

交通モデルの課題と展望*

An Overview of Transportation Modelling and its Future Prospects

飯田恭敬**

By Yasunori IIDA

1. はじめに

交通計画を策定するには、交通現象のメカニズムを分析することによってその性質や特徴を知り、現象の動向や変化を推定することが必要となる。こうした現象分析には多くの場合、交通モデルが用いられるが、交通モデルは対象となっている計画の内容や目的によって異なってくる。そのために、これまでいろいろな種類の交通モデルが開発されてきており、交通計画の策定や問題の解決にそれぞれ多大の貢献をしてきた。しかし、既存モデルにおける仮定の考え方や方法論の取り扱い方については多くの問題点があり、大枠や方向を決めるマクロ的観点からの計画策定には大いに役立っても、実際道路網に対応したミクロ的観点からの管理運用計画を作成するには限界があるように思われる。

特に最近では、交通システムによる環境改善や交通施設の効率的利用等のような現実現象を対象としたキメの細かい規制・誘導計画が重要性を増しており、従来の重力モデルに見られるようなマクロモデルでは対応することが困難になってきている。交通行動は社会現象の一部であり、人間の動きは不規則で多様な面を有しており、また時間経過とともに変

化する性質がある。また、行動には種々の社会的および経済的な要因が関係してくる。したがって、より現実的な交通計画を策定するには、これからの交通モデルには、多数の要素が取り扱えること、個人行動の異質性が考慮できること、現象の変化が追えること、現象の細部が記述できること等が求められる。要するに、モデルの多元化、多様化、動的化、詳細化を目指すことが今後の大きな課題となっている。

交通モデルの構造は、上で述べたように交通計画の目的や内容と関係してくる。したがって、社会ニーズの高度化にともない計画の目的や内容のレベルが上がると、交通モデルの構造レベルもグレードアップしなければならないのである。ここで留意しておかなければならないのは、最近における計画レベルの向上に対応するには、既存モデルの延長線上での改良あるいは改善では困難であり、新しい見地からのモデル発展が必要であるということである。

ところで、交通モデルといっても多種多様であり、それらをすべて対象にして議論することは、紙数の制約から難しい。そこで、初めに一般的な交通需要分析モデルの発展経緯について述べ、次に道路ネットワークの交通量配分モデルに焦点を絞って論述することにする。交通量配分モデルを特に取り上げるのは、筆者がこの研究課題に長く関わりがあったこともあるが、モデル化において容量による混雑の影

* Key Words 交通需要分析, ネットワークフロー, 動的交通行動モデル

**正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学科 (〒606-01 京都市左京区吉田本町 Ⅷ 075-753-5124)

響を考慮しなければならないという、他のモデルにはあまり見られない特徴を有するからである。交通量配分のモデル解法が困難であるとされてきた理由の一つは、この容量制約による選択行動と混雑度の依存関係があるからである。もう一つの理由は、道路網における経路選択行動の現象法則性が明確ではないという事実である。それゆえ、交通量配分モデルは等時間原則や時間比原則といった仮説にもとづいて理論発展が進められてきたのである。しかし、これらの配分原則が実際に検証されて、その妥当性が確かめられているわけではないし、その考え方にも疑問点が少なくない。既存の配分理論は均衡状態を求めることを目指しているが、均衡状態がどのようなプロセスで達成されるのかは示されていない。もし経路交通量が均衡状態に接近していくのなら、過去の経験や学習の効果、あるいは提供される外部情報も関係してくるはずである。すなわち、既存の均衡配分は交通量の期待値としての静的配分モデルであり、その現実性を高めるには経路選択の動的プロセスの解明が必要なのである。したがって本論文の後半では、既存の配分モデルの問題点を指摘するとともに、これからの発展の方向、特に動的モデルの展開について述べることにする。

2. 交通需要分析モデルの発展経緯

アメリカにおいて交通調査に関する法律が1952年に制定されたが、これを契機に交通需要推定の方法論が発展したといわれている。この法律は道路建設に対する財政支出の正当性を理由づけることを要求したもので、デトロイトやシカゴでの大規模な交通調査はこの法律にもとづいて実施されたものである。交通需要推計の四段階推定法の原形はすでにこの頃に確立されており、成長率法や重力モデル法によるOD交通量推定法、転換率にもとづいた交通量配分法はこれらの交通調査に関連して作成、あるいは発展がなされている。成長率法や重力モデル法、また転換率法はいずれも現象全体としての動向特性に着目した方法論であり、経験則にもとづくものである。したがって、現象のメカニズムを記述するよりは、むしろ妥当な推定値が得られることを重視したモデルといえる。

この後すぐに出現してきたのが、経済学における

需要と供給の均衡概念を利用した交通需要推定モデルである。交通に要する費用あるいは時間が小さければ、交通需要量は大きくなることが考えられ、一方、交通需要量が大きくなると、道路が混雑して時間が長くなり、交通費用が大きくなるので需要は抑えられることになる。前者は需要曲線、後者は供給曲線概念に相当するので、実際の交通需要はこの両曲線の交差する均衡点で決まるという考え方である。しかし、交通需要は交通費用だけで決まるものではなく、土地利用、人口密度、商業販売額、家族構成、所得等のさまざまな社会経済的な要因が関係してくる。このように交通の需要量と交通システムのサービス水準、および社会経済活動の水準が相互に影響し合い、そのバランスのとれた点で交通需要量が顕在化するというモデル概念である。このモデルでは、交通の需要変化における要因の因果関係がかなり明示的に取り扱われるので、先の経験則モデルに対して、因果律モデルと呼ぶことができるであろう。

しかし、上記の2つのモデルはいずれも、交通現象を均質な集合体として取り扱うもので、交通行動のメカニズムを記述することよりは、需要推定の把握に力点が置かれたモデルといえるであろう。人間の行動基準は個人によって異なるし、関係する要因データのばらつきも大きい。したがって、交通行動を集合体としての平均値で取り扱うより、個々の行動を区別して記述するほうが現実的であり、非集計モデルが発達することになった。非集計モデルは、交通行動を確率モデルとして表現することにも特徴をもっている。さらに従来の交通モデルでは、トリップ行動の時間的、空間的制約、トリップの目的変化とつながり、交通行動における職業や家族構成の影響等が考慮されることがなかった。このため、非集計モデルとは別に、交通行動の本質に関わるこれらの諸特性を取り入れた相互連関分析モデルが考案されるに至った。トリップチェーンモデル、時空間モデル、活動拠点モデル等がこの種のモデルに相当する。したがって、この段階になってようやく交通行動モデルと呼べるふさわしい形態になってきたといえるであろう。

最近ではこうした新しい観点からの方法論に加えて、交通行動の動的な分析が盛んに行われるように

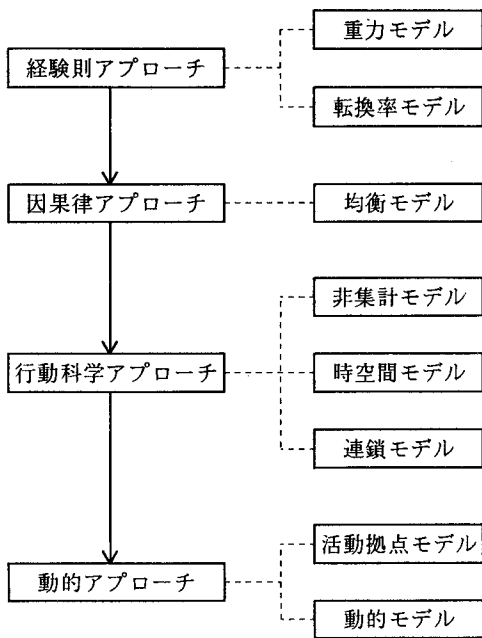


図-1 交通モデルの発展

なってきた。その大きな理由としては、交通行動の特性は一時点の行動結果だけでは捉えきれない面を有しているからである。この考え方からすると、活動拠点モデル等の相互関連交通モデルも動的モデルの分類に入れられるものである¹⁾。交通行動はつまるところ選択の意思決定の問題であり、それまでの経験、学習、満足度、また場合によっては情報や見込み等が関与してくるのである²⁾。

上で述べた交通行動モデルの発展経緯について、大まかな流れをまとめたのが図-1であるが、このモデル発展の経緯は、そのときの社会的背景とも大きな関わりをもっている。表-1は時代推移にともなう社会背景と交通計画の変遷を示しており、交通モデルのレベルは交通計画の目指す内容と密接に関連していることが理解される。

日本のモータリゼーションは昭和30年の中頃から始まったが、この年代は所得倍増計画による高度経済成長のときであり、都市への人口集中が急速に進んだ。そして、もともと道路整備が遅れていたこともあって、道路建設を積極的に進めねばならない状況にあった。それゆえに、交通需要推定に関しても経験則的なアプローチによるマクロな方法でも十

表-1 社会背景と交通計画の変遷

年代	社会背景	交通計画
昭和30年 (1955)	モータリゼーション 都市人口集中	積極的建設
昭和40年 (1965)	都市交通問題 公害環境問題 石油ショック	代替的選択
昭和50年 (1975)	緊縮財政	効率的利用
昭和60年 (1985)	情報技術進展	動的運用

分であり、交通行動のメカニズムについての詳細な分析はそれほど必要とはされなかった。しかし昭和40年代になると、通勤地獄、道路渋滞等の都市交通問題が顕在化し、また経済の発展成長が重視されたあまり、公害問題が発生し、環境に対する社会的関心が大きくなった。このような地域環境に対する住民意識の高まりから、道路や鉄道の整備は単に不足しているから建設するというのではなく、環境に対する影響や、交通手段の分担関係等を考慮して、複数案の中からより望ましい実行可能な計画案を見つけ出ししていくことが求められるようになってきた。すなわち、計画案の代替的選択が必要となったのである。代替案の比較検討をするとすると、モデルはかなり信頼性の高いものでなければならないし、因果関係が明示的に取り扱われなければならないことになる。パーソントリップを用いた総合交通計画の手法は、この年代の前半から活発に研究が行われるようになり、またネットワーク交通流の均衡論アプローチはこれより少し遅れて研究が進展することになった。

昭和40年代の末になると、石油危機の問題が起これ、このあおりで昭和50年代は財政事情が悪化し、いわゆる安定経済の時代となった。そのために、大型の公共投資は抑制され、交通施設の効率的利用が重要視されるようになった。すなわち、ハードよりもソフトな対策が大きな課題となったのである。このことに対応するには、交通現象の特性を詳細に分析することができ、しかも各種要因に対する確かな応答が可能な操作性の高い交通モデルでなければならない。非集計モデルはこうした要求に応えられる特性をもっており、政策応答型の短期モデルとして実際への適用が多く試みられている。しかし、交

通行動は一時点よりも多時点にわたって分析したほうが、より本質的な特徴が把握できる。パネルデータによる交通分析はこのような考え方にもとづいたものであり、動的分析モデルといわれている。パネル分析による交通モデルは、動的過程が考慮されている点で、非集計モデルよりさらに政策応答的であり、長期的モデルとしても利用できる。パネル調査にもとづく動的交通モデルの研究開発はこの年代において始められたが、動的交通モデルの重要性は情報技術の進展とあいまって次の年代にさらに増大する。

昭和60年代は情報化の時代に入り、道路交通においても路車間通信、道路のインテリジェント化の技術が進み、交通管理の高度化が展開されつつある。このような状況になってくると、従来のような静的な交通モデルでは対応ができなくなり、時々刻々の交通状態が記述できる動的モデルが必要となる。路車間通信を利用した新しい交通管理手法は日本ではVICS(Vehicle information and communication system)、ヨーロッパではRTI(Road Transport Informatics)、アメリカではIVHS(Intelligent Vehicle Highway System)といわれているが、こうした革新的な交通管理システムが導入される場合、実際における誘導制御の効果を高めるために使用されるのはもちろんのことであるが、システム導入にあたっての事前評価の算定にも動的交通モデルの果たす役割は大きい。

このように交通計画の内容は時代の背景によって影響を受け、また交通モデルのレベルは交通計画の内容に応じて変遷をしてきた。要約していえば、交通モデルは現象の概略を対象としたマクロモデルから詳細部も取り扱えるミクロモデルへ、現象変化の推定を重視した相似的モデルからメカニズムも分析できる記述的モデルへ、現象を一体化した集合体として見る均質モデルから個体を区別できる異質モデルへ、一時点データだけからの静的モデルから多時点のパネルデータによる動的モデルへと、次第に発展をしてきたといえる。

3. 交通モデルの役割

交通モデルに求められるものは多々あるが、まず現象の再現性が優れていることであろう。したがっ

て、実績値によく適合するように要因選択やパラメータ決定がしばしば行われるが、これだけでは不十分である。なぜなら、実績値との適合性が高いだけでよいのなら、そのようなモデルは容易に作成できるからである。大事なことはこのことに加えて、現象変化のメカニズムが説明できる記述性の高いことが必要である。極端な例ではあるが、もし自動車交通量の伸びがガンによる死亡者数と相関が高ければ、ガン死亡者数を説明変数とする適合性の高い自動車交通量の推定モデルを構築することが可能である。しかしこの場合の適合性は見かけだけであって、どう考えてもガン死亡者数が自動車交通量に関与するとは思えない。また交通量配分モデルについても、時間比配分、等時間配分、総走行時間最小化配分のいずれの方法を用いても、配分結果に差のないことがある。このようなとき、どの配分方法を採用すべきかは、現状値に対する精度からだけでは判断することが難しい。

また、ある時点や場所で作成されたモデルが他の時点や場所でも有効であるというモデル移転性がたびたび議論されるが、この根拠はきわめてあいまいである。留意しておくべきことは、モデルは使用されたデータの範囲に限り有効であるということである。モデル移転性は他の時点や場所に適用してはじめて検証できることであり、事前に確認の方法がないのである。モデル移転性が事後に認められたとしても、偶然に支配される要素が多分にあるし、その理由の説明についてはデータの統計的な分析が改めて必要であろう。

これらのことからわかるように、交通モデルは推定精度がよいことも重要であるが、同時に現象動向が無理なく説明できるものでなければならない。また説明要因の採択も、専門知識にもとづいた適切なものをケースに応じて考慮すべきであり、さらに要因の相互作用についても詳細に分析しておくことが大切である。

交通モデルの役割には、現象の再現性と記述性に加えて、計画の評価と効果の計測に使用されることが挙げられる。このとき、推定誤差が関係してくる。特に代替案の選択においては、推定誤差が小さければ、最適案は明確に決められるが、誤差が大きくなると最適案の決定があいまいとなってくる。したが

って、誤差の大きさをあらかじめ分析することができれば、最適案の安定度を知ることができるので都合がよい³⁾。一般に言えば、計画の評価においては推定誤差はできるだけ小さいほうが望ましいが、そのためにモデルの説明変数を増やして、モデルを複雑にすればよいかというと、必ずしもそのような結果にはならない。なぜなら、要因数を増やすとモデルの構造誤差は小さくなるものの、逆に各要因の誤差集積である計測誤差は大きくなるからである。したがって、モデルの複雑度は構造誤差と計測誤差のトータルが最小になるところが最適となる⁴⁾。また、交通計画では各種の計画が連鎖的に関係することが多い。この場合は、各モデルの詳細度が不統一では問題が生じる。例えば、交通量配分モデルが詳細な道路網を取り扱えるものであっても、発生量モデルが概略的なモデルでは配分結果の信頼性は低いものになってしまう。

現象はまた不確定な要因によっても支配を受ける。不確定な要因は、不規則な要因と計測不能な要因に分けられ、不規則な要因には事故や災害、渋滞等の生起があり、計測不能な要因には情報、価値観、習慣や好み、見込み等がある。現象分析にこのような不確定な要因や計測不能な要因の影響をどのように取り入れていくかは容易ではないが、これから考慮すべき大きな課題である。

交通モデルに求められる条件をまとめると、再現性が優れていること、説明力が高いこと、状況変化に対応できること、単純で明快であること、操作が容易であること、使用が経済的であること等であろう。しかし、再現性を上げようとするれば、モデルは複雑になるというように、この中にはトレードオフの関係も存在するので、これらのすべてを同時に満たすことはきわめて困難である。また、計画の枠組みは必ずしも固定的ではないし、交通現象には不確定な要因が絡んでくる。それゆえ、交通モデルは精緻さを追求しても実際にはそれほど意味はない。

したがって、交通モデルを利用するとき大事なことは、モデルの結果をどのように解釈するかということである。モデルの結果は数値で得られるが、数値をそのまま絶対的なものとして見るだけでなく、同時に相対的な値としても評価するのがよいと思われる。交通量配分にしても、結果であるリンク交通

量は一つの目安であり、個々のリンクに着目するよりは、むしろリンク間の交通量の相対的比較をすることが重要である。このようにすれば、より柔軟な幅広い計画が検討できることになる。つまり、モデルによる結果は定量的と同時に定性的な考察をすることが大事であり、またモデルに内包されていない要因も考慮して総合的な見地から理解することが、計画の実現性を高めることにつながる。要するに、交通モデルはまだ未成熟な段階にあるので、予測値そのものを求めることよりは、むしろ現象の動向やメカニズムの理解を重視すべきであるということができる⁵⁾。

交通モデルはこれからは、交通の運用や制御の面において、ますます重要な役割を果たすことが期待されている。そのためには動的モデルとしての発展が必要であり、より現実的で信頼性の高いモデル開発を目指すことが求められている。

4. 交通量配分モデルの問題点

経路選択行動を取り扱うモデルは交通量配分モデルといわれており、道路網における交通流の挙動を分析するのに用いられる。すでに述べたように、道路網の交通現象には明確な法則性が不明確であったこともあって、配分原則にもとづいた理論発展がなされてきた。3つの配分原則のうち、運転者の自主的判断による経路選択を前提とするのは、等時間配分と時間比配分である。等時間配分原則では、あるOD交通に対する利用経路の所要時間は等しく、非利用経路の所要時間はそれ以上になることが成立しなければならず、時間比配分原則では、所要時間の短い経路ほど選択確率が高くなることを満たさねばならない。しかしこれらの配分原則が、実際の交通現象を正しく反映したものであるかどうかは大いに議論の余地がある。以下では、このことについて考察することにする。

まず等時間配分について、簡単な例で考えて見よう。図-2の(a)のようにノードAとBの間に2本の経路があり、それぞれの経路の交通量と所要時間の関係を表す走行時間関数が図(b)のようになっているとする。ここで走行時間関数を、経路1については原点を左側に、経路2については反転して原点を右側にして重ねると図(c)のようになる。

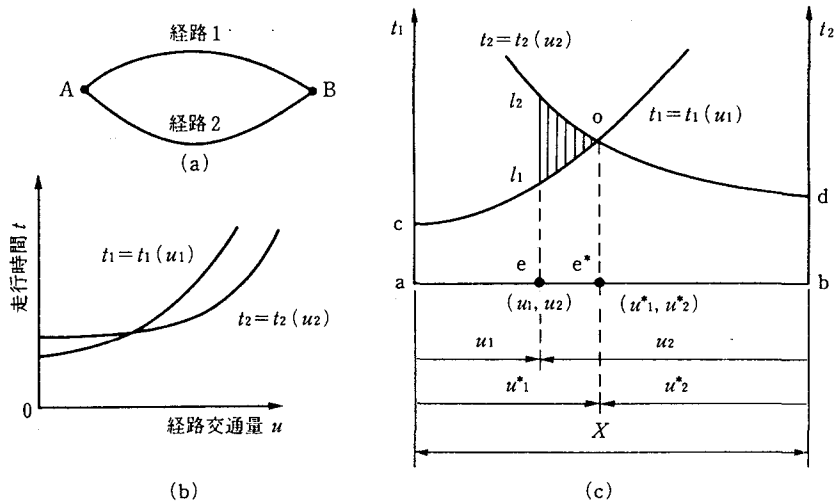


図-2 等時間配分の均衡状態

ただし、両原点間の距離は、このOD交通量である X となっている。いま配分交通量が点 e の状態になっているとする、すなわち、交通量が経路 1 に u_1 、経路 2 に u_2 流れているとすると、経路 1 および経路 2 の所要時間は t_1 、 t_2 となる。このとき、経路 2 は経路 1 よりも所要時間が大きいので、経路 2 の利用者は一部経路 1 に移ることが考えられる。しかし、経路 1 への転換が多すぎると、今度は逆に経路 1 の所要時間が経路 2 よりも大きくなってしまう。このようにして、所要時間の短い経路に移り変えることを繰り返せば、最終的には点 e^* の状態に達し、両経路の所要時間は等しくなる⁶⁾。この点 e^* は利用者最適均衡状態といわれている。なぜなら、この状態での経路はすべての利用者にとって時間最短となっており、もしある利用者がこれより短い所要時間を達成しようとする、他の利用者に犠牲を強いることなしには実現できないからである。このような利用者にとって最適な均衡状態を求めるのが等時間配分である。

実際の交通現象におけるこの均衡状態の実現性については、以下のようないくつかの問題点が指摘される。第 1 点は、この均衡状態へ至るプロセスが完全情報を前提としていることである。すなわち、利用者は利用経路と非利用経路の両方についての所要時間を知ることができると仮定している。しかし実際には、利用者は利用経路の所要時間がその走行結果としてわかるだけで、一般には非利用経路の所要

時間は知ることができないのである。もしすべての経路に対する所要時間が提供されるのであれば、この仮定は現実的なものとなる。ところが現在のところ、まだそのような方法がないため利用者は知るすべがなく、非現実的な仮定といわざるをえないのである。仮に、この完全情報の仮定が成立するとしても、所要時間の長い経路から短い経路への移行の繰り返しによって、均衡状態に達するという明確な保証は何もない。なぜなら、利用者の走行時間に対する感度が高ければ、各経路の交通状態が振動し、発散していくことが考えられるからである。

均衡状態へのプロセスについては、別の考え方として分割増分配分法にもとづくものがある。等時間配分モデルの定式化は次式で示される。ただし、OD 交通量、経路交通量、リンク交通量の保存則に関する制約条件式は省略する。

$$\text{Min } z = \sum_a \int_0^{x_a} f_a(x) dx \quad (1)$$

ここに、 x_a はリンク a の交通量、 $f_a(x)$ はリンク a の走行時間関数である。この式からわかるように、所与の OD 交通量を分割し、その分割した OD 交通量を逐次、最短経路に配分してネットワーク上で累加していけば、等時間配分が近似的に実現される⁷⁾。実際の交通現象は果してこのように、既存の交通量状態の上に、次の OD 交通量が順次積み重ねられていく形になっているのであろうか。この場合も、経

路選択に対して完全情報が前提となっている。このようにいずれの考え方にしても、完全情報の仮定は非現実的といわざるを得ないと思われる。

第2点は、経路の選択行動のメカニズムが明らかにされていないことである。経路選択には、所要時間、走行距離、走行費用、安全性、快適性、わかり易さ等さまざまな要因が関係してくる。議論を複雑化しないために、ここでは経路選択の要因として所要時間だけを取り上げるにしても（多くの要因の中で最も大きく効いていることが過去の多くの調査で確かめられている）、過去の経験、学習、情報に影響されるといわれている⁸⁾。つまり、現時点の交通状態からだけで経路選択が行われているわけではないということである。Mahmassani等の出発時刻と経路の同時選択の実験によると、予測所要時間と実際所要時間のずれが選択行動の説明要因として用いられており、この要因の効きかたは過去に遡るほど小さくすると述べられている⁹⁾。著者等の実験でも、過去の実際走行時間よりは、予測走行時間とのずれのほうが説明力が高いことが確かめられている¹⁰⁾。また経路選択には、通常通り慣れている経路から変更することへの抵抗感、他の経路のほうがよいことがわかっていても、そのギャップがある値を越えないと変更しないという習癖、さらには利用経路に特に問題を感じなければ、そのまま同一経路を選択するという特性等があるといわれている⁸⁾。すなわち、習慣、しきい値、満足基準が経路選択行動に大きく関与してくる。したがって、経路選択については静的に行動要因を分析しても実態に適応しているとはいえず、動的観点から行動分析が必要となる。

第3点は、利用者の行動特性は個人によって異なるという異質性が存在することである。経路選択行動の実験によると、経路を変えようとしていない人、所要時間の変化に対応して素直に反応して変更をする人、次の交通変化を見越して選択する人等、選択行動は多様性に富んでいることが判明している¹¹⁾。それゆえ、利用者を均質なグループとして集計的に取り扱うことには問題がある。経路選択行動の異質性、あるいは多様性を記述するには非集計モデルの適用が考えられるが、まだ動的モデルとしての研究が十分に進んでいない。人間の行動は、こうした個人間の異質性、多様性に加えて、過剰反応に対する抑制

や、気まぐれな面をもっている。所要時間に素直に反応して経路変更を繰り返せば、経路交通量は拡大振動して発散してしまうことが予想されるが、現実にはそのようなことは起こらないのである。また、普段利用している経路を突然変更することがときどき起こるのである¹¹⁾。経路選択行動がある基準にしたがって規則正しく行われるのであれば、経路変更および交通量変化の収束性が数理的に分析証明できるが、不確定な要因が予期しないときに介入することがあるので、本当に収束するのかどうかをすることはさきめて困難である。

第4点は、OD交通量が一定であるとしているが、現実にはネットワークを利用する交通量は常に変動しており、この仮定が成立していると思なすことは難しい。したがって、道路網の交通量が等時間を満たす均衡状態に到達するとは考えにくい。しかし交通配分においては、OD交通量は平均値として与えられていると理解するのが妥当であろう。そして、配分結果は、この固定値として与えられたOD交通量が、何回となく経路選択を繰り返したときの安定解として見るべきであろう。この安定解が実際にどのようなして得られるのかは、いまのところ現実交通量を観測するか、あるいは実験によって確かめるしか方法がないのである。

時間比配分についても均衡配分法がすでに開発されている。この方法は確率利用者均衡配分 (Stochastic User Equilibrium Assignment)とも呼ばれている。この均衡状態は、利用者が一方向的に経路変更をしても自身の知覚所要時間を改良できない状態と定義されている¹²⁾。ここでの知覚所要時間とは、実際所要時間にランダム誤差を加えたものとしている。もしこのランダム誤差がなければ確率均衡配分は、確定的均衡配分、すなわち等時間配分に一致することが証明されている¹²⁾。時間比配分は転換率式の考え方を一般化したものであるが、時間比の効き方を示すパラメータを無限大にすると、等時間配分に一致することが確かめられている。つまり、完全情報を仮定して、所要時間の最短経路を選択するようになれば、等時間の状態になることが明らかにされている¹³⁾。

ところで、Horowitzは確率均衡配分について、簡単な2リンクのネットワークで均衡の安定性を論じ

ている¹⁴⁾。この中では、経路の知覚所要時間は過去の走行経験の蓄積によって形成されるとしている。モデルは3ケース考えられており、モデル1では、各経路の選択を決定する知覚所要時間は、過去の実際所要時間の重み付き平均値で与えられると仮定している。重みの与え方は、過去の経験ほど大きくなる場合と、最近の過去ほど大きくなる場合の2種類を考えている。前者は最初の経験の影響が大きく、後になっても行動を変更しようとししない場合であり、後者は新しい経験にもとづいて行動することを表している。モデル2では、知覚所要時間は過去の知覚所要時間の重み付き平均値で与えられると仮定している。重みの与え方はモデル1と同じである。モデル3では、知覚所要時間は利用した経路のみの知覚所要時間の重み付き平均値で与えられると仮定している。これらの各モデルについていくつかの数値計算を行ったところ、常に均衡解に達するとは限らず、場合によっては振動することもあるし、初期条件によって均衡解とは異なる別の収束状態の得られることがあると結論されている。そして、この研究では経路選択行動のプロセスが知覚所要時間の仮定にもとづいたもので、真実を反映したものとはいえず、今後はこの行動プロセスについて実験を通じた考察が重要であると述べている。著者等も知覚所要時間の式は異なるが、同様なシミュレーションを実施したが、やはり同じような結論が得られている¹⁵⁾。

ここで注意しておかなければならないのは、ランダム項の取り扱いであろう。ここでは経路選択の要因として所要時間のみを対象としているので、このランダム項も時間に関する不確定要素と考えるのが妥当であろう。例えば、時間認識に対する誤差や不明確さの度合等が、これに相当するものと考えられる。このランダム項を時間認識の誤差と考えるなら、経路選択を何度も繰り返すうちに、もし経路交通量が均衡状態に収束するのであれば、この誤差は次第に小さくなっていくものと思われる。すなわち、各経路の所要時間が確実にわかる完全情報の状態に近づいてくる。上述したように、ランダム項が零の場合、確率的均衡配分は確定的均衡配分に一致することが証明されているし、また完全情報の場合は、時間比配分は等時間配分に一致することがすでに明らかにされている。したがって、確率配分の均衡状態

が実現するのは、等時間配分の交通状態に収束したときであるといえるのではなからうか。しかしながら、このことについては未知の部分が少なくないので、今後多くの実験や観察を通して確認する必要がある。

これまでの等時間配分および時間比配分の均衡モデルは、所要時間と交通量の関係が相互に矛盾しないように、結果として得られる交通量のみの関数でモデル定式化がなされている。そして、その均衡に至るプロセスについては、実際現象の観察にもとづいた議論はまったくなされていないといってもよい。交通量配分モデルは、数理的に困難な課題が多く、そのために数理解析面からの興味で研究が発展してきた部分が多いことは否定できないであろう。交通計画の面からいえば、交通量配分の均衡状態の実現を自明のこととして分析するよりも、均衡状態は果して成立するのかどうか、成立するとしたら、どのように実現するのかを究明することのほうがより意義が大きいと思われる。

5. 経路選択行動の動的プロセス

経路選択行動がどのようなプロセスで行われているのかを見るために、簡単な室内実験を用いて考察をしてみた¹⁶⁾。この実験では、図-2(a)のような経路が2本の道路網を想定し、被験者に経路選択を繰り返してもらう形でやっている。実験の概要は以下のとおりである。①被験者に各経路の所要時間を予測してもらい、自身の判断でいずれかの経路を選択してもらい、②被験者の選択結果を各経路で集計し、経路交通量に応じた実際所要時間を算出する。③各被験者に選択した経路の実際所要時間を知らせる。④再び①に戻って、次の選択をしてもらう。ただし、この繰り返しが所定の回数に達したら終了する。

各経路の実際所要時間が、繰り返し回数が進むにつれてどのように変化したかを示したのが図-3である。この図を見ると、14回目位で一度収束しかかっているが、それ以後再び振動を繰り返して、収束する気配がない。均衡状態となる実際所要時間は図中の横線で示した30分であるが、この実験からでは、均衡状態に到達するかどうかは判断が難しい。

このことについては、もう少し後で議論すること

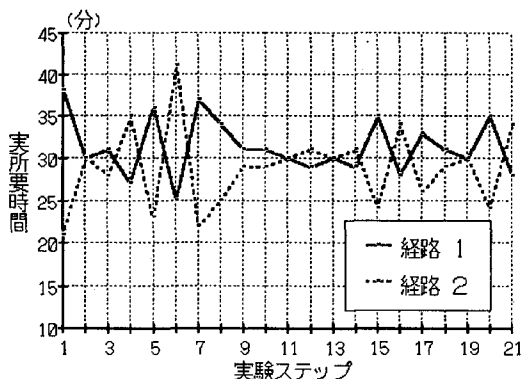


図-3 所要時間の変動(実験A)

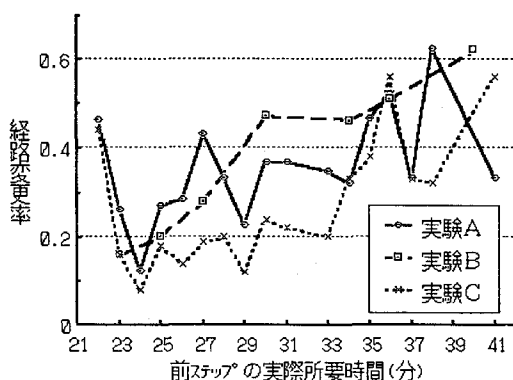


図-4 前ステップの所要時間に対する経路変更率

にして、経路選択における特性について考察してみる。図-4は、実際所要時間と経路変更率の関係が示されている。なおここでは、他の実験による結果も合わせて示されている¹⁶⁾。実験Aは、実際所要時間を選択結果から内生的に決定する上で述べた実験であり、実験BとCは、実際所要時間を外生的に与えるものである。ただし、実験Cは実験Aと同じ変動パターンを与えている。この図-4では、実際所要時間が大きくなるにつれて、経路変更率が高くなっているが、この傾向は常識的な感覚と一致するといえるだろう。実験別にみると、実験Aと実験Cの結果がよく似た傾向を示しており、実験Bはこの両者とは少し形状が異なっている。図-5は所要時間の予測誤差(予測値-実際値)と経路変更率の関係が示されている。どの実験ケースも経路変更率は、実際所要時間が予測値よりも短くなるほど変更率が少なくなっている。これは満足度が大きくなると、経路変更をしなくなることを表している。この場合

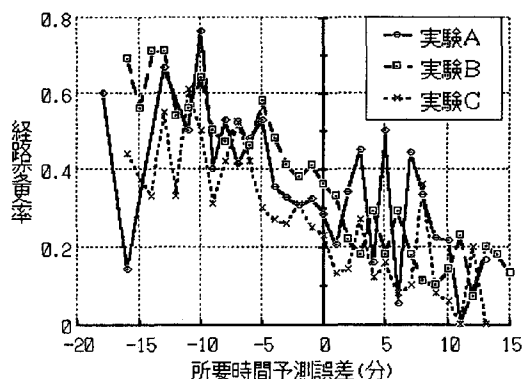


図-5 所要時間予測誤差に対する経路変更率

は、実験A、B、Cの間で変化傾向に特に顕著な差はないようである。

次に、所要時間予測の構造について考察してみる。予測モデルとして、2つの式を設定した。

モデル1

$$\hat{t}_s^{n+1} = \alpha_1 + \beta_1 t_s^n + \gamma_1 t_s^{n-1} + \delta_1 t_s^{n-2} + \varepsilon_1 \quad (n=3, 4, \dots, 20) \quad (2)$$

モデル2

$$y^{n+1} = \alpha_2 + \beta_2 x_0^n + \gamma_2 x_1^n + \delta_2 x_2^n + \varepsilon_2 \quad (n=3, 4, \dots, 20) \quad (3)$$

ここに、 $y^{n+1} = \hat{t}_s^{n+1} - t_s^n$ ，
 $x_k^n = \hat{t}_s^{n-k} - t_s^{n-k} (k=0, 1, 2)$ ，
 t_s^n : ステップnにおける選択経路の実際所要時間
 $\hat{t}_s^n$: 選択経路Sの予測所要時間，
 n : ステップ番号，
 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$: 定数パラメータ，
 ε : 誤差項。

モデル1は、予測所要時間を実際所要時間にもとづいて求めようとするものであり、モデル2は、予測誤差により推定しようとするものである。いずれも過去3回の経験を用いるとしている。実験Aと実験Bに対するモデルのパラメータ推定結果は表-2に示されている。ここでは系列自己相関があるため、Parksの方法を適用している。モデルの適合性の結果は表-3に示されている。これらの表の結果から見ると、所要時間予測(知覚所要時間)はHorowitz型のモデル1よりは、予測誤差にもとづくモデル2のほうが優れているように思われる¹⁷⁾。その理由の第1は、適合性が高いこと、第2は、モデルの意味付けが合理的であることである。現実における我々の経路選択行動も、それまでの予測のずれによって

表-1 予測旅行時間モデル(実験A, B)

n	サンプル数	モデル1 (t 値)				モデル2 (t 値)			
		α_1	β_1	γ_1	δ_1	α_2	β_2	γ_2	δ_2
<実験A>									
3-20	1008	17.34 (126)	0.334 (147)	0.135 (57.8)	-0.035 (-18.5)	0.430 (24.5)	0.517 (164)	0.068 (22.9)	0.033 (10.9)
<実験B>									
3-20	1620	13.05 (95.0)	0.464 (245)	0.038 (20.1)	0.075 (43.5)	1.126 (29.4)	0.471 (76.5)	0.103 (15.4)	0.011 (1.96) ⁺

+:有意水準1%で非有意

表-2(a) 推計値と実測値の相関(実験A)

VARIABLE	N	MEAN	SD	MIN	MAX	COR*
$\hat{t}_s^{n+1}$ <Model 1>						
実測値	1008	30.8	5.82	1.0	120.0	0.282
推計値	1008	30.7	1.42	26.8	35.0	
y^{n+1} <Model 2>						
実測値	1008	0.13	6.19	-36.0	92.0	0.560
推計値	1008	-0.05	3.37	-13.8	30.4	

*:PEARSON CORRELATION COEFFICIENTS

表-2(b) 推計値と実測値の相関(実験B)

VARIABLE	N	MEAN	SD	MIN	MAX	COR*
$\hat{t}_s^{n+1}$ <Model 1>						
実測値	1620	30.2	5.74	10.0	100.0	0.448
推計値	1620	30.3	2.51	17.3	35.5	
y^{n+1} <Model 2>						
実測値	1620	0.34	5.87	-21.0	75.0	0.550
推計値	1620	0.36	3.47	-10.9	37.6	

*:PEARSON CORRELATION COEFFICIENTS

次回の所要時間の予測を行うというように、モデル2に近いと思われる。また、所要時間予測では一般に安全を見込んだ余裕時間をとるが、モデル2のパラメータ α がこれに相当すると理解することができる。ここで、モデルパラメータ β , γ , δ の値を見ると、この順番に指数的に小さくなっており、このことは最近過去の経験ほど所要時間予測への影響度が大きいことを示している。そして、3回以前の経験になるとほとんど効いていないことがわかる。この他にもこれらの実験を通して興味深い知見が多く見出されている。例えば、経路選択行動は実験AとCが類似したモデル式となるように、所要時間の変動パターンによって大きな影響を受けること、経路特性によっても行動反応に差があること、経験の蓄積度によって行動が変化すること、日常の運転頻度によって選択行動に違いがあること等が判明している¹⁶⁾。

ところで、上のような経路選択実験から得られた行動特性から、等時間配分となる均衡状態が達成されると推論できるであろうか。現段階ではまだ断定的なことはいえないが、実際には厳密な意味での均衡状態に収束することはまず考えられず、収束するとしても、均衡状態の近傍でおそらく振動するものと思われる。なぜなら、経路所要時間が利用者にと

って最適となる均衡状態に達しているかどうかの明確な意識はなく、また各利用者が均衡状態を達成しなければならない必然性はないからである。利用者にすれば、均衡状態が別に実現されなくても、その時々に応じた自身にとってのより短い所要時間が達成できればよいからである。逆にいえば、均衡状態でないほうが、ある一部の利用者にとってはより所要時間の短い経路の選択が実現できることになる。このために、所要時間の短いと思われる経路を毎回推定し、その見込み違いによって経路交通量の振動が繰り返されることになると思われる。しかし、所要時間が予測した値より小さければ、満足度が大きくなると思われるので、図-5からもわかるように、経路を変更することが少なくなることが見られる。Mahmassaniは経路選択に対してではないが、出発時刻の変更に対して許容満足範囲の概念を提案している⁹⁾。経路変更についても同様な考え方ができるであろう。もし経路交通量の状態がこの範囲に入れば、経路変更が行われなくなるので、交通量はそれ以後変化することなく一定値になるはずである。しかし、経路実験を見る限り、そのようになる気配はない。これには、被験者によって許容満足範囲が異なるし、選択行動における個人差が大きいことが関係していると思われる。上とは別の実験でも、経路選択行動

はきわめて多様性に富んでいることが確かめられているし¹¹⁾、また図-5に示されているように、実際所要時間が予測値に一致しても十分な満足は得られず、経路変更率は零にはならないのである。つまり、利用者は常に交通量の変動を頭に入れて、次の最適行動を考えているのであろう。

6. モデル発展のための今後の課題

交通量配分モデルは上で述べてきたようにまだ不明な点が少なくない。これらの問題点をすべて解明あるいは解決することは容易ではないが、今後のモデル発展に関連するいくつかの課題を以下に整理しておこう。

まず第1は、使用目的に応じた配分モデルを明確にすべきであるということである。これまで多くの配分モデルが開発されてはいるものの、どのような目的に使用すべきなのか、あまり議論されたことがないように思われる。具体的な例でいうと、等時間配分と時間比配分がどのように使い分けがなされるのか、明確な基準がない。等時間配分は完全情報を、時間比配分は不完全情報を前提としているため、あえていえば前者は都市内交通、後者は都市間交通へ適用するのがよいといえよう¹⁸⁾。しかし、この情報の完全性、不完全性の概念にも非現実的な面があり、また両配分ともその均衡状態の実現性についても問題があるので、これらのことを今後さらに究明し、その適用範囲を明示することが望まれる。

第2は、静的モデルと動的モデルを区別することである。このことは上述したモデルの使用目的とも関係する。道路の整備計画の場合と、交通制御や経路誘導の場合とでは、使用するモデルの構造がまったく違ってくる。前者の場合は、何回となく繰り返される平均値としての交通量が求められれば十分なので、従来からよく知られている静的な配分モデルで対処できる。これに対して後者の場合は、時々刻々の道路交通現象を取り扱わなければならないので、動的モデルが使用されなければならない。静的モデルについては、これまで多くの研究がなされているので、ここで改めて議論することは避けるが、動的モデルについては、これから考究すべき課題は多い。動的モデルにおいても、等時間均衡や利用者均衡の概念にもとづくものがあるが、果してこのような概

念を用いることが現実現象に適合しているのどうか、再考して見る必要があるのではないだろうか。先にも述べたように、利用者は自身の判断のみにもとづいて行動しており、他の経路よりも最適であるかどうかは不明であり、あまり問題にしていらないように思われるのである。

第3は、交通行動モデルにおける長期的対応と即時的対応の結合である。我々の交通行動は、過去における繰り返しの経験や学習によって影響されることが多い。通勤ルートが人によってだいたい決まっているのはこの例であろう。しかし一方では、交通時の状況によっても行動が変化する。例えば、通常の経路で渋滞に遭遇すれば、別の経路に変更をすることがある。このように交通行動は、過去の知識集積と現在の状況認識の両方から選択判断をしているのである。前者を戦略的対応、後者を戦術的対応と呼ぶこともできる。動的な経路選択モデルを構築するには、こうした過去の行動における経験や学習の効果による戦略的行動と、現在の交通状況の認識にもとづく戦術的行動のメカニズムをまず明らかにすることである。そして、この戦略的対応と戦術的対応をどのように組み合わせて記述するかが課題となっている。この課題に対応するための一つの方法としては、条件付き確率の形で記述することも考えられる¹⁹⁾。

第4は、情報による選択行動への影響である。経路の選択行動は、過去の経験による交通状態の推定判断にもとづいて行われるが、交通状態を知らせる情報提供が外部からなされると、様相が異なってくる。すなわち、自分の経験と交通情報のいずれを重視するかという問題である。交通情報が正確であればその信頼性は高いであろうが、不正確であれば信頼性は低くなる。また、経験の蓄積度も交通情報との相対的重みを決めることに関係してくる。経験の多いドライバーほど交通情報を信頼しないとの報告もあるが²⁰⁾、経験と情報の関わり方は複雑であり、どのように経路選択行動に反映されるのか、いまのところ明確にはなっていない。また、交通情報が提供される場所や時点も経路選択に影響してくる。交通情報を時々刻々知ることができれば、経路変更が途中で始終行われることになる。しかし交通行動には、状況が少しぐらい変わっても行動変更をしない

習慣への固執性もある。動的な経路選択行動モデルを作成するには、実際現象を観察して、これらのことを解明していくことが必要となる。

第5は、経路選択行動における利用者の異質性と多様性を反映させることである。これまでの配分モデルでは、利用者の行動特性は均質で一様であると仮定されているが、現実の行動はきわめて複雑である。上で示したように、所要時間のみを要因としても、その変化に対する感度はさまざまである。状況に素直に対応する人もいるし、それまでの行動を変えない人もいる。また実際においては、所要時間以外にも多くの要因が関係してくる。利用者によっては、所要時間の要因を重視しないことも多いであろう。さらには、利用者にはその道路を日常的に走行しているものもいれば、初めてそこを通るものもある。それゆえ、交通管理のような現実的な問題に配分モデルを適用する場合には、このような利用者の異質性、多様性を考慮することが必要となる。

第6は、交通量配分をするにあたってのOD交通量の与え方である。静的モデルにおいてもOD交通量の取り扱いについてはいろいろ問題があるが、特に動的モデルになると、時々刻々のOD交通量の発生量を各ノードごとにどのように与えるかが課題となる。このとき、道路網における交通量動態を知ることができるになれば、利用者は交通状態に応じてトリップの出発時刻を決めるようになると思われるので、発生交通量の時刻分布と道路網交通量は相互に依存関係を有するようになってくる。いまのところ、このような相互依存関係を考慮した動的配分モデルのアプローチは考えられていない。しかし、路車間情報を利用したVICS等の高度交通管理システムが実用に供されるためには、この問題は避けなくては通れない。

その他には、モデルの単純化を図り、操作性の高いモデル開発を目指すことである。一般に道路網の交通流解析は複雑で大規模となるため、計算に大変な時間と費用を要する。交通量配分では、水や電気の流れとは異なるマルチコモディティの流れを扱うため、ODを区別しなければならないことが計算上の大きな負担となっている。したがって、モデルは現実性を追求しながらも、簡略化を達成するという、一見相反する困難な課題を解決しな

ければならない。

7. おわりに

交通モデルの発展経緯、問題点、これからの発展の方向について述べてきた。その中でも特に、道路網交通現象の解析手法である交通量配分モデルを中心に議論を進めてきた。配分モデルは、最近のVICS, IVHS, RTIの開発動向と関連して、静的モデルから動的モデルへと研究の重点が移ってきている。動的配分モデルはまだ残されている問題が多いが、交通状況に応じた高度な交通管理を実現するには不可欠なので、これから飛躍的な発展が期待される。配分モデルに限らず、交通行動モデルはいろいろなレベルで動的な取り扱いが進められつつある。これは、交通政策に対する応答が確かな需要分析を行うには、従来のような静的モデルでは問題が多いことが明らかになってきたからである。

配分モデルも含めたこれらの動的交通モデルが実用モデルとして使用されるようになるには、まず何よりも実際の交通現象をよく観察することであろう。我々は交通現象が複雑な社会現象であるため、仮説や仮定にもとづいてモデルづくりを安易に進めてきたきらいがあるのではないだろうか。また、表面的な現状値との一致性や、数理的な興味に少しとらわれ過ぎた面があるのではないだろうか。交通量、速度、密度の関係を対象にした交通流理論の研究では、実際に交通現象の観察が多く行われたが、交通行動の研究においても同様に実際の行動を繰り返し観測することが重要と思われる。

道路交通量の観測に比べると、交通行動の長期的な調査は容易ではないが、しかし行動の本質を把握するには、観測をする以外に方法がないのである。机上の仮説や仮定だけからでは、実際の現象を正しく反映するモデルを作成することは困難であろう。仮説や仮定を考えるのであれば、その検証をすることが必要である。交通量配分ははじめとする交通モデルの多くの仮説は、まだその現実性について検証がなされていないのである。より効果的な交通計画を実現するためには、交通モデルの真实性を高めることが大切である。それゆえ、交通モデルの研究は再び基本に立ち戻って、交通行動の地道な観測をすることの重要性を認識することを述べておきたい。現

実の交通行動を注意深く継続的に観測することによって、従来の仮説にはない新しい知見が得られ、そこから新しい展開がなされることが期待される。しかし、モデルは交通現象のすべてを捉えられるものではなく、過剰は期待をすることは意味がない。大事なことはモデルによって、交通現象の本質的な特性や傾向を知ることである。

参考文献

- 1) P. Jones, F. Koppelman and J. Orfeul: Activity Analysis -State of the Art and Future Directions, Developments in Dynamic and Activity-Based Approaches to Travel Analysis, Oxford Studies in Transport, pp. 34-55, Avebury, 1990.
- 2) R. Kitamura: Panel Analysis in Transportation Planning -An Overview, Dynamic Travel Behaviour Analysis, Special Issue, Transportation Research, Vol. 24A, No. 6, pp. 401-416, 1990.
- 3) 飯田恭敬, 児玉健, 高山純一: 最適代替案確率の図形表示による総合評価手法特性の比較分析, 土木計画学研究・講演集, pp. 437-444, No. 8, 1986.
- 4) W. Alonso: The Quality of Data and Choice and Design of Predictive Models, Highway Research Board, Special Report 97, National Academy of Sciences, pp. 85, 1968.
- 5) E. Pas: Is Travel Demand Analysis and Modelling in Doldrum?, Developments in Dynamic and Activity-Based Approaches to Travel Analysis, Oxford Studies in Transport, pp. 3-27, Avebury, 1990.
- 6) A. Kanafani: Transportation Demand Analysis, MacGraw-Hill Book, 1983.
- 7) 井上博司: 道路網における等時間原則による交通量配分に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, 昭和50年10月.
- 8) P. Goodwin, R. Kitamura and H. Meurs: Some Principles of Dynamic Analysis of Travel Behaviour, Developments in Dynamic and Activity-Based Approaches to Travel Analysis, Oxford Studies in Transport, pp. 56-72, Avebury, 1990.
- 9) G. Chang and H. Mahmassani: Travel Time Prediction and Departure Adjustment Behaviour Dynamics in a Congested Traffic System, Transportation Research, Vol. 22B, No. 3, pp. 217-232, 1988.
- 10) 飯田恭敬, 内田敬, 宇野伸宏: 通勤者の旅行時間予測機構に関する実験分析, 土木計画学研究・講演集, NO. 13, pp. 335-342, 1990.
- 11) Y. Iida, T. Akiyama and T. Uchida: Experimental Analysis of Dynamic Route Choice Behaviour, Transportation Research, Vol. 26B, No. 1, pp. 17-32, 1992.
- 12) Y. Sheffi: Urban Transportation Networks, Prentice-Hall, Inc., 1985.
- 13) 飯田恭敬: 交通量による影響を考慮した時間比交通量配分, 高速道路と自動車, Vol. 13, No. 5, pp. 28-38, 1970.
- 14) J. L. Horowitz: The Stability of Stochastic Equilibrium in a Two-Link Transportation Network, Transportation Research, Vol. 18B, No. 1, pp. 13-28, 1984.
- 15) 飯田恭敬, 内田敬, 宇野伸宏: 経路選択行動の動態変化に関するシミュレーション分析, 土木計画学研究・講演集, No. 12, pp. 29-36, 1989.
- 16) 飯田恭敬, 内田敬, 山本政博, 村田重雄: 実験アプローチによる動的経路選択行動のモデル化, 土木計画学研究・講演集, No. 14, pp. 271-278, 1991.
- 17) 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分析, 土木学会論文集, 第4部門, 特集論文(投稿中).
- 18) 佐佐木綱監修, 飯田恭敬編著: 交通工学, 国民科学社, 1992.
- 19) M. Ben-Akiva and S. Lerman: Some estimation Results of a Simultaneous Model of Automobile Ownership and Mode Choice to Work, Transportation, Vol. 3, pp. 357-376, 1974.
- 20) P. Bonsall: The Influence of Route Guidance Advice on Route Choice in Urban Networks, Transportation, Vol. 19, pp. 1-23, 1992.