

交通ネットワーク上の経路選択行動：観測と理論

朝倉 康夫¹・羽藤 英二²

¹正会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科(〒790-8577 松山市文京町)

²正会員 博士(工学)愛媛大学助手 工学部環境建設工学科(同上)

交通空間はネットワーク構造を持つから、交通行動の記述は時空間ネットワーク上のパス(経路)の記述に他ならない。行動データ収集のための紙ベースの調査手法は、位置と時刻の精度が高いとはいえない。移動体通信を援用した新しい行動観測手法は、この点を解決できる可能性を持つ。一方、交通網での選択行動を集計しそのメカニズムをシステム的に記述するネットワークフロー分析は、どちらかといえば解析の容易性を重視して単純な行動規範を仮定する傾向にある。解析の容易性を大きく損なわない範囲で、行動の観測から得られるより現実的な行動ルールを組み込むことができれば、ネットワークフローモデルの説得力をさらに高めることができる。その方向性を検討するために、本稿では経路選択行動の観測とフロー分析を意識した経路選択行動のモデル化について考察する。

Key Words: network, route choice, monitoring, modelling

1. はじめに

改めていっても、交通とは時間・空間領域における人や物(交通主体)の場所的・時間的移動である。個々の主体の移動軌跡が時空間における経路(パスまたはルート)である。道路にても航路にても移動に使うことのできる交通空間は限定されているから、個々の移動主体が利用した経路を重ねあわせてマクロにみると、そこには3次元空間に浮遊する網(ネットワーク)が現れる。ここでは鉛直方向の移動は無視して、2次元空間平面に時間を加えて3次元空間を考えるものとする。交通空間はネットワーク構造を持つから、交通行動を時空間で記述するということは、時空間ネットワーク上の移動を記述することに他ならない。もちろん、ミクロに見ると交通空間の幅の中での移動軌跡の分布を考えなければならないが、ここではそれを無視する。

空間を捨象した交通行動モデルが交通のモデルとしての意味を問われるのと同様に、交通ネットワークに投影できない行動モデルは交通モデルとしての本質を欠くと言うこともできる。後述するように、ネットワーク上の経路選択に関してこれまでいくつかの視点から行動のモデル化がなされてきたが、それらは必ずしも完成されたレベルに達しているとはいえないのが現状である。

ネットワーク上の行動主体の選択行動と、その結果として生じる混雑現象の相互作用をシステム的に記述することを狙いとするのが、交通ネットワークフローモデルである。ネットワークに投影可能な一部の交通行動モデルの成果は、確率的な選択行動と選択行動の階層性を仮定したネットワーク均衡モデルに反映されている。階層的な選択構造を仮定した Nested Logit モデルと整合的なネットワークフローモ

デルとしては、たとえば、需要変動型確率の利用者均衡モデル^{1),2)}を挙げることができる。交通目的や時間価値が異なる複数の移動主体が混在する場合のネットワーク均衡は、Multi-class User Equilibrium³⁾と呼ばれるが、これは単一主体の均衡概念をわずかに拡張するだけでモデル化できる。とはいえ、利用者均衡モデルに代表される交通ネットワークフローモデルは、どちらかといえば数理モデルとしての解析性を追求する余りに、個々の移動主体の交通行動を詳細に記述することを避ける傾向にあったことは否めない。

ネットワーク上の経路選択行動に関する最も単純な仮説は、費用最小化行動である。ネットワーク利用者の費用認識の不確実性を導入するなどの工夫によって現実性の向上がなされてきたが、それでもなお行動規範が現実的ではないという批判が残っている。もちろん、詳細で複雑な行動モデルを仮定すれば現実性が向上する面があるのは確かである。一般性を犠牲にしても現実性を追求する方向、たとえば、ネットワーク上の行動を詳細にシミュレートすることを目指す方向もある。しかしこのようなアプローチは、システムを支配するパラメータが増加し、モデルの分析結果から一般性のある結論が何も得られないという結果に陥りかねない。ネットワークフローの持つ一般的な特性を明らかにすることと、前提となる行動規範の現実性とのバランスを保つことは容易なことではないが、ネットワークフローモデルは、数理モデルとしての解析性を失わない範囲で、ネットワーク上の行動モデルの成果を組み込む工夫を考えるべきであると考える。そしてそのための必要条件を行動モデル側に提示することが重要であると考えられる。

経路選択行動モデルの妥当性をネットワーク上で検証することの必要性は従前から指摘されてきた。しかし、実ネ

ツワーク上で観測された経路選択データを用いて経路選択行動モデルを構築・検証した研究^{4), 5), 6)}は極めて少なく、限定的な条件下で少数のサンプルの行動観測・分析にとどまっている。交通行動データの主要なソースであるパーソントリップ調査や道路交通センサスといった大規模交通行動調査では、利用者の選択経路を尋ねることは稀である。ネットワーク上での行動軌跡の観測と収集データのハンドリングは容易ではなく、解析に使うことのできる信頼性の高いデータが存在しないことも、経路選択に関する行動モデルが必ずしも十分ではないことの背景にあるものと考えられる。

第2章で述べるが、近年では様々な高度情報機器を用いて移動主体を直接的に観測することが可能になってきている。この方法は、被験者の記憶に依存することなく時空間の経路を記録することができるので、経路や時刻の抽出が容易であるという利点を持っている。観測できるデータがなければ精緻な行動モデルの同定は不可能であるし、検証できないモデルは構築しても工学的に意味がない。逆に、分析の道具と適用対象が明確でなければ、何を観測すべきかが不明であり、仮に観測したとしても単に大量の不要物が蓄積されるだけである。

本稿の目的は、交通ネットワーク上の経路選択行動について、観測技術に関する現状の課題を整理する一方で、経路選択のモデル化に関するいくつかのアプローチを示す。そして、観測技術の進歩を受けて、経路選択モデルを開発する上で新たに検討すべき課題を示す。第2章では経路選択を含む交通行動データの収集方法に焦点をあて、これまでの研究事例と最近のアプローチ、とくに近年急速に普及している移動体通信機器を用いた新しい交通行動観測の事例を紹介する。第3章は経路選択行動のモデル化について既存の研究事例を述べ、新たな行動モデルを開発することの必要性と、いくつかの考えられるアプローチを検討する。4章では、ネットワークフローモデルへの展開を考慮したときに、経路選択モデルが持つべき課題を整理して述べる。なお、以下では議論を単純にするために、2次元平面での経路選択に限定して考察していくものとする。

2. 経路選択行動の観測

(1) 行動データの収集方法

対象を経路に限定することなく、交通行動全般を対象として見たとき、人の交通行動のモデルはきわめて精緻化されてきた^{7), 8), 9)}。それに伴い、モデル推定のために必要な行動データの精度への要求も厳しくなっている。しかしながら、モデルの精緻さが向上しつづけているのに比較すると、高精度の行動データを取得するための行動調査手法の進化の速度は相対的に遅い^{10), 11)}。交通行動データの収集には、「行動の調査」という用語が使われることが一般的であるが、以下では「行動の観測」という用語を代替的に用いることが

ある。その理由は、(2)で述べる移動体通信システムを援用した新しい行動データの収集方法は、「調査」というよりはむしろ「観測」に近いからであり、そのような視点から行動データを収集する際には「行動の観測」と呼ぶことにする。

交通行動データの収集方法は、2つのアプローチに大別できる。ひとつは、仮想的状況を設定した実験室での実験による方法であり、他のひとつは実際の交通空間での行動の観測である。

a) 実験室での実験(Laboratory Experiments)

このアプローチによる行動データの収集は、選択状況、選択代替案、それらの属性などの条件を仮想的に設定し、被験者の選択や選好の結果を得るものである。その代表は、紙と鉛筆による Stated Preference(SP)調査である。ドライビングシミュレータや、CG を用いたコンピュータシミュレータなどの機材を用いると、より「実験」の色合いが強くなる。シミュレータによる代表的研究のひとつに、Leeds 大学の Bonsall らによる VLADIMIR¹²⁾を挙げることができる。これは、モニターに走行時の画像を示してドライバー(被験者)の経路選択行動や交通情報に対する反応に関するデータを収集するためのシミュレータである。ドライバーが選択した経路の状況が順次モニターに表示され、ドライバーはそれを見ながら次の行動を起こす。起点から終点までの一連の選択結果と、そのときの交通条件が自動的に記録され、経路選択モデル同定のためのデータとなる。

実験室での実験は、選択行動に関する各種の条件設定が容易であり、とりわけ、現実の空間では避けられない変数間の相関を制御できるといった特徴を持っている。たとえば、OD ペア間の所要時間と費用は現実空間では相関を持つことが多く、パラメータ推計等に不都合が生じることもあるが、実験室での実験ならば、これらの変数間に相関が生じないように条件を設定することは容易である。データの現実性が担保できれば、分析手法に見合は質と量のデータを必要なだけ得ることができるという利点は大きい。

しかし、たとえ高度なシミュレータを用いても、実験室内で被験者が認知する交通環境に現実味を持たせることは容易ではない。現実に体験する時間、空間と、実験室内でモデル化される時空間は必ずしも一致しないからである。実時間で動くシミュレータでは被験者に飽きさせずに十分な数のデータを得ることも難しい。空間記述の現実性が向上するにつれて室内実験の有効性は今後高まるものと期待されるが、時間的、場所的な移動を伴う交通行動、とくに、経路選択や出発時刻選択の観測手法としての室内実験の限界については十分な議論が必要であると考える。

b) 現実の交通空間での観測(Real World Observations)

交通行動データを収集するもうひとつのアプローチは、現実空間での交通行動の観測である。最も伝統的な方法は、インタビューやアンケートにより被験者の行動を母ねる方法である。道路交通センサスや PT 調査に代表される行

動系の調査では、被験者に調査票を配付し、被験者の記憶に基づいて行動を調査票に記入するのが一般的である。調査員が面接する形式の調査でも、被験者に電話で問い合わせる形式の調査でも、被験者が自らの行動を想起して回答する仕組みは同じである。被験者の負担が少なく精度が高いとされるアクティビティダイアリー調査¹³⁾や、インターネットを用いた調査¹⁴⁾でも、調査精度は被験者自身の記憶に依存する。

詳細で正確な交通行動データをアンケートによって収集する方法の持つ問題点は以下のように整理できる。(1) 詳細な行動データを得るには質問項目を増加させざるを得ないが、そのことにより被験者の負担が増加する。(2) 行動の記述は被験者の記憶に依存するため、記述もれや記述の誤りが発生する。とりわけ、時間や時刻を正確に記憶して記述することは難しい。(3) 地図上に行動を記述する場合を除けば、位置(経路)の特定は容易ではない。経路を地図上に記述する場合でも、習慣的行動以外は正確に記述することは難しい。(4) 調査票に記載された行動内容をコーディングするためのコストが大きい。

一方、情報・通信技術の高度化に伴い、GPS、携帯電話、PHSなどに代表される移動体通信システムの利便性向上とコスト低下が実現し、その利用者数は飛躍的に増加した。移動体通信による位置特定サービスは福祉や保安面で既に商用化段階¹⁵⁾にあり、ある特定の場所周辺の情報を簡単に取得することのできるモバイルインフォサーチ¹⁶⁾にも関心が高まっている。移動体通信を利用すれば、携帯機器を持つ個人の位置データを入手できるということは、交通行動における活動の位置特定が可能であることを意味する。

アンケート調査による方法は、被験者自身が過去の行動を想起するのに対し、移動体通信による調査方法は被験者の行動を外部から観測するという形式をとる点で異なっている。外部からの行動の観測は行動心理学や動物行動の分析¹⁷⁾ではむしろ一般的であるが、観測により時間・空間を移動する人間の交通行動を調査した例は少ない。

Bovy and Stern¹⁸⁾は、このようなカテゴリーに属する交通行動観測の事例をいくつか紹介している。ナンバープレートを複数地点で観測し車の軌跡を追跡する調査や、特定の地点(高所)から写真やビデオにより人や車の流れを観測するもの、および車、自転車、人の跡をつける(tracking)調査の事例である。わが国では、動物園での観客の追跡調査¹⁹⁾や、実ネットワークでの経路選択行動を調査車両に同乗して観測した事例²⁰⁾がある。高速道路上に設置されたナンバープレートの自動識別装置(AVI)により、車両の軌跡を再現することにより時間的に変化するOD表を推定する試み²⁰⁾もなされている。

近年では光ビーコンなど路車間の双方向通信機能を用いて、車載器を搭載している個別の車両の動きを把握することも可能になりつつある。桑原らの調査²¹⁾によれば、横浜

地区の113箇所のビーコン設置地点を通過する車両のうち、車載器を搭載する車両の割合は0.13%であり、車両IDの正常判別率は67%であった。車両走行軌跡の再現のためにすべてのビーコン情報が完全に計測されている必要があり、測定エラーの修復方法の開発が必要であろう。計測装置を搭載した車両により約2,000台日の利用形態を調べたINRETの調査²²⁾は、個人ではなく車ベースの行動調査であるが、それによると、ダイアリーデータによる1日のトリップ数の報告値は実際の自動車利用と比較して過小であり、短距離のトリップの記述が欠落する傾向にあるとしている。

外部観測による方法では行動目的を知ることができないから、外部観測のみで交通行動のすべてのデータが収集できるわけではない。しかしながら、外部観測によるアプローチは、想起式のアンケート調査に比較して、詳細な行動データ、とりわけ活動の位置と時刻のデータを正確に得られる点で優れている。移動体通信による位置特定機能を援用すれば、容易に位置データを取得できるからである。

(2) 移動体通信システムによる行動調査

高度情報通信技術の発展により、VICSなどに代表されるITSにおいても、様々な機器やシステムが交通状態のモニタリングに利用できるようになった。の中でも移動体通信技術の進歩は著しく、個人の交通行動を観測・記録するまでの有効性はきわめて大きいものと思われる。そこで以下では、GPS、携帯電話・PHSを利用した行動観測の例と課題を整理して示す。

a) GPSを用いた事例

移動体通信システムの代表はGPS(Global Positioning System)である。GPSは人工衛星により原子時計の時刻のズレを計測することで緯度経度座標を特定するシステムである。D-GPS(Differential GPS)では、移動局で得られた緯度経度データを別途の基地局位置データにより補正することにより精度を向上させている。GPSを利用した交通調査事例として、Zito et al.²³⁾やSermons and Koppelman²⁴⁾を挙げることができる。Quiroga and Bullock²⁵⁾はGPSとGIS(Geographic Information System)を組合せることにより、車両の走行時間の計測を行っている。これらの研究はいずれも車両の軌跡を追跡することが狙いであって、行動データの取得を目的とするものではないが、車両の位置や速度の計測にGPSが利用可能であることを検証した事例である。

交通行動調査にGPSを利用した研究として、米国FHWAによるレキシントン地域での行動調査²⁶⁾を挙げることができる。この調査は、100人規模の被験者に対してGPSにより自動車利用による行動を観測するとともに、ダイアリーチェックを並行して実施し、両者の比較を行っている。GPSによる結果と被験者自身の想起による結果を比較した結果、両者の間ではトリップ開始時刻やトリップ距離がかなり異なることが示された。トリップ数では、GPS調査の方がダイアリーチェ

査のそれを上回ること、逆に、トリップ時間や距離では、ダイアリー調査による報告値がGPSによる観測値を上回ることが確認された。我が国では、大森他²⁷⁾が携帯型のGPS機器を用いて、歩行、自転車、車での移動を比較している。分析の結果、いずれの手段の移動でも、出発地・到着地・経路の特定が可能であるが、位置特定の誤差が50~150mであることを示している。

GPSによる行動調査は、車での行動に限定すればかなり有効である。我が国では、GPSと自律航法によるマップマッチング技術を組み合せた高精度の位置特定が可能なカーナビゲーションシステムが広く商品化されているが、ナビゲーションシステムから車両の軌跡を取り出すことも可能であろう。しかし、GPSにベースを置く行動観測には次のような問題がある。(1)人工衛星の電波を受信するために常にレシーバーを露出させておく必要があるが、人が携帯する場合にはこのことが被験者の負担になる。(2)建物内部、地下街、アーケード、公共交通の車内などGPS電波が困難な場所での行動の追跡は難しい。(3)携帯できるように小型化されているとはいえ、調査のための装置を被験者が持ち歩く必要がある。

b) PHSによる位置特定

近年、移動体通信の市場が世界的に拡大するにつれて、携帯電話による位置特定に関する研究開発への関心が高まっている²⁸⁾。その背景のひとつには、米国連邦通信委員会(Federal Communication Committee)により、携帯電話の通信事業者に対して2001年までに緊急時コールの位置特定精度を保証するよう義務付けられたこと²⁹⁾も挙げられる。携帯電話による位置特定の方法には様々な方法がある。電波の方角、時刻、電界強度、基地局の位置データベースを利用するものなどである。その中で、たとえばSnap Trackの方法は、GPS電波を携帯電話で受信しセンターに転送して位置特定するというものである。GPS電波を受信するためのアンテナを携帯電話に装填することが難しい等の指摘もあるが建物内でも50mの精度が得られたとする報告³⁰⁾もある。

携帯電話の地上基地局の配置密度は薄いため、基地局の位置から移動局である携帯電話の位置を特定することは難しい。これに対して、PHS(Personal Handy Phone)の電波は微弱であるために、通信キャリアは基地局の配置密度を相対的に高くせざるを得ない。都市内ではほぼ毎100m程度の密度で基地局が配置されており、地下街、地下鉄の構内や、建物内にも配置されている。PHSは複数(3~5)の基地局のID番号と電界強度を常に把握している。LOCUSの位置特定システム¹⁵⁾は、このようなPHSの特性を活用したものである。基地局の位置座標は既知であるから、PHSが受信している基地局のIDと電界強度から位置特定が可能である。PHSによる位置特定サービスは、1998年4月から開始され、福祉、保安、観光などに利用されている。

PHSの問題点は、高速での移動中にデータ送信が困難

であることと、基地局密度が薄い郊外では位置特定精度が落ちることである。高速での移動については、高速道路の走行時には支障が発生することもあるが、平面街路を車で移動する程度であれば十分に対応できる。また、鉄道駅には基地局が設置されているため、駅を通過する都度、位置特定が可能である。PHSの利点としては、GPS電波が届かない地下街や建物内でも位置特定が可能であるほか、地下鉄などの公共交通乗車中でも位置特定ができることが挙げられる。このことは多層化された都市空間において、シームレスに人の行動を観測する道具として、「現時点では」PHSの利用価値が高いことを意味している。

c) PHSによる時空間行動調査

PHSによる位置座標の特定システムを利用すれば、位置座標データを短い時間間隔で取得できる。現在の技術レベルでは、最小時間間隔は15秒である。被験者にPHSを貸与し、一日ないしは数日の行動を連続して記録すれば、位置座標ベースでの行動データが得られる。PHSによる位置特定サービスは、もともと保安や福祉などでのオンラインによる位置特定を想定したものであるが、得られた一日分の位置座標データをオフラインで行動データに変換すれば精緻な行動データが入手できることになる。

著者らを含む研究グループは、PHSの位置特定機能を利用した一連の交通行動観測を実施している。1998年の8月にシステムの挙動を確認した後、同年11月に、阪神地区に在住の10名の被験者の協力を得て、連続した2週間の行動調査を実施した。毎日朝の6時から夜の12時までの間、2分間隔で位置データを入手した。併せて2週間のトラベルダイアリー調査と、2日間のパーソントリップ調査を実施し、PHS調査の結果と比較している。

1999年の4月には、大阪市で開催されたスポーツイベントの観客100名を被験者として、非日常的な1日の交通行動をPHSシステムにより調査した。個人単位の分析に加えて、グループでの行動(待ち合わせなどの行動調整を含む)の分析が可能であるほか、イベントに伴う情報利用についても分析している。これらの調査結果の報告は別稿で詳細に発表している^{31,32,33)}が、いずれの調査でもPHS調査の有用性を確認している。

先に述べたように、移動体通信による外部観測のみで人の交通行動が完全に把握できるわけではない。PT調査のような大規模行動調査を即時に代替できるとも考えられない。移動体通信を用いた新たな行動調査手法を開発するには、現時点で入手可能な位置特定データが個人の交通行動をどの程度記述できるかを明らかにしておく必要がある。その中でも、位置座標データから時空間の行動データ、とりわけ「時空間パス」への変換はどのような機器で位置座標データを取得したとしても必須のプロセスであり、その方法を開発しておく必要性は高いと考えられる³⁴⁾。GPSであってもPHSであっても、観測で得られる1次データは時空間における

連続した位置座標点の分布に過ぎず、そのままで交通行動データとしては使えない。したがって、位置座標点からトリップデータへの変換が必要であるということである。

なお、PHS を交通行動調査に利用した事例は、建設省と計量計画研究所によっても報告³⁵⁾されている。これは高度情報機器を利用した交通実態調査の可能性を検討したもので、GPS と PHS の機能性能を比較している。PHS の精度は高く、交通行動の把握に利用可能であるとしている。

3. 経路選択行動のモデル

(1) ネットワークフロー分析と経路選択

段階的な交通需要予測の最終段階に位置し、与えられた(手段別)OD 交通量をネットワークに負荷するプロセスが交通量配分であり、交通量配分は最も狭義のネットワークフロー分析である。狭義という言葉は次の意味で用いている。需要予測の各段階は、利用者均衡の枠組みの中で統合することができる。たとえば、分担段階と配分段階を統合すれば、分担/配分統合型の利用者均衡モデルを構築できる。このとき、分担交通量も配分交通量もいずれもネットワークフローあることに変わりはない。需要予測段階の統合は、交通量配分から需要予測プロセスを遡る形での統合である。その意味で、交通量配分が最も狭義のネットワークフロー分析であるといえるのである。

さて、交通量配分で OD 表をネットワークに負荷する際のルールは、行動論的ないしは現象記述的ルールと、システム側から見た最適化ルールに大別できるが、ここでは前者に注目する。起点と終点を固定した場合には、経路選択のルールを決めることが配分ルールを決めるに相当する。交通量配分自体は、交通量の増加に伴う交通コストの増加(混雑現象)や、時間的に変化する交通流(動的フロー)などを包括的に記述するものであるが、議論を簡潔にするために「混雑のないネットワークでの静的な経路選択」に限定して配分ルール(Network Loading Rule)を考えよう。

ネットワークは強連結(strongly connected)であり、OD ペア間に少なくとも1本のルート(経路)が存在するとしよう。OD ペア rs 間の k 番目経路の交通コスト c_k^{rs} は、経路上のリンクコストの和で与えられる。

$$c_k^{rs} = \sum_{a \in A} \delta_{a,k}^{rs} t_a \quad (1)$$

ここに、 t_a はリンクコスト、 $\delta_{a,k}^{rs}$ は OD ペア rs 間の k 番目経路がリンク a を含むとき 1、そうでなければ 0 である。リンクコストの和が経路コストであるという条件は、たとえば距離遞減料金体系を持つような公共交通ネットワークでは必ずしも成立しないが、完全な距離比例料金体系(もしくはそれに近似できる場合)であればこの条件で問題はない。なお、リンク

コストは所要時間、費用などが合成された一般化費用である。この前提は後述する EBA モデルの説明の際に緩和される。

最も単純な配分ルール、すなわち経路選択規範は、コスト最小の経路を選択するというルールである。経路コストに不確定要素は存在せず、かつネットワーク利用者がすべての経路のコストについて完全な情報を得ており、合理的に経路を選択するならば、最も妥当な経路選択ルールは「最小コスト経路選択ルール」である。交通混雑がなければ、リンクコストは一定であり、したがって OD ペア間で利用される経路は最小コスト経路1本だけである。最小コスト経路選択ルールでは OD ペア間に存在するすべての経路が選択対象であるから、OD 間の経路集合が明示的に意識されることはない。なお、起終点間の最小コスト探索アルゴリズムでは、すべての経路を列挙するようなことはしない。すべての経路が選択対象であるからといって、すべてを列挙・比較して最小コスト経路を決めるのではないことに注意されたい。

(2) 確率的経路選択モデル

最小コスト選択ルールは利用者がすべての経路コストを知っており、かつ合理的に行動することが前提であった。これは必ずしも現実的ではない。そこで、利用者の経路コストの認知が確率的であるとし、ランダム効用理論が適用されてきた。利用者の効用は経路のコストが小さい程大きいと考えられるから、OD ペア rs 間の k 番目経路の効用関数を

$$U_k^{rs} = -c_k^{rs} + \xi_k^{rs} \quad (2)$$

と定義する。ここに ξ_k は利用者の認知誤差を表す確率変数である。経路の効用を所要時間や距離などの要因の影響を受ける確定項($-c_k^{rs}$)と、不確定な要因である確率項(ξ_k^{rs})の和として表現したことになる。ここで注意すべき点は、コストの確率変動は利用者の認知の変動によるものであって、コスト自体の物理的な変動を仮定しているのではないことである。なお、誤差項については、利用者の認識値を観測者が完全には観測できないこと表現するために導入されたとする解釈もある。

経路を利用者の選択肢と考えれば、OD ペア rs 間で k 番目経路が選択される確率は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} P_k^{rs} &= \Pr[U_k^{rs} \geq \max_{k' \neq k} \{U_{k'}^{rs}\}] \\ &= \Pr[-c_k^{rs} + \xi_k^{rs} \geq \max_{k' \neq k} \{-c_{k'}^{rs} + \xi_{k'}^{rs}\}] \\ &= \Pr[c_k^{rs} - \xi_k^{rs} \geq \min_{k' \neq k} \{c_{k'}^{rs} - \xi_{k'}^{rs}\}] \end{aligned} \quad (3)$$

確率項の分布形が異なれば、上式から導出される確率選択モデルの関数形は異なる。すべての確率項の分布を

お互いに独立な Gumbel 分布であると仮定すれば、経路選択モデルはロジットモデルとなる。ロジットモデルは選択肢の確率項に相関を認めていない。このため、選択肢である経路が互いに重複していて必ずしも独立ではない場合には、経路の選択行動の推計に際してバイアスが発生する。具体的には、複数経路の重複区間を構成するリンクの選択率が相対的に大きくなり、その区間に過大なフローを負荷することも生じる。

しかしながら、ロジットモデルを経路選択モデルとするとの利点のひとつは、計算プロセスの中で経路を限定する Dial のアルゴリズムなどによって交通フローを解析的に求められる点にある。経路選択に関するロジットモデルのアルゴリズムについては、赤松³⁶⁾に詳しい。Dial³⁷⁾のアルゴリズムは「効率的経路集合(efficient path)」の考え方を用いて、事前に経路の列挙を行うことなく、経路(というよりもリンク集合と呼ぶ方が適切であるが)を限定していく方法である。しかし、Dial のアルゴリズムでは不自然な経路を抽出する可能性がある。そこで経路を限定することなくロジットモデルによる経路選択を計算するために、Markov 連鎖を応用する方法が開発されている。さらに、幾何学的条件を付加してループを発生させない工夫も提案されている。

ロジットタイプの経路選択モデルが持つもうひとつの利点は、OD 需要を固定しない統合型のモデルへの展開が容易であることである。階層的な選択構造を Nested Logit モデルにより記述すれば、経路選択だけではなく手段や目的地の選択を統合モデルとして陽に表現できる。利用者均衡の枠組みで統合的に表現することができるので、利用者の行動とシステムのパフォーマンス(混雑)の相互作用を整合的に扱うことができる。

一方、確率項の分布形に正規分布を仮定するとプロビットモデルが導出される。プロビットモデルは、各選択肢の誤差項間に多重正規分布を仮定するため、選択肢間の観測されない影響の相関を考慮することが可能である。このことにより先に述べたロジットモデルの欠点を補うことが可能となる。しかしながら、プロビットモデルの場合は解析的に選択率の閾数形を記述することができず、経路数が多い場合には数値計算が容易ではないという欠点がある。プロビットモデルの計算アルゴリズムのうち、最も容易な方法は Monte Carlo Simulation による方法である。これはリンクの認知された交通コストが相互に独立な正規分布に従うとして正規乱数を発生させ、それをリンクコストとして最短経路を探索するプロセスを繰り返すというものである。古典的には Burrel のアルゴリズムとして知られていたが、Daganzo and Sheffi³⁸⁾により確率均衡配分の中で再構成された。

なお、従来から指摘してきたプロビットモデルのパラメータ推定の煩雑さという問題に対して、シミュレーション法などの解法がいくつか提案されている³⁹⁾。選択肢間の相関を

表わすパラメータについては、構造化手法が提案されており、現実的なモデルになりつつあるといえよう。

(3) リスクモデル

リスクモデルというカテゴリーは Bovy and Stem⁴⁰⁾に準じている。リスクモデルはランダム効用モデルの説明変数となる要因の不確実性をより明示的に取り扱ったものとも解釈できる。(2)で示したランダム効用モデルは、利用者のコスト認知が確率的であるのであって、コスト自体は確定的であるとしていた。これに対し、Mirchandani and Soroush⁴⁰⁾は利用者のコスト認知の確率変動だけではなく、リンクコスト自体の確率変動をも同時に考慮した均衡モデルを提案している。リンクコストの分散をリスクととらえ、リスクに対するドライバーの態度をリスク選好型、リスク中立型、リスク回避型に分類し、各セグメントごとの行動を区別している。リスク中立型は経路コストの平均値のみにより経路選択を行うグループであり、その行動は通常のランダム効用モデルと同様に記述される。リスク回避型は経路コストの分散を負の効用として評価し、コストの分散がより少ない経路を選択する。逆に、リスク選好型は経路コストの分散を正の効用として評価し、コストの分散がより大きい経路を選択する。もちろん、コストの期待値が小さい経路が選好されることとは、リスクに対する態度にかかわらず共通である。

交通情報提供下においては、経路属性の不確実性を、提供される情報の精度と考えることもできる。小林ら⁴¹⁾は交通情報提供下のネットワーク均衡問題において、危険回避型、中立型の経路選択行動を記述し、情報の精度とドライバーの厚生水準の関係について分析を行っている。

リスクモデルの特徴は、リスクに対する態度によるセグメントを行うことで、経路属性の不確実性に対するドライバーの反応をより明示的に取り扱うことができる点にある。その意味では、(2)で述べたランダム効用理論にベースをおく確率的経路選択モデルよりも、ネットワーク利用者の経路選択行動を詳細に表現したモデルであるといえる。しかし、現在までのところ、リスクモデルで解析的に扱うことのできるネットワークの形態は限定期的であり、一般的なネットワークへ適用するに至っていない。モデルの構造が複雑であるため、解析できるネットワークの形状は 1OD2リンクのような単純なネットワークに限られているのである。交通量配分に組み込むには、リンク交通量に対して非線形的にコストが増加するリンクコスト閾数を用いるのが一般的であるが、リスクモデルでは線形のリンクコスト閾数を用いた記述に留まっている。これらの点が解決できれば、行動の不確実性を表現する上で優れた特性を持つリスクモデルの有用性は高い。

(4) 新たな行動モデル

ここまで述べてきた経路選択モデルの大きな特徴は、

利用者の選択行動に強い合理性を仮定している点であり、暗黙に次の条件を置いていることである。

1)選択肢集合があらかじめ所与である。

2)結果の確率分布は(客観的あるいは主観的に)既知である。

3)利用者は期待効用が最大となるよう行動する。

しかし、実際のドライバーの経路選択行動はこのような条件の下で行われているであろうか？現実には経路選択肢が完全に所与であることはないし、経路選択の結果の確率分布も既知とはいえない。これに対して Simon⁴²⁾は、限定された合理性の理論を提唱している。重要な点は以下の3点である。

1)選択肢集合を所与とせず、選択肢の生成プロセスを記述する。

2)確率分布を所与とせず、不確実性に対処するためのヒューリスティックスを導入する。

3)期待効用最大化理論の代わりに満足原理を用いる。

限定合理性の理論の特徴のひとつは、利用可能な選択肢を発見するプロセスをモデル化の対象に含める点にある。意思決定に費やされる時間の大部分は、可能な選択肢の探索とその評価に充てられると考えると、選択可能集合の決定は重要である。選択肢の探索と評価は時間と費用がかかるプロセスであり、意思決定主体はヒューリスティックスを用いて、満足可能な選択肢を発見するように努めていると考えることができよう。

交通ネットワーク上の経路選択の場合、選択可能経路の探索過程を明示的に取り扱うことはかなり本質的である。交通手段や目的地の選択に比較すれば、実ネットワーク上に存在する経路の数は著しく多い。存在経路(Existing route)とは、ODペア間を連結しているという条件を満足する経路であり、選択対象であるとは限らない。ループを許容すれば、連結ネットワーク上の存在経路の数は無限である。存在経路の部分集合が、利用者が認識した経路である認知経路(Known route)の集合である。さらにその部分集合として、利用者の制約条件を満足する利用可能経路(Available route)の集合が存在する。選択可能経路(Choice set)とは利用可能経路の集合を指す。選択可能経路集合の作成については、Ben-Akiva et al.⁴³⁾が実際に観測された経路を含むような経路集合の作成法を提案している。

ネットワークの連結条件から決まる存在経路集合から、利用可能経路集合への絞り込み過程を記述することが探索過程のモデル化に他ならない。この過程を明示的に考慮することにより、ネットワーク上での経路選択行動モデルの説得力が向上するものと考えられる。探索過程をシステムティックに記述できれば、「経路の数が膨大であるから」という理由で計算量の面から制約が多いとされる経路交通量ベースの配分計算アルゴリズムを利用する上でも都合がよい。以

下では、限定合理性に基づいたモデルをいくつか紹介する。

a) PS(Production System)モデル

Michon のモデル分類によれば、経路選択モデルの多くは、シンプルな確率的意思決定メカニズムによって説明されている。心理学的な認知メカニズムは捨象され、ブラックボックスとして表現される。彼は Production ルールを適用した経路選択モデルを提案している。エキスペートシステムとしてよく知られる Production System モデルは、人工知能研究の成果の一つとして知られる。基本的には IF THEN ルールの積み上げにより経路選択の意思決定を記述するものである。コンピュータシミュレーションにおいては、PS モデルの優位性があることは Clark & Smith⁴⁴⁾により示されている。個人属性データや経路属性の詳細なデータがあるなら、そのパターンをルール化して、クローニングすることで正確な経路選択の結果が表現できるというものである。

シミュレーション的な視点からネットワークフロー分析を行うのであれば、PS モデルは有用なツールであることは確かである。しかしながら、ルールベースモデルの欠点のひとつはモデルの特性がモデル作成者以外には不明であることが多く、追試が困難である点である。操作性に優れている利点は、恣意的であるとの批判につながる。他の欠点は、多くのパラメータを用いてルールを構築するために、システムを支配している主要なパラメータが何であるかがわからないといった事態が懸念されることである。交通という複雑な社会システムを複雑なままにモデル化しても、システムの特徴を解析することは困難であるからである。

b) EBA(Elimination by Aspects)モデル

選択肢の属性に着目し、自分が望ましいと思う条件を満たさない代替案を消去していくプロセスを属性による消去(Elimination By Aspects)過程と呼ぶ。EBA は Tversky⁴⁵⁾により提唱された概念である。EBA では、経路の属性に加法性を仮定しない。たとえば、経路の属性が「所要時間」、「距離」、「右左折回数」であったとしよう。このとき、それぞれの属性ごとに許容できる上限(ないしは下限)を設定し、主要な属性から順に条件を満足しない経路を選択集合から消去していくというプロセスである。経路が一つになったとき、この逐次的な意思決定プロセスを止める。

EBA モデルの重要な点は IIA 特性(無関係な代替案からの選好独立性)の問題を解決している点にある。EBA モデルでは、意思決定者は効用加算モデルのように全ての属性を同時に計算にいれるのではなく、ひとつひとつの属性の値を、その属性が自分にとって重要である順番に、検討していくものと考える。より厳密には、その重要性に比例する確率で属性を検討の対象としてとりあげるモデルとして一般化が可能である。ある属性が抽出される確率はその属性の非負の効用値に比例するとして、選択肢集合からの選択確

率を求める。EBA モデルは、選択肢が共通の属性を持つ場合には共通属性の寄与が減少するという構造を持っている。このことにより IIA 問題を解決できるのである。詳細はたとえば、中村・富山⁴⁶⁾を参照されたい。

Tversky の EBA の考え方を交通の選択に応用した事例は、Recker and Golob⁴⁷⁾である。選択肢が少なくて、すべての選択肢の列挙が可能な場合には EBA の考え方をそのまま適用することも不可能ではない。しかし、経路選択問題では、最初にすべての選択肢を列挙することは不可能である。ネットワーク上での EBA 問題に対し、D'Este⁴⁸⁾は Hybrid choice の考え方を提案している。彼の問題設定は「複数の従属性に関する制約を満足する範囲内で OD ペア間の主属性を最適にするルートを求めよ。(たとえば、コストが上限を超えるか右折回数が上限を超えない)」という条件下で、「距離を最小にする」である。この問題に対するアルゴリズムとして、主属性により最短経路を順に列挙してゆき、従属性のすべてを満足するものを求めるという方法と、従属性を満足しない経路上のノードをネットワークから消していく方法を提案している。いずれにしても、Elimination processにおいて、標準的な EBA では選択肢が直接 eliminateされるが、ネットワーク EBA ではノードが eliminateされるのであって、経路は間接的にしか eliminate されない点に特徴がある。

実道路網上での EBA の適用については、真浦他⁴⁹⁾が紹介している。一方、観光ツアーのように訪問先での滞在が正の効用(負のリンクコスト)を持つ場合のルート探索問題は、通常の経路探索アルゴリズムが使えない。しかし、EBA にベースを置くアルゴリズムは、属性の加法性を仮定しないため、負のコストを持つようなケースでも適用可能である。詳細は大草他⁵⁰⁾を参照されたい。

c) プロスペクト理論

Tversky and Kahneman⁵¹⁾によるプロスペクト理論は意思決定過程を2局面に分ける。編集(Editting)と評価(Evaluating)の過程である。

(1)編集過程:ドライバーはヒューリスティックな情報認知を行う。

a)類型化(coding);準拠点(reference point)にしたがって利得を正領域と負領域に分類

b)結合化(combination):等利得の確率和算

c)分離化(segmentation):確実な利得部分と危険な利得部分の分離

d)切捨化(cancellation);通常の独立性公理

e)単純化(simplification);小さい差違の無視

(2)評価過程:ドライバーは条件付きの経路属性の重み付け値と価値の判断過程を持っている。ウェイト関数 w と、価値関数 v によって、実際の心理的決定がモデル化される。ここで重要な点は、客観的確率は、額面通りには受け取られないことである。非常に小さい確率の差は実際より大きく認

知され、大きい確率の差は実際よりも小さく認知される。また、実際の心理的決定においては、客観的外的な選択行動の望ましさが評価されるのではなく、基準点(Reference Point)からの変化、すなわち、得をするか、損をするかによって評価関数は大きく異なる。価値関数は、たとえば、得する利得に対しては上に凸、損に対しては下に凸な関数を仮定することもできる。

プロスペクト理論を経路選択に応用する場合には、所要時間 x_j が $p(x_j)$ の確率($\sum p(x_j) = 1$)で実現する経路 k を選択する行動の望ましさ $v(k)$ を次のように定義する。

$$v(k) = \sum_j w(P(x_j)) v(x_j) \quad (4)$$

ここに $v(x_j)$ は、所要時間が x_j であったときの価値関数の値である。ウェイト関数 $w(P(x_j))$ は所要時間の不確実性 $P(x_j)$ を変換した関数であるが、このことにより評価プロセスに必ずしも加法性が成立しない場合も説明できることになる。評価過程で用いられる価値関数とウェイト関数は、(1)の編集過程と整合的に決定されるが、必ずしも個々の編集過程が関数の特定化に一対一対応するとは限らない。経路の所要時間の不確かさを、加法性を満たさないウェイトによって評価することが重要であろう。

著者らの知る範囲では、プロスペクト理論が交通の経路選択行動の記述に応用された例はない。しかし、選択の意志決定過程を編集と評価に分け、さらに評価過程では必ずしも加法性が成立しないような状況での不確実性評価を扱えるという点は魅力的である。

4. 今後の課題

本研究では、交通ネットワーク上の経路選択行動に着目して、行動観測とモデル化の両面から従来研究をレビューした。行動観測については、被験者の想起によるデータ収集方式に加えて移動体通信を利用した新しい観測方法が利用可能であることを示した。とりわけ実ネットワーク上での経路選択行動データの収集といった視点から見ると、被験者が自己の位置と時刻を正確に記憶して記述することは難しいから、移動体通信による方法が有効であると考えられる。人の行動という面では、都市空間でシームレスに位置データが取得できるという意味で PHS を用いる方法が有用である。しかし、新しい機器の利用が期待される一方で、経路選択行動の観測に関して検討すべき課題は少なくない。

①位置座標データからの経路の特定

移動体通信の機器やシステムがどのようなものであっても、移動体通信によって得られる位置データを経路選択行動の分析に用いるにはいくつかの課題が残されている。そ

の中でも位置座標データから行動データへの変換が重要であるが、経路選択行動の分析のためには、移動と滞在の識別だけではなく経路の特定が必要である。位置特定の精度が高いカーナビゲーションシステムのデータを利用する場合は、既に電子化された道路ネットワークと連動しているためこの問題はそれほど深刻ではないが、PHS や GPS を単体で用いる場合には経路データへの適切な変換方法を開発する必要がある。道路ネットワーク上での行動だけなら比較的対応が簡単であるが、複数の交通手段から構成される高密度な交通ネットワーク上での経路の特定には多くの課題が残されている。

②従来型行動調査手法と移動体による観測との融合

先に述べたように、新しい機器による行動の追跡だけで経路選択をはじめとする交通行動の全体が把握できるわけではない。従来型の行動調査手法と組合せることにより、より精度の高い行動データが収集できると考えられる。移動体通信によるデータ収集方法自体の検討が始まられたばかりの現段階では、従来型の調査との適切な組み合わせを議論するのは早いけれども、様々な利用形態を意識した多方面からの検討が必要であることは確かであろう。

③経路選択モデル検証のためのデータ収集

経路選択モデルの妥当性を実ネットワーク上で検証するには、検証用のデータセットが必要であることはいうまでもない。第3章(2)で述べた単純な経路選択モデルさえ、必ずしも実データによる十分な検証がなされてきたとは言えない。ネットワークのトポロジーや混雑レベルなど経路選択に及ぼす要因の値が異なる条件でデータを収集することにより、経路選択モデルの検証を進めることが必要である。また、第3章(4)で紹介した限定合理性に基づく新しい経路選択モデルは、経路の認知や選別など直接的に観測することが必ずしも容易でないプロセスを内包している。実空間でのモデル検証のために観測すべき項目を明確にし、モデル構築に合わせてその観測手法を開発することが必要である。

一方、新しいデータ収集方式により高精度な行動データが得られたとして、それらを用いた新しい経路選択モデル開発を行っていく必要がある。関連する今後の課題を以下に整理して示そう。

①選択肢集合選別プロセスのモデル化

選択肢を所与のものとして与える既存のモデルでは、経路選択モデルのパラメータ推定、それに基づくネットワークへの Loading 結果にバイアスが発生する可能性がある。従来のモデルでは、存在経路集合から選択可能経路集合を選別するプロセスが必ずしも明示的であったとはいえない。選別プロセスに全ての選択肢属性を考慮する必要はなく、ネットワークトポロジーの認知とその学習といった観点から選別プロセスのモデル化を検討することが重要である。

②経路属性の認知メカニズムの解明

既存のモデルでは実所要時間の平均値を認識値として用いることが多い。しかし、認識と実際の所要時間は一致するとは限らない。また、ネットワーク利用者が右左折回数や所要時間の分散といった属性をどの程度認識しているかについて従来のモデルは明確な回答を用意していない。

情報獲得・参照は利用者の認知を更新させるものであり、これを研究する必要性が高い。また空間認知と記憶のメカニズムに焦点をあてた研究も必要になろう。空間の分節化、階層構造、異法性といった概念は、経路選択の際のネットワークの認知に大きな影響を及ぼす⁵²⁾。メンタルマップの研究などは個人の描画能力と認知能力を分離できないという問題があるにしても、ネットワークの認知と形成に関して有効な知見が得られる可能性はあるだろう。その際、歩行者交通の経路探索に関する多くの既往研究(たとえば、Bovy & Stern⁴¹⁾、渡邊・森⁵³⁾、松下・岡崎⁵⁴⁾を参照することも有効であると考えられる。

③多様な経路選択ルールの比較検討

経路選択に影響を及ぼす属性間に加法性が成立することが既存の経路選択モデルの前提であった。しかし、この仮説は必ずしも検証されているわけではない。リンク単位に分解できない属性の取扱いも難しい。現象を忠実に記述することに焦点を当てると、ネットワーク利用者の経路選択ルールには期待効用最大化以外にも多様なルールが存在するであろう。それを検討する際、満足度、準拠点などの概念は重要であろう。ルールが適用されるべき範囲やその組み合わせについても実証的なデータに基づいて検討されるべきであろう。

鉄道や道路といったネットワークの属性、あるいは状況に依存した経路選択ルールを検討することも重要な課題である。たとえば、一部の有料道路の料金や鉄道運賃に見られるように、経路コストは常にリンクコストの和で表現できるとは限らない。EBA を組み込んだ経路探索アルゴリズムは、距離比例制でも均一料金でもない経路に固有の料金体系を持つような交通ネットワークにもシステムティックに適用できる可能性を持っており、今後の展開が期待される。

④学習プロセス

従来の研究で提案されている経路選択行動の学習のモデルでは、学習ルールは機械的であるといえる。ネットワーク利用者が意識する経路選択ルールそのものが学習過程において変化、選択される可能性もある。この点を明示的に取り扱った研究が必要であろう。

以上の議論は、経路選別／選択ルールを単に複雑にすることを意味しない。経路選択行動の記述だけが目標であれば問題がない場合でも、ネットワークのハンドリングが困難であったり、ネットワークフローモデルへの組み込みがほとんど不可能なほど複雑なルールは、交通工学的な意味での有用性が低いと考えられるからである。フローモデルとし

ての解析可能性を考慮しつつ、より現実的な経路選択行動のモデル化が待たれているといえよう。そのことを念頭においていた新しいデータ収集方法の開発と、経路選択モデルの研究が待たれている。

参考文献

- 1) 松井寛(編著): 交通ネットワークの均衡分析ー最新の理論と解法ー土木学会,1998.
- 2) Patriksson, M. : *The Traffic Assignment Problem; Models and Methods*. VSP Utrecht, The Netherlands,1994.
- 3) Yang, H. : Multiple Equilibrium Behaviours and Advanced Traveller Information Systems with Endogenous Market Penetration: *Transpn. Res. B*, Vol.32, No.3, pp.205-218,1998.
- 4) Bovy, P.H.L. and Stern, E. : *Route Choice- Wayfinding in Transport Networks*, Kluwer Academic Publishers. Netherlands., pp.160-169,1990.
- 5) 伊藤融, 池之上慶一郎, 安井和彦:都市内トリップにおける経路選択行動のモデル化について, 土木計画学研究・論文集, No.12,pp.485-491,1995.
- 6) 小山周一, 久保田尚, 岩崎伸昭, 高橋伸夫, 杉浦孝臣:情報をコントロールされた自動車運転者の Way Finding 機構に関する実験的研究, 土木計画学研究・論文集, No.13,pp.603-612,1996.
- 7) Garling, T., Laitila, T. and Westin, K. : *Theoretical Foundations of Travel Choice Modeling*. Pergamon Press, Amsterdam, 1998.
- 8) 森川高行: 個人選択モデルの新展開と再構築, 土木計画学研究・論文集, No.12, pp.15-27,1995.
- 9) 小林潔司: 知識社会における交通行動:課題と展望, 土木計画学研究・論文集, No.12, pp.1-13,1995.
- 10) Ettema, D., Timmermans, H. and Veghel, L.V. : Effects of Data Collection Methods in Travel and Activity Research. *For European Institute of Retailing and Services Studies* , <http://www.fhwa.dot.gov/ohim/trb/reports.htm>, 1996.
- 11) Axhausen, K. : Can We Ever Obtain the Data We Would Like to Have ? in Garling, T. et al. (eds.) *Theoretical Foundations of Travel Choice Modeling*. Pergamon Press, pp.305-234, 1998.
- 12) Bonsall, P., Firmin, P., Anderson, M., Palmer, I. and Balmforth, P.: Validating the Results of a Route Choice Simulator , *Transportation Research C*., Vol.5, No.6, pp.371-387, 1997.
- 13) Stopher, P.R.: Measurement, Models and Methods: Recent Applicatins, in Stopher P. and Lee-Gosselin M. (eds.) *Understanding Travel Behaviour in an Era of Change*. Pergamon Press, pp.413-435,1997.
- 14) 羽藤英二,香月伸一,朝倉康夫,平井千智: 交通情報提供下の経路選択行動データの収集方法に関する一考察,第 18 回交通工学研究発表会論文報告集,pp.1-4, 1998.
- 15) LOCUS: Location Information Services by Portable Phone Networks. <http://www.locus.ne.jp/regular/e/locus2.system.htm>, 1999.
- 16) 高橋克己,三浦信幸,大坪理恵,島健一:モバイル環境における消費行動の支援, 第6回マルチエージェントと協調計算ワークショップ(MACC'97). 1997.
- 17) Martin, P. and Bateson, P. : *Measuring Behaviour: an introductory guide*. Cambridge University Press, Cambridge.(柏谷英一・近雅博・細馬宏通(訳)行動研究入門, 東海大学出版会), 1985.
- 18) 佐佐木綱,松井寛: 会場内の観客流动モデル,土木学会論文集. 第 159 号, pp.90-95, 1968.
- 19) 朝倉康夫,羽藤英二,宗貞孝太郎,真浦泰久: 実道路網上でのドライバーの経路選択・変更行動に関する実証分析,第 18 回交通工学研究発表会論文報告集,pp.9-12, 1998.
- 20) Asakura, Y., Aizawa, T., Ohkubo, T. and Tanabe, J.: Verification of OD Matrix Estimation Model Using AVI Data on the Han-Shin Expressway Network, *Proc. 5th ITS World Congress in Seoul (CD-ROM)*, 8 pages, 1998.
- 21) 桑原雅夫,麦倉武志,新倉聰,織田利彦: ピーコン情報によるOD 交通量推計に関する研究,交通工学, Vol.33 ,No.4, pp.15-21, 1998.
- 22) Andre, M.: Vehicle Uses and Operating Conditions: On-Board Measurement. In Stopher, M. and Lee-Gosselin, M. (eds.) *Understanding Travel Behaviour in an Era of Change*, pp.469-481, 1997.
- 23) Zitto, R., D'Este, G. and Taylor, P. : Global Positioning Systems in the Time Domain: How Useful a Tool for Intelligent Vehicle-Highway Systems ? *Transportation Research C*. Vol.3, No.4, pp.193-209, 1995.
- 24) Sermons, M.W. and Koppelman, S. : Use of Vehicle Positioning Data for Arterial Incident Detection, *Transportation Research C*. Vol.4, No.2, pp.87-96, 1996.
- 25) Quiroga, C.A. and Bullock, D. : Travel Time Studies with Global Positioning and Geographic Information Systems: an Integrated Methodology, *Transpn. Res. C*, pp.101-127, 1998.
- 26) Battelle Transportation Division: Lexington Area Travel Data Collection Test: Global Positioning Systems for Personal Travel Surveys, Final Report to FHWA (Federal Highway Administration). <http://www.fhwa.dot.gov/ohim/trb/reports.htm> 1997.
- 27) 大森宣暁,室町泰徳,原田昇,太田勝敏: 交通行動調査へのGPS の適用可能性に関する研究,第 18 回交通工学研究発表会論文報告集,pp.5-8, 1998.
- 28) Ovum Ltd. : *Ovum Forecasts – Global Mobile Markets*. 1998.
- 29) Federal Communication Committee: FCC Adopts Rules to Implement Enhanced 911 for Wireless Services, *NEWSReport No.DC96-52*, 1996.
- 30) SnapTrack: An Introduction to SnapTrack Server-Aided GPS Technology. <http://www.snaptrack.com/>, 1999.
- 31) Asakura, Y., Hato, E., Nishibe, Y., Daito, T., Tanabe, J. and

- Koshima, H.: Monitoring Travel Behaviour using PHS Based Location Positioning Service System, 6th ITS World Congress in Tronto, in CD-ROM, 1999.
- 32)高橋厚年,羽藤英二,朝倉康夫: 移動体通信システムによる交通行動データ特性に関する基礎的分析,土木計画学研究講演集, No.22(2), pp.187-190,1999.
- 33) 羽藤英二,朝倉康夫,喜村裕二: 移動体通信システムを用いた大規模イベント時の交通行動分析,土木計画学研究講演集, No.22(1), pp.409-412, 1999.
- 34) 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.653/IV-48,pp.95-104,2000.
- 35) 建設省建築研究所・(財)計量計画研究所: 都市交通調査の新たな実態調査手法の検討調査報告書, 1999.
- 36)赤松 隆: 確率的利用者均衡モデルの解法, 交通ネットワーク の均衡分析(第9章), 土木学会, 1998.
- 37)Dial, R.B.: A Probabilistic Multipath Traffic Assignment Algorithm which Obviates Path Enumeration, Transpn. Res., Vol.5, pp.83-111, 1971.
- 38) Daganzo, C. and Sheffi, Y.: On Stochastic Models of Traffic Assignment, Transpn. Sci., Vol.11, pp.253-274, 1977.
- 39)屋井鉄雄,中川隆広,石塚順一: シミュレーション法による構造化 プロビットモデルの推定特性,土木学会論文集, No.604/IV-41, pp.11-21, 1998.
- 40)Mirchandani, P. and Soroush, H.: Generalized Traffic Equilibrium with Probabilistic Travel Times and Perceptions, Transportation Science, Vol.21, No.3, pp.133-152, 1987.
- 41)小林潔司, 太田勝久, 都明植: 不完全情報下における状況依存的混雑料金に関する理論的研究,土木学会論文集, No.611/ IV-42, pp.57-68 1999.
- 42)Simon, H. A. : Bounded Rationality, J.Eatwell et al. (eds.), The New Pargrave: Utility and Probability, W. W. Norton & Company, 1987.
- 43) Ben-Akiva, M., Bergman, M.J., Daly, A.J. and Ramasway, R. : Modeling inter-urban route choice behaviour. Volmuller, J. and Hamerslag, R. (eds.) Proc. 9th ISTTT in Delft., VNU Science Press, The Netherlands, pp.299-330, 1984.
- 44) Clark, W. A. V. and Smith, T. R. : Production system models of residual search behavior: a comparison of behavior in computer-simulated and real-world environments, Environment and Planning A, Vol.17, No.4, pp.555-568, 1985.
- 45) Tversky, A. : Elimination by Aspects: a theory of choice. Psychological Review 79, pp.281-299, 1972.
- 46)中山和男, 富山慶典:選択の数理～個人的選択と社会的選択～. 朝倉書店, pp.63-65, 1998.
- 47) Recker and Golob,T.: A non-compensatory model of transportation behaviour based on sequential consideration of attributes. Transpn. Res. 13B, pp.269-280, 1979.
- 48) D'Este, G. : Hybrid Route Choice Procedures in a Transport Network Context. Journal of the Eastern Asia Society for Transport Studies, Vol.2, No.3, pp.737-752, 1997.
- 49) 真浦靖久, 朝倉康夫, 羽藤英二, 宗貞孝太郎: 経路選択集合生成アルゴリズムの提案と松山市道路網での検証,土木計画学研究・講演集, No.22(2), pp.187-190, 1999.
- 50) 大草裕二郎, 朝倉康夫, 羽藤英二 : Screening 法による観光周遊ルート集合の抽出,土木計画学研究・講演集, No.22(1), pp.397-400, 1999.
- 51) Kahneman, D. A and Tversky, A. : Rational Choice and Framing of Decisions, Rational Choice, The University of Chicago Press, pp.67-94, 1987.
- 52) 松井孝雄: 空間の意味と記憶表象, 哲学(三田出版会), No.95, pp.153, 1993.
- 53) 松下聰, 岡崎甚幸: 巨大迷路における歩行実験による探索歩行の研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 428 号, pp.93 -100, 1991.
- 54) 渡邊昭彦, 森一彦: 経路選択モデル. (建築・都市計画のためのモデル分析の手法, 日本建築学会(編))pp.71-84, 1992.

(1999.11.8 受付)

ROUTE CHOICE BEHAVIOUR IN A TRANSPORT NETWORK: OBSERVATION AND THEORY

Yasuo ASAKURA and Eiji HATO

This paper aims to discuss the relations of monitoring and modelling methods of trip maker's route choice behaviour in a transport network, and to show possible directions of model development of route choice. Previous monitoring methods based on questionnaire are not sufficient for detailed analysis of travel behaviour in space/time dimensions. A new observation method using mobile communication system is possible to trace the movement of individual route choice behaviour. The results of behavioural analysis using detailed route choice data could be applied for improving route choice models employed in network flow models such as User Equilibrium.