

特集論文
SPECIAL TOPIC

特集論文(交通需要の動的分析) 交通需要の動学的分析の諸相と今後の展望

松井 寛*

本論文は交通分野における需要分析と行動分析について、近年成果をあげつつある動的モデルについて概観するとともに、本特集論文の位置づけについて述べる。動的モデルの研究を対象とする事象によって分類するならば、出発時刻決定問題、動的交通量配分モデル、学習調整プロセスのシミュレーションモデル、マクロ交通流モデル、動的交通行動分析、時間帯別交通需要予測モデル等に分けることができ、合わせてこれら研究分野での今後の研究課題を展望する。

Key Words : a review, dynamic travel demand, dynamic travel behaviour

1. はじめに

近年交通需要や交通行動を時間軸上で把えようとするいわゆる動的分析が多く見られるようになった。一般に動的というのは時々刻々と変動する状態をいい、従来の静的分析が、状態としての交通現象や交通行動を一時点の横断データ (cross-sectional data) を用いて表現しようとするのに対し、動的分析はこれら交通現象や交通行動の変化に注目して、これをたとえば微分方程式や差分方程式を用いて表現しようとするものである。したがって動的分析においては、経時的な縦断データ (longitudinal data) が必要となる。さらに、動的現象や行動は多くの要因の相互作用として特徴づけられるのが一般的であり、したがって多変数系のシステムを構成する。この多変数系と時間的変動の構造こそが動的モデルの特徴といえる。

本論文は交通分野に限定した需要分析と行動分析において、本特集論文をはじめ近年成果をあげつつある動的モデルについて概観するとともに、今後の研究の課題や展望について述べることを目的としている。ただし、一般に動的モデルといってもその範囲は相当に広いので、本稿では最近の時事的な研究を中心とし、たとえばかなり以前から取り組まれてきた時系列モデルやトラフィックシミュレーション等については対象外とする。

2. 動的分析研究の背景とその内容

一般に動的モデルと呼ばれるものは、従来からたとえば前述の時系列モデルやトラフィックシミュレーションモデルのほか、マクロ計量経済モデルやシステムダイナミクス等の分野で古くから取り扱われてきた。しかしながら、Pas (1990) が動的分析の時代 (The Dynamic

Analysis Era) の到来と呼んだように、とくに1980年以後交通需要分析や交通行動分析の分野で、動的分析の研究が目立つようになってきた。この背景として次の諸点が指摘できよう。

① 将来の交通需要予測がハードな交通計画立案のためだけでなく、ソフトな交通管理計画等にも活用したいという社会的要請が強まってきた。とくに都市圏にみられる交通混雑問題は依然として大きな社会問題であり、その対策として各種交通管理計画、フレックスタイムや時差出勤、カープール制の導入などの社会システムの改善等が検討されるようになり、そのための導入効果分析が急務となってきている。しかしながら、混雑・渋滞下にある交通需要や交通流は本質的に非正常であり、渋滞の形成、成長、消滅のメカニズムを表現するには動的アプローチが不可欠である。

② さらに近年のコンピュータ、情報通信網、車両検知技術等の進歩により、交通をリアルタイムで処理することが現実的に可能な時代となってきたため、エレクトロニクスの最新技術を応用した高度な交通管理システムが開発されるようになってきた。たとえば路車間通信を利用した経路誘導システム、旅行時間や混雑状況の情報提供システムなど来たるべき高度情報化社会に対応した新システムが実用化されつつある。したがって、これら新しいシステムの基礎情報として、時間変動する交通需要をリアルタイムで把える必要性が出てきている。

③ 人間行動をよりきめ細かく分析するという立場から、交通を含めた人間行動を人間活動との関連から時空間上で把えようとするアクティビティ分析 (activity-based analysis) や、複数時点の行動分析に基づいたパネル分析 (panel analysis) などの新しい分析手法が試みられるようになった。また、これらの分析を通して、人間行動にみられる学習プロセス、習慣や慣れ、交通環境の変化に対する反応遅れや閾値の存在など、

*正会員 工博 名古屋工業大学教授 社会開発工学科
(〒466 名古屋市昭和区御器所町)

動的分析でしか明らかにできないようなミクロな分析に対しても関心が向けられるようになった。

④ 時々刻々と変化する状況の下で行われる交通行動を、一日の平均的な指標で説明することにはもともと限界があり、またバイアスを生じる原因ともなる。そういう意味で従来静的に扱われてきた問題を改めて動的に扱うことによって、予測精度を改善する可能性がある。

さて、動的分析は、時間軸のディメンジョンのとり方によって、日々の日変動特性 (day-to-day dynamics)、1 日中の時間変動特性 (time-of-day dynamics)、および 1 時間未満の短時間変動特性 (real-time dynamics) を扱うものの 3 つに分けることができる。このうち最後の短時間変動特性は主に不規則変動に支配されることから、時系列モデルによる取り扱いが中心となる。たとえば自己回帰モデル、自己回帰移動平均モデル、カルマンフィルター理論などが従来から適用されてきた。本稿では主に前二者の変動特性についての研究を対象とする。

一方近年の動的分析研究を、対象とする事象によって分類するならば、出発時刻決定問題 (出発時刻決定、出発時刻・経路同時選択)、動的交通量配分モデル (動的システム最適化配分、動的利用者均衡配分)、学習調整プロセスのシミュレーションモデル、マクロ交通流モデル、動的交通行動分析、時間帯別交通需要予測モデル等に分けることができる。本特集論文のうち、角論文 (1993) は出発時刻決定問題に分類され、また井上論文 (1993) は動的交通量配分に、飯田論文 (1993) は学習調整プロセスのシミュレーションモデルに、河上論文 (1993) は動的交通行動分析に、松井論文 (1993) は時間帯別交通需要予測モデルにそれぞれ分類される内容である。以下これらについて概観してみたい。

3. 出発時刻決定問題

(1) 出発時刻決定モデル

出発時刻決定問題は動的分析の中でも比較的早くから取り組まれてきた分野である。初期の研究としては Gaver (1968)、Vickrey (1969)、Hurdle (1974) の例があるが、その基本的な考えとなる旅行時間とスケジュール遅れ (希望到着時間と実際の到着時間の差) との間のトレードオフ関係を最初に示唆した論文は、おそらく Kraft/Wohl (1967) の研究であろう。その後多くの研究者によって出発時刻決定問題が研究されるようになった。1985 年以前の研究のレビューについては Alfa (1986) の論文に詳しい。

a) 確定的アプローチ

確定的アプローチからの出発時刻決定問題は Henderson (1977)、Hendrickson ら (1981a, 1981b)、Fargier (1981) の研究が代表的である。出発時刻決定問題の基本型は、1 つのボトルネックをもつ 1 OD 単一経路上の

希望到着時刻をもつ通勤者が対象とされ、Hendrickson ら (1981a) はこの出発時刻決定問題を最も一般的な形で定式化した。すなわちボトルネックでの遅れ時間と希望到着時間に対する到着余裕時間および遅刻時のペナルティから成る線形コスト関数を定式化し、これを最小化する出発時刻を決定している。また Hendrickson ら (1981b) はピッツバーグで得られた調査データを用いて、コスト関数のパラメータを実際に求めている。またコスト関数として線形のほかにいくつかのパリエーションを提案し、さらにスケジュール遅れが単に出発時刻のみならず、交通モードや経路選択にも影響を与えることを指摘した。Henderson の研究では到着時刻遅れのペナルティは無視されており、一方 Hurdle は逆に遅れて到着することを認めないモデルとなっている。一方 Fargier は職場への出発時刻決定問題に加えて、職場からの帰宅トリップについても同様な定式化を行っている (この場合は希望出発時刻が与えられる)。

自宅から職場への 1 OD 単一経路の出発時刻決定問題の一般的な均衡解の存在の証明は、ペナルティ関数が凸で微分可能である条件のもとで Smith (1984a) によって行われ、さらに均衡解の唯一性については Daganzo (1985) によって証明された。また職場から自宅への帰宅トリップの出発時刻決定問題については Fargier によって均衡解の存在と唯一性が証明されている。以上の確定的アプローチによる出発時刻決定問題は、経路の旅行時間の不確実性や個人の知覚差を全く無視しているところに非現実性がみられる。ただ個人差に関しては、Newell (1987) によって異なるコストパラメータを持つ数種のグループからなる通勤者の出発時刻決定問題が研究されている。

b) 確率的アプローチ

確率的利用者均衡に基づいた出発時刻決定問題は、旅行時間に対する不確実性と通勤者の知覚差を考慮して、より現実的な解を求めようとするもので、ボトルネックの待ち時間や経路上の旅行時間を確率変数と仮定するところに特徴がある。この種の研究例としては初期のものとして Cosslett (1977) の研究があり、その後 Alfa/Minh (1979)、de Palma ら (1983) によって研究が進められた。問題は時間的に不均質な確率待ち行列問題をいかに解くかということであるが、Alfa/Minh はマルコフ連鎖の考えを導入し、出発時刻変更による旅行コストの節約額で表現された出発時刻変更確率を用いて、定常解としての出発時刻分布を求めている。一方 de Palma ら (1983) は、Hendrickson らが提案したような出発時刻に依存した関数 (ただしコスト関数ではなく効用関数) を用い、連続型ロジットモデルを利用した出発時刻分布を求めている。

現実の道路では道路の交通状態は日々変動しており、

したがって通勤者は毎日同じ時間に出発しているわけではない。そこで Ben-Akiva ら (1984) は日単位 (day-to-day) の変動特性を記述するための微分方程式型で与えられる動的シミュレーションモデルを提案した。ただし出発時刻変更確率には de Palma らが提案した連続型ロジットモデルを採用している。Ben-Akiva らはこれをボトルネックの容量変化や仕事開始時刻変化による交通流への影響分析に適用している。ただこの動的シミュレーションモデルでは通勤者の選択行動を効用とは別の外生的な修正係数を用いて行っているため、学習効果が反映されたものとはなっていない。Alfa/Minh および de Palma ら (1983) の研究は解の存在や唯一性を証明していないが計算例からは1つの解に収束していくことを明らかにしている。

一方松本・角ら (1983) は旅行時間の変動が正規分布に従うと仮定し、遅刻確率と出発から到着指定時刻までの旅行時間とのトレードオフを考慮し、その消費コストの和を最小とする出発時刻を確率的に求める方法を提案している。ただ、この研究では所要時間分布を独立に与えているので、出発時刻によって所要時間分布が変化する場合には適用できない。したがって、角ら (1984) はこのモデルを公共交通利用通勤者に適用している。さらに角ら (1986) は経験頻度によってグループ分けした集団ごとに所要時間分布を与えることによって、個人差を考慮した空港アクセス交通行動の分析を行っている。また角ら (1992) は渋滞に伴う走行速度の低下の関数である非効用と実質消費時間の和を最小化することによって、出発時刻を決定する方法も提案している。

(2) 出発時刻・経路同時選択問題

1 OD 単一経路に限定された前述の出発時刻決定問題は、当然その適用が限定されるため、その後一般的なネットワークに適用できるようモデルの拡張が試みられた。その第1段階が1 OD 複数経路の出発時刻と利用経路の同時選択問題であり、初期の研究例として Hurdle (1974), Alfa (1981), Mahmassani/Herman (1984) らの研究がある。Hurdle (1974) は1 OD 2 経路の同時選択問題を取り上げた最初の研究であり、これを利用者均衡に基づいて解いている。一方 Alfa (1981) は確率的アプローチから1 OD 複数経路の同時選択問題を定式化した。このモデルでは各経路の所要時間は所与の確率分布で与えられ、また同時選択の調整プロセスをマルコフ連鎖を用いて表現している。Mahmassani/Herman (1984) のモデルは Hendrickson が提案した出発時刻決定モデルを同時選択問題に拡張したものである。ただし旅行時間の計算には Hendrickson のモデルと違って、線形の Q-V 曲線を利用し、一般的な道路網への対応が可能な形となっている。さらに Ben-Akiva/de Palma ら (1986) は需要変動型の出発時刻・経路同時選択問題

を3レベルのネステッドロジットモデルによって表現し、さらに日単位変動における選択調整プロセスを表現するため差分方程式で与えられる動的シミュレーションモデルを定式化した。これは先の Ben-Akiva ら (1984) のモデルを同時選択問題に拡張した形となっている。またこの研究の中で効用関数の中に通行料金を組み込むことによって混雑緩和からみた料金政策や、カープール専用車線導入の効果分析を行っている。

Arnott/de Palma ら (1990) も1 OD 複数経路を対象とした同時選択問題を取り上げ、その応用例として料金政策の効果分析を行っている。一方 Sumi/Matsumoto ら (1990) は従来の彼らが出発時刻決定モデルを同時選択問題に拡張し、公共交通の運行サービスの変化に伴う通勤者の応答について分析している。さらに本特集論文において角ら (1993) は、従来の著者ら (1992) の提案モデルを自動車通勤交通の動的経路配分に応用したものである。すなわち出発時刻変更に伴うコストを仮想リンクで表現した時間軸方向へのバイパスネットワークを考えることによって、静的配分計画によって擬似的に動的配分が行えることを示している。また Hendrickson/Plank (1984) はロジットモデルを用いた出発時刻と交通モード (公共交通と自動車) の同時選択問題を取り上げている。

出発時刻・経路同時選択問題に対する上記の研究の多くは1 OD 複数経路に限られており、またその経路も並列経路が前提となっている。このように一般ネットワークに適用できるようなモデルの開発が遅れている最大の理由は、この問題が時間軸を含む3次元空間での最短距離探索問題となることで数値的困難さを増すためである。いまのところ、簡単なネットワークについて特殊な求解アルゴリズムで解いた de Palma ら (1990) が一般ネットワークを対象とする唯一の研究例である。

このような状況の中で Alfa (1989) は一般ネットワークを対象とした同時選択問題をヒューリスティックなアプローチで解く方法を提案している。また飯田ら (1991) は Ben-Akiva ら (1986) のモデルと有効旅行時間を組み込んだシミュレーションモデルを提案している。一方 Vythoukas (1990) は同時選択問題について2つのモデルを提案したが、その1つは旅行時間を予測するためのマクロ交通流モデルと、de Palma (1983) と同様なネステッドロジット型の同時選択確率を組み合わせたシミュレーションモデルであり、他の1つは Sheffi ら (1982) による確率均衡配分モデルを動的モデルに拡張したモデルである。とくに後者はいまのところ一般ネットワークを対象とする唯一の数理計画的モデルであり、解の唯一性が証明されている。Vythoukas のモデルは出発時刻選択問題と動的交通量配分問題の統合を図った最初の成果として注目される。

4. 動的交通量配分問題

(1) 動的交通量配分研究の経緯とその内容

動的交通量配分とは時々刻々と変動する時間的にも空間的にも非定常なネットワーク交通流を時間を追って表現する方法をいい、とくに渋滞や待ち行列を含む交通流の記述には欠かせない。動的交通量配分が従来の静的交通量配分と形式上最も異なる点は、従来の静的配分が交通量を状態変数にとるのに対し、動的配分は交通密度(ないしは存在台数、待ち行列台数)を状態変数にとる点である。したがって静的配分の場合、リンクパフォーマンス関数として定常的な $Q-V$ 曲線(または所要時間関数)が用いられるのに対し、動的配分の場合は、交通流における保存則を与える連続方程式が用いられる点異なる。

動的交通量配分問題は最初従来の静的配分モデルを基本にしながら時間的に変動する需要交通量に対しても適用できるように工夫することから始められた。佐佐木・松井(1965)はネットワーク交通流を連続吸収マルコフ過程で表現した動的モデルを提案したが、これは佐佐木(1965)が提案したモデルを動的に拡張したものである。このモデルは状態方程式が交通流の連続方程式に基づいているという点で最近の動的交通量配分研究の先駆をなすものといえる。しかしこのモデルは交差点での分岐確率のみで道路網上の交通流を表現しようとするものであるから、その応用はきわめて限定される。

その後 Chu/Gazis (1974) は待ち行列を状態変数とする状態方程式を導入し、1 OD 多経路の動的配分問題を取り上げ、システム最適化と利用者均衡の両配分を解析的に解いており、次いで Chu (1977) はやはり待ち行列を状態変数にとり、走行速度一定の下でシステム最適化に基づく 1 OD のネットワーク問題を取り上げ、これを最適制御理論によって解いている。Gazis (1974) は Chu と同様の問題を変数の離散化によって LP 問題として解く方法を提案し、さらに Dáns/Gazis (1976) によって多 OD への拡張がなされた。

その後多くの研究者によって動的交通量配分問題が取り組まれてきたが、いまこれらを大別すると、動的システム最適化配分と動的利用者均衡配分(確率均衡を含む)に分類できる。また定式化のアプローチによって分類すると、シミュレーション的アプローチ、数理計画的アプローチ、および最適制御理論的アプローチに分けることができる。

(2) 動的システム最適化配分

動的システム最適化配分を最も一般的な形で定式化したのは Merchant/Nemhauser (1978) によるモデル(以下 M-N モデルと呼ぶ)が最初である。このモデルは道路区間の存在台数を状態変数にとり、離散型、非線形、

非凸形数理計画問題として定式化し、これを区分線形化によって LP 問題として解く方法を提案した。Carey (1987) はさらに M-N モデルをより精練された非線形凸形計画問題として再定式化し、その Kuhn-Tucker 条件が最適解の必要十分条件を与えることを証明した。凸問題としての定式化によって凸形計画法の一般的解法が適用できるようになった。しかしながら M-N モデルは依然として single-destination の問題に限定されていた。

最適制御理論的アプローチからの研究は松井(1983a)による研究がある。ただしここでは 1 OD のネットワークでの定式化が行われている。Wie (1989) は多 OD のネットワークを対象にした定式化を行った。問題は Pontryagin の最大原理問題となり一般化 Legendre-Clebsch 条件によって解の必要十分条件が与えられる。また Ran ら(1989) は Wie と同様の問題を離散型最大原理によって定式化し、その解法を示した。

以上のとおり動的システム最適化配分問題は最適制御理論的アプローチによって多 OD のネットワーク流に拡張され、その最適性条件が与えられるようになった。動的システム最適化問題としては交通量配分問題よりも最適制御問題としての応用が考えられる。たとえば Papageorgiou (1980) や松井・佐藤(1982) らは高速道路の動的流入制御問題の研究を行った。

(3) 動的利用者均衡配分

Yagar (1971) は渋滞による待ち行列を含むネットワーク流を求めるためのヒューリスティックな求解アルゴリズムを開発している。これは利用者均衡に基づく動的配分解を求めようとする最初の試みである。一方 Robillard (1974) は時間変動する需要交通量を対象とする確率配分モデルを提案している。しかしこれらはいずれも基本的には静的配分を繰り返す方法によっている。その後渋滞や待ち行列を含むネットワーク流を対象にした多くのシミュレーションモデルが開発され実用化されている。比較的知られたものとして英国の TRRL が開発した CONTRAM (Leonord ら, 1978) がある。これら実用的なシミュレーションモデルのレビューについては Van Aerde/Yagar ら(1987) や Chrisoulakis (1991) に詳しい。最近で本特集論文において、井上(1993)が道路網上の交通流を時間を追って精緻に予測できるマイクロシミュレーションモデルを提案している。このモデルは車一台一台を記述するマイクロシミュレーションである特徴に加え、経路選択を内生化することによって、一般的な道路網上での交通流の経時的記述を可能としている。動的利用者均衡配分問題の定式化に関しての理論的研究例は少ない。いまのところ松井(1983a, 1987), Wie ら(1990), Janson (1991) らの研究がみられる程度である。このように動的システム最適化配分に比べて

研究が遅れた理由は、目的関数の決め方の困難さにある。ところで動的利用者均衡の定義については次のように2通りの定義が可能である。

定義1 (即時的利用者均衡)

すべてのODについて、任意の時点での経路の現在旅行コスト (current travel cost) に対して常に利用者均衡が成立する。

定義2 (予測的利用者均衡)

すべてのODについて、任意の時点に出発した車が目的地に到着するまでの経路の予測旅行コスト (predictive travel cost) に対して常に利用者均衡が成立する。

当然のことながら定常状態においては上記の2つの定義に基づく均衡解は一致する。Papageorgiou (1990) は定義1に比べて定義2に基づく動的利用者均衡の定式化が困難と述べているが、定義1による旅行コストは実際にドライバーが経験する旅行コストと異なるので、実際の交通問題への適用を考えると、むしろ実際の旅行コストに対応した定義2に基づく利用者均衡が好ましい。しかしいまのところ定義2に基づく動的利用者均衡を扱った研究は松井(1983a, 1987)のみである。松井(1987)は予測的利用者均衡原則に基づいた多ODの配分問題を最適制御理論を援用して定式化し、これを離散型最大原理問題として解いている。また松井・丹羽(1986)はこのモデルを経路誘導問題に適用している。しかしながら、いまのところ解の最適性条件については十分に証明されていない。なおこの点に関しては桑原(1990)が1OD2経路の簡単なネットワーク流を例にあげながら、予測的利用者均衡問題の解の唯一性を証明することの困難さについて報告している。

一方、Wieら(1990)とJanson(1991)の研究は定義1に基づいた動的利用者均衡問題を扱っている。Wieら(1990)は最適制御理論的アプローチから問題を定式化し、その最適性条件をPontryaginの最大原理に基づいて証明している。またこの動的配分問題の定常解が従来の静的利用者均衡解に一致することを明らかにした。一方Janson(1991)も同様な問題を同様な方式で定式化したが、Wieモデルとの違いは、Wieモデルでは変数としてリンクフローがとられているのに対し、Jansonモデルでは変数としてパスフローがとられ、かつ変数が離散化されている点である。Jansonモデルは非線形非凸形問題となるが、その求解に対しヒューリスティックな計算アルゴリズムを提案している。

いずれにしても動的利用者均衡配分問題の目的関数は静的な利用者均衡配分問題の目的関数がそうであったように、具体的な意味を持つものとなっていない。

一方動的確率均衡配分問題については、Sheffiら(1982)の確率均衡配分理論を動的化したVythoulkas

(1990)の研究が現在のところ唯一である。このモデルは出発時刻決定を含む一般的なモデルとして定式化されている(3.(2)節参照)。

5. 学習調整プロセスのシミュレーションモデル

利用者均衡が成立するための条件として、利用者が完全な情報を得ていることと、すべての利用者が同一の評価基準のもとで行動するという前提が成立しなければならないが、現実にはこれらの前提が成立しているとは言い難い。むしろ人々は日常の交通行動において過去の経験から学習し、他人の行動から情報を得ながら自己の交通行動を逐次調整しているのが現実の姿であろう。このような学習に基づいた交通行動の調整メカニズムをシミュレーションで表現しようとする研究が最近見られるようになった。このシミュレーションモデルは基本的に交通行動を調整するためのルールを表現した学習調整モデルと、ネットワーク上の旅行時間を予測するためのマクロ交通流モデルとから構成されており、研究の多くは前者の学習調整モデルの開発に主眼を置いている。この種の先駆的研究はHorowitz(1984)による研究である。Horowitzは1OD2経路の単純なネットワークを対象に、交通流の確率均衡の定常性の解析において、学習調整ルールをモデル化した。彼は3タイプのモデルを提案しているが、これらはいずれも以前に経験した旅行コストによって次の知覚旅行コストが規定されるというものである。Mahmassani/Chang(1986a)は出発時刻決定問題に対しHorowitzと同様な学習調整ルールを用いた日単位変動を予測するシミュレーションモデルを提案している。これは希望到達時刻と実際の到着との差によって次の日の出発時刻を調整するものである。Chang/Mahmassani(1988)はさらに実際の通勤者から得た調整データをもとにパラメータの選定を行い、その結果、旅行時間の予測には直前の経験による旅行時間が決定的に影響するとを明らかにした。一方Mahmassani/Changら(1986b)は出発時刻や経路の選択において、その調整行動に閾値の存在を明らかにし、またその値は一定ではなく、過去の経験によって変化することを明らかにしている。同様な研究をIidaら(1992)が実験室内での被験者の選択アンケートの時系列データを用いて行っている。

このような一連の学習調整プロセスのシミュレーションモデルに対する素朴な疑問として、このような調整ルールを繰り返した結果、いわゆる利用者均衡解に収斂して行くかという点である。この点に関しては、前述の研究例はいずれも均衡解への収束性を保証していないし、永久に振動を繰り返すケースも見られる。その理由は各利用者が必ずしも常に最短経路を逐次選択するルー

ルになっていないからである。この点に関しては、Smith (1984 b) が利用者が常に自己の旅行時間を最小化する方向に経路選択変更を行うというルールを考えた場合、旅行時間関数が単調増加で微分可能、かつ容量制限式が付加されなければ、その学習調整プロセスの定常解が初期状態に無関係に均衡解になることを証明したことは重要である。

一方、Cascetta ら (1989, 1991) は確率配分に基づいた学習調整プロセスのシミュレーションモデルを提案し、その解が唯一の安定的な確率分布に収斂することを証明している。

学習調整プロセスのシミュレーションモデルの実際交通問題への応用としては、道路交通情報提供の効果分析が考えられる。Mahmassani ら (1991) は道路交通情報の提供によってドライバーの経路選択がどのように変化し、旅行時間がどの程度減少したかをシミュレーションによって分析している。また Ben-Akiva/de Palma ら (1991) は道路交通情報提供によるドライバーの交通行動決定プロセスの構築方法について論じている。また、本特集論文において飯田ら (1993) は、ドライバーの経路選択行動をパネル調査と実験分析を合わせ用いたアプローチによって、ドライバーの日々の選択行動を分析するとともに、交通情報提供下での経路選択の反応特性との関連性について分析を行っている。

6. マクロ交通流モデル

ネットワーク流を対象とする動的モデルに共通する問題は、時々刻々と変動するネットワーク流をいかに精度よく表現するかということである。そのために利用されるのが交通流モデルであって、その使用目的に応じて様々なモデルが提案されているが、一般には車一台一台の挙動をモデル化するミクロ交通流モデルと、交通流を流体として扱うマクロ交通流モデルに大別している。マクロ交通流モデルは交通流の基本式である交通流の保存則を表現するとともに、旅行時間の予測に欠かせないものである。したがってここでは簡単にマクロ交通流について触れておきたい。

最も一般的なマクロ交通流モデルは単純連続モデル (simple continuum model) である。これは流体の連続方程式 (交通流の保存則) と速度-密度曲線によって表現されている。これをさらに改良し渋滞の影響が上流側に遡上する様子をうまく表現できるように工夫された単純連続モデルの改良型が松井 (1983b), Michalopoulos (1986), Papageorgiou (1989) らによって提案されている。さらに交通流の速度変化を動的化した高次連続モデル (higher-order continuum model) がある。これには追従モデルから運動方程式を導いた Payne (1971) のモデルと、気体流に関する Boltzmann 方程式

から運動方程式を導いた Phillips (1979) のモデルなどが知られている。また、信号交差点等にみられる待ち行列の動的記述にはより簡単な IO モデル (input-output model) が利用される。これらマクロ交通流モデルの比較研究については Papageorgiou ら (1983), Derzko (1983), 山内泰次 (1985) などに詳しい。

7. 動的交通行動分析

交通行動分析とは個人レベルでの交通行動を対象とした分析をいい、具体的には2章で述べたアクティビティ分析やパネル分析がその代表例である。交通行動分析に関する研究は1970年代に始まり、従来の四段階推定法の欠点を補うものとして精力的に研究が進められてきたが、1980年代に入って交通行動の動的分析の必要性が次第に認識されるようになった。たとえば1988年オックスフォード大学で開催された Dynamic and Activity-Based Approaches to Travel Analysis に関する国際会議や、1989年京都で開催された Dynamic Travel Behaviour Analysis に関する国際会議では、動的交通行動分析が中心テーマとして取り上げられた。その概要については Goodwin/Kitamura (1990) や Kitamura (1989a) に詳しい。

交通行動分析手法の中でも動的分析にふさわしい手法としてパネル分析が知られている。パネル分析は同一個人についての複数時点における調査 (panel data) に基づく分析手法で、個人の意識や行動の変化を外的環境やライフサイクルとの関係から追跡できる。パネル分析は交通行動の変化を「刺激」に対する「反応」として捉えようとする分析である。したがって人間の交通行動にみられる学習効果、習慣や慣れ・惰性、外的環境の変化に対する反応遅れや閾値の存在、応答速度や応答の非対称性、ライフサイクルによる行動変化などの分析が可能になると期待されている。

現在のところパネルデータに基づいた動的分析例は、数年単位で現れる変化に対応した交通行動分析が比較的多い。たとえば、Golob (1990) は3年間にわたるパネルデータに基づいて、交通手段選択の行動変化を所得や車保有との関連性から、構造方程式によるモデル化を行っている。また Golob/Meurs (1987) は交通手段別の交通発生量の変化について、Kitamura/Hoorn (1987) は一週間における交通行動の規則性と非逆行性について、それぞれパネルデータを用いて分析している。このほか、ライフサイクルと車保有の関連性をパネルデータを用いて分析した Kitamura/Goulias (1989b) の研究もある。比較的短い時間のパネルデータを用いた研究例としては、時差出勤による通勤時間の変化構造を明らかにしようとした Giuliano/Golob (1990) の研究がある。

本特集論文における河上論文(1993)は、非集計交通行動モデルをベースに、交通手段選択行動における動的プロセスを考慮するため、利用者の時間価値の変化、利用交通手段による評価構造の異質性とその経時的な変化を考慮して、モデルの動学化を図っている。

8. 時間帯別交通需要予測

都市圏レベルでの交通需要の時間変動を把握しようとする研究に時間帯別交通需要予測手法がある。これは1日24時間中の時間単位(time-of-day)の需要変動を把握することを目的としている。とくにネットワーク流を時間帯別に把握しようとする時間帯別交通量配分モデルは、そのモデル構造が従来の静的な交通量配分手法に基づいているため、実用的で大規模ネットワークにも適用できるのに加え、前時間帯のネットワーク流残存量の、次の時間帯の交通量配分への影響が考慮されているという意味で動的特性を有しており、半動的配分モデルと呼ぶこともできる。

時間帯別交通量配分問題は、河上・溝上ら(1985)の先駆的研究に始まるが、その理論的構造を明確にしたのは藤田・松井ら(1988)である。この論文では隣接時間帯で交通量の保存則を成立させるための修正を、リンク交通量レベルで行うリンク修正法と、OD交通量レベルで行うOD修正法を提案したが、とくにOD修正法による問題は、需要変動型ネットワーク均衡問題として定式化できることを明らかにし、解の存在と唯一性を証明した。藤田ら(1989, 1990)はさらにリンク修正法が変分不等式条件で表れる利用者均衡配分問題として再定義できることを示し、さらに分割配分法を利用した時間帯別分割配分法を開発し、モデルの実用化を進めた。時間帯別交通量配分問題に関しては、このほか宮城ら(1991)や高橋・河上(1991)の研究例がある。また松井・藤田(1992)は通勤出発時刻選択に多項ロジットモデルを適用して、問題を出発時刻分布・交通量配分の同時決定モデルに拡張し、この問題がやはり需要変動型ネットワーク均衡問題として定式化できることを明らかにしている。また、本特集論文において松井・藤田(1993)は、上記の同時決定モデルをフレックスタイム導入下における出発時刻選択問題に適用し、その結果として道路交通混雑緩和効果と心理的ゆとり効果の計測に応用している。

一方時間帯別交通量配分モデルを解くには、その前段階としての時間帯別発生(集中)交通量や分布交通量の予測が必要となり、これらに関してはSupernak(1987)、松井・藤田ら(1991)らの研究がある。

欧米では交通行動の時間変動よりも日変動に関する関心が高く、たとえばHirshら(1986)は一週間の生活行動調査に基づいたアクティビティダイアリ分析(activity

diary analysis)に基づいて、一週間における買物行動モデルを効用最大化理論によって定式化し解いている。このような交通行動の曜日変動に関する研究例としては、ほかにHuff/Hansen(1990)、Pas(1988)、杉恵・芦沢(1990, 1991)などの研究がある。

9. 今後の展望

以上見てきたように、動的交通需要・交通行動分析に関する研究はこの十数年間精力的に進められてきたが、まだ理論、実用の両面で未解決の課題を多く残しており、いまだ開発途上の研究分野であるといえる。最後に、今後の動的分析の研究展望についての私見を述べてみたい。

① 出発時刻決定問題に関しては、一般的な多ODネットワークへのモデルの拡張とその実用的な解法の開発が急務である。Vythoulkas(1990)の確率均衡に基づく出発時刻・経路同時選択問題がいまのところ唯一の成功例であるが、注意すべきは、彼のモデルで扱われる旅行コスト(時間)は、4.(3)節で述べた定義1に基づく現在旅行コストである。したがって別の観点からの問題の定式化が可能と思われ、まだ研究の余地が残されている。また、人の選択行動が他人の選択行動に影響を与えること、渋滞を回避したいという点で人の選択行動が互いに競争的であることに注目すれば、Nash均衡(利用者均衡はその特殊解であるが)や、最悪の事態を回避したいという観点からMinmax均衡に基づく出発時刻決定問題などが新たに研究される価値のあるテーマである。いずれにしても、出発時刻決定問題は、いざい動的な交通量配分問題と統合された形で理論化されることが期待できる。

② 動的な交通量配分問題に関しては、この数年間の研究によって理論上の成果が著しいが、残された理論上の問題として、実際問題への適用面できとくに重要と思われる予測的利用者均衡原則に基づく動的配分問題の理論面での更なる解明が重要である。また、一般ネットワークを対象とした動的な交通量配分のより効率的な計算アルゴリズムの開発が、実際問題への適用にあたって重要である。

③ 学習調整プロセスのシミュレーションモデルに関しては、いわゆる学習調整モデルをいかに合理的に構築するかという点で、実際の観測データに基づいた実証面からの研究が今後必要となろう。また理論面では、日常的な通勤者を想定すれば、需要量自体や外的交通環境に変化がなければ、学習による試行の繰り返し、いずれいゆる利用者均衡状態に収束していくと考えるのが常識的であるから、Smith(1984b)が証明した均衡解に収束することが保証された学習調整モデルを構築することが今後必要と思われる。また一般的に学習調整モデルの収束性条件を解明することも今後の研究課題である。

- ④ 動的交通行動分析に関しては、まだ初期の研究段階にあるが、将来大いに発展する可能性のある研究分野であり、今後理論面、実証面での多角的な取り組みが必要である。とくにわが国においてはパネル調査がほとんど実施されていないためデータ上の制約が大きい。わが国におけるパネル調査データの整備が第一の課題である。
- ⑤ 時間帯別交通需要予測に関しては、都市圏レベルでの適用が可能で、しかも従来の四段階推定法で慣用された手法が利用できるという点で、最も実用的があり、もっと注目されてよい研究分野である。今後の課題としては、時間帯別四段階推定法とも呼ぶべき一貫した時間帯別予測手法を構築することが重要である。
- ⑥ その他、全般的に動的分析に関する研究は理論面で残された問題が多いこともあって、その実際問題への適用事例の研究が不十分である。適用可能性や適用範囲を広げる意味でも、実用面からの並行した研究が望まれる。

参考文献

- 1) Alfa, A.S. and Minh, D.L. : A stochastic model for the temporal distribution of travel demand-the peak hour problem, *Transpn. Sci.* Vol.13, 315~324, 1979.
- 2) Alfa, A.S. : A strategy for combined section of travel route and departure times from home during the peak period-a theoretical model, *Scientific management of transport systems.* 356~362, 1981.
- 3) Alfa, A.S. : A review of models for the temporal distribution of peak traffic demand, *Transpn. Res.* Vol.20B No.6, 491~499, 1986.
- 4) Alfa, A.S. : Departure rate and route assignment of commuter traffic during peak period, *Transpn. res.* Vol.23B No.5, 337~344, 1989.
- 5) Arnott, R., A. de Palma and R.Lindsey : Departure time and route choice for the morning commute, *Transpn. Res.* Vol.24B, 209~228, 1990.
- 6) Ben-Akiva, M., M.Cyna and A. de Palma : Dynamic model of peak period congestion, *Transpn. Res.* Vol.18B, No.4/5 339~355, 1984.
- 7) Ben-Akiva, M., A.de Palma and P.Kanaroglou : Dynamic model of peak period traffic congestion with elastic arrival rates, *Transpn. Sci.* Vol.20, No.2, 164~181, 1986.
- 8) Ben-Akiva, M., A.de Palma and I.Kaysi : Dynamic network models and driver information systems, *Transpn. Res.* Vol.25A, No.5, 251~266, 1991.
- 9) Carey, M. : Optimal time-varying flows on congested networks, *Operations Res.* Vol.35, No.1, 58~69, 1987.
- 10) Cascetta, E. : A stochastic process approach to the analysis of temporal dynamics in transportation networks, *Transpn. Res.* Vol.23B, 1~17, 1989.
- 11) Cascetta, E. and G.E.Cantarella : A day-to-day and within-day dynamic stochastic assignment model, *Transpn. Res.* Vol.25A, No.5, 277~291, 1991.
- 12) Chang, G.L. and H.S.Mahmassani : Travel time prediction and departure time adjustment behavior dynamics in a congested traffic system, *Transpn. Res.* Vol.22B, No.3 271~282, 1988.
- 13) Chrisoulakis, J. : Simulation programs, *Macroscopic-Traffic and Transpn. Systems*, Pergamon Press, 491~497, 1991.
- 14) Chu, K.C. and D.C.Gazis : Dynamic allocation of parallel congested traffic channels, *Proc. of the 6th Intern. Symp. on Transpn. and Traffic Theory*, Sydney 307~326, 1974.
- 15) Chu, K.C. : Decentralized real-time control of congested traffic networks, *Proc. of the 7th Intern. Symp. on Transpn. and Traffic Theory*, Kyoto, 471~490, 1977.
- 16) Cosslett, S. : Demand model estimation and validation urban travel demand forecasting project, University of California, Berkeley, 1977.
- 17) Dáns, G.C. and D.C.Gazis : Optimal control of oversaturated store-and-forward transportation networks *Transpn. Sci.* Vol.10, 1~19, 1976.
- 18) Daganzo, C.F. : The uniqueness of a time dependent equilibrium distribution of arrivals at a single bottleneck *Transpn. Sci.* Vol.19, No.1, 29~37, 1985.
- 19) de Palma, A., M.Ben-Akiva, C.Lefevre and N.Lilinas : Stochastic equilibrium model of peak period traffic congestion, *Transpn. Sci.* Vol.17, No.4, 430~453, 1983.
- 20) de Palma, A., P.Hansen and M.Labbé : Commuters paths with penalties for early or late arrival time, *Transpn. Sci.* Vol.24, No.4, 276~286, 1990.
- 21) Derzko, N.A., A.J.Ugge and E.R.Case : Evaluation of dynamic freeway flow model by using field data, *Transpn. Res. Rec.* 905, 52~60, 1983.
- 22) Fargier, P.H. : Effects of the choice of departure time on road traffic conditions. *Proc. of the 8th Intern. Symp. on Transpn. and Traffic Theory*, Toronto, 223~266, 1981.
- 23) 藤田素弘・松井寛・溝上章志 : 時間帯別交通量配分モデルの開発と実用化に関する研究, *土木学会論文集*, 第389号, IV-8 111~119, 1988.
- 24) 藤田素弘・山本幸司・松井寛 : 渋滞を考慮した時間帯別交通量配分モデルの開発, *土木学会論文集*, 第407号, IV-11, 129~138, 1989.
- 25) 藤田素弘・山本幸司・松井寛 : 時間帯別分割配分法の開発と実用化, *交通工学*, Vol.25, No.5, 25~33, 1990.
- 26) Gaver, D.P. : Headstart strategies for combating congestion, *Transpn. Sci.* Vol.2, 172~181, 1968.
- 27) Gazis, D.C. : Modelling and optimal control of congested transportation systems, *Networks*, Vol.4, 113~124, 1974.
- 28) Giuliano, G. and T.Golob : Using longitudinal methods for analysis of a short-term transportation demonstration project, *Transportation* 17, 1~28, 1990.
- 29) Golob, T. and H.Meurs : A structural model of temporal change in multi-model travel demand, *Transpn. Res.* Vol.21A 391~400, 1987.
- 30) Golob, T. : Structural equation modelling of travel choice dynamics, *Developments in Dynamic and Activity-Based Approaches to Travel Analysis*, 343~370, 1990.
- 31) Goodwin, P., R.Kitamura and H.Meurs : Some principles of dynamic analysis of travel behaviour, *Developments in Dynamic and Activity-Based Approaches to Travel*

- Analysis 26-72, 1990.
- 32) Henderson, J.V. : Economic theory and the cities, Chap. 8, Academic, New York, 1977.
 - 33) Hendrickson, C. and Kocur G. : Schedule delay and departure time decisions in a deterministic model, *Transpn. Sci.* Vol.15, 62-77, 1981a.
 - 34) Hendrickson, C., D. Nagin and E.Plank : Characteristics of travel time and dynamic user equilibrium for travel-to-work, *Proc. of the 8th Intern. Symp. on Transpn. and Traffic Flow*, Toronto, 321-347, 1981b.
 - 35) Hendrickson, C. and Plank, E. : The flexibility of departure times for work trips, *Transpn. Res.* Vol.18A 25-36, 1984.
 - 36) Hirsh, M., J.N.Prashkea and M.Ben-Akiva : Dynamic model of weekly activity pattern, *Transpn. Sci.* Vol.20 No.1, 24-36, 1986.
 - 37) Horowitz, J.L. : The stability of stochastic equilibrium in a two-link transportation network, *Transpn. Res.* Vol.18B No.1, 13-28, 1984.
 - 38) Huff, J.O. and S.Hanson : Measurement of habitual behaviour : examing systematic variability in repetitive travel, *Developments in Dynamic and Activity-Based Approaches to Travel Analysis*, 229-249, 1990.
 - 39) Hurdle, V.F. : The effect of queuing on traffic assignment in a simple road network, *Proc. of the 6th Intern. Symp. on Transpn. and Traffic Flow*, Sydney, 519-540, 1974.
 - 40) 飯田恭敬・柳沢吉保・内田敬 : 通勤交通の経路選択と出発時刻分布の同時推定法, *土木計画学研究・論文集*, No.9, 93-100, 1991.
 - 41) Iida, Y., T.Akiyama and T.Uchida : Experimental analysis of dynamic route choice behavior, *Transpn. Res.* Vol.26B, No.1, 17-32, 1992.
 - 42) 飯田恭敬・内田敬・宇野伸宏 : 交通情報の効果を考慮した経路選択行動の動的解析, *本特集*, 1993.
 - 43) 井上博司 : 道路網における交通流動の動的シミュレーション手法, *本特集*, 1993.
 - 44) Janson, B.N. : Dynamic traffic assignment for urban road networks, *Transpn. Res.* Vol.15B, No.2/3, 143-161, 1991.
 - 45) 河上省吾・溝上章志・鈴木稔幸 : 交通量の時間的変動を考慮した道路交通量配分手法に関する研究, *交通工学*, Vol.20, No.6 17-25, 1985.
 - 46) 河上省吾・三島康生 : 通勤通学交通手段選択行動における動的特性の分析, *本特集*, 1993.
 - 47) Kitamura, R. and T.van der Hooft : Regularity and irreversibility of weekly travel behavior, *Transportation*. 14. 227-251, 1987.
 - 48) Kitamura, R. : Panel analysis in transportation planning; Overview, *Intern. Con. on Dynamic Travel Behavior Analysis*, Kyoto, 2-21, 1989a.
 - 49) Kitamura, R. and G.Goulias : MIDAS : A travel demand forecasting tool based on dynamic model system of household car ownership and mobility, Report prepared for Project bureau TVUS, The Hague, 1989b.
 - 50) Kraft, G. and M.Wohl : New directions for passenger demand analysis and forecasting, *Transpn. Res.* Vol.1, 205-230, 1967.
 - 51) 桑原雅夫 : 渋滞したネットワークにおける動的均衡配分に関する考察, *土木学会論文集*, 第419号, IV-13, 123-126, 1990.
 - 52) Leonard, D.R., J.B.Tough and P.C.Baguley : CONTRAM-a traffic assignment model for predicting flows and queues during peak periods, *TRRL Report LR841*, 1978.
 - 53) Mahmassani, H. and R.Herman : Dynamic user equilibrium departure time and route choice on idealized traffic arterials, *Transpn. Sci.* No.4, 362-384, 1984.
 - 54) Mahmassani, H.S and G.L.Chang : Experiments with departure time choice dynamics of urban commuters, *Transpn. Res.* Vol.20B, No.4, 297-320, 1986a.
 - 55) Mahmassani, H.S, G.L.Chang and R.Herman : Individual decisions and collective effects in a simulated traffic system, *Transpn. Sci.* Vol.20, No.4, 258-271, 1986b.
 - 56) Mahmassani, H.S and R.Jayakrishnan : System performance and user response under real-time information in a congestion traffic corridor *Transpn. Res.* Vol.25A, No.5, 293-307, 1991.
 - 57) 松井寛・佐藤佳朗 : 都市高速道路の動的流入制御理論に関する研究, *土木学会論文報告集*, 第326号, 103-114, 1982.
 - 58) 松井寛 : 総走行時間最小化配分と等時間原則配分の動的化, *土木学会論文報告集*, 第339号, 239-242, 1983a.
 - 59) 松井寛 : 高速道路交通流の動的記述モデル, *交通工学* Vol.18, No.2, 17-26, 1983b.
 - 60) 松井寛・丹羽知紀 : 道路網上の経路誘導に関する基礎的研究 *土木計画学研究・論文集*, No.4, 85-92, 1986.
 - 61) 松井寛 : 動的交通量配分モデル-交通ネットワークの分析と計画, *土木計画学講習会テキスト*, 84-97, 1987.
 - 62) 松井寛・藤田素弘・神谷英次 : 時間帯別発生集中および分析交通量の予測手法に関する研究, *土木計画学研究・論文集*, No.9, 77-84, 1991.
 - 63) 松井寛・藤田素弘 : 時間帯別通勤時刻分布・配分同時モデルの発生, *土木学会論文集*, No.449, IV-17, 117-123, 1992.
 - 64) 松井寛・藤田素弘 : 半動的通勤時刻分布・配分同時モデルのフレックスタイム制導入による効果測定への適用, *本特集*, 1993.
 - 65) 松本嘉司・角知憲・田辺俊郎 : 一般化出発時刻に基づく交通の実質消費時間の推定, *土木学会論文集*, 第337号, 177-183, 1983.
 - 66) Merchant, D.K. and G.L.Nemhauser : A model and an algorithm for the dynamic traffic assignment problems, *Transpn. Sci.* Vol.12, No.3, 183-199, 1978.
 - 67) Michalopoulos, P.G. : Integrated modelling of freeway flow and application to microcomputers, *Traffic-Eng. and Control*, 198-204, 1986.
 - 68) 宮城俊彦・牧村和彦 : 時間帯別交通配分手法に関する研究, *交通工学*, Vol.26, No.2, 17-28, 1991.
 - 69) Newell, G.F. : The morning commute for nonidential Travelers, *Transpn. Sci.* Vol.2, No.2, 74-88, 1987.
 - 70) Papageorgiou, M. : A new approach to time-of-day control based on a dynamic freeway traffic model, *Transpn. Res.* Vol.14B, 349-360, 1980.

- 71) Papageorgiou, M., B.Posch and G Schmidt : Comparison of macroscopic models for control of freeway traffic, *Transpn. Res.* Vol.17B, No.2, 107~116, 1983.
- 72) Papageorgiou, M., J.M.Blosseville and H.Hadj-Salem : Macroscopic modelling of traffic flow of the Boulevard Périphérique in Paris, *Transpn. Res.* Vol.23B, No.1, 29~47, 1989.
- 73) Papageorgiou, M. : Dynamic modelling, assignment, and route guidance traffic networks, *Transpn. Res.* Vol.24B, No.6, 471~495, 1990.
- 74) Pas, E.I. : Weekly travel behaviour, *Transportation* 15, 89~109, 1988.
- 75) Pas, E.I. : Is Travel Demand Analysis and Modelling Doldrums? Developments in Dynamic and Activity-Based Approaches to Travel Analysis, 3~27, 1990.
- 76) Payne, H.J. : Models of freeway traffic and control, *Simulation Council Proc.* 1, 51~56, 1971.
- 77) Phillips, W.F. : A new continuum model for traffic flow, *Utah State Univ. Report DOT-RC-82018*, 1979.
- 78) Ran, B. and T.Shimazaki : A general model and algorithm for the dynamic traffic assignment problems, *Proc. of the 5th WCTR*, Vol.IV, Yokohama, 463~477, 1989.
- 79) Robillard, P. : Multipath traffic assignment with dynamic input flows, *Transpn. Res.* Vol.8, 567~573, 1974.
- 80) 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, 第121号, 28~32, 1965.
- 81) 佐佐木綱・松井寛 : 連続吸収マルコフ過程を用いた交通量分布, 第8回日本道路会議論文集, 1086~1089, 1965.
- 82) Sheffi, Y. and W.B.Powell : an algorithm for the equilibrium assignment problem with random link times, *Networks*, 12, 191~207, 1982.
- 83) Smith, M.J. : The existence of a time-dependent equilibrium distribution of arrivals at a single bottleneck, *Transpn. Sci.* Vol.18, No.4, 385~394, 1984a.
- 84) Smith, M.J. : The stability of dynamic model of traffic assignment -An application of a method of Lyapunov, *Transpn. Sci.* Vol.18, No.3, 245~252 1984b.
- 85) 杉恵瀬寧・芦沢哲蔵・羽藤英二 : 個人の1週間の交通行動の特性, 土木計画学研究・講演集, No.13, 549~554, 1990.
- 86) 杉恵瀬寧・芦沢哲蔵 : 買物・私用交通の曜日変動特性, 第26回日本都市計画学会学術研究論文集, 277~282, 1991.
- 87) 角知憲・宮木康幸・村尾光弘・松本嘉司 : 任意の運行特性をもつ公共交通機関利用者の一般化出発時刻, 土木学会論文集, 第347号, IV-1, 95~104 1984.
- 88) 角知憲・木村邦久・島崎敏一・松本嘉司 : 空港アクセス交通の一般化出発時刻と交通行動の経験依存性, 土木学会論文集, 第365号, IV-4, 115~124, 1986.
- 89) 角知憲・岡田良司・杉野浩茂・宮木康幸 : 経路上の交通渋滞に応答する自動車通勤者の出発時刻決定行動モデル, 土木学会論文集, 第449号, IV-17, 107~115, 1992.
- 90) Sumi, T., Y.Matsumoto and Y.Miyaki : Departure time and route choice of commuters on mass transit systems, *Transpn. Res.* Vol.24B, No.4, 247~262, 1990.
- 91) 角知憲・清田勝・田村伸司・武田史郎 : 交通渋滞に応答する自動車通勤者の出発時刻決定行動モデルに基づく擬似動的配分計算法, 本特集, 1993.
- 92) Supernak, J.C. : A method for estimating long-term changes in time-of-day travel demand, *Transpn. Res. Rec.* 1138, 18~26, 1987.
- 93) 高橋君成・河上省吾 : 動的車種別交通量配分モデル, 第26回日本都市計画学会学術研究論文集, 313~318, 1991.
- 94) Van Aerde, M., S Yagar, A Vgge and E.R.Case : A review of candidate freeway-arterial corridor traffic models, *Transpn. Res. Rec.* 1132, 53~65, 1987.
- 95) Vickrey, W.S. : Congestion theory and transport investment, *Amer. Econ. Rev.* 59, 25~261, 1969.
- 96) Vythoulkas, P.C. : Two models for predicting dynamic stochastic equilibria in urban transportation networks, *Proc. of the 11th Intern. Symp.on Transpn. and Traffic Theory Yokohama*, 253~272, 1990.
- 97) Wie, B.W. : Dynamic system optimal traffic assignment on congested multidestination networks, *Proc. of the 5th WCTR Vol.IV*, Yokohama, 491~504 1989.
- 98) Wie, B.W., T.L.Friesz and R.L.Tobin : Dynamic user optimal traffic assignment on congested multi-destination networks, *Transpn. Res.* Vol.24B, No.6, 431~442, 1990.
- 99) Yager, S. : Dynamic traffic assignment by individual path minimization and queuing, *Transpn. Res.* Vol.5, 179~196 1971.
- 100) 山内泰次 : 高速道路の交通流モデルとシミュレーション, 高速道路と自動車, 第28巻, 第11号, 32~40 1985. (1992.10.26受付)

A REVIEW OF DYNAMIC ANALYSIS FOR TRAVEL BEHAVIOUR AND DEMAND PREDICTION

Hiroshi MATSUI

The existing models for predicting dynamic travel demand and analyzing travel behaviour are reviewed in this paper. Based on their application domain, the models are classified into six groups as follows, departure time decision, dynamic traffic assignment, dynamics of commuting decision behaviour, dynamic simulation of macroscopic traffic flow, dynamic travel behaviour analysis and time-of-day travel demand forecasting. The advantages and disadvantages of each model are discussed and directions for future research are proposed.