大きくパラメータ推定の結果が変わっており、有意でなくなっている点に注目できる。実際に残差 $\mu$ が有意な結果となっており、アクセス時間が内生変数であることが確認されている。残差 $\mu$ の解釈として、プラスが車に対する選好、マイナスが公共交通に対する選

好と想定していたため、その符号も整合的な結果となっている。

## 5.7 政策的含意

この推定結果から、アクセス時間は内生変数であり、公共交通への意識など観察されない項と相関を持っていることが示唆される。よって推定を行う場合、内生性バイアスを除去するためにコントロール関数法の適用が有効に働く。またコントロール関数法によるアクセス時間の推定結果より、人々は利用する交通機関をあらかじめ想定した上で、その交通機関を利用しやすい居住地を選択するという、居住地ソーティングを居住地点レベルで行っている可能性が高いことが示唆される。つまり、鉄道利用を好む人々は駅へのアクセス時間が短い地点に居住する傾向があることが言える。このような場合、公共交通へのアクセス時間を短くするようなハード面の政策は、それだけでは想定した結果を生まない可能性がある。例えば、端末の充実化、新駅の設立などによりある地域の居住者の鉄道アクセス時間を変化させるような施策が考えられるが、これと併せて居住者の鉄道に対する選好を増加させるソフト面の政策と、ソーティングを促すような居住地移転支援施策などを行うことで大きく都市構造を変化させることができるであろう。

## 第6章 結論

本研究では人々の交通モード選択における心理的効用に着目し、それに係る現象、政策を分析した。心理的効用の役割として特に、公共交通を好む人々は公共交通のインフラ整備水準の高い地域に居住する割合が高くなり、逆に車利用がしやすい郊外地では車に対して選好を持つ人々が居住する割合が高くなるという「ソーティング」現象を発生させる機能に着目した。心理的効用と都市構造変化の関係について把握するため、交通モードに対する選好を明示的に扱うシミュレーションモデルを構築し、ソーティングのメカニズムと都市構造への影響について分析を行った。その上で人々の選好に影響を与えるような政策の役割についての考察を行い、パーソントリップ調査データに基づく実証分析によって現実でのソーティングについて検証した。このような分析によって近年実務への適用が進んでいる人々の心理に働きかけるソフト面の政策についてその意義、有効性について示唆を得ることが可能となった。以下に、各章で考察した問題の概要、構築したモデル、それらを通じて得られた知見をまとめる。

**第2章**では従来の研究についてソーティングとモデル分析手法を中心に文献調査を行い、既存の研究結果、分析の方法論について特徴を整理した。とくに、交通モード間の競合と複数均衡に関する既存研究により公共交通が有する費用構造とポジティブフィードバックの性質について触れた。そのうえで従来の研究では扱われなかった交通モードに対する選好を明示的に取り入れたモデルを構築し、ソフト面の政策評価を行うという本研究の方向性を定めた。

**第3章**では交通モード選択における心理的効用の存在がもたらす内生性の問題について整理を行った。心理的効用は通常観測することができないためモデルの誤差項に入ってくる。このとき説明変数に地域の交通モードインフラに係る変数が入っている場合、内生性が発生する可能性がある。心理的効用の存在が居住地域選択の際にも働き、その変数を「選択」していると考えためである。例えば場合鉄道利用に選好を持つ家計が鉄道インフラの整った地域に住む場合、選好の大きさとインフラ整備水準は正の相関をもち内生性の問題が生じる

このような内生性対処方法についてBLPアプローチとコントロール関数アプ

ローチの2つを取り上げその方法論の説明を行った。BLPアプローチは集計データを用いて分析できることに特徴があり、地域レベルの内生性の分析を行う場合に有効に働く。コントロール関数アプローチは個人データを用いることで個人レベルの内生性の分析が可能である。

第4章では心理的効用を明示的に考慮した理論モデルを構築し、シミュレーション分析を行った。これによりソフト面の交通施策が都市構造変化をもたらすメカニズムについて示唆を得た。まず、自動車偏重型社会からの脱却のためには、モードに対する選好を変化させる政策が有効であることを示す結果が得られた。都市構造変化のプロセスに着目し選好強度の集合は3つの領域に分類できる。領域1は両地域とも自動車依存型社会の状態にとどまっている状態であり、両地域の政府とも鉄道に対する投資は行わない。領域2は鉄道に対する選好強度の高まりに伴い鉄道整備に優位性を持つ地域1に鉄道利用者が一定数集まった結果、地域1政府は鉄道に対する投資を開始する。これにより地域1は地域2に比べ鉄道サービス水準が高くなる。地域2で鉄道を利用していた家計は地域1に居住地を移転し鉄道利用を行う。このようなソーティングによって地域1鉄道は規模の経済が発生する。しかし自動車に選好を持つ家計はその選好強度が比較的高い水準にあるため、鉄道利用へモード変更はなされない。領域3は自動車に選好を持つ家計の選好強度が低い水準にあるため、ソーティングによって発生した規模の経済の恩恵を享受するためモード変更を行う家計がでてくる。これによりポジティブフィードバックが両タイプの家計から引き起こされ地域1は鉄道整備が進み人口が集積する。さらに、両地域とも過度の自動車利用が解消されたため混雑は緩和し社会厚生は大きく上昇する。鉄道に対して選好を持つ家計の選好度合いを上昇させることで領域1から領域2へ移行し、自動車に対して選好を持つ家計の選考度合いを減少させることで領域3に移行することができれば社会厚生の高い都市構造の実現が達成されるであろう。つまりソフト面の政策では鉄道のイメージアップキャンペーンと自動車に対するネガティブキャンペーンを同時に行うことが重要である。一方だけでは社会厚生最大化へとは向かわない。次に、交通モードのコスト構造を変化させるようなハード面の政策が、都市構造変化を及ぼす選好領域を変化させることが判明した。この結果はハード面の政策の評価に新たな視点を加えることになる。鉄道に関するハード面の政策はコスト構造変化を通じてソーティング現象を引き起こしやすくすることを理解しなけれ



ばならない。つまりコスト構造を変化させるハード面の政策と選好強度を変化させるソフト面の政策は相乗効果を持つことになる。逆に言えばハード面の政策自体はソーティングを引き起こすと限らないため、ソフト面の政策も考慮しなければ期待した効果を生まない可能性が生じてくる。自動車に関するハード面の政策は鉄道のソーティングによる規模の経済を妨げる効果を持つだけでなく、全体の社会厚生まで下げてしまう可能性がある。鉄道利用を促進するためのソフト面の政策をいくら行っても、自動車に関するハード面の政策を伴うと期待する結果を得ることは難しくなってくる。最後に、現実の社会では居住地移転費用の存在により行動が制約されることが少なくないため、居住地移転費用を考慮した分析を行った。その結果居住地移転費用の存在はソーティングと規模の経済による人口集積を妨げ領域3を縮小させることがわかった。このため大規模に都市構造を変化させていくためにはソフト面の政策だけでなく居住地移転を支援するような政策も併せて考える必要がある。

第5章では現実のデータを用いてソーティングの検証を行い、第4章で得られた帰結の妥当性を確認した。コントロール関数アプローチの推定結果より、人々は利用する交通機関をあらかじめ想定した上で、その交通機関を利用しやすい居住地を選択するという、居住地ソーティングを行っている可能性が高いことが示唆された。

上述のように本研究は都市構造と交通行動という複雑な関係を有するシステムを分析する際、従来考慮されていなかった交通モードに対する選好と居住地ソーティングに着目することで、既存の枠組みでは分析できないソ政策の評価を行っただけでなく、内生性という既存モデルで発生する問題点を指摘した。しかしながら、居住地ソーティングに関わる研究は緒についたばかりであり、今後多くの研究課題が残されている。ここで本研究の今後の方向性と今回の分析の位置づけ、今後必要な分析について整理しておく。

まず居住地ソーティングの詳細と今回行った分析の位置づけを確認しておく。本稿では人々が自分の好む交通モードが利用しやすい居住地を選択することを居住地ソーティングとして定義したが、段階に分けてソーティングを分類すると、個人の行動としてのミクロなソーティング、現象としてのマクロなソーティングという2つのレベルが考えられる。前者は人々が居住地選択を行う際の行動原理であり、後者は個人の行動の集積した結果、地域ごとに選好の似通った人々が分布し

ているという棲み分け現象として捉えられる。本稿の第5章で行った実証分析はマクロなソーティングが起こっていることを前提として、居住地域での人口分布に交通モードに対する選好の偏りがあることから生じるバイアスを除去した交通機関選択モデルを提示しているものとして位置づけられる。バイアスが実際に確認されたことで、現象としてのマクロなソーティングを示唆し、その背景にある個人行動としてのミクロなソーティングの可能性を指摘した。第4章では交通モードに対する選好を導入した簡単なモデルを構築することで、家計の効用最大化の結果ミクロなソーティングが起こることを確認し、結果としてマクロなソーティングによって都市構造が変化することを示した。しかし今回行った分析は多くの課題を有している。第4章でのモデルは交通モードの選好、居住地移動、交通モード選択の関係を分析するために必要最低限な要素のみ取り入れた可能な限り簡略化されたものとなっており、より詳細な分析のためには地代の導入、所得など個人の特性、住宅市場の導入などさらなるモデルの拡張が必要である。第5章ではあくまで既存の交通機関選択モデルの問題点を指摘しバイアスを除去したに過ぎず、マクロなソーティングを前提とした分析である。マクロなソーティングを形成を予測する実証モデルを構築するためには、ソーティングを考慮した居住地選択モデルを作成する必要がある。

ソーティングを考慮した体系的研究を行うことでコンパクトシティを目指す政策の評価が可能となる。例えば、公共交通指向型開発と次世代路面電車システム(Light Rail Transit; 以下, LRT)は都市構造再編の手法として注目されている。しかしながら、LRT新設は検討にとどまり実際の導入は一向に進展していないのが現状である。LRTを新設するにあたり問題となるのは導入空間の制約だけでなく、事業としての成立見通しが不透明なことが原因として挙げられるであろう。従来の需要予測の枠組みでは需要関数を交通サービス水準の関数として記述されており、非観測要因である選好の存在は全く考慮されていない。その結果、LRT導入により居住地ソーティングがどの程度発生し沿線の開発が進むのかという予測ができていない。居住地ソーティングを考慮した居住地・交通予測モデルを開発することで都市構造変化の影響も考慮したLRTの経済評価が可能となる。このように都市構造政策の分析を行う際、ソーティングを考慮した分析体系の構築は非常に重要となってくるであろう。

以上のような分析のために今後多方面の理論的・実証的分析が必要となる。第1

に、交通モードに対する選好を計量化する手法が必要である。特にLRTなど新しいモードに対してどのように人々が選好を持つのか明らかにする必要がある。選好の計測タイミングの問題も存在する。データ制約のため現在有する選好を計測することしかできないことが多い。しかし実際に知りたいのは居住地選択を行った時点の選好であるため、このタイミングによるバイアスに対する対処法も考慮しなければならない。このために、選好の形成プロセスをモデル化することが考えられる。例えば、所得の高い人は車に対する選好が高い傾向にあるか否かといった分析を行い、人々の個人特性などから選好の予測が可能となるであろう。また選好に影響を与えるソフト面の政策の評価も併せて行う。

第2に、ソーティングを考慮した居住地選択モデルを構築する必要がある。居住地選択においては愛着など居住地への個人的選好、データとして現れない土地特有の魅力、交通モードに対する選好、の3つの要素が誤差項に含まれると考えられる。この際、土地アメニティの魅力は地代と正の相関を持つであろう。このような内生性も考慮した分析には第3章で述べたBLPアプローチが有効となるであろう。またパネルデータを用いた分析で人々の居住地選択と交通行動の関係について実証的に明らかにすることも必要である。

第3に、都市構造、交通体系、経済活動の相互作用を考慮した統合モデルによる分析が必要となる。このような手法として応用都市経済モデル(Computable Urban Economic Model; 以下、CUEモデル)が有効となるであろう。立地と交通が同時に均衡するCUEモデルはミクロ経済学を基礎においており、伝統的費用便益分析と整合性をもっているため定量的に便益を測定可能である。CUEモデルでは立地選択確率と交通選択確率の推定をそれぞれ行うが、このときソーティングの影響をモデルに組み込むことで、沿線開発への影響を考慮したLRTの経済評価も可能となってくる。以上までの分析によってコンパクトシティに向けた政策の評価をハード面、ソフト面を問わず実行できることが期待されるであろう。

## 参考文献

- 1) R. Cervero : Transit Oriented Development ' s Ridership Bonus: A Product of Self-Selection and Public Policies, *Environment and Planning A*, Vol.39, pp.2068-2085, 2007.
- 2) R. Cervero and K. Kockelman : Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol.2, pp.199-219, 1997.
- 3) 国土交通省, 平成21年度国土交通白書第3章
- 4) 社会資本整備審議会, 新しい時代の都市計画はいかにあるべきか。(第二次答申), 2007.
- 5) Dittmar. H. : *The Social Psychology of Material Possessions: To Have is to be*, St. Martin's Press, 1992.
- 6) 谷口綾子, 藤井聡, 原文宏, 高野伸栄, 加賀屋誠一 : TDMの心理的方略としてのTFP(トラベルフィールドバックプログラム)ー実務的課題と展望ー, 土木学会論文集, Vol.737, pp.27-38, 2003.
- 7) 谷口綾子, 藤井聡:「交通事業者」によるモビリティ・マネジメント:顧客主義とエモーショナルキャンペーン, 交通工学, Vol.42, pp.58-65, 2007.
- 8) 池田浩嗣: ソーシャルゲームはなぜハマるのかーゲーミフィケーションが変える顧客満足, ソフトバンククリエイティブ, 2011.
- 9) 島岡明生, 谷口守, 松中亮治: コンパクトシティ・マネジメントにおける行動変容戦略の不可欠性, 土木学会論文集, Vol. 2005, No. 786, pp.135-144, 2005.
- 10) 藤井 聡: 交通行動が居住地選択に及ぼす影響についての仮説検証: コンパクト・シティへの誘導に向けた交通政策に関する基礎的研究, 交通工学, Vol.43, pp.53-62, 2008.
- 11) Mokhtarian, P. L. and Cao, X. Examining the impacts of residential self-selection on travel behavior: A focus on methodologies, *Transportation Research B*, Vol.42 (3), pp204-228, 2008.
- 12) Cao, X., Mokhtarian, P. L., and Handy, S. L. : Examining the Impacts of Residential Self-Selection on Travel Behaviour: A Focus on Empirical Findings, *Transport Reviews*, Vol.29: 3, pp359-395, 2009.

- 13) R. Cervero and M.Duncan : Residential Self Selection and Rail Commuting: A Nested Logit Analysis, Working paper, University of California Transportation Center, 2002.
- 14) Cao, X. : Disentangling the influence of neighborhood type and self-selection on driving behavior: an application of sample selection model, *Transportation* , Vol.36, pp207-222, 2009.
- 15) Kitamura,R., Mokhtarian, P.L., Daidet, L. : A micro-analysis of land use and travel in five neighborhoods in the San Francisco Bay Area, *Transportation* , Vol.24, pp125-158, 1997.
- 16) Bagley, M.N. and Mokhtarian, P.L. : The impact of residential neighborhood type on travel behavior: A structural equations modeling approach, *The Annals of Regional Science*, Vol.36, pp279-297, 2002.
- 17) Chatman, D.G. : Residential choice, the built environment, and nonwork travel: evidence using new data and methods,*Environment and Planning A* Vol.41(5), pp.1072-1089, 2009.
- 18) Boarnet, M. G., and S. Sarmiento : Can Land-use Policy Really Affect Travel Behaviour? A Study of the Link between Non-work Travel and Land-use Characteristics, *Urban Studies*, Vol. 35, No. 7, pp.1155-1169, 1998.
- 19) Khattak, A.J. and Rodriguez, D. : Travel behavior in neo-traditional neighborhood developments: A case study in USA, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.39, pp.481-500, 2005.
- 20) T.A.Paulus, Cao, X., Corinne, M. : Understanding neighbourhood design impact on travel behavior: An application of structural equations model to the british micro-analysis data, Proceedings of the 12th World Conference on Transport Research Society, pp.1-16, 2010.
- 21) Cao, X., Xu, Z., Fan, Y. : Exploring the connections among residential location, self-selection, and driving: Propensity score matching with multiple treatments, *Transportation Research Part A*, Vol.44, pp.797-805, 2010.
- 22) Kitamura, R., S. Nakayama and T. Yamamoto: Self-Reinforcing Motorization: Can Travel Demand Management Take Us out the Social Trap?, *Transport Policy*, Vol.6, pp.135-145, 1999.
- 23) 松島格也, 小林潔司: 手段補完性を考慮したバス市場構造の分析, 土木学会論文集, No.765/IV-64, pp.115-129, 2004.
- 24) 中村良平, 田淵隆俊: 都市と地域の経済学, 有斐閣, 1996.

- 25) P. A. Samuelson : The Pure Theory of Public Expenditure, *The Review of Economics and Statistics*, Vol.36, pp.387-389, 1954.
- 26) Tiebout, C. M. : A pure theory of local expenditures, *Journal of Political Economy*, Vol.64, pp.416-424, 1956.
- 27) Mansoorian, A. and Myers, G. M. : Attachment to home and efficient purchases of population in a fiscal externality economy, *Journal of Public Economics*, Vol.52, pp.117-132,1993.
- 28) 坂下昇 : ふるさと志向を伴う場合の地域間人口配分, 応用地域学研究論文集, Vol.2, pp.1-10, 1996.
- 29) Vance, C. and Hedel, R. : The impact of urban form on automobile travel: disentangling causation from correlation, *Transportation*, Vol.34, pp.575-588, 2007.
- 30) Greene, W. : *Econometric Analysis*, Sixth Edition, Prentice Hall, 2007.
- 31) Louviere, J. et al. : Recent Progress on Endogeneity in Choice Modeling, *Marketing Letters*, Vol16 pp.255-265, 2005.
- 32) Berry, S. : Estimating Discrete-Choice Models of Product Differentiation, *RAND Journal of Economics* , Vol.25, pp.242-262, 1994
- 33) Berry, S., J.Levinsohn, and A.Pakes : Automobile Prices in Market Equilibrium, *Econometrica* , Vol.63, pp.841-889, 1995.
- 34) Nevo, A. : A Practitioner's Guide to Estimation of Random-Coefficients Logit Models of Demand, *Journal of Economics and Management Strategy*, Vol.9, pp.513-548, 2000.
- 35) Heckman, J. : Dummy Endogenous Variables in a Simultaneous Equation System, *Econometrica* , Vol.46, pp.931-959, 1978.
- 36) Hausman, J. A.: Specification Tests in Econometrics, *Econometrica* , Vol.46, pp.1251-1272, 1978.
- 37) Heckman, J. and R. Robb. : Alternative methods for evaluating the impact of interventions: An overview, *Journal of Econometrics*, Vol.30, pp.239-267
- 38) Blundell, R. and Powell, J. : Endogeneity in Semiparametric Binary Response Models, *The Review of Economic Studies* , Vol.71, No.3, pp.655-679, 2004
- 39) Fox, J. : Semiparametric Estimation of Multinomial Discrete-Choice Models Using a Subset of Choices *The RAND Journal of Economics* ,Vol.38, pp.1002-1019, 2007

- 40) Guevara, C and M. Ben-Akiva : Endogeneity in residential location choice models, *Transportation Research Record* , pp.60-66, 2006.
- 41) Petrin, A and Train, K. : A Control Function Approach to Endogeneity in Consumer Choice Models, *Journal of Marketing Research*, Vol. 47, pp3-13, 2010.
- 42) Pagan, A. R. : Econometric Issues in the Analysis of Regressions with Generated Regressors, *International Economic Review*, Vol.25, pp221-247, 1984.
- 43) Steg, L. : Car use: lust and must. Instrumental, symbolic and affective motives for car use, *Transportation Research-A*, Vol.39, pp.147-162, 2005.
- 44) Train,K. : *Discrete Choice Model with Simulation* , Cambridge University Press , 2003.
- 45) CR. Bhat and JY. Guo : An Innovative Methodological Framework to Analyze the Impact of Built Environment Characteristics on Activity-Travel Choices, *Innovations in Travel Demand Modeling*, Vol.2, 2008.
- 46) SL Handy, MG Boarnet, R Ewing, RE. Killingsworth : How the Built Environment Affects Physical Activity Views from Urban Planning *American Journal of Preventive Medicine*, Vol.23, pp.64-73, 2002.
- 47) Boarnet, M. G., and S. Sarmiento : Can Land-use Policy Really Affect Travel Behaviour? A Study of the Link between Non-work Travel and Land-use Characteristics, *Urban Studies*, Vol. 35, No. 7, pp.1155-1169, 1998.
- 48) Boarnet, M. G., and R. Crane : The influence of land use on travel behavior: specification and estimation strategies, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 35, pp823-845, 2001.
- 49) Cao, X., Mokhtarian, P. L., and Handy, S. L. : Examining the Impacts of Residential Self-Selection on Travel Behaviour: A Focus on Empirical Findings, *Transport Reviews*, Vol.29: 3, pp359-395, 2009.
- 50) :R. Cervero and M.Duncan Residential Self Selection and Rail Commuting: A Nested Logit Analysis, Working paper, University of California Transportation Center, 2002.
- 51) CR. Bhat and JY. Guo : An Innovative Methodological Framework to Analyze the Impact of Built Environment Characteristics on Activity-Travel Choices, *Innovations in Travel Demand Modeling*, Vol.2, 2008.

- 52) CR. Bhat and JY. Guo : A comprehensive analysis of built environment characteristics on household residential choice and auto ownership levels, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.41, pp.506-526, 2007.
- 53) S.L. Handy, M.G. Boarnet, R. Ewing, RE. Killingsworth : How the Built Environment Affects Physical Activity Views from Urban Planning *American Journal of Preventive Medicine*, Vol.23, pp.64-73, 2002.
- 54) Boarnet, M. G., and R. Crane : *Travel by Design: The Influence of urban Form on Travel* , Oxford University Press , 2001.
- 55) Boarnet, M. G., and R. Crane : The influence of land use on travel behavior: specification and estimation strategies, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 35, pp823-845, 2001.
- 56) R. Cervero and R. Gorham : Commuting in Transit Versus Automobile Neighborhoods, *Journal of the American Planning Association*, Vol.61, pp.210-225, 1995.
- 57) Crane, R. and Crepeau, R. : Can Land Use Policy Really Affect Travel Behavior? A Study of the Link between Non-Work Travel and Land Use Characteristics, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol.3, pp.225-238, 1998.
- 58) Guo, Z. : Does the pedestrian environment affect the utility of walking? A case of path choice in downtown Boston, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* Vol.14, pp.343-352, 2009.
- 59) Greenwald, M. J. and Boarnet, M. G. : The Built Environment as a Determinant of Walking Behavior: Analyzing Non-Work Pedestrian Travel in Portland, Oregon : *Transportation Research Record*, 1780, pp.33-42, 2001.
- 60) Naess, P. : Residential Self-Selection and Appropriate Control Variables in Land Use: Travel Studies, *Transport Reviews*, Vol.29, pp293-pp324, 2009.
- 61) Schwanen, T., Mokhtarian, P.L. : What affects commute mode choice: neighborhood physical structure or preferences toward neighborhoods?, *Journal of Transport Geography*, Vol.13, pp83-99, 2005.
- 62) Litman, T.A. : Land Use Impacts on Transport How Land Use Factors Affect Travel Behavior, Victoria Transport Policy Institute, 2010.
- 63) P. Kennedy : *A guide to econometrics 6th Edition*, Blackwell Publishing, 2008.



- 64) Park, S. and S. Gupta : Simulated Maximum Likelihood Estimator for the Random Coefficient Logit Model Using Aggregate, *Journal of Marketing Research*, Vol.46, pp.531-542, 2009.
- 65) Petrin, A and Train, K. : Omitted Product Attributes in Discrete Choice Models, NBER Working Paper, 2003.
- 66) Petrin, A and Train, K. : A Control Function Approach to Endogeneity in Consumer Choice Models, *Journal of Marketing Research*, Vol. 47, pp3-13, 2010.
- 67) Yang, S., Chen, Y., and Allenby, G.:Bayesian Analysis of Simultaneous Demand and Supply, *Quantitative Marketing and Economics* , Volume 1, pp.251-275, 2003.
- 68) Jiang, R., Manchandab, P.,and Rossi, P. : Bayesian analysis of random coefficient logit models using aggregate data, *Journal of Econometrics* , Vol.149, pp.136-148, 2009.
- 69) Guevara, C and M. Ben-Akiva : Endogeneity in residential location choice models, *Transportation Research Record* , pp.60-66, 2006.
- 70) Train,K. : *Discrete Choice Model with Simulation* ,Cambridge University Press , 2003.
- 71) Handy S.L., Boarnet M.G., Ewing R., Killingsworth R.E. :How the Built Environment Affects Physical Activity Views from Urban Planning, *American Journal of Preventive Medicine*, pp.64-73, 2002.
- 72) J.Rajamani, C.R. Bhat, S. Handy, G. Knaap, Yan S. : Assessing Impact of Urban Form Measures on Nonwork Trip Mode Choice After Controlling for Demographic and Level-of-Service Effects, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol.1831, pp.158-165, 2003.
- 73) D. Levinson : Accessibility and the Journey to Work, *Journal of Transport Geography*, Vol.6, pp11-21, 1998.
- 74) T, Yoshida and K, Tanaka : Land-use diversity index: a new means of detecting diversity at landscape level, *Landscape and Ecological Engineering*, Vol.1, pp.201-206, 2005.
- 75) B.B. Brown, I. Yamada, K. R. Smith, C. D. Zicka, L. K. Jones, J. X. Fan: Mixed land use and walkability: Variations in land use measures and relationships with BMI, overweight, and obesity, *Health and Place*, Vol.15, pp.1130-1141, 2009.
- 76) Eagly, A. H., and Chaiken, S. : *The psychology of attitudes* Forth Worth, FL: Harcourt Brace Jovanovich, 1993.

- 77) 藤井聡：TDMと社会的ジレンマ：交通問題解消における公共心の役割，土木学会論文集，Vol.667，pp.41-58，2001.
- 78) 藤井聡：土木計画のための社会的行動理論－態度追従型計画から態度変容型計画へ－，土木学会論文集，Vol.688，pp.19-35，2001.
- 79) 藤井聡，染谷祐輔：交通行動と居住地選択行動の相互依存関係に関する行動分析，土木計画学研究・論文集，Vol.24，pp.481-488，2007.
- 80) 福田大輔，上野博義，森地茂：社会的相互作用存在下での交通行動とマイクロ計量分析，土木学会論文集，Vol.765，pp.49-64，2004.
- 81) 上杉昌也，浅見泰司：小地域の所得分布推計および転居の所得要因分析，Discussion Paper，No.103，2010.
- 82) 国土交通省地価公示・都道府県地価調査，<http://www.land.mlit.go.jp/landPrice/AriaServlet?MOD=0&TYP=0>，平成23年5月6日時点.

## 付録A 導出過程

1) 式 (A.8) の導出

$$\omega = \delta - X_1\theta_1 \quad (\text{A.1})$$

$\theta_2$  を所与とした場合の GMM 目的関数を  $f(\theta_1)$  で定義する.

$$f(\theta_1) = \omega(\theta_1)'Z\Phi^{-1}Z'\omega(\theta_1) \quad (\text{A.2})$$

$$= (\delta - X\theta_1)'Z\Phi^{-1}Z'(\delta - X\theta_1) \quad (\text{A.3})$$

$$= \delta'Z\Phi^{-1}Z'\delta - \delta'Z\Phi^{-1}Z'X\theta_1 - \theta_1'X'Z\Phi^{-1}Z'\delta + \theta_1'X'Z\Phi^{-1}Z'X\theta_1 \quad (\text{A.4})$$

一階条件は次式で表される.

$$f'(\theta_1) = -(\delta'Z\Phi^{-1}Z'X)' - X'Z\Phi^{-1}Z'\delta + 2X'Z\Phi^{-1}Z'X\theta_1 \quad (\text{A.5})$$

$$= -2X'Z\Phi^{-1}Z'\delta + 2X'Z\Phi^{-1}Z'X\theta_1 \quad (\text{A.6})$$

$$= 0 \quad (\text{A.7})$$

以上より  $\hat{\theta}_1$  は次式で導かれる.

$$\hat{\theta}_1 = (X'Z\Phi^{-1}Z'X)^{-1}X'Z\Phi^{-1}Z'\delta(\hat{\theta}_2) \quad (\text{A.8})$$

## 謝 辞

本研究の遂行にあたり、多くの方々にご指導・ご協力をいただきました。ここに心より感謝の意を表します。京都大学大学院工学研究科小林潔司教授には筆者が学部4回生として研究室に配属されて以来、常に辛抱強くご指導頂きました。小林教授の下で研究に取り組んできた過程は、研究だけに留まらず、プロとしての姿勢、生きかた、教養など、自分の至らない点全てを吸収するうえで何事にも代え難い貴重な経験となりました。大学に入学し小林教授のような人物と時間を共有することができたことを大変幸運に思っております。ここに、心より深く感謝申し上げます。京都大学大学院工学研究科松島格也准教授には、毎回の研究ゼミにおいて鋭いご指摘を頂いた他、日頃から公私に関わらず相談に乗って頂き、常に適切な助言を頂きました。本稿を取りまとめるにあたっても多大なるご支援を受けました、心より御礼申し上げます。京都大学大学院工学研究科大西正光助教には、日々のささいなことから研究の議論に至るまで研究室生活を送るうえで多大なサポートを受けました。また常に学生のこと、研究室のことを気にかけてくださり、研究室の雰囲気をも明るくして頂きました。ここに、深く感謝の意を表します。京都大学大学院工学研究科吉田護特定助教には、日頃の研生活の他、本研究の遂行に関わる基礎的素養についても有益なご指導・コメントを頂きました。学生に対しても気軽に、そして優しく接していただいたため、筆者にとっても大変心強い存在でありました。ここに厚く御礼申し上げます。京都大学大学院工学研究科鄭蝦榮研究員には、研究室に入った当初から常に温かくご指導を頂きました。つらいときにも励ましの言葉を頂き、勇気をもらうことができました。ここに、心より感謝申し上げます。大連理工学石磊准教授には、学部時代から研究に関して真剣な議論を交わす中で数々の有益なコメントを頂きました。初めての国際学会発表時においても筆者の不安を和らげて頂きました。ここに、深く感謝いたします。秘書の藤本彩氏には、日頃から多くの事務上のお手伝いの他、様々な場面でご支援を受けました。ここに、心より感謝いたします。同学年の仲間である尾木健士郎氏、塩谷賢平氏、謝景韻氏とは共に勉学にいそみ、励ましながら大学生活を過ごすことができました。とくに尾木健士郎氏とは、学部時代を含め大学生活の約半分をともに過ごし、日々切磋琢磨しながら成長して参りました。

真剣に勉学に励み、夢を語らい、ときに旅に出かけた尾木氏との研究室生活は筆者の人生の中でも最も刺激的な時期でありました。今後も道は違えど、それぞれの道で汗を流し、ともに人間として1回り成長した姿で再会できることを願います。京都大学経営管理大学院阿部真育氏とは公私共に多くの時間を共有し、常に周りに気を配れる阿部氏から多くのことを学びました。阿部氏がいつも入れてくださった良質なコーヒーがもう飲めなくなるとなると思うと感慨深く思います。今後ますます著しくなるであろう阿部氏の活躍を楽しみにしていきたいと思えます。計画マネジメント論研究室の諸兄姉には、本研究を取りまとめる上での多大な御協力を頂きました。感謝の意を申し上げます。さらに、紙面には書ききれない多くの方々に、筆者の研究生活は支えられ、またその支えによって、本論文は完成に至りました。ここに記すことができない失礼をお詫び申し上げるとともに、感謝の意を記します。最後に、なかなか帰郷することができなかった親不幸な筆者に対して、常日頃から体調を気にかけてくださり暖かく惜しみない支援と、筆者が勉学に勤しむ環境を本日に至るまで厭わず供与してくださった家族へ、深く感謝の意を表します。