

# ネットワーク上の空間計画に向けた 観測と行動モデルの展開

福山 祥代<sup>1</sup>・羽藤 英二<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 独立行政法人都市再生機構 (〒 163-1382 東京都新宿区西新宿 6-5-1)  
E-mail: sachiyo.fukuyama@gmail.com

<sup>2</sup>正会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)  
E-mail: hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp

ネットワーク上を移動する個人単位の軌跡データの取得技術が進展し、交通行動分析の手法がトリップベースからアクティビティベースへと移行している状況を踏まえ、本稿では、歩行スケールの界隈を形成する 1km 四方程度の範囲において、人の移動の観点から、空間計画を行う上での手がかりとなるデータとモデルの技術的状况を整理する。歴史的な文脈と現在の行動の両面から都市の空間構造を把握することを目的として、ネットワークデータと行動観測データに着目し、グラフ理論を用いたネットワーク特性の分析手法と観測データに基づく歩行者流動の分析・予測のためのモデリングの手法について、近年の動向を概観し、今後の方向性について議論する。

*Key Words: network analysis, pedestrian behavior, activity choice modeling, observational data*

## 1. はじめに

人の移動は、都市空間とそのネットワーク的なつながりに大きな影響を及ぼす。交易上の主要な街道沿いに立地する市や宿場町、港湾都市の発展、鉄道敷設による駅周辺の著しい商業集積、車社会の進展による駅周辺地区の空洞化など、移動手段の変化がもたらす人の流動状況の変化が、都市と地域の様相の変化の大きな原動力となってきたことを示す歴史的な事象は容易に見つけることができる。身近な例では、人通りの多い場所にある店は一般的に利用客が多く、人が減多に通らない場所では店舗経営に苦労する。これとは逆に、ニューヨークのハイラインやパルセロナの多孔質戦略のように、非常に魅力度の高い施設やパス、見通しのいい広場を外部挿入することによって、停滞していた地域に人の集中と流動を生み出し、施設周辺地区に活気をもたらす空間更新が誘発されることもある。

このことが、独占性が生じるという空間の特質によって説明できる。生産や商業、居住、余暇などの様々な活動が土地と関係づけられ、その結果、活動を行うために人や物の移動が発生する。Krugman, 藤田らによる新経済地理学 (Fujita et al. 1999a<sup>1)</sup>) では、このようなメカニズムで発生する移動を一つの原動力として、都市における経済活動の立地が説明される。

そもそも、土地や土地に固定された人などを分散力、規模の経済を集積力とし、これらと移動コストとの相互関係によって、経済活動の立地に空間構造が生じるこ

とが古くから研究されてきた。von Thünen(1826)<sup>2)</sup> の「孤立国」やこれを発展させた Alonso(1964)<sup>3)</sup> の中心業務地区と居住地帯による単一中心モデル、Christaller(1933)<sup>4)</sup> や Lösch(1940)<sup>5)</sup> の中心地理論などの伝統的な立地論においても、移動コストが立地のメカニズムにおいて重要な役割を果たし、新経済地理学の理論との整合性も明らかにされている (Fujita and Krugman, 1995<sup>6)</sup>; Fujita et al. 1999b<sup>7)</sup>, Ikeda et al., 2010<sup>8)</sup>)。

数理経済学の嚆矢といえる Hotelling(1929)<sup>9)</sup> による空間寡占競争の理論では、消費者を空間的に分布させ、商品価格と交通費の合計が小さくなる店を選択するとして 2 店舗の立地問題がモデル化されており、資源経済学や厚生経済学において地理と交通の問題を数理的に扱うことが明確に意味づけられているといえよう。

こうした研究では、単純な距離に着目した移動コストの議論に加え、Fujita and Mori (1996)<sup>10)</sup> に見られるように、港や交通ハブ等の自然的利点が都市の形成を促進する中心となる傾向について、新経済地理学のモデルを援用し発展的に説明することに成功している。そこでは、総輸送費用が最小になる地点であることがハブの優位性を生み出すとされる。さらに近年では、赤松ら (e.g. 赤松ら, 2010<sup>11)</sup>; 高山ら, 2013<sup>12)</sup>) が、新経済地理学の核周辺モデルを多都市や多産業のモデルに拡張し、より複雑な人口集積・分散パターンの発生メカニズムを明らかにしている。

交通戦略が都市の発展過程に与える影響は、土地利用-交通統合モデルを用いたシミュレーションでも明らかにされている(宮城・澤田, 2002<sup>13)</sup>)。土地利用-交通統合モデルでは、立地行動に加えて交通選択行動をモデルに組み込み、都市均衡モデル、雇用・人口モデル、ネットワーク均衡モデルにより土地利用と交通パターンの相互作用が数的に記述され、均衡状態が求められる(e.g. Anas, 1984<sup>14)</sup>, Miyagi, 1989<sup>15)</sup>)。

都市は、場所どうしの移動による関係が複雑に重なりあひながら、張り巡らされたネットワークにより形成されている。供給側もしくは需要側の移動コストと関係して経済活動や社会的活動の集積が発生し、空間の利用形態やネットワークそのものの改変を促す。この結果生じた移動条件の変更や何らかの外的な条件がまた活動集積を変化させ、空間側の次のステップの変化を引き起こすといった循環的な作用は、ブローデルの地中海を引用するまでもなく、歴史的な時間軸においても起こり続けている。また短期的な街の新陳代謝においても、中核駅の駅ナカの発展や国道沿いの郊外SCの成功に見られるように、さまざまな空間的スケールで展開されてきたといえるだろう。

都市の空間計画を行うにあたっては、都市空間をネットワークに見立てて、ネットワーク上の人の流動や活動集積の体系に対して、自分たちが加える改変がどのように影響し、期待する効果が得られるかを検証することが重要である。

複雑なネットワーク上で多様な経済主体の相互作用による自己組織化の過程を精緻に予測することは困難であるが、Fujita and Mori (1996)<sup>10)</sup>が指摘しているような交通に基づいたアプローチの利点は、ネットワークの幾何学的形態に着目し、グラフ理論に基づく分析を行うことにより把握できることにある。行動データが得られない過去の都市空間構造とその変遷を定量的に把握する上で、歴史的なネットワークデータの分析は大きな手がかりを与えてくれるのではないだろうか。

一方、ネットワーク上を移動するより詳細な個人の選択に着目して、これらの重ね合わせから流動や活動の集積の状況を予測することが可能になりつつある。スマートフォンや様々な位置ベースの個人単位の移動サービスが整備され、個人ごとに膨大な移動軌跡データが取得できる技術的環境は既に整い、データの利用可能性は著しく高まっているといえるだろう。

理論的にいかに精緻であったとしても、データで検証してみると、現実の現象とは全く異なっている結果を示している場合がある。またその逆にモデルは簡素だが、再現性が高く、頑健な結果が得られる場合もあるかもしれない。物理学や生物学の世界ではモデルは常に観測によって検証されてきた。実験や観測から現

象が可視化され、よりよい理解が得られる。観測の精緻化と多元化が、理論が新たに発展する機会になっているのではないだろうか。

かつて、欧米で中心商業地の衰退が問題となった1960年代から1980年代にかけて、歩行者行動のモデル化に関心が集まり、多くの記述的モデルに加えて、回遊行動をネットワーク上の逐次的な意思決定過程と捉えたアクティビティベースのモデルもBorgers and Timmermans(1986)<sup>16)</sup>により提案された。微視的なレベルでは空間を捨象していた従前の古典的なモデルを離れ、現実の都市空間における人々の微視的な行動を再現しようとしたといえるだろう。

但し、こうした空間行動モデルの初期段階では、大規模交通調査は車や公共交通での移動の把握を主眼としたゾーン単位の移動情報に依存していた。歩行者行動を分析できる分解度をもっていないことから、個別のアンケートやインタビュー、追跡調査に依らざるを得ず、データの量や調査範囲、把握できる内容に限界があった。しかし、トリップベースからアクティビティベースの手法に移行したことで、大規模で精緻なモデルシステムは開発され、適用が進められている(e.g. Bowman and Ben-Akiva, 2000<sup>17)</sup>; ALBATROSS: Arentze and Timmermans, 2004<sup>18)</sup>; CEMDAP: Bhat et al., 2004<sup>19)</sup>; FAMOS: Pendyala et al., 2005<sup>20)</sup>; TASHA: Miller and Roorda, 2003<sup>21)</sup>)。

無論、こうした動きには、データの進展と並行して飛躍的に向上した計算能力も影響している。データがもたらす複雑なネットワーク上の行動の理解とその広がり、既存の理論やモデルに大きな変化を迫る状況が生じているといえるだろう。

たとえば、より微視的な交通行動の記述についてみると、ビデオなどで観測しやすい室内などの二次元空間での歩行者行動では、歩行者どうしの相互作用も考慮された詳細なモデルの研究が大きく進展し、その検証が進められている(e.g. Social Force モデル: Helbing and Molnár, 1995<sup>22)</sup>; Cellular Automaton モデル: Blue and Adler, 2001<sup>23)</sup>; 離散選択モデル: Hoogendoorn, 2001<sup>24)</sup>; Antonini et al., 2006<sup>25)</sup>; Asano et al., 2010<sup>26)</sup>)。

一方、駅からの歩行圏を形成するような1km四方程度の歩行者の回遊行動やアクティビティ分析については、依然として研究の蓄積が少ない。観測誤差の大きさや、行動のばらつきと多様性が大きく関係しており、ある程度まとまったスケールの都市空間で歩行者行動を観測し、理論化していくための手法論が十分に確立しているとはいえない。

地方都市における中心市街地の空洞化が積年の課題となっており、人口減少が予想される中では、将来的に

事態が一層深刻化することも想定される。都市活動の需要総量が縮小し、大量消費の時代から人々の行動様式も大きく変化した中で、空間計画にあたってはより丁寧な分析ときめ細かな戦略が求められている。データに裏付けられた空間計画評価の重要性は増しているといえるだろう。

本稿では、歩行スケールの界限を形成する 1km 四方程度の範囲において、人の移動の観点から、空間計画を行う上での手がかりとなるデータとモデルの技術的状況を整理する。まずネットワークデータに着目し、グラフ理論を用いたネットワーク上の場所の特性に関する分析手法について説明する。次に、観測データに基づく歩行者流動の分析・予測手法について、近年の動向を概観する。ネットワーク上の行動記述の手法は、自動車交通の研究の蓄積の多くを歩行者行動に適用できるものの、移動の自由度の高さや移動と滞在の連続性、体力による移動範囲の限界や周辺環境の影響の大きさなど、考慮すべき歩行者行動独自の特性も多い。これらの特性を表現するのに適したモデリングの手法を抽出する。最後に今後の方向性について論じる。

## 2. ネットワークデータによる分析

空間相互の接続関係はネットワークにより表現され、ネットワークの幾何学的形態により生じる空間上の特性は、ネットワーク上の交通の流動に大きな影響を及ぼす。

このことに着目して、ネットワークの幾何学的形態を用いた交通や空間の様々な分析手法が提案されている。ネットワーク形態の基本的な分析手法はグラフ理論として確立されており、交通ネットワークの表現や分析の基礎をなすものともなっている。立地上の有利性を分析するためのグラフ理論の指標として「中心性」がある。中心性は、ネットワークの構造によって定まる各頂点の重要性を評価、比較するための指標であり、どのような意味で中心性を捉えるかによって、適用する指標が異なってくる。代表的な中心性指標として、他のノードとの距離が小さいものほど中心性が高いとする近接中心性、他のノードとの接続数が多いほど中心性が高いとする次数中心性、ネットワーク上の 2 点間の最短経路が通過する数が多いほど中心性が高いとする媒介中心性などがある。

近接中心性を用いた分析手法の代表的なものとして、スペースシンタクスがある。スペースシンタクスは、Hillier ら (Hillier and Hanson, 1984<sup>27)</sup>) が提唱した空間解析理論であり、街路を解析対象とした場合、Axial Line (街路を線分の集合に置き換えたもの) をノードとし、その接続関係をリンクとすることにより、解析の対

象をトポロジカルな相互関係に限定していることが特徴である。実際の移動距離やフローは考慮されないが、近さの概念に基づく立地上のポテンシャルを簡易に把握する手法として多くの研究に適用されており、GIS と組み合わせて街路構造や歩行者回遊行動を分析する研究 (e.g. 溝上ら, 2012<sup>29)</sup>) や、歴史的な街路ネットワークの変化を分析する研究 (e.g. 木川・古山, 2006<sup>28)</sup>) も行われている。

各中心性指標がもつ特徴の違いを活用して、4 つの中心性指標により総合的にネットワークのポテンシャルを評価する分析手法も提案されている。Porta et al.(2009)<sup>30)</sup> は、近接中心性、次数中心性、媒介中心性など 4 つの中心性指標とポーロニャの商業・サービス施設の密度との関係を分析し、小売及びサービス施設が媒介中心性の高い場所に集中していることを示している。

永杉・羽藤 (2014)<sup>31)</sup> は、媒介中心性分析による中心の偏り状況の把握に加えて、駅からの閉路数を指標として回遊の奥行きや多様さの程度を数値化し、駅周辺の街路の回遊性についての定量的な評価指標として提示している。閉路を分析する単位をネットワークのコミュニティ分析で抽出した界限単位とすることで、多様な界限をもつエリアでの回遊行動の豊かさを表現できる指標となっている。

福山・羽藤 (2012)<sup>32)</sup> は、「行動圏域ごとのリンク媒介中心性」という指標を設定し、都市の歴史的形成過程と空間政策に関する数理的な分析手法を提示した。歩行者の行動圏域を仮定して、ネットワーク上の各ノードを出発点とし、そこから行動圏域内にあるノードを目的地とする最短経路によりリンク媒介中心性を計算するものであり、OD の分布及び経路選択メカニズムに単純な仮定を置くことにより、行動データが得られない歴史的ネットワーク等のリンク交通量を計算する手法となっている。ここでは出発地の均等な分布を仮定しているが、ノードごとの出発数の分布に重み付けを行うことにより、鉄道駅の建設などに伴う出発地点の偏りを考慮した分析を行うこともできる。以下に示す行動データに基づく交通需要分析手法と同様の枠組みとすることで、歴史的な都市の変化の過程と現在の状況を統一的な観点で評価することができる。

## 3. 観測データによる歩行者流動の分析・予測

本章では、観測データを用いたモデリングと交通量予測の手法について、都市空間での歩行者行動を対象に近年の動向を整理する。

交通行動のモデリングは、出発地-目的地間の移動そのものの需要に着目したトリップベースの手法から、活

表-1 アクティビティモデルの課題比較

	都市圏アクティビティモデル	都市内歩行スケールのアクティビティモデル
対象とする行動と空間	<ul style="list-style-type: none"> <li>自動車や公共交通を利用した都市圏内での行動（マルチモーダル）</li> <li>ゾーン単位の空間表現</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1km 四方程度の都市空間内の歩行者行動</li> <li>街路ネットワークベースの空間表現</li> </ul>
政策課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>地域交通政策（インフラ整備，課金政策，交通需要マネジメントなど）</li> <li>土地利用政策</li> <li>省エネルギー，環境保全</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>都市の街路空間や施設利用の活性化（都市空間の利用需要とネットワークの接続関係・施設配置との関係の分析と施策効果の予測）</li> </ul>
モデリングの主な課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>時間利用のモデル化</li> <li>活動のタイミングとスケジュールのモデル化</li> <li>時空間制約の考慮</li> <li>選択肢相関の考慮</li> <li>世帯構成員間の相互作用</li> <li>社会的ネットワークの影響の考慮</li> <li>長期的選択と短期的選択の複合化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>時間利用のモデル化</li> <li>活動のタイミングとスケジュールのモデル化</li> <li>時空間制約の考慮</li> <li>選択肢相関の考慮</li> <li>移動と滞在の連続的なモデル表現</li> <li>街路環境（物理的／景観的）の影響把握</li> </ul>

動全体のモデルを構築することで付随する移動の需要を把握するアクティビティベースの手法へと移行している。トリップベースのモデルに対するアクティビティモデルの違いとして、(1) 活動に着目し、移動をその付随的需要と捉えること、(2) 個別のトリップでなくトリップが連続するツアーとして捉えること、(3) 時間について、連続的な時間領域における時間利用の意思決定と捉えること、(4) 交通調査ゾーン単位の集計値でなく個人単位の行動を扱うことの4点が挙げられる (Pinjari and Bhat, 2010<sup>59</sup>)。街なかでの歩行者の行動は、1つの目的地までの往復で終わる場合もあれば、複数の目的地を回遊する場合もある。さらに、沿道の店が気になって少し覗いたり、疲れて休憩したりすることもある。複数の移動と滞在を含む行動は、その中に含まれる1つの移動を取り出して分析しても需要の特性を捉えることが難しい。多様性の高い行動の重ね合わせで生じる都市空間での歩行者の流動を捉えるには、アクティビティベースのアプローチが不可欠だと言える。

一方で、現在構築されている都市圏スケールのアクティビティモデルシステムは、都市内の歩行スケールのモデルとは対象とする空間や政策課題、行動特性等が異なる部分も多く（表-1）、歩行者行動の検討にあたってはその特性に応じた適切なモデルによってシステムを再構築する必要がある。

本稿で検討する都市内歩行モデルは、1km 四方程度のネットワーク空間上での歩行者行動を対象とし、沿道環境や施設配置及びネットワークの接続関係により構成される空間条件に対して、発生する歩行者の選択行動とその集積による交通量を分析・予測することを目的とする。このため、都市圏のアクティビティモデルが生活行動全体の組み立てに着目しその再現に注力しているのとは異なり、活動対象空間と歩行者行動と

の相互関係のモデル化に重点を置き、以下の点を前提とする。

- 1km 四方程度の分析対象地区に入ってから出るまでの一連の歩行行動を分析対象とする。
- ここに含まれる主な選択行動は、対象地区への進入地点 (entry point) 及び退出地点 (exit point)、進入時刻及び退出時刻の選択、対象地区内での活動パターン、活動スケジュール、目的地（活動場所）及び経路の選択となる。
- 施設だけでなく街路空間も活動空間を構成し、そこで歩行を含む活動が連続的に行われる状況を記述する。

このため、本稿では、時間軸上で行われる活動の連鎖の表現に注目して、関連する研究の抽出を行う。このようなモデルの構築には、個人単位の活動開始から終了までの時間軸上の行動軌跡データが得られることが前提となるが、近年のGPS技術の進展と個人単位の情報通信環境の整備によって、それが可能な状況になっている。パーソントリップ (PT) 調査や個別アンケートなどの質問形式による取得データと、GPSなどを用いた個人単位の情報通信機器による取得データの最も大きな違いの一つは、移動経過の位置及び時刻情報の詳細さにある。GPSを用いた移動情報では、10秒などの短い時間間隔で時刻ごとの緯度・経度データが記録される。これにより、連続する時間・空間上の動きとして、移動の状況を把握し、取り扱うことができる。トリップチェーンやTime-space上での行動に関する理論やモデルは1970年代頃から検討、提案がなされてきたが、現実的に適用可能なものとするにはデータの進展を待たなければならなかった。データ環境が整いつつある現在、データ特性を生かした新たな手法の提案も増えてきている。

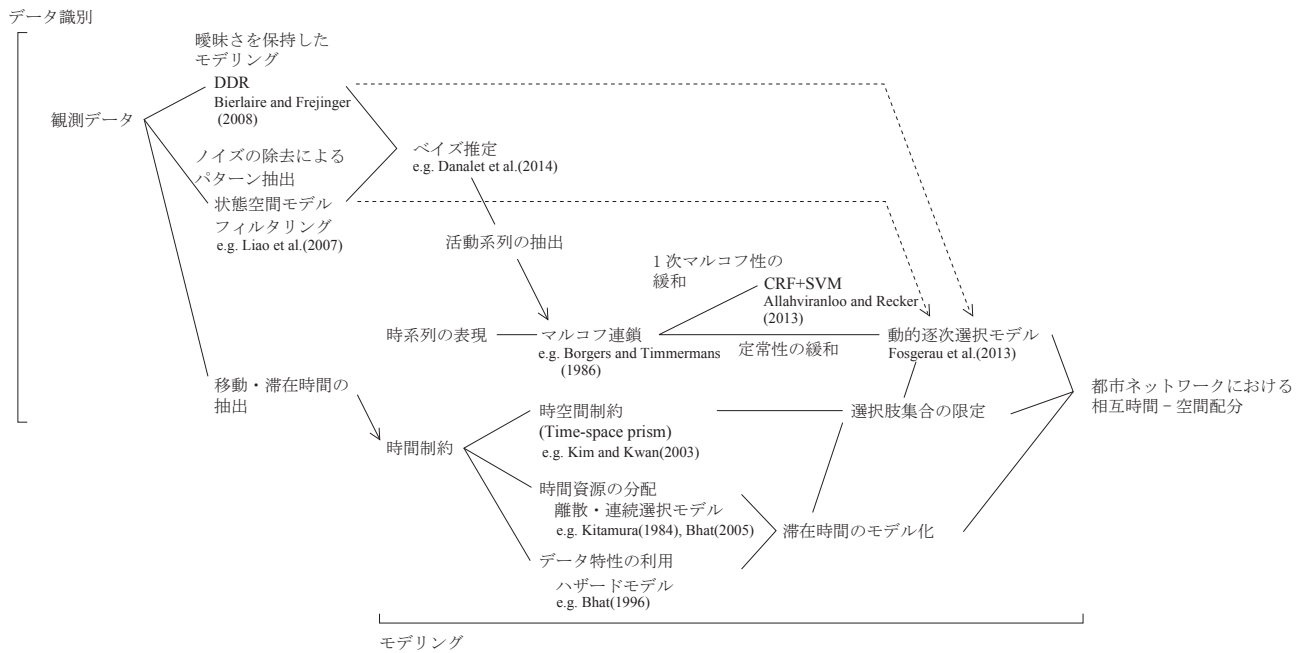


図-1 時間軸上の連鎖のモデリングとデータ識別の流れ

また同時に、GPSによるデータ取得は、新たな課題とこれに対応するモデルへの取り組みも促している。位置と時刻の情報により構成され、さらに観測誤差を含むGPS等のドットデータは、行動モデルに用いるには、そこに含まれる活動スケジュールや活動場所、ネットワークデータとの関連付けなど、分析に必要な非観測情報の推定が必要となる。このようなデータ識別のための手法として、観測誤差を含むデータの新たな取扱いや、データマイニングの知見等を活用したモデリングなどの提案がなされている。

本章では、以上のような時間軸上の連鎖を記述するモデリングとこのためのデータ識別の流れを図-1のように捉え、具体的な手法について整理する。以降では、まず行動記述の基本となるモデルを概観した上で、モデリングにおける連鎖の表現と時間概念の導入手法について提示し、さらに交通需要の予測に必要な交通量配分と選択肢集合の考え方を説明する。次に、データの取得とモデルへの適用のための技術について概説し、最後に対象空間の拡張について触れる。

### (1) 意思決定の基本モデル

アクティビティモデルでは、個々の選択行動を異なるモデルで表し、これらの相互関係を規定したモデルシステムによって、全体の活動を記述する。

個々の選択行動の意思決定の記述手法として、効用最大化理論に非観測要因による確率的変動を導入したランダム効用最大化モデル (Marschak, 1960<sup>34</sup>); Manski, 1977<sup>35</sup>) が、経済学や交通計画の分野で幅広く用いら

れ、豊富な研究の蓄積と実務への適用がなされている。体系的な解説書やレビューは数多く存在する (e.g. Train, 2003<sup>36</sup>) ため、本稿では次項以降のモデルの基本となるモデルについて簡潔に触れることとする。

#### a) 離散選択モデル

離散選択モデルは、離散的な選択肢から1つを選ぶ場合の意思決定を記述するモデルであり、選択肢集合  $C_n$  に対して、個人  $n$  が選択肢  $j$  により得られる効用を  $U_{nj}$  とすると、 $U_{ni} > U_{nj}$ ,  $\forall j \neq i$  のとき選択肢  $i$  が選択されるものとする。効用  $U_{nj}$  は次式で表される。

$$U_{nj} = V_{nj} + \varepsilon_{nj} \quad (1)$$

確定項  $V_{nj}$  は選択肢や個人の属性等分析者が観測できる変数  $x_{nj}$  により説明され、一般的には線形和  $V_{nj} = \beta' x_{nj}$  が用いられる。誤差項  $\varepsilon_{nj}$  は、実際の効用と分析者が把握できる効用との差を表す。パラメータ  $\beta$  を最尤法等により推定し、モデルが特定される。 $\varepsilon_{nj}$  は確率的に分布していると仮定され、分布関数の違いによって、既往のモデルはIID (independently, identically distributed) ガンベル分布を仮定した Logit モデル (Luce, 1959<sup>37</sup>); McFadden, 1974<sup>38</sup>) とその一般化である GEV モデル (McFadden, 1978<sup>39</sup>)、正規分布を仮定した Probit モデル (Thurstone, 1927<sup>40</sup>); Daganzo, 1977<sup>41</sup>)、多様な分布形をとる項とガンベル分布をとる項の複合を仮定した Mixed Logit モデル (Boyd and Mellman, 1980<sup>42</sup>); Cardell and Dunbar, 1980<sup>43</sup>) に分類できる。

多項ロジット (Multinomial Logit, MNL) モデルの選



択確率は次式で表される．

$$P_{ni} = \frac{e^{V_{ni}}}{\sum_{j \in C_n} e^{V_{nj}}} \quad (2)$$

MNL モデルは、クローズドフォームによる計算の容易性という大きな利点によって、非常に汎用性の高いモデルとして多くの場面で用いられてきた．一方で、選択肢間の独立性 (Independence from Irrelevant Alternatives, IIA) が前提となるため、経路選択モデルのように選択肢の相関が避けられないものに適用すると、誤った選択確率が導かれることになる．

GEV モデルは、ネスト構造により選択肢の代替関係を表現し MNL モデルの IIA 特性を緩和したモデルであり、誤差分布の同一性の仮定は保持しつつ説明変数の係数の相関を認めることで、クローズドフォームを維持したモデルとなっている．GEV モデルに属するモデルとして、Nested Logit (NL) モデル (Williams, 1977<sup>44</sup>)、Cross Nested Logit (CNL) モデル (Vovsha, 1997<sup>45</sup>)、Paired Combinatorial Logit (PCL) モデル (Chu, 1989<sup>46</sup>)、Generalized Nested Logit (GNL) モデル (Wen and Koppelman, 2001<sup>47</sup>) などが挙げられる．

多項プロビット (Multinomial Probit, MNP) モデル及び Mixed logit (MXL) モデルは、MNL モデルが表現できない選択肢間の代替関係、個人間の嗜好の違い、非観測要素の時系列相関に対応できる自由度の高いモデルである．多次元積分計算が必要であり、計算の困難さから適用範囲が限られていたが、近年、計算機的能力とシミュレーションによる計算法の著しい向上により、適用が進んでいる．

## b) 離散・連続選択モデル

離散・連続選択モデルは、連続量の選択結果が離散的な選択に影響を及ぼすような場合に、離散選択と連続量の選択を相互に関連づけてモデル化するものであり、福田・力石 (2013)<sup>48</sup> によって詳細なレビューが提示されている．大きく分けると、Tobin(1958)<sup>49</sup> による Tobit モデルを基にしたモデル群と、効用最大化理論に基づくモデル群がある．福田・力石 (2013)<sup>48</sup> は、前者を誘導型、後者を構造型のモデルとして両者の特性を整理し、政策評価のように経済理論に整合的であることが求められる場合は構造型のうちキューンタッカー (Kuhn-Tucker, KT(Kuhn and Tucker, 1951<sup>50</sup>)) 条件に基づくモデル、現象記述や不完全観測下での行動モデルには誘導型のモデルが望ましいとしている．

Tobit モデルは、離散問題の選択を表すモデルと、選択される場合の観測量を表す連続問題のモデルにより構成され、式の構成により TypeI から TypeV のバリエーションをもつ (Amemiya, 1985<sup>51</sup>)．このうち TypeII

のモデルは式 (3) で表される．

$$\begin{aligned} y_{n1}^* &= \beta_1 x_{n1} + \varepsilon_{n1}, \\ y_{n2}^* &= \beta_2 x_{n2} + \varepsilon_{n2}, \\ y_{i2} &= \begin{cases} y_{n2}^* & \text{if } y_{n1}^* > 0 \\ 0 & \text{if } y_{n1}^* \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

$y_{n1}^*$  は個人  $n$  における  $y_1$  の値、 $y_{n2}^*$  は個人  $n$  における  $y_2$  の観測結果、 $x_{n1}, x_{n2}$  は説明変数ベクトル、 $\beta$  はパラメータ、 $\varepsilon_{n1}, \varepsilon_{n2}$  は誤差項を示す．離散問題と連続問題は、評価関数の誤差項の相関により結びつけられる．2変量正規分布の共分散構造を考慮した条件付き確率を用いて尤度関数を構築することで、相関を反映したパラメータが推定される．Tobit モデルの発展形として、連立方程式の数を増やして扱える状況や同時選択の数を増やす試み (e.g. Fang, 2008<sup>52</sup>) や、誤差関数の操作により計算性や柔軟性を高める試み (e.g. Lee, 1983<sup>53</sup>, Bhat and Eluru, 2009<sup>54</sup>) がなされている．

構造型モデルでは、効用最大化理論に基づき、個人  $n$  が  $I$  個の異なる財 (離散選択肢) について、式 (5) の資源制約の下で効用  $U_n$  が最大になるように各財の消費量  $z_i$  を選択すると仮定する．このとき直接効用関数  $U_n$  は式 (4) で表される．

$$U_n = f_n(z_{1n}, z_{2n}, \dots, z_{In}), \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I p_i z_{in} = E_n, \quad \forall z_{in} \geq 0 \quad (5)$$

$p_i$  は各財の価格、 $E_n$  は個人  $n$  のもつ資源の総量とする．

各財の需要関数を導く方法として、間接効用関数を定義してロワの恒等式を用いる方法 (e.g. Dubin and McFadden, 1984<sup>55</sup>) と、KT 条件を用いて最適化問題を解く方法 (e.g. Wales and Woodland, 1983<sup>56</sup>) が提案されている．ロワの恒等式を用いた場合には 1 つの財の選択しか扱えないのに対し、KT 条件を用いたモデルでは、2 つ以上の、かつ全てではない選択肢を、同時に選択して資源を配分するという問題を扱うことができる．このうち、Bhat(2005, 2008)<sup>57, 58</sup> により提案された Multiple Discrete-Continuous Extreme Value (MDCEV) モデルは、誤差項にガンベル分布を仮定したクローズドフォームのモデルであり、計算性の高さが特徴であるが、MNL モデルと同様、選択肢間の独立 (IIA) の仮定がモデルの制約となっている．MDCEV モデルの効用関数は式 (6)、資源制約は式 (7) で表される．

$$U(z) = \sum_i \frac{\gamma_i}{\alpha_i} [\exp(\beta x_i + \varepsilon_i)] \cdot \left\{ \left( \frac{z_i}{\gamma_i} + 1 \right)^{\alpha_i} - 1 \right\} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I p_i z_i = E \quad (7)$$

式中の  $\exp(\beta x_i + \varepsilon_i)$  は資源の消費が 0 の点から 1 ユニット消費する場合の限界効用に相当し、 $x_i$  は説明変数、 $\beta$  はパラメータ、 $\varepsilon_i$  は誤差項である。 $\alpha_i, \gamma_i$  はともに消費量増加に伴う限界効用の低減を表すパラメータであり、さらに  $\gamma_i$  は無差別曲線の位置及び端点解の有無を規定する。MDCEV モデルは、離散選択モデルにおける MNL モデルから NL モデルや MXL モデル等への拡張と同様な拡張を行うことができる (Mixed MDCEV(MMDCEV) model, Bhat, 2005; <sup>57</sup>), Multiple Discrete-Continuous Nested Extreme Value (MD-CNEV) model, Pinjari and Bhat, 2010; <sup>59</sup>), Multiple Discrete-Continuous Generalized Extreme Value (MDCGEV) model, Pinjari, 2011 <sup>60</sup>) .

### c) 動的離散選択モデル

時間軸上で順次選択を行っていく場合には、現時点の選択の効用だけでなく将来の選択の期待効用を考慮して意思決定を行うことが考えられる。このような動的な離散選択モデルは、構造推定の手法により定式化されており、包括的なレビューとして Aguirregabiria and Mira (2010) <sup>61</sup>) がある。

個人  $i$  が  $K$  期のうち  $k$  期において、観測した状態変数  $s_{ik}$  に基づき、次式で表される期待効用を最大化するよう選択肢  $a_{ik} \in A$  を選択すると仮定する。

$$E\left(\sum_{j=0}^{K-k} \beta^j U(a_{i,k+j}, s_{i,k+j}) | a_{ik}, s_{ik}\right) \quad (8)$$

$\beta \in (0, 1)$  は時間割引率、 $U(a_{ik}, s_{ik})$  は  $k$  期の効用を示す。ベルマンの最適性原理 (Bellman, 1957) <sup>62</sup>) より、この動的計画問題の価値関数  $V(s_{ik})$  は次式で表される。

$$V(s_{ik}) = \max_{a \in A} \{U(a, s_{ik}) + \beta \int V(s_{i,k+1}) dF(s_{i,k+1} | a, s_{ik})\} \quad (9)$$

ここで、 $F(s_{i,k+1} | a, s_{ik})$  はマルコフ遷移確率分布関数を示す。このときの最適決定ルールは  $\alpha(s_{ik}) = \arg \max_{a \in A} \{v(a, s_{ik})\}$  となる。 $v(a, s_{ik})$  は次式で定義される選択肢別価値関数である。

$$v(a, s_{ik}) \equiv U(a, s_{ik}) + \beta \int V(s_{i,k+1}) dF(s_{i,k+1} | a, s_{ik}) \quad (10)$$

状態変数  $s_{ik}$  のうち観測可能なものを  $x_{ik}$ 、観測できないものを  $\varepsilon_{ik}$  とし、誤差項  $\varepsilon_{ik}$  に IID ガンベル分布を仮定し、かつ次期の観測可能な状態変数  $x_{i,k+1}$  が今期の誤差項  $\varepsilon_{ik}$  に依存しないと仮定すると、 $\varepsilon_{ik}$  の分布に対する価値関数の期待値  $\bar{V}$  及び選択確率は次式のよう

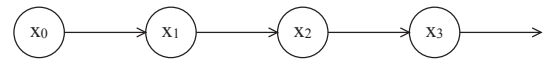


図-2 マルコフ連鎖の概念図

に記述できる (Rust, 1987 <sup>63</sup>) .

$$\bar{V}(x_{ik}) = \log \left( \sum_{a=0}^J \exp\{u(a, x_{ik}) + \beta \sum_{x_{i,k+1}} \bar{V}(x_{i,k+1}) f_x(x_{i,k+1} | a, x_{ik})\} \right) \quad (11)$$

$$P(a | x_{ik}, \theta) = \frac{\exp(v(a, x_{ik}))}{\sum_{j=0}^J \exp(v(j, x_{ik}))} \quad (12)$$

$u(a, x_{ik})$  は選択肢別効用関数、 $f_x$  は  $x$  に関する遷移確率密度関数を示す。

## (2) 連鎖の表現

### a) マルコフ連鎖

時間軸上で行われる複数の選択行動は、時系列データと捉えることができる。このとき、個々の選択行動は独立になされるのではなく、他の選択行動との関係下で行われる。系列データの依存関係を表す手法として、現在の状態が過去の系列の状態に依存すると仮定するマルコフ連鎖モデルがある (図-2)。

マルコフ連鎖を用いたトリップチェーンの表現は、1970 年代に注目を集めて以降多くの研究が提示されており、Hanson(1979) <sup>64</sup>)、Thill and Thomas(1987) <sup>65</sup>)、Timmermans et al.(2002) <sup>66</sup>) などのレビューにその系譜が示されている。初期のトリップチェーンモデルは、目的地間等の推移確率の分布を直接的に仮定する記述的なモデルであった (e.g. Sasaki, 1971 <sup>67</sup>); Kondo, 1974 <sup>68</sup>); O'Kelly, 1981 <sup>69</sup>) が、政策の変更が交通需要に及ぼす影響を把握するために選択行動の意思決定を記述する必要性が論じられ、効用最大化理論に基づく選択行動モデルを導入したトリップチェーン表現の研究が進展した (e.g. Alder and Ben-Akiva, 1979 <sup>70</sup>); Kitamura and Kermanshah, 1983 <sup>71</sup>); Borgers and Timmermans, 1986 <sup>16</sup>)。その後、時間の概念が導入され、より包括的なアクティビティモデルへと発展していく。

選択行動の連鎖を記述するマルコフモデルでは、目的地やノードなど選択対象となるものの個々の選択肢を 1 つの状態とみなして、状態間の遷移確率が離散選択モデル等の意思決定モデルを用いて定義される。

最も基本的なマルコフモデルは、現在の状態が 1 つ前の状態のみに依存するとする 1 次のマルコフ性と、状態間遷移を定義する条件付き確率分布を選択ステップによらず同一とする定常性を仮定するものである。選択行動間の関係において、少なくとも時間的に 1 つ前の選択結果は、次の選択行動の与条件を規定する。複

数の活動場所を訪れる行動では、前の目的地は次の出発地となり、次の選択肢への移動距離など効用に関わる事項に影響する。経路であれば、ノードごとに次に進むべきリンクが選択肢集合として限定される。

歩行者の経路選択については、1次のマルコフ性と定常性を仮定した逐次的な選択モデルの提案が多く見られ、自由度が高く計画性の低い回遊的行動の表現に加えて、人の経路選択の基礎的な嗜好や特性を明らかにする研究にも適用されている。塚口らの一連の研究(e.g. 竹上・塚口, 2006<sup>72)</sup>)では、目的地指向性と方位保持性による空間的定位置という概念を導入し、これらが経路形成において経路長以外の基本的な行動原理として働いていることを示している。

逐次的なリンク選択は、経路列挙を伴わない交通量配分モデルに先駆的に用いられている(e.g. 佐佐木, 1965<sup>73)</sup>; Bell, 1995<sup>74)</sup>; Akamatsu, 1996<sup>75)</sup>; 赤松, 1996<sup>76)</sup>; Baillon and Cominetti, 2008<sup>77)</sup>)。佐佐木(1965)<sup>73)</sup>は、マルコフ連鎖の性質に着目し、出発後、ノード間の遷移確率 $Q$ に従って繰り返しノード間を移動し目的地に到達するまでの全ての可能な経路を想定した場合に、車が各ノードにいる確率が式(13)で表されることを用いて、経路列挙を行わずに無限周回を含む全ての経路を配分対象としたリンク交通量を得る手法を提案した。

$$I + Q + Q^2 + \dots = [I - Q]^{-1} \quad (13)$$

Akamatsu(1996)<sup>75)</sup>は、ノード間の遷移確率にLogitモデルを採用することで、佐佐木(1965)<sup>73)</sup>のモデルを行動論的根拠をもつモデルに発展させた。さらに、非現実的な周回経路を除去するモデルが赤松(1996)<sup>76)</sup>により提案されている。

#### b) 定常性と1次マルコフ性の緩和

実際の行動ではある程度の計画性をもって活動選択を行う場合も多く、この場合には最初に出発してから一連の活動を終えるまでの全体が最適になるよう、個々の選択行動間のトレードオフも考慮して判断がなされると考えられる。各選択ステップで同一の選択原理を仮定する逐次選択モデルでは、選択ステップ間のトレードオフは表現できない。

逐次選択の対極的なモデルとして、全体計画の最適性を考慮し活動開始前に全体の活動を同時に選択するモデルがあり、自動車の経路選択モデルを中心に発展し、多くの研究の蓄積がある(羽藤, 2002<sup>78)</sup>)。また、後述する時間配分モデルは、選択行動間のトレードオフを考慮し選択がなされることから、同時選択の形式がとられ、活動種別や目的地選択等に適用されている。

しかし、同時選択モデルでは、時間軸上での選択の推移を表現することはできない。このため、逐次選択

をベースに、各選択ステップにおける選択行動間の関係性をモデルに導入し、定常性や1次マルコフ性を緩和する手法が検討されている。

代表的な手法として、各期の選択においてその先の選択の効用も評価して意思決定を行う状況を再帰的な関係式により表現した動的な逐次選択モデルがある。

Kitamura(1984a)<sup>79)</sup>は、目的地選択肢の効用を、その次に選択可能な選択肢の効用も加えた prospect utility により定義し、トリップチェーンにおける目的地選択行動の相互関係を式(14)の再帰的なモデルにより記述している。

$$U_j = V_j + \sum_{k \in E} q_{jk}(U_k - \theta d_{jk}) \quad (14)$$

$V_j$ は目的地 $j$ のみの効用、 $E$ は目的地選択肢集合、 $q_{jk}$ は $j$ の次に目的地 $k$ を訪れる確率、 $d_{jk}$ は $j, k$ 間の距離、 $\theta$ は移動の不効用を表すパラメータである。

また、経路選択モデルでは、Rust(1987)<sup>63)</sup>の動的離散選択モデルを用いた Recursive Logit モデルが、Fosgerau et al.(2013)<sup>80)</sup>により提案されている。リンク $k$ に接続するリンクの集合を $A(k)$ とすると、現在の状態がリンク $k$ であるときのリンク $a \in A(k)$ の選択確率は、状態が $k$ のときの $a$ の効用と $a$ から目的地 $d$ までの価値関数 $V^d(a)$ によって式(15)で表され、価値関数 $V^d(a)$ は式(16)で定義される。

$$P_n^d(a|k) = \frac{e^{\frac{1}{\mu}(v_n(a|k) + V_n^d(a))}}{\sum_{a' \in A(k)} e^{\frac{1}{\mu}(v_n(a'|k) + V_n^d(a'))}} \quad (15)$$

$$V_n^d(k) = \begin{cases} \mu \ln \sum_{a \in A(k)} e^{\frac{1}{\mu}(v_n(a|k) + V_n^d(a))} & \forall k \in A \\ 0 & k = d \end{cases} \quad (16)$$

計算性を確保するため、式(16)は、式(11)における時間割引率 $\beta$ や状態遷移の不確実性を考慮しない形をとっている。また、同時選択モデルと同様、経路の一部重複による選択肢相関がMNLモデルのバイアスを生むことが課題となる。同時選択モデルでは、a)で挙げたモデルの他、MNLに修正項を加えた計算の容易な Path-Size Logit (PSL) model (Ben-Akiva and Bierlaire, 1999<sup>81)</sup>)が開発されているが、これと同様の修正項を期待リンクフローにより定義し、Recursive Logit モデルに導入する提案がなされている。

以上のような、先の状況を考慮するモデルとは逆に、既に行った選択行動の履歴を考慮するモデルも提案されている。

比較的シンプルな対応として、活動履歴を説明変数に導入する方法があり、Borgers and Timmermans(2005)<sup>82)</sup>では、商業地区への進入地点(entry point)からの移動履歴を考慮した逐次選択モデルが提案されている。



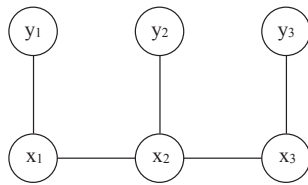


図-3 CRF の概念図

また, Allahviranloo and Recker(2013)<sup>83)</sup> は, 1 次  
のマルコフ性と条件付き分布の定常性を緩和する活動  
種別の選択モデルを, サポートベクターマシン (SVM)  
を用いて構築している. 1 日に行われる活動種別間の相  
互依存関係について, 条件付き確率場 (CRF)(図-3) を  
用いることで個人属性を活動遷移の説明変数として導入  
し, 個人属性のパラメータが時間ごとに変化するものと  
して遷移確率に時間変化を組み込んだ多項ロジスティッ  
ク回帰モデルと, マルチクラスの SVM を逐次的に用い  
た場合の 2 種類の方法を用いて求めている. SVM は,  
訓練データを用いて推定した判別関数によりデータを  
分類する手法の一つである. 訓練データの分類境界に  
ついて, マージン (分類境界と訓練データの最短距離)  
を最大化するような超平面により設定する. クラスご  
との特徴を表す入力ベクトルとして, 個人属性と 1 つ前  
の段階で選択した活動種別を用いると 1 次マルコフ連  
鎖の状態が表され, 1 つ前だけでなく当日行った活動の  
全てを入力ベクトルに加えることで, 過去の選択履歴  
の影響を考慮したモデルが形成される. ただし, SVM  
は識別関数であり, 説明変数の係数や事後確率を得る  
ことはできない. 説明変数に対して解釈可能な係数を得  
るには多項ロジスティック回帰モデルを用いる必要が  
ある. SVM では, サポートベクトルの重みを用いて変  
数の影響に関する感度分析を行うことができる.

### (3) 時間の導入

人の活動の大部分は時間制約の中で行われている. 時  
間は移動可能な範囲と密接に関係し, 選択肢の範囲を限  
定する. Hägerstrand(1970)<sup>84)</sup> は, Time-space prism  
という概念を導入し, 活動場所, 関連する場所間の距  
離, 移動と活動に利用可能な時間, 移動の速度によっ  
て, 個人が到達可能な時間-空間的範囲が決まることを  
示している. 時空間制約下では, 移動時間が長くと滞  
在時間が短くなり, 滞在時間を長くとると到達可能な  
範囲が小さくなるというトレードオフが発生する. さ  
らに, 複数の活動を行う場合は, 活動間のトレードオ  
フも発生する. また, 電車の出発時刻や駐車料金など,  
スケジュールや外的な制約条件による時間的プレッ  
シャーが意思決定に影響を及ぼす場合も多く, さらに  
近年では, 移動中の情報利用が滞在時間に影響するこ

とも確認されている (金ら, 2007<sup>85)</sup>). このように, 時  
空間上での活動を前提とするアクティビティモデルで  
は, 時間が選択行動に大きく影響し, 時間利用のモデ  
リングが重要となる.

このための手法として, 継続時間の分布もしくは意  
思決定をモデル化する方法と, 時間配分の意思決定を  
モデル化する方法が提案されている.

#### a) 活動継続時間の決定

ハザードモデルは, 継続状態が終了するまでの時間  
経過の分布を与えるモデルであり, 医学や経済学, 工  
学分野等で広く適用されている. 継続時間の確率分布  
としてワイブル分布や指数分布, 対数正規分布, 対数  
ロジスティック分布等を用いるパラメトリックなモデル  
と, 確率分布を仮定しないノンパラメトリックなモデ  
ル, 分布を仮定しないが共変量を導入するセミパラメ  
トリックな手法がある.

最も広く用いられているコックス比例ハザードモデ  
ル (Cox, 1972<sup>86)</sup>) は, 継続時間に影響する共変量  $x$  と  
継続時間  $t$  の関係を回帰モデルで表したもので, 式 (17)  
で定義される.

$$h(t|x) = h_0(t) \exp(\beta x) = h_0(t) \exp\left(\sum_{i=1}^m \beta_i x_i\right) \quad (17)$$

$\beta$  はパラメータ,  $h_0(t)$  は共変量  $x$  がすべて 0 の場合の  
ハザードで, 基準ハザードと呼ばれる.

コックス比例ハザードモデルでは説明変数の影響が  
時間によらず一定だとするが, この仮定が現実にそぐ  
わない場合もあり, これを改善するモデルの 1 つに, 加  
速ハザードモデルがある (式 (18)).

$$\log(T) = \beta x + z \quad (18)$$

式 (18) は  $T = \exp(z) \exp(\beta x)$  となり,  $\exp(z)$  が式 (17)  
の基準ハザードに対応する.  $z$  は密度  $f(t)$  をもつ確率変  
数で, 密度関数はパラメトリックに定義される. もう 1  
つの課題として非観測要素の異質性によるバイアスの問  
題があり, コックス比例ハザードモデルにパラメトリッ  
クもしくはノンパラメトリックな誤差項を導入する手法  
が提案されている (e.g. Hans and Hausman, 1990<sup>87)</sup>;  
Hensher and Mannering, 1994<sup>88)</sup>; Bhat, 1996<sup>89)</sup>).

活動継続時間分析への適用例としては, 帰宅時の買  
い物行動における継続時間を分析した Bhat(1996)<sup>89)</sup>,  
観光地における周遊行動での滞在時間と情報利用との  
関連性を分析した西井ら (2005)<sup>90)</sup>, 潜在クラスを用い  
て加速ハザードモデルに異質性を導入し, 活動継続時  
間と社会経済属性の強い関係性を示した Lee and Tim  
mermans(2007)<sup>91)</sup>, van den Berg et al. (2012)<sup>92)</sup> など  
が挙げられる.

ハザードモデルが意思決定を表現できないのに対し  
て, 時間継続の意思決定を記述するモデルも提案され

ている。Zhu and Timmermans(2009)<sup>93)</sup>では、活動継続の効用を経過時間と時刻の関数として表し、これと帰宅の効用との相対関係で帰宅の意思決定が表現されている。

#### b) 時間配分

Becker(1965)<sup>94)</sup>が提示したように、有限な時間資源が、活動間のトレードオフの下で、全体の効用を考慮して各活動に分配されると考えることにより、時間利用を個人の意思決定モデルとして記述することができる。

時間という連続量が、活動種別等の離散的な選択肢との関連で決定される状況の記述には、離散・連続選択モデルが適している。Kitamura(1984b)<sup>96)</sup>は、効用最大化理論に基づき式(4),(5)のように活動への時間配分を定式化し導出した需要関数と、各活動に時間を配分するかどうかを表現する2項Probitモデルによる離散選択問題を、TypeIIのTobitモデルを用いて関係づける形で、ミクロ経済理論と誘導型モデルを複合的に利用し、2種類の活動への時間配分問題を記述している(福田・力石, 2013<sup>48)</sup>)。さらに、Kitamura et al. (1996)<sup>96)</sup>では、2つの打ち切り型Tobitモデルを用いて、2種類の活動の両方もしくは片方への時間配分に対応できるモデルが構築されている。Yamamoto and Kitamura(1999)<sup>97)</sup>はこのモデルを複数日に拡張し、勤務日と休日における時間配分の相関の分析に適用している。効用最大化による時間配分モデルと活動選択モデルをTobit型のモデルで関連づける複合型のモデルでは、活動選択モデルとして多様な提案がなされており、時間制約と予算制約を考慮し、自由時間の増大により限界効用が最大となる活動を選択すると仮定した福田ら(2003)<sup>98)</sup>のモデル、scobitモデル(skewed-logitモデル)を用いて活動への参加/不参加の非対称な分布を考慮したZhang et al.(2012)<sup>99)</sup>のモデルなどがある。

一方、選択肢集合から複数の活動を選択してこれらに時間を配分するような選択行動は、複数選択肢の離散連続問題を扱えるMDCEVモデルによって表現できる。Bhat(2005)<sup>57)</sup>では、1日の活動時間を家及び外出先での社会的活動及び余暇の活動に配分する選択をモデル化している。MDCEVモデルの拡張として、時間に加えて予算など複数の制約条件がある場合に対応したmultiple constraint-MDCEVモデル(Castro et al, 2012<sup>100)</sup>)や、活動選択と時間配分における個人間、世帯間、時間、空間、個人内の異質性を導入したmultilevel MDCEVモデル(Chikaraishi et al., 2010<sup>101)</sup>)などが提案されている。歩行者行動への適用としては、福山・羽藤(2013)<sup>102)</sup>が、駅周辺における複数目的地の選択と移動・滞在時間の配分のモデル化を行っている。

#### c) 時間制約下での活動推移

Hoogendoorn and Bovy(2004)<sup>103)</sup>は、駅などの大規模施設内での歩行者行動について、移動空間を2次元の連続平面と捉え、時間制約を用いて活動スケジュール、活動場所、経路の同時選択モデルを構築している。まずある1つの活動に対する活動場所と経路の選択に関して、連続的な時間-空間上での期待最小コストを位置 $x$ と時間 $t$ の関数で表し、Bellmanの最適性原理(Bellman, 1957<sup>62)</sup>)を用いて時間経過に対する逐次的な期待コストの動的な関係式を得る。ここからHamilton-Jacobi-Bellman(HJB)方程式を導出し、時間内に活動が実行できなかった場合のペナルティを終局的条件、各活動場所の効用を境界条件としてHJB方程式を解くことで、時刻 $t$ に位置 $x$ にいる歩行者にとっての各活動場所の期待最小コストが得られる。2次元平面上での期待最小コストの分布は等高線状に表現され、現在地から等高線の垂線方向に進むことで最適な活動場所と最適経路が得られる。活動スケジュールは、行すべき複数の活動について、Bellmanの最適性原理とHJB方程式を用いてコストを最小化する系列を求めることにより得られる。

また、Habib(2011)<sup>104)</sup>は、効用最大化による時間配分モデルと活動選択モデルをTobit型のモデルで関連づける複合型のモデルフレームと、MDCEVモデルと同型の効用関数を用いて、時間制約下での活動の種類、場所及び継続時間の選択を扱う動的なスケジューリングモデルを構築している。1日の活動において、時間資源は活動を実行する度に減少していく。この過程を、選択した活動と、計画されているがスケジューリングされていない残りの活動の総体の2つに時間を配分する問題と考える。効用関数(6)に対して、 $i=1$ を選択した活動、 $i=2$ を残りの活動の総体とし、KT条件を用いて離散選択(活動種別)と連続量の選択(時間)の確率分布関数を導出した上で、Lee(1983)<sup>53)</sup>に基づき活動種別と配分時間の同時分布を定義する。これにより求めた1ステップの選択に対する尤度関数を、1日の選択過程に従って順に導出し、これら全てを掛け合わせたものが活動スケジュール全体の尤度関数となる。活動種別と時間配分の同時選択モデルに活動場所の選択を導入するには、活動種別と活動場所の効用を加算型の効用関数として表し、Nested Logit型のモデルとして、上記と同様の過程で尤度関数を得ることができる。

#### (4) 交通量配分と選択肢集合

##### a) 交通量配分

各道路における進行方向ごとの容量が明確で、進行方向や速度について周辺他者との同調性が必須となる自動車交通では、交通量と速度が密接に関係し、個人

の行動選択に影響する。これを用いた均衡配分の考え方が、自動車交通需要予測の基本となっている。一方、歩行者行動の場合は、通勤時の駅構内やイベント時などの著しい混雑時や避難時を除き、混雑が所要時間に大きく影響したり渋滞に陥ったりすることは稀で、交通量と経路選択の関係は明確でない。このため、歩行者の行動選択は基本的には交通量とは独立のものと仮定して、個々の経路選択結果の単純な集計量を交通需要とみなすことができる。

## b) 選択肢集合

経路選択や目的地選択では、客観的には選択肢が膨大に存在するが、選択者が認識したり、選択にあたって比較対象としたりする選択肢の数は、人の情報処理能力の観点から限定的である。選択者においては、認知や情報取得のレベルで限定された選択肢集合と、時間制約等から物理的に選択可能な選択肢集合があり、必要な場合にはさらに何らかの方法で数を絞って、相互比較可能なレベルの選択肢集合がつけられると考えられる。

個人が考えている選択肢集合を観測することは難しい一方、モデル推定やモデルを用いた交通量配分において、選択肢集合の違いが結果に大きな影響を及ぼす (e.g. Prato and Bekhor, 2007<sup>105</sup>) ことから、選択肢集合の生成手法が重要な課題となっている。経路列挙を行う場合、全ての経路を生成することは困難であり、観測経路が生成されない場合もあり得る (Ramming, 2002<sup>106</sup>)。このため選択肢集合生成の問題は推定よりも需要予測の際により深刻となる。

課題への対応方法は、選択肢集合の精度を高めようとする方向と、選択肢集合を限定しない方向に大きく分かれる。

選択肢集合の精度を高める方向での研究では、選択肢集合形成段階での意思決定のモデル化が検討される。大量の情報の取捨選択を行う場合、人は何らかのヒューリスティクスを用いて非補償的な意思決定を行うと考えられている (Bovy, 2009<sup>107</sup>)。非補償型のルールを用いる場合、どのような属性に着目するかが選択肢集合の生成結果に大きく影響する。自動車の経路選択モデルでは、経路長に着目した列挙、限定手法が多く用いられている (K 番目経路探索, link elimination : Azevedo et al., 1993<sup>108</sup>, link penalty : de la Barra et al., 1993<sup>109</sup>)。これに対して、多様な属性をもつ選択肢を抽出する手法として、ラベリング法 (Ben-Akiva et al., 1984<sup>110</sup>) がある。より複雑な方法として制約条件付き列挙手法 (Branch-and-bound 法 ; Hoogendoorn-Lanser, 2005<sup>111</sup>, Prato and Bekhor, 2006<sup>112</sup>) があり、行動規範を反映させた閾値を用いて逐次的に枝刈りを行いながら経路候補が生成される。

実際の選択肢集合は個人ごとに多様な要因で形成されているため、以上の手法では、特に着目する属性が少ない場合ほど再現率が低いことが示されている (Ramming, 2001<sup>106</sup>; Bekhor and Prato, 2006<sup>113</sup>)。また、再現率の高い Branch-and-bound 法でも、列挙数を絞るためにはかなり強い制約条件を恣意的に設定することが必要になる。

このような現実的な選択肢集合生成の困難さを考慮し、選択肢を明示的に列挙しない方法や、選択肢の範囲を制限しない方法が提案されている。Cascetta and Papola (2001)<sup>114</sup> は、経路選択モデルに選択肢集合の選択を内生的に組み込んだモデル (Implicit Availability/Perception (IAP) モデル) を提案している。

また、Frejinger et al. (2009)<sup>115</sup> では、経路生成アルゴリズムを用いたサンプリングにより選択肢集合を生成するが、サンプリングの影響を補正する項を経路の効用に加えることで、ネットワーク上のすべての選択肢を選択肢集合とみなすのと同様のモデルが構築されている。

経路列挙を伴わない交通量配分手法として、佐佐木 (1965)<sup>73</sup>, Akamatsu (1996)<sup>75</sup> らによるマルコフ連鎖配分モデルが提案されているが、Fosgerau et al. (2013)<sup>80</sup> の recursive logit モデルでは、これと同様の枠組みを用いて選択肢集合の範囲を限定しないモデルを実現している。動的離散選択モデルを確定的に用いることにより、価値関数がリンク数+1の線形方程式系によって表され、この解を求めることが必要になるものの、考えるべき選択肢集合は各リンクにおける次のリンク選択肢のみとなっている。

選択肢集合には、時間制約等による物理的な到達可能性や、時間帯による施設等の利用可能性も大きく影響する。3次元で表される Time-space prism を2次元の平面に投影したものを potential path area (PPA) と呼び、与えられた時間-空間制約内で利用可能なすべての場所が含まれる領域を表す。PPA を用いた GIS ベースのモデルが Kwan and Hong (1998)<sup>116</sup>, Miller (1991)<sup>117</sup> により提案され、さらに移動時間の違いや店舗の営業時間を考慮したモデルが Weber and Kwan (2002)<sup>118</sup> により提示されている。Kim and Kwan (2003)<sup>119</sup> は、現実的な最低限の活動継続時間と最大限の移動時間を考慮した time window という概念をモデルに導入している。Yoon et al. (2012)<sup>120</sup> は、以上の手法を用いて、4つの異なる移動時間帯における移動速度の違いと、就業者の分布と勤務時間から想定されるサービスの利用可能時間を考慮して目的地選択肢集合を生成し、環境の変動によって選択肢集合が大きく変化することを示している。

GPS データを用いてデータオリエンテッドに選択肢集

合を生成する手法も提案されている。田中ら (2011)<sup>121)</sup> は、GPS データのマッピングにより得られたリンク集合を用いて経路選択の選択枝集合を設定する手法を提案している。また、福山・羽藤 (2014)<sup>122)</sup> は、進行方向や迂回に関する GPS データの分布特性を用いて Branch-and-bound 法の制約条件を設定することを試みている。

## (5) データの取得とモデルへの導入

### a) データの取得

歩行を含む様々な交通手段により移動する個人単位の行動データを収集する手法として、朝倉、羽藤らによるプローブパーソン (Probe Person, PP) 調査 (e.g. 羽藤・朝倉 (2000)<sup>123)</sup>, 朝倉ら (2000)<sup>124)</sup>) が開発され、実施されている。PP 調査は、携帯電話など GPS 搭載の移動体通信とウェブダイアリーを用いて、人の移動行動を記録する調査である。位置データは秒単位で自動的に記録され、加えて出発地・到着地や出発時間・到着時間は被験者が携帯電話上でボタンを押すことにより記録される。また、移動目的、目的施設、交通手段等の情報を、ウェブダイアリーを用いて被験者が入力することにより取得する。加速度センサーを備えた BCALs やスマートフォンを用いることにより、位置・時刻情報に加えて、加速度情報が取得できる (Hato, 2010<sup>125)</sup>)。加速度情報により、歩行環境や周辺環境に対応した歩行者の詳細な行動の変化を観測することができる。PP 調査の特徴として、先述した GPS データの利点に加えて、個人ごとの正確な時間・位置データとともに、これと紐付け可能な目的施設や交通手段等の情報が取得できることが挙げられる。

調査によるデータ取得手法に加えて、通信網インフラにより自動的に取得される位置情報を利用する研究も行われている。Danalet et al. (2014)<sup>126)</sup> は、WiFi によるデータ取得の利点として、調査のために新たな機能を個人の機器にインストールする必要がなく個人情報にアクセスしなくて済むことや、インフラ単位で軌跡を収集するため調査対象施設内の行動のみを追跡することになり、施設外も含む個人の訪問先全ての追跡情報を取得しないことなど、プライバシーの面からのデータの利用しやすさを挙げている。同時に、その裏返しとして、調査対象とした個人の属性に関する情報を入手するのが難しいことを欠点として挙げ、利用できる軌跡以外の情報の種類と行動推定結果の関係について分析している。このように、通信情報網による位置データの利用においては、プライバシー保護との関係が避けて通れない課題となっている。井料ら (2014)<sup>127)</sup> は個人の行動履歴データの使用が有効な場合とそうでない場合について分析し、別のデータ活用アプローチ

との有効性の比較検討を行うことの必要性を指摘している。

分析に必要なデータとして、行動データに加えてネットワークデータがある。歩行者が利用可能な街路は車を対象として整備された道路ネットワークデータよりも細かく、歩行者専用道や広場状の空地、歩道橋なども存在する。また、歩行者は建物内をショートカットする場合もある。歩行者用のネットワークデータは通常は地図を用いて個別に作成されるが、GPS データを用いて自動的に生成しようとする研究もある。Kasemsuppakorn et al. (2013)<sup>128)</sup> は、GPS 搭載の移動通信機器によって自動収集された個人の移動軌跡データを用いて、ネットワークデータを生成するアルゴリズムを提案している。

### b) 非観測情報の推定

GPS や通信網インフラにより自動的に取得される移動軌跡データは、緯度・経度による位置と時刻の情報だけで構成されており、実際にどのような活動系列に対応しているのか不明である。別途活動履歴の情報を取得する PP 調査等と異なり、通信インフラから得られる二次的なデータを活用する場合には、目的施設や交通手段、活動継続時間など、選択行動のモデリングや需要予測のために必要となる情報を推定する手法が重要となる。また、ネットワーク上の選択行動をモデル化するには、観測された位置データとネットワークデータの関連付けを行い、選択経路を特定することが必要になる。

観測データ系列に含まれるトリップのセグメントを抽出するには、移動と滞在を判別する必要があり、通常、2つの測位点間の距離もしくは速度を用いて判別がなされる。また、交通手段は速度の閾値を用いて識別される場合が多い。

観測データはノイズや欠損などの測定誤差を含むことから、その取扱いが課題となる。動的システムの状態の系列と、これに対応する観測データの系列との関係は、図 4 に示す一般状態空間モデルで表される (福田, 2012<sup>129)</sup>)。一般状態空間モデルは、状態の時間変化を記述するシステムモデル  $x_t \sim p(x_t|x_{t-1})$  と、ノイズを含む観測過程を記述する観測モデル  $y_t \sim p(y_t|x_t)$  で構成される。状態遷移には 1 次のマルコフ性が仮定されている。既知の状態空間モデルと観測時系列データ  $y_{1:t}$  が与えられたとき、ベイズの定理を用いて式 (19) により時刻  $t$  における状態  $x_t$  の事後分布が求められる。

$$p(x_t|y_{1:t}) = \frac{p(y_t|x_t)p(x_t|y_{1:t-1})}{p(y_t|y_{1:t-1})} \quad (19)$$

この過程はフィルタと呼ばれ、広く用いられているものとしてカルマンフィルタとパーティクルフィルタがある。カルマンフィルタは、観測モデルとシステムモデルに線形ガウス分布を仮定した、解析的に計算可能



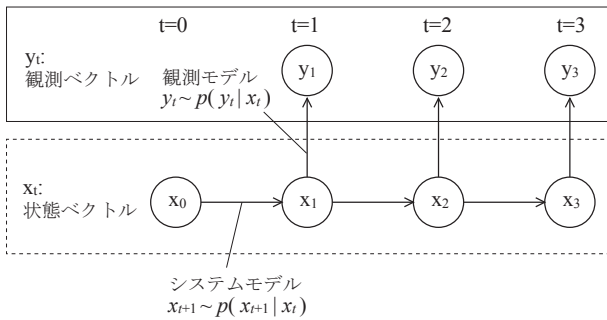


図-4 一般状態空間モデルの概念図

なフィルタリング手法である．パーティクルフィルタは，状態系列の事後分布を重み付きの粒子群によって近似する手法であり，サンプリングにより直接的な近似を行うため，表現の自由度が高い．

位置データをネットワーク上の経路データに変換するマップマッチングの手法は，様々な既往研究で提示され，Quddus et al. (2007)<sup>130)</sup>により包括的なレビューがなされている．近年ではカルマンフィルタやパーティクルフィルタを用いて観測誤差を補正することで，マップマッチングの精度を高める手法が提案されている (e.g. Liao et al., 2007<sup>133)</sup>; 薄井, 2009<sup>131)</sup>; 三谷・羽藤, 2009<sup>132)</sup>).

Liao et al.(2007)<sup>133)</sup> は，階層的マルコフモデルを用いて，経路に加えて交通手段，目的地等を含む活動系列をGPSデータから特定する手法を提案している．モデルは動的なベイジアンネットワークで表現され，1期前の位置の事後分布に基づき次の状態が Rao-Blackwellized particle filter (RBPF) を用いて推定される．RBPFはカルマンフィルタとパーティクルフィルタを組み合わせることで効率性と表現力を両立させた手法である．上位に行動の新規性，中位にトリップのセグメントと目的地，下位に交通手段と速度，位置を配置した3層のモデルで活動系列が記述され，個人の繰り返しデータを用いた学習により階層モデル内の遷移確率行列を推定し，最も確率の高い活動系列を得る．

以上のような，観測誤差を含むデータから尤度が最大となる1つの系列を特定する手法に対して，データと経路の関係を確率的に表現することで不確かさをもったままデータをネットワークベースのモデルに適用する手法が開発されている．Bierlaire and Frejinger (2008)<sup>134)</sup>によるDDR(Domain of Data Relevance)は，観測により得た位置データが関連する空間領域を観測機器の精度等に基づき定義したものであり，位置データとネットワークデータを重ねたときに当該位置データのDDRと重なりをもつノードまたはリンクを実際の通過ノード・リンクである可能性のあるものとして抽出する(図-5)．Bierlaire and Frejinger (2008)<sup>134)</sup>では，DDRを経路選択モデルに適用する手法を示している．個人 $n$ のOD

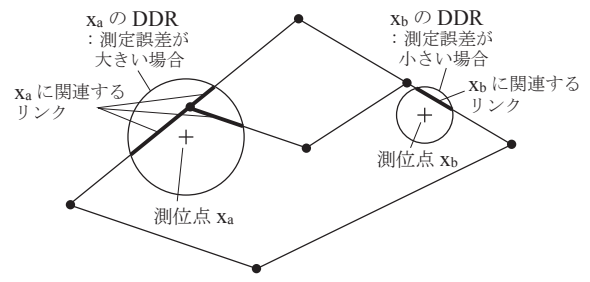


図-5 DDRの概念図

間の観測データ列  $(d_1, d_2, \dots, d_k)$  に対し，最初の位置データ  $d_1$  と最後の位置データ  $d_k$  それぞれのDDRに関連するノードによりODペアの集合  $S_i$  を定義する． $S_i$  に対して  $i$  が観測される確率  $P_n(i|S_i)$  を， $S_i$  に対して実際のODペアが  $s$  である確率  $P_n(s|S_i)$ ，実際の経路が  $p$  のとき  $i$  が観測される確率  $P_n(i|p)$ ，選択肢集合  $C_n(s)$  の中で個人  $n$  が経路  $p$  を選択する確率を示す経路選択モデル  $P_n(p|C_n(s); \beta)$  を用いて次式で表し，最尤推定法により経路選択モデルのパラメータ  $\beta$  を推定する．

$$P_n(i|S_i) = \sum_{s \in S_i} P_n(s|S_i) \sum_{p \in C_n} P_n(i|p) P_n(p|C_s; \beta) \quad (20)$$

DDRを用いた確率的なマップマッチングアルゴリズムがBierlaire et al. (2013)<sup>135)</sup>により開発されている．また，Danalet et al.(2014)<sup>126)</sup>は，DDRを用いて，観測精度の粗いWiFiデータから歩行者の活動場所・活動時間の系列を尤度とともに導出するための手法を提案している．時空間制約を考慮した各活動場所の魅力度を用いて活動系列の事前分布を設定し，活動場所候補に対する観測データの尤度を用いて，ベイズ推定により活動系列の尤度を計算する．観測データ系列  $\hat{m}_j = (\hat{x}_j, \hat{t}_j), j = 1, \dots, J$  の位置データ  $\hat{x}_j$  は，DDRを用いて確率的に活動場所候補  $x_j$  と関連付けられる．このため1つの位置データに複数の活動場所候補が紐づく場合があり，観測データ系列に対応する活動場所候補の系列  $(x_1, x_2, \dots, x_J)$  が複数得られる．活動開始時刻  $t_j^-$ ・活動終了時刻  $t_j^+$  は， $(x_1, x_2, \dots, x_J)$  の連続する2点  $(x_j, x_{j+1})$  が異なる活動場所である場合に， $(x_j, x_{j+1})$  間の最短距離と所与の速度から求めた移動時間  $tt_{x_j, x_{j+1}}$  を考慮して，観測時刻データ  $\hat{t}_j$  を用いて  $t_j^+ \in [\hat{t}_j, \max(\hat{t}_j, \hat{t}_{j+1} - tt_{x_j, x_{j+1}})]$  及び  $t_{j+1}^- \in [\min(\hat{t}_j^+ + tt_{x_j, x_{j+1}}, \hat{t}_{j+1}), \hat{t}_{j+1}]$  と設定できる．滞在時間が閾値(例えば5分)未満となる活動場所候補は系列から削除する．観測データ系列に従って以上の作業と活動系列の尤度の更新，事前分布の更新を繰り返し，最終的に，活動場所・活動時間の系列とその尤度が得られる．



## (6) スケールの拡張

現代において、分析対象とする歩行圏内を移動する人の行動がその中で完結している例はほとんどなく、分析対象外の地区とネットワークを介してつながっている。都市圏は、多数の歩行圏が速い交通のネットワークで相互に接続され、人の移動により相互に関係し合っているものと捉えることができる。このような都市圏の人の流動の状況を考慮するためのネットワーク表現がいくつか提案されている。

Sheffi(1985)<sup>136)</sup>による supernetwork は、複数の単一交通ネットワーク (uni-modal network) のレイヤーを、乗換リンクにより相互に接続することで、1つの multi-modal network に統合したものである。この方法により、交通手段選択が経路選択の一部として表現され、かつ乗換を行う場所が1つのネットワーク表現の中で記述できる。

これを発展させ、Arentze and Timmermans (2004b)<sup>137)</sup>は activity-based モデルでの活動の推移を表現する multi-state supernetwork を提案した。この手法では、ノードは空間上の位置を表し、リンクとして同じ活動状態のノード間での個人の移動を表す travel link、同じノード、同じ活動状態における交通状態の変更を表す transition link、同じノードにおける行動状態の変更を表す transaction link の3種類を用いる。これにより、空間上の位置、交通状態、活動状態の変化を統合された1つのネットワークで表現する。Liao et al. (2013)<sup>138)</sup>は multi-state supernetwork に時間の概念を導入し、時空間制約を考慮してネットワーク表現を個人化することにより表現の簡素化を図るとともに、時間の影響を活動選択の不効用に組み込むことで、現実的な活動・移動パターンが生成できる形に改善している。

伊藤 (2013)<sup>139)</sup>は、分析対象とする都市圏をグリッドで分割し、人の動きを詳細に把握する必要がある部分と大きな流動の状況を捉えればよい部分に異なるネットワーク表現を適用するマルチスケールネットワークを用いて、東京都市圏での人の流動のシミュレーションを行っている。詳細に分析したい部分には実ネットワークを用い、これ以外の部分には、グリッドで分割されたセルの接続関係によって交通ネットワークを簡易的に表現する Virtual Network を用いている。

## 4. 今後の展開

ここまで歩行者行動の記述とミクロスケールの都市空間計画への適用を念頭にモデルとデータの既往研究を概観し、様々な情報サービスによって蓄積されつつある位置データのもつ可能性と、歩行者行動の多元的

なアスペクトの記述につながる行動モデル研究の進展を確認することができた。

### (1) 移動と滞在の連続的表現のためのデータ処理とモデル

街路ネットワーク上の移動と滞在を記述する歩行者行動に関する統合的なアクティビティモデルはまだ整備されていないといっている。GPSデータによる個人の詳細な位置・時刻情報を前提として、先の選択を考慮しながら逐次的に現在の選択を行っていく動的なモデルにより行動を記述することが今後は重要であろう。また、ミクロな都市空間計画における政策変数は、建築の内部空間のリノベーションや広場のデザインといったように、その表現は多様かつ詳細化している。都市空間での過ごし方が多様化するに伴い、行動の選択肢が爆発的に増える中で、活動時間の制約と時間経過をモデルに組み込むことによって選択肢の範囲を限定し、モデルを現実的な形に絞り込んでいく手法の重要性が高い。

移動と滞在、目的地と経路の選択が時間経過の中で連続的に行われる歩行者行動の表現には、以上の2つの手法を統合的に用いたモデルが適していると考えられる。一方で、現時点で提案されつつあるモデルに対する検討課題として、以下の点が挙げられよう。

動的逐次選択モデルは、現実に近い意思決定をモデル化することができる一方で、計算負荷が大きく、モデル構造も複雑であることから、頑健性の点で課題を残している。静的な歩行者行動モデルは将来の不確実性を考慮しない確定的なモデルであり、歩行者が都市空間において認知した状態変数の変化によって行動を変えるような現実の行動表現までには至っていないといえるだろう。時間割引や先の状況の不確実性は歩行者の回遊行動にも見受けられる性質であり、これらの要素を考慮することでより回遊行動の本質に近づくモデルが構築できる可能性がある。その反面、意思決定問題における不確実性の導入や行動連鎖の表現では、選択肢集合が無限に増大し計算困難な状況に陥る。時間的制約条件の考慮などによる新たな定式化と解法の工夫が求められる。

もう1点は、滞在時間のモデリングである。目的地での滞在時間は個別性が高く、データ分布を近似するハザードモデルの適用が主流となっている。データが十分に得られる場合にはハザードモデルを用いてデータオリエンテッドに滞在時間を求めることが現実的な手法だと考えられる。一方で、滞在時間は建築内部空間や街路空間のデザイン、移動/滞在時のコミュニケーションと関連しており、個人における場所の評価の指標ともなり得るだろう。都市空間全体の施設配置や街

路計画のバランスが都市空間の魅力に大きな影響を与えることを考えれば、データオリエンテッドな方法に加え、離散・連続選択モデルなどを用いて時間選択の要因を考慮した意思決定モデルのフレームを構築することに一定の価値があると考えられる。

また近年、都市空間にインストールが進められている乗り捨てが可能なモビリティシェアリングによっても、移動需要のリアルタイムで膨大なデータが利用可能になりつつある。さらに（滞在時間に比例して従量課金されることの多い）回遊時間を大きく制約してきた駐車・駐輪コストが、モビリティシェアリングでは無料になることから、都市の回遊行動そのものを大きく変化させる可能性があるといえよう。乗り捨て可能なモビリティシェアの都市空間への再配置は、公共交通システムの進化系といえる。Uberのような相互扶助型のサービスは、財源が限られる公共交通と私的交通市場において、都市の移動欲求を実現する新たなシステムであり、モビリティの利用と所有を切り離れた上で、互いの移動欲求を調整しながらシェアリングシステムそのものを効率的に運用するための新たな理論を必要としている(原・羽藤, 2014<sup>140</sup>)。都市空間の移動欲求を最大限に生かすためには、オークションにおけるVCGメカニズムのデザインや、レベニューマネジメントとそのサービス実装は、都市空間の回遊性を高めていくうえで重要な研究課題となってくるだろう。

## (2) マルチスケールモデルによる都市圏解析

自動車や公共交通による高速で広範囲の移動が可能な現代都市を想定するならば、歩行圏による限界を「速い交通」がつかなく多層レイヤーのネットワーク構造と、歩行による「遅い交通」の双方の流動を関連づけて記述することが重要になっている。

歩行での移動は、体力等の関係から長い移動になるほど発生頻度が少なくなり、頻度分布は移動距離に伴い指数関数的に減少する。このため、歩行圏での人の流動を予測する上では、外部との接続地点ごとの流入量・流出量が重要になる。歴史的には、駅の新たな立地が市街地の集積状況を一変させ、自動車の普及が中心市街地の空洞化をもたらした。商業地区など1つの対象エリアを分析する場合には、駅やバス停、駐車場など、対象地区にアクセスする地点(entry point)の設定が重要であり、特に車交通が主体の都市では、駐車場の配置が、都市空間の歩行者行動デザイン上の重要な要素となる。これらのエントリーポイントから分析対象地区に流入する人は、公共交通や道路のネットワークにより地区外のエリアにつながっている。また、東京の中心部では、歩行圏程度の数多くの地区が鉄道のネットワークで接続され、これらのネットワークを介

して大量の人が地区間を移動している。

人口動態が大きく変化する中では、歩行圏どうしが相互に関係して構築される都市システム全体の動きを考慮しない限り、対象地域の予測を正しく行うことは難しい。例えば東京では、国際的な都市間競争に加えて都市内における地区間競争が生じており、鉄道ネットワークとの接続条件と、地区内の立体的なネットワーク構造や施設配置をどのように計画していくべきか、部分と全体の計画論が問われている。

このための手法として、マルチレイヤーやマルチスケールのモデルが提案されている。これらのモデルにおいては、全体の計算量が膨大になることから、詳細な結果を得たい対象地区については表現の分解度を細かく維持し、広範囲の移動を表すネットワークや行動表現については簡略化を図ることが計算の効率性のために必要となる。今後の課題として、粗いスケールでのデータを細かいスケールに繰り込む場合の誤差が問題となる。境界条件の設定やスケールの接続処理に関して、変数の集計量を近似するための工夫が必要であろう。

ETCやICカード、移動情報サービスによる様々な空間スケールでの移動記録の入手が可能になりつつある。データ同化などの手法により、蓄積されつつある多様なデータを、多様なスケールの行動モデル群と結びつけることで、都市動態のオンライン把握も可能になると考える。災害リスク評価や都市システムの維持管理と投資回収の評価を考えれば、今後は、中長期的な都市計画と短期的な都市オペレーションを組み合わせ、モデルシステムについての検討も重要となろう。

## (3) 歴史的な文脈の数理的把握と観測データによる予測の統合的利用による空間評価

都市文化の継承や、歴史の蓄積がもたらす空間の生活様式そのものが都市空間にとって大きな価値をもたらすことは明らかである。時間利便性のみの議論からは、こうした問題を議論することは難しい。歴史のある街では、それぞれの場所が各時代のネットワーク上での役割を踏まえて構築され、その部分的な更新の積み重ねの結果が現在の姿を形成している。

歩行者が主体だった時代のネットワーク形態や重要な場所などを下敷きとしているものの、車社会の都合に合わせて改変を受け、大きく性質を変えてしまったケースも少なくない。また、鉄道駅ができるだけでも、出発地の分布が一変して場所の重要度が全く変わってしまう。地域の中で重要であった場所や施設を活用するには、それが重要性を獲得した理由を分析し、現在の空間計画に結びつけることが重要である。

歴史的な文脈の分析結果を現在の観測データに基づ

く交通量予測と関連づけて評価を行うには、歴史的なネットワークの分析と観測データを用いた分析を総合的な手法で行うことが必要になる。福山・羽藤(2012)<sup>32)</sup>では単純な行動原理を仮定して、リンク交通量を計算する枠組みを提示しているが、OD分布の変化やマルチスケールへの拡張など、史実に基づく交通や土地利用の条件の変化を導入したり、あるいは現在の観測データから得られた行動特性を分析に適用したりすることにより、モデルの分析力を高める検討が必要と考える。

## 5. おわりに

情報通信環境の革命的な進展によって得られるようになった個人ごとの詳細な移動軌跡データとその蓄積により、観測データは可視化され、これまでに見えなかったものが客観的に明らかになることの説得力を我々に示してくれる。その一方で、データのもつ力を有効に使うためには、データを適切に読み解くモデルの力が不可欠である。大きな機会が目の前に広がっている現在、データの見かけの力だけに依存することなく都市をマネジメントしていくには、先進的な分析や判別、予測等の手法そのものを研究しながらも、分析対象となる行動原理と都市というネットワークシステムの本質に目を凝らし、理論の検証と構築を繰り返していくことが求められる。

また同時に、新しく広がる可能性だけに目を奪われることなく、都市空間の中で展開されてきた過去の知的蓄積に潜む価値にも目を配る必要がある。歴史的な時間の中で、繰り返されることで生まれた人々の生活の知恵や、経験の蓄積には、短期的かつ個別的な思考では到達できない重要な情報が潜んでいることは間違いない。これらの知見を見だし、その知的基盤の上に今日的な価値を再編集することで、よりよい理解として継承していく必要があるだろう。そうすることで、表層的な政策の短期的な繰り返しサイクルから脱することができるのではないだろうか。

詳細な観測と歴史から研究を通じて得られた人の行動と空間との関係についてのよりよい理解は、実際の都市空間の計画に利用されることによって初めて意味を成すものとなるだろう。現時点では、道路交通や公共交通の場合とは異なり、都市の内部空間の更新計画に際して、データに基づく分析や検証がされている事例は非常に少ない。複雑なシステムである都市をうまく機能させていくには、従来重視されてきたマクロな計画の視点と合わせて、その一部を成す歩行スケールの都市空間計画とそのマネジメントは高い重要性をもつと考えられる。

白地の土地に構想を描くケースはもう随分前になく

なっており、既存の都市の構造や資源を読み解きこれらとの関係性をデザインしていくことが、現在の都市における空間計画のあり方となっている。このための方法が模索される中で、本稿で提示したような数理的な分析・予測を用いた計画の評価は一つの道筋を示すものとする。

謝辞: 本講演の機会を与えてくださった土木計画学研究委員会に感謝いたします。

論文賞受賞論文は、龍谷大学阿部大輔准教授の貴重な研究成果がなければ成し得ず、また、研究会や学会等における多くの先生方のご意見とご助言、匿名の査読者の的確なご指摘の賜物でもあります。さらに著者らが新たな行動モデルの研究を進めるにあたって、研究室の理論談話会と欧州調査の存在は何より大きく、継続的にご講義、ご議論頂いてきた東京工業大の朝倉康夫教授、山梨大学佐々木邦明教授、名古屋大学山本俊行教授、神戸大学井料隆雅教授、東京工業大学福田大輔准教授をはじめとする多くの先生方には、多大なご指示をいただいた。また朝早くから夜遅くまで共に学んだ研究室の歴代メンバーには本当に多くの刺激をいただきました。心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) Fujita, M., Krugman, P., Venables, A.J.: *The Spatial Economy: Cities, Regions and International Trade*, Cambridge MA, MIT Press, 1999.
- 2) von Thünen, J.H.: *Der Isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie*, Hamburg, Perthes, 1826.
- 3) Alonso, W.: *Location and Land Use*, Cambridge MA, Harvard University Press, 1964.
- 4) Christaller, W.: *Die Zentralen Orte in Süddeutschland*, Gustav Fischer Verlag, Jena, 1933.
- 5) Lösch, A.: *Die Räumliche Ordnung der Wirtschaft*, Gustav Fischer, Jena, 1940.
- 6) Fujita, M., Krugman, P.: When is the economy mono centric? von Thünen and Chamberlin unified, *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 25, pp. 505-528, 1995.
- 7) Fujita, M., Krugman, P., Mori, T.: On the evolution of hierarchical urban systems, *European Economic Review*, Vol. 43, pp. 209-251, 1999.
- 8) Ikeda, K., Murota, K., Akamatsu, T., Kono, T., Takayama, Y., Sobhaninejad, G., Shibasaki, A.: Self-organizing hexagons in economic agglomeration: Core-periphery models and central place theory, *Technical Report METR 2010-28*, Department of Mathematical Informatics, University of Tokyo, October 2010.
- 9) Hotelling, H.: Stability in competition, *Economic Journal*, Vol. 39, pp. 41-57, 1929.
- 10) Fujita, M., Mori, T.: The role of ports in the making of major cities: self-agglomeration and hub-effect, *Journal of Development Economics*, Vol. 49, pp. 93-120, 1996.

- 11) 赤松隆, 高山雄貴, 池田清宏, 菅澤晶子, 佐藤慎太郎: 1次元多都市システムにおける人口集積パターンの創発メカニズム, 土木学会論文集 D, Vol.66, No.4, pp. 442-460, 2010.
- 12) 高山雄貴, 赤松隆, 福島晶子: 一次元空間における都市階層構造の創発: relocation cost を考慮した多産業 Core-Periphery モデルの分岐解析, 土木学会論文集 D3, Vol.69, No.3, pp. 250-266, 2013.
- 13) 宮城俊彦, 澤田理: 交通戦略による都市発展過程のシミュレーション分析-土地利用・交通統合モデルの応用-, 岐阜大学地域科学部研究報告第 11 号, pp. 53-66, 2002.
- 14) Anas, A.: Discrete choice theory and the general equilibrium of employment, housing, and travel networks in a Lowry-type model of the urban economy, *Environment and Planning A*, Vol.16, pp. 1489-1502, 1984.
- 15) Miyagi, T.: A combined residential-location and transportation model, *Selected Proceedings of the 5th WCTR*, IV, pp. 123-137, 1989.
- 16) Borgers, A.W.J., Timmermans, H.J.P.: A model of pedestrian route choice and demand for retail facilities within inner-city shopping areas, *Geographical Analysis*, Vol.18, No.2, pp. 115-128, 1986.
- 17) Bowman, J., Ben-Akiva, M.: Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules, *Transportation Research Part A*, Vol. 35, No. 1, pp. 1-28, 2000.
- 18) Arentze, T.A., Timmermans, H.J., 2004, A learning-based transportation oriented simulation system. *Transportation Research Part B*, Vol. 38, No. 7, pp.613-633.
- 19) Bhat, C.R., Guo, J.Y., Srinivasan, S., Sivakumar, A.: A comprehensive econometric micro simulator for daily activity-travel patterns, *Transportation Research Record*, No.1894, pp. 57-66, 2004.
- 20) Pendlyala, R.M., Kitamura, R., Kikuchi, A., Yamamoto, T., Fujii, S.: FAMOS: The Florida activity mobility simulator, *Transportation Research Record* No. 1921, pp. 123-130, 2005.
- 21) Miller, E.J., Roorda, M.J.: Prototype model of household activity/travel scheduling (TASHA), *Transportation Research Record*, No. 1831, pp. 114-121, 2003.
- 22) Helbing, D., Molnár, P.: Social force model for pedestrian dynamics, *Physical Review E*, Vol. 51, No. 5, pp. 4282-4286, 1995.
- 23) Blue, V. J., Adler, J. L., : Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways, *Transportation Research Part B*, Vol. 35, pp. 293-312, 2001.
- 24) Hoogendoorn, S. P.: Normative Pedestrian Flow Behavior: Theory and Applications, *Research Report VK2001.002*, Transportation and Traffic Engineering Section, Delft University of Technology, 2001.
- 25) Antonini, G., Bierlaire, M., Weber, M.: Discrete choice models of pedestrian walking behavior, *Transportation Research Part B*, Vol. 40, pp. 667-687, 2006.
- 26) Asano, M., Iryo, T., Kuwahara, M.: Microscopic pedestrian simulation model combined with a tactical model for route choice behaviour, *Transportation Research Part C*, Vol. 18, pp. 842-855, 2010.
- 27) Hillier, B., Hanson, J.: *The Social Logic of Space*, Cambridge, Cambridge University Press, 1984.
- 28) 木川剛志, 古山正雄: スペースシンタクスをを用いた地方都市の近代化に伴う形態変容の考察-滋賀県大津市における近代化プロセスを事例として-, 都市計画学会論文集, No.41-3, pp. 229-234, 2006.
- 29) 溝上章志, 高松誠治, 吉住弥華, 星野裕司: 中心市街地の空間構成と歩行者回遊行動の分析フレームワーク, 土木学会論文集 D3, Vol. 68, No.5, pp. 363-374, 2012.
- 30) Porta, S., Valentino, I., Messora, R.: Street centrality and densities of retail and services in Bologna, Italy, *Environment and Planning B*, Vol. 36, pp. 450-465, 2009.
- 31) 永杉博正, 羽藤英二: ネットワークの閉路特性に着目した駅周辺の回遊性分析, 土木計画学研究・講演集 Vol. 49, CD-ROM, 2014.
- 32) 福山祥代, 羽藤英二: バルセロナの歴史的発展過程と歩行者の行動圏域を考慮した広場-街路のネットワーク分析, 土木学会論文集 D1, Vol.68, No.1, pp. 13-25, 2012.
- 33) Pinjari, A.R., Bhat, C.R.: Activity-based travel demand analysis, *Handbook of Transport Economics*, de Palma, A., Lindsey, R., Quinet, E., and Vickerman, R. eds. Edward Elgar Publishing, pp. 213-248, 2010.
- 34) Marschak, J.: Binary choice constraints on random utility indications, *Stanford Symposium on Mathematical Methods in the Social Sciences*, Arrow, K. eds. Stanford University Press, Stanford, CA, pp. 312-329, 1960.
- 35) Manski, C.: The structure of random utility models, *Theory and Decision*, Vol. 8, pp. 229-254, 1977.
- 36) Train, K.: *Discrete Choice Methods with Simulation*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2003.
- 37) Luce, R.: *Individual Choice: A Theoretical Analysis*, John Wiley, New York, 1959.
- 38) McFadden, D.: Conditional logit analysis of qualitative choice behavior, *Frontiers in Econometrics*, P. Zarembka, P., eds., Academic Press, New York, pp. 105-142, 1974.
- 39) McFadden, D.: Modelling the choice of residential location, *Spatial Interaction Theory and Residential Location*, Karlqvist, A., Lundqvist, L., Snickars, F., and Weibull, J., eds., pp. 75-96, North-Holland, Amsterdam, 1978.
- 40) Thurstone, L.: A law of comparative judgement, *Psychological Review*, Vol. 34, pp. 273-286, 1927.
- 41) Daganzo, C. (1977), Multinomial probit and qualitative choice: A computationally efficient algorithm, *Transportation Science*, Vol. 11, pp. 338-358.
- 42) Boyd, J., Mellman, J.: The Effect of Fuel Economy Standards on the U.S. Automotive Market: A Hedonic Demand Analysis, *Transportation Research*, Vol.14A, 5-6, pp. 367-378, 1980.
- 43) Cardell, N, Dunbar, F.: Measuring the Societal Impacts of Automobile Downsizing, *Transportation Research*, 14A, 5-6, pp. 423-434, 1980.
- 44) Williams, H.C.W.L.: On the formation of travel demand models and economic evaluation measures of user benefit, *Environment and Planning*, Vol. 9A, pp. 285-344, 1977.
- 45) Vovsha, P.: The cross-nested logit model: application to mode choice in the Tel-Aviv Metropolitan Area, *Transportation Research Record*, No.1607, pp. 6-15, 1997.
- 46) Chu, C.: A paired combinatorial logit model for travel analysis, *Proceedings of the Fifth World Conference on Transportation Research*, Ventura, CA, pp. 295-309, 1989.
- 47) Wen, C.H., Koppelman, F.S.: The generalized nested logit model, *Transportation Research Part B*, Vol. 35,

- No. 7, pp. 627-641, 2001.
- 48) 福田大輔, 力石真 : 離散-連続モデルの研究動向に関するレビュー, 土木学会論文集 D3, Vol.69, No.5, pp.497-510, 2013.
  - 49) Tobin, J. : Estimation of relationships for limited dependent variables, *Econometrica*, Vol. 26, pp. 24-36, 1958.
  - 50) Kuhn, H.W., Tucker, A.W. : Nonlinear programming, *Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Neyman, J., eds., University of California Press, Berkeley, CA, pp. 481-492, 1951.
  - 51) Amemiya, T. : *Advanced Econometrics*, Harvard University Press, 1985.
  - 52) Fang, H.A. : A discrete-continuous model of households' vehicle choice and usage, with an application to the effects of residential density, *Transportation Research Part B*, Vol. 42, No. 1, pp. 736-758, 2008.
  - 53) Lee, L.-F. : Generalized econometric models with selectivity, *Econometrica*, Vol. 51, pp. 507-512, 1983.
  - 54) Bhat, C.R., Eluru, N. : A copula-based approach to accommodate residential self-selection effects in travel behavior modeling, *Transportation Research Part B*, Vol. 43, pp. 749-765, 2009.
  - 55) Dubin, J.A., McFadden, D.L. : An econometric analysis of residential electric appliance holdings and consumption, *Econometrica*, Vol. 52, No. 2, pp. 345-362, 1984.
  - 56) Wales, T.J., Woodland, A.D. : Estimation of consumer demand systems with binding non-negativity constraints, *Journal of Econometrics*, Vol. 21, No. 3, pp. 85-263, 1983.
  - 57) Bhat, C. R. : A multiple discrete-continuous extreme value model: formation and application to discretionary time-use decisions, *Transportation Research Part B*, Vol. 39, pp. 679-707, 2005.
  - 58) Bhat, C. R. : The multiple discrete-continuous extreme value (MDCEV) model: Role of utility function parameters, identification considerations, and model extensions, *Transportation Research Part B*, Vol. 42, pp. 274-303, 2008.
  - 59) Pinjari, A.R., Bhat, C. : A multiple discrete-continuous nested extreme value (MDCNEV) model: Formulation and application to non-worker activity time-use and timing behavior on weekdays, *Transportation Research Part B*, Vol. 44, pp. 562-583, 2010.
  - 60) Pinjari, A.R. : Generalized extreme value (GEV)-based error structures for multiple discrete-continuous choice models, *Transportation Research Part B*, Vol. 45, pp. 474-489, 2011.
  - 61) Aguirregabiria, V., Mira, P. : Dynamic discrete choice structural models: a survey, *Journal of Econometrics*, Vol. 156, No. 1, pp. 38-67, 2010.
  - 62) Bellman, R. : *Dynamic Programming*, Princeton University Press, Princeton, 1957.
  - 63) Rust, J. : Optimal replacement of GMC bus engines: An empirical model of Harold Zurcher, *Econometrica*, Vol. 55, pp. 999-1033, 1987.
  - 64) Hanson, Urban-travel linkages: a review, *Behavioral Travel Modelling*, Hensher, D.A., and Stopher, P., eds., London, Croom Helm, pp. 81-100, 1979.
  - 65) Thill, J.C., Thomas, I. : Toward conceptualizing trip-chaining behavior : a review, *Geographical Analysis*, Vol.19, pp. 1-18, 1987.
  - 66) Timmermans, H., Arentze, T., Joh, C-H : Analysing space-time behaviour : new approaches to old problems, *Progress in Human Geography*, Vol. 26, No. 2, pp. 175-190, 2002.
  - 67) Sasaki, T. : Estimation of person trip patterns through Markov chains, *Proceedings of the Fifth International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation*, Newell, G., eds., New York, Elsevier, pp. 119-130, 1971.
  - 68) Kondo, K. : Estimation of person trip patterns and model split, *Transportation and Traffic Theory*, Buckley, D.J., eds, Wales, N.S. Wales University, pp. 715-742, 1974.
  - 69) O'Kelly, M.E. : A model of the demand for retail facilities, incorporating multistep, multipurpose trips, *Geographical Analysis*, Vol. 13, pp. 134-148, 1981.
  - 70) Alder, T., Ben-Akiva, M.E. : A theoretical and empirical model of trip chaining behavior, *Transportation Research Part B*, Vol. 13, pp. 243-257, 1979.
  - 71) Kitamura, R., Kermanshan, M. : Identifying time and history dependencies of activity choice, *Transportation Research Record*, No. 944, pp. 22-30, 1983.
  - 72) 竹上直也, 塚口博司 : 空間的定位に基づいた歩行者の経路選択行動モデルの構築, 土木学会論文集, Vol.62, No1, pp. 64-73, 2006.
  - 73) 佐佐木綱 : 吸収マルコフ過程による交通量配分理論, 土木学会論文集 No.121, pp. 28-32, 1965.
  - 74) Bell, M. : Alternatives to Dial's logit assignment algorithm *Transportation Research Part B*, Vol. 29, No.4, pp. 287-295, 1995.
  - 75) Akamatsu, T. : Cyclic flows, Markov process and transportation stochastic assignment, *Transportation Research Part B*, Vol. 30, No. 5, pp. 369-386, 1996.
  - 76) 赤松隆 : ネットワークの幾何学情報を考慮した確率的交通均衡配分モデル, 数理モデル化と問題解決 9-2, 1996.
  - 77) Baillon, J.B., Cominetti, R. : Markovian traffic equilibrium, *Mathematical Programming* Vol. 111, No.1-2, pp. 33-56, 2008.
  - 78) 羽藤英二 : ネットワーク上の交通行動, 土木計画学研究・論文集, Vol.19-1, pp. 13-27, 2002.
  - 79) Kitamura, R. : Incorporating trip chaining to analysis of destination choice, *Transportation Research Part B*, Vol. 18, pp. 67-81, 1984.
  - 80) Fosgerau, M., Frejinger, E., Karlstorm, A. : A link based network route choice model with unrestricted choice set, *Transportation Research Part B*, Vol. 56, pp. 70-80, 2013.
  - 81) Ben-Akiva, M., Bierlaire, M. : Discrete choice methods and their applications to short term travel decisions, *Transportation Science Handbook*, Preliminary Draft, 1999.
  - 82) Borgers, A., Timmermans, H. : Modelling pedestrian behaviour in downtown shopping areas, *Proceedings of CUPUM 05 Conference, Computers in Urban Planning and Urban Management*, Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London, London, pp. 83-97, 2005.
  - 83) Allahviranloo, M., Recker, W. : Daily activity pattern recognition by using support vector machines with multiple classes, *Transportation Research Part B*, Vol. 58, pp. 16-43, 2013.
  - 84) Hägerstrand, T. : What about people in regional science? *Papers and Proceedings of Regional Science Association*, Vol. 24, pp. 6-22, 1970.
  - 85) 金賢, 西井和夫, 佐々木邦明 : 富士五湖地域における観光客の情報利用と周遊行動との因果構造分析, 都市計画



- 論文集, 41(3), pp. 13-18, 2006.
- 86) Cox, D. : Regression models and life-tables, *Journal of the Royal Statistical Society B*, Vol. 34, pp. 187-220, 1972.
  - 87) Han, A., Hausman, J.A. : Flexible parametric estimation of duration and competing risk models, *Journal of Applied Econometrics*, Vol. 5, pp. 1-28, 1990.
  - 88) Hensher, D.A., Mannering, F. : Hazard-based duration models and their application to transportation analysis, *Transport Reviews*, Vol. 14, pp. 63-82, 1994.
  - 89) Bhat, C.R. : A hazard-based duration model of shopping activity with nonparametric baseline specification and nonparametric control for unobserved heterogeneity, *Transportation Research Part B*, Vol. 30, No. 3, pp. 189-207, 1996.
  - 90) 西井和夫, 佐々木邦明, 金賢, 品川円宏, 山根広嗣 : 観光情報利用と周遊パターン・滞在時間特性との関連分析, *土木計画学研究・論文集*, Vol.22, no.3, pp. 487-494, 2005.
  - 91) Lee, B., Timmermans, H. : A latent class accelerated hazard model of activity episode durations., *Transportation Research Part B*, Vol. 41, pp. 426-447, 2007.
  - 92) van den Berg, P., Arentze, T., Timmermans, H. : A latent class accelerated hazard model of social activity duration, *Transportation Research Part A*, Vol. 46, pp. 12-21, 2012.
  - 93) Zhu, W., Timmermans, H. : Modelling pedestrian go-home decisions: A comparison of linear and nonlinear compensatory, and conjunctive non-compensatory specifications, *Journal of Retailing and Consumer Services*, Vol.16, pp. 227-231, 2009.
  - 94) Becker, G. : A theory of the allocation of time, *Economic Journal*, Vol.75, pp. 493-517, 1965.
  - 95) Kitamura, R. : A model of daily time allocation to discretionary out-of-home activities and trips, *Transportation Research Part B*, Vol.18, No. 3, pp. 255-266, 1984.
  - 96) Kitamura, R., Tamamoto, T., Fujii, S., Sampath, S. : A discrete-continuous analysis of time allocation to two types of discretionary activities which accounts for unobserved heterogeneity, *Transportation and Traffic Theory*, Lesort, J.B., eds., pp. 431-453. Oxford: Elsevier Science Publishing, 1996.
  - 97) Yamamoto, T., Kitamura, R. : An analysis of time allocation to in-home and out-of-home discretionary activities across working days and non-working days, *Transportation*, No. 26, pp. 211-230, 1999.
  - 98) 福田大輔, 吉野広郷, 屋井鉄雄, イルワン プラセティヨ : 休日のアクティビティに着目した活動時間価値の推定方法に関する研究, *土木学会論文集 No.737, IV-60*, pp. 211-221, 2003.
  - 99) Zhang, J., Xu, L., Fujiwara, A. : Developing an integrated scobit-based activity participation and time allocation model to explore influence of childcare on women's time use behaviour, *Transportation* 39, 125-149, 2012.
  - 100) Castro, M., Bhat, C.R., Pendyala, R.M., Jara-Diaz, S.R., Accommodating multiple constraints in the multiple discrete-continuous extreme value (MDCEV) choice model, *Transportation Research Part B*, Vol. 46, No. 6, pp. 729-743, 2012.
  - 101) Chikaraishi, M., Zhang, J., Fujiwara, A., Axhausen, K. W. : Exploring variation properties of time use behavior based on a multilevel multiple discrete-continuous extreme value model, *Transportation Research Record*, No. 2156, pp. 101-110, 2010.
  - 102) 福山祥代, 羽藤英二 : ネットワークの縮約表現に着目した離散・連続選択モデルによる歩行パターン分析, 第33回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 439-444, 2013.
  - 103) Hoogendoorn, S. P., Bovy, P.H.L. : Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models, *Transportation Research Part B*, Vol. 38, pp.169-190, 2004.
  - 104) Habib, K.M.N., A random utility maximization (RUM) based dynamic activity scheduling model: application in weekend activity scheduling, *Transportation*, Vol. 38, pp. 123-151, 2011.
  - 105) Prato, C.G., Bekhor, S. : Modeling route choice behavior: how relevant is the composition of choice set?, *Transportation Research Record*, No. 2003, pp. 64-73, 2007.
  - 106) Ramming, M. : *Network Knowledge and Route Choice*, PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2001.
  - 107) Bovy, P. H. L. : *On modelling route choice sets in transportation networks: A synthesis*, *Transport Reviews*, Vol. 29, No. 1, pp. 43-68, 2009.
  - 108) Azevedo, J., Costa, M.S., Madeira, J.S., Martins, E.V. : An algorithm for the ranking of shortest paths, *European Journal of Operational Research*, Vol. 69, No. 1, pp. 97-106, 1993.
  - 109) de la Barra, T., Pérez, B., Anez, J. : Multidimensional path search and assignment, *Proceedings of the 21st PTRC Summer Meeting*, pp. 307-319, 1993.
  - 110) Ben-Akiva, M., Bergman, M. j., Daly, A. J. , Ramaswamy, R. : Modeling inter urban route choice behavior, *Ninth International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, VNU Science Press, pp. 299-330, 1984.
  - 111) Hoogendoorn-Lanser, S. : *Modelling Travel Behaviour in Multi-modal Networks*, PhD thesis, Delft University of Technology, 2005.
  - 112) Prato, C. G. and Bekhor, S. : Applying branch-and-bound technique to route choice set generation, *Transportation Research Record*, 1985, pp. 19-28, 2006.
  - 113) Bekhor, S., Prato, C.G. : Effects of choice set compassion in route choice modeling, *Proceedings of the 87th TRB Annual Meeting*, Washington, DC, 2006.
  - 114) Cascetta, E., Papola, A. : Random utility models with implicit availability/perception of choice alternatives for the simulation of travel demand, *Transportation Research Part C*, Vol. 9, No. 4, pp. 249-263, 2001.
  - 115) Frejinger, E., Bierlaire, M., Ben-Akiva, M. : Sampling of alternatives for route choice modeling. *Transportation Research Part B*, Vol. 43, 10, pp. 984-994, 2009.
  - 116) Kwan, M., Hong, X. : Network-based constraints-oriented choice set formation using GIS, *Geographical Systems*, Vol. 5, pp.139-162, 1998.
  - 117) Miller, H. J. : Modeling accessibility using space-time prism concepts within geographical information systems, *International Journal of Geographical Systems*, Vol. 5, pp.287-301, 1991.
  - 118) Weber, J., Kwan, M.-P. : Bringing time back in: a study on the influence of travel time variations and facility opening hours on individual accessibility, *Professional Geographer*, Vol. 54, No. 2, pp. 226-240, 2002.

- 119) Kim, H.-M., Kwan, M.-P. : Space-time accessibility measures: a geocomputational algorithm with a focus on the feasible opportunity set and possible activity duration, *Journal of Geographical Systems*, Vol. 5, pp. 71-91, 2003.
- 120) Yoon, S.Y., Deutsch, K., Chen, Y., Goulias, K.G. : Feasibility of using time-space prism to represent available opportunities and choice sets for destination choice models in the context of dynamic urban environments, *Transportation*, Vol. 39, pp. 807-823, 2013.
- 121) 田中伸治, 藤原直生, 桑原雅夫 : 携帯電話からの GPS データを用いた歩行者の経路選択リンク集合の推定, 土木学会論文集 D3 Vol.67 No.5, 2011.
- 122) 福山祥代, 羽藤英二 : 都市空間での行動分布特性を考慮した歩行者経路選択モデルの構築, 第 33 回交通工学研究発表会論文集, CD-ROM, 2014.
- 123) 羽藤英二, 朝倉康夫 : 時空間アクティビティデータ収集のための移動体通信システムの有効性に関する基礎的研究, *交通工学*, Vol.35, No.4, pp.19-28, 2000
- 124) 朝倉康夫, 羽藤英二, 大藤武彦, 田名部淳 : PHS による位置情報を用いた交通行動調査手法, 土木学会論文集 No.663, IV-48, pp. 95-104, 2000.
- 125) Hato, E. : Development of behavioral context addressable loggers in the shell for travel-activity analysis, *Transportation Research Part C*, Vol. 18, pp. 55-67, 2010.
- 126) Danalet, A., Farooq, B., Bierlaire, M. : A Bayesian approach to detect pedestrian destination-sequences from WiFi signatures, *Transportation Research Part C*, Vol. 44, pp. 146-170, 2014.
- 127) 井料隆雅, 原祐輔, 日下部貴彦 : 交通行動データ活用とプライバシー保護のトレードオフ : 理論モデルによる解析, 土木計画学研究・講演集 Vol. 49, CD-ROM, 2014.
- 128) Kasemsuppakorn, P., Karimi, H.A., 2013, A pedestrian network construction algorithm based on multiple GPS traces, *Transportation Research Part C*, Vol. 26, pp. 285-300.
- 129) 福田大輔 : データ同化アプローチによる交通状態の推定に関する研究動向, *交通工学*, Vol. 47, pp. 33-38, 2012.
- 130) Quddus, M.A., Ochieng, W.Y., Noland, R.B. : Current map-matching algorithms for transportation applications: state-of-the art and future research directions, *Transportation Research Part C*, Vol.15, No. 5, pp. 312-328, 2007.
- 131) 薄井智貴, 三輪富生, 山本俊行, 森川高行 : 歩行者プローブデータ多面的活用のためのデータクリーニング手法に関する研究, 土木計画学研究・講演集 vol.39, CD-ROM, 2009.
- 132) 三谷卓摩, 羽藤英二 : パーティクルフィルタを用いた空間データの自動作成法, 土木計画学研究・講演集 Vol.40, CD-ROM, 2009.
- 133) Liao, L., Patterson, D.J., Fox, D., Kautz, H. : Learning and inferring transportation routines, *Artificial Intelligence*, Vol. 171, pp. 311-331, 2007.
- 134) Bierlaire, M., Frejinger, E. : Route choice modeling with network-free data, *Transportation Research Part C*, Vol. 16, pp. 187-198, 2008.
- 135) Bierlaire, M., Chen, J., Newman, J.P. : A probabilistic map matching method for smartphone GPS data, *Transportation Research Part C*, Vol. 26, pp. 78-98, 2013.
- 136) Sheffi, Y. : *Urban Transportation Networks Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.
- 137) Arentze, T.A., Timmermans, H.J.P. : A multi-state supernetwork approach to modelling multi-activity multi-modal trip chains, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 18, No. 7, pp. 631-651, 2004.
- 138) Liao, F., Arentze, T., Timmermans, H. : Incorporating space-time constraints and activity-travel time profiles in a multi-state supernetwork approach to individual activity-travel scheduling, *Transportation Research Part B*, Vol. 55, pp. 41-58, 2013.
- 139) 伊藤創太 : 異なる尺度を持つデータの統融合手法を援用した移動-活動シミュレーションの開発, 東京大学大学院修士論文, 2013.
- 140) 原祐輔, 羽藤英二 : 乗捨て型共同利用交通システムに対する利用権取引制度の設計とその解法の提案, 土木学会論文集 D3, 2014 (掲載予定).

(2014. 9. 19 受付)

## OBSERVATION AND BEHAVIOR MODELS FOR SPATIAL PLANNING IN NETWORKS

Sachiyo FUKUYAMA and Eiji HATO

Considering the recent developments of the detection technologies of individual traces in networks and the approach of the travel behavior analysis that has shifted from trip-based to activity-based, we overview the methodological circumstances of the data and models with focusing on the pedestrian movements within about 1km-square area, which would provide some basis for planning of urban spaces. Setting our objective on figuring out the spatial structure of urban districts from the point of view of their historical contexts and the detailed analysis of pedestrian behavior, we review the methods of network analysis based on the graph theory and the modeling approaches to pedestrian behavior and demands with observational data, and discuss the future direction.