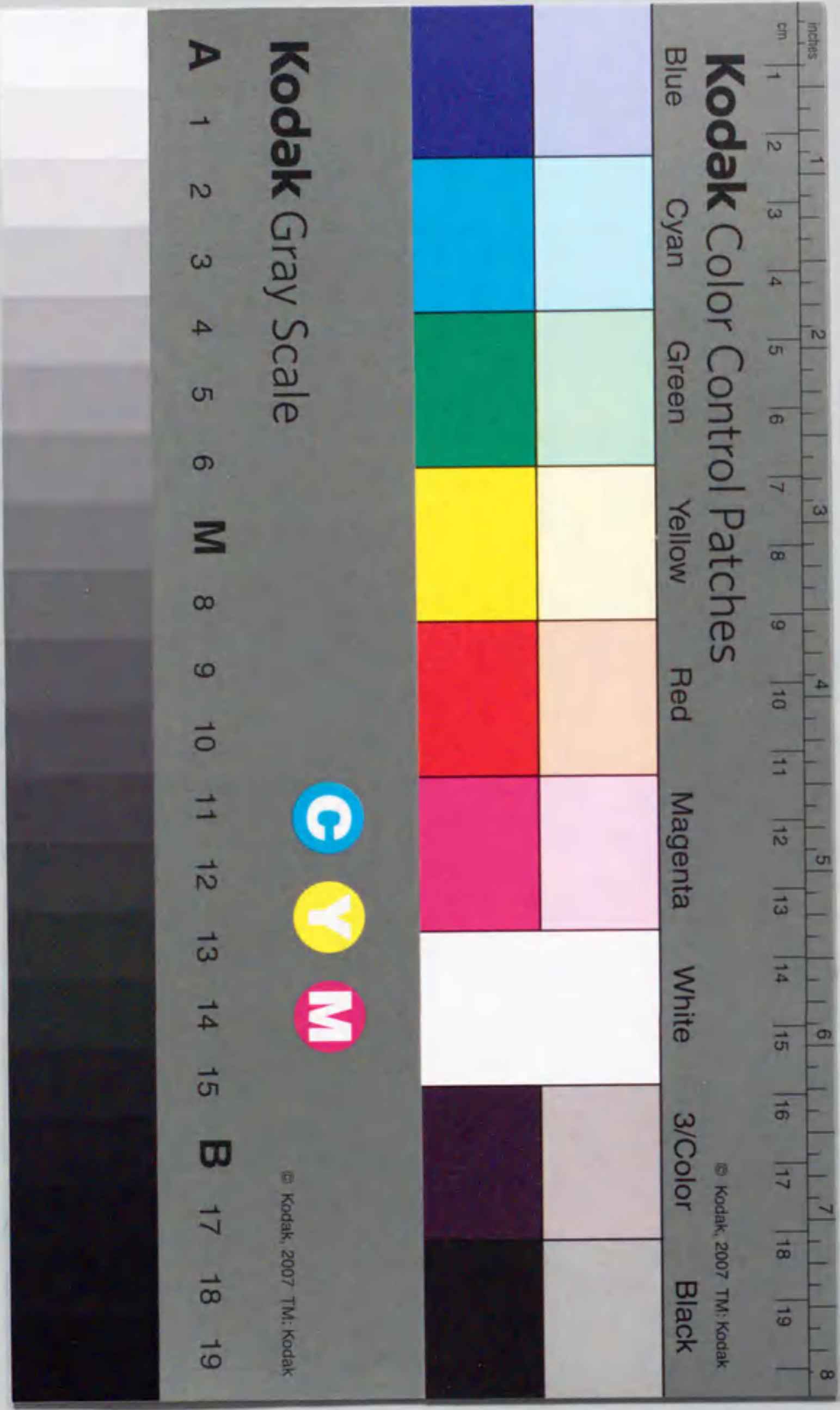


報告番号 甲第 5071 号

交通量配分問題へのファジィ・ニューラルネットワークの適用に関する研究

井ノ口 弘昭



交通量配分問題へのフuzzy・ニューラルネットワークの適用に関する研究

2001年1月

神戸大学 工学部

東京大学

交通量配分問題へのファジィ・ニューラルネットワークの適用に関する研究

2001年1月

井ノ口 弘昭

目 次

第1章 序論.....	1
1.1 本論文の意義と目的.....	1
1.2 各モデルの相互関係.....	2
1.3 本論文の構成.....	3
第2章 交通量配分モデルの現状とその問題点.....	7
第3章 本研究におけるモデル開発の基本的考え方.....	15
第4章 ニューラルネットワークを用いた経路選択モデルの構築.....	19
4.1 経路選択モデルの開発の意義.....	19
4.2 アンケート調査の概要.....	21
4.3 アンケート調査結果の集計.....	22
4.4 経路選択モデルの構築.....	27
4.4.1 ニューラルネットワークの適用.....	27
4.4.2 経路選択モデルの推定結果.....	29
4.5 入力値として用いる指標の検討.....	29
4.5.1 経路の混雑状況の定式化.....	29
4.5.2 信号機や一時停止の数の定式化.....	31
4.5.3 道路の走りやすさの定式化.....	31
4.6 ランダム効用理論を用いたモデルとの比較.....	32
4.7 選択肢集合に関する考察.....	33
4.8 まとめ.....	34
第5章 ファジィ的交通量配分モデルの開発.....	38
5.1 ファジィ的交通量配分モデルの開発の意義.....	38
5.2 ファジィ的交通量配分モデルの配分原則.....	39
5.2.1 可能性測度最大化配分モデル.....	39
5.2.2 満足度最大化配分モデル.....	41
5.2.3 不満最小化配分モデル.....	42
5.3 ファジィ的交通量配分モデルのアルゴリズム.....	47
5.4 まとめ.....	50
第6章 ファジィ的交通量配分モデルの適用.....	52
6.1 仮想道路網による各種配分手法の比較.....	52
6.1.1 1-OD ペアの場合.....	52
6.1.2 複数 OD ペアの場合.....	55

6.2	実道路網を用いた配分精度の検討	57
6.2.1	使用データの概要	57
6.2.2	計算条件	58
6.2.3	配分計算結果	59
第7章	ファジィ的ニューラルネットワークを用いた追従走行モデルの構築	65
7.1	追従走行モデルの開発の意義	65
7.2	ファジィ的ニューラルネットワークを用いた追従走行モデル	66
7.2.1	追従走行モデルの概要	66
7.2.2	ファジィ的ニューラルネットワークについて	66
7.3	GPSを用いた走行データの収集	67
7.3.1	測量用GPS受信機を用いる利点と欠点	67
7.3.2	追従走行モデル構築のための走行調査	70
7.4	追従走行モデルの構築	73
7.5	追従走行モデル推定結果	76
7.6	まとめ	80
第8章	微視的道路交通シミュレーションモデルの開発	84
8.1	微視的道路交通シミュレーションモデルの開発の意義	84
8.2	微視的道路交通シミュレーションモデルの概要	85
8.3	道路網モデル	87
8.4	道路走行モデル	88
8.4.1	速度決定モデル	88
8.4.2	車線変更モデル	89
8.4.3	車両発生モデル	89
8.5	計算手順	90
8.6	スキッピングタイムの検討	92
8.7	豊田市都心部への適用	92
8.7.1	ネットワークおよびデータの概要	92
8.7.2	現況再現	93
8.8	トヨタ自動車本社工場周辺地域への適用	96
8.8.1	ネットワークおよびデータの概要	96
8.8.2	駐車場の設定	96
8.8.3	現況再現性の評価	98
8.8.4	利用駐車場指定方式にした場合の効果分析	100
8.9	まとめ	102
第9章	結論	105

第1章 序論

1.1 本論文の意義と目的

交通需要予測における交通量配分は、分布交通量として予測された車や人の移動を、与えられた交通ネットワーク中の流れとして捕らえ、ネットワークの各部分の交通量を予測する作業であり、その主な目的は、道路網計画を策定する際の基礎情報を提供することである。交通量配分モデルに関する研究は1950年代に all-or-nothing 法、転換率曲線の研究から始まり、最短経路探索アルゴリズムの開発に伴い、大規模な道路網にも適用可能な分割配分法の開発が行なわれ、分割配分法は現在の実務でも広く用いられている。

近年では、交通量配分モデルは単なる道路網計画にとどまらず、交通運用計画、交通管理計画、道路交通情報提供などソフトウェア的対策にも利用されるようになってきている。そこで、現在の実務で用いられている手法の問題点が指摘されつつあり、人間の交通行動に基づいた、より論理性のある配分理論の開発が必要となっている。

一方、都市内においては交通渋滞が慢性化している箇所が多く、時間の損失、燃料消費による経済的損失、排気ガスによる大気汚染が深刻化している。特に、東京23区においては平成9年のピーク時自動車走行平均速度は19km/hであり、全国平均の35km/hと比較しても交通渋滞の深刻さが分かる。また、大気汚染の原因物質の1つとして挙げられる二酸化窒素に注目すると、環境基準である「1時間値の1日平均値が0.04ppmから0.06ppmまでのゾーン内又はそれ以下であること」に対して、「自動車から排出される窒素酸化物の特定地域における総量の削減等に関する特別措置法」の特定地域(首都圏特定地域、大阪、兵庫圏特定地域)の環境基準達成率は、自動車排出ガス測定局で35.7%となっている。道路整備により渋滞が解消することにより排出ガスの量が減少し、大気汚染などの低減につながると考えられるが、用地、予算等の制約から道路の新設・拡幅による渋滞対策が困難になりつつある。そこで、より有効な既存道路の利用のために、道路の交通容量の改善に着目した交差点改良等の対策や、道路の需要管理に着目したTDM(Transportation Demand ManagementあるいはTravel Demand Management)等の政策が注目されている。これらの対策・政策を実施するためには、より詳細な交通行動予測が必要である。

また、利用者の経路選択行動は、費用最小化行動の仮説を用いたものが多い。

利用者の費用に対する認識の不確実性を導入するなどの工夫がなされたモデルも存在するが、必ずしも現実の経路選択行動が十分に表されているとは言えない。利用者の経路選択行動はまだ完全には解明されていないのが現状である。我々の行ったアンケート調査結果では、経路を選んだ理由で、「所要時間が短い」の回答は1位ではあったが、全体の39%であり、道路の走りやすさなども考慮して経路を選択していることが分かった。この経路選択行動を明らかにすることにより、より精緻な交通需要予測を行なうことが出来ると期待されている。

現在、ITS 技術の研究開発が盛んに行なわれている。その中でも、安全運転の支援の開発分野のうちの車間距離警報システム(Adaptive Cruise Control)のような運転補助や自動運転のサービスに大きな期待が寄せられている。これらの研究開発には、車間距離を適正に保つための追従走行挙動のモデル化が非常に重要である。

そこで本研究では、利用者の経路選択行動を分析することを第1の目的とする。そのために、まず自動車運転者の経路選択行動に関するアンケート調査を実施し、定量的な分析を行なった後、ニューラルネットワークを用いた経路選択モデルの構築を行なう。

本研究の第2の目的は、人間の交通行動に基づいた、より論理性のある配分理論を確立するために、各リンクの所要時間にファジィ理論を導入したファジィ的交通量配分モデルの開発を行なうことである。3つの配分原則を提案し、各モデルの比較を行なう。

本研究の第3の目的は、ITS 技術の研究開発にも有用な追従走行挙動のモデル化を行なうことである。GPS 受信機を用いて走行データを収集し、ファジィ的ニューラルネットワークを用いて運転者属性別に追従走行のモデル化を行なう。

本研究の第4の目的は、交差点改良や時差出勤などの交通対策策定の際に有用な微視的道路交通シミュレーションモデルを構築することである。モデルを構築し、豊田市中心市街地およびトヨタ自動車本社工場周辺地域へ適用を行ない、モデルの有用性について検証する。

以上のように、本研究はファジィ理論、ニューラルネットワーク理論を利用して、より論理性のある交通モデルを開発するものである。

1.2 各モデルの相互関係

本研究では、経路選択モデル、追従走行モデル、交通量配分モデル、微視的

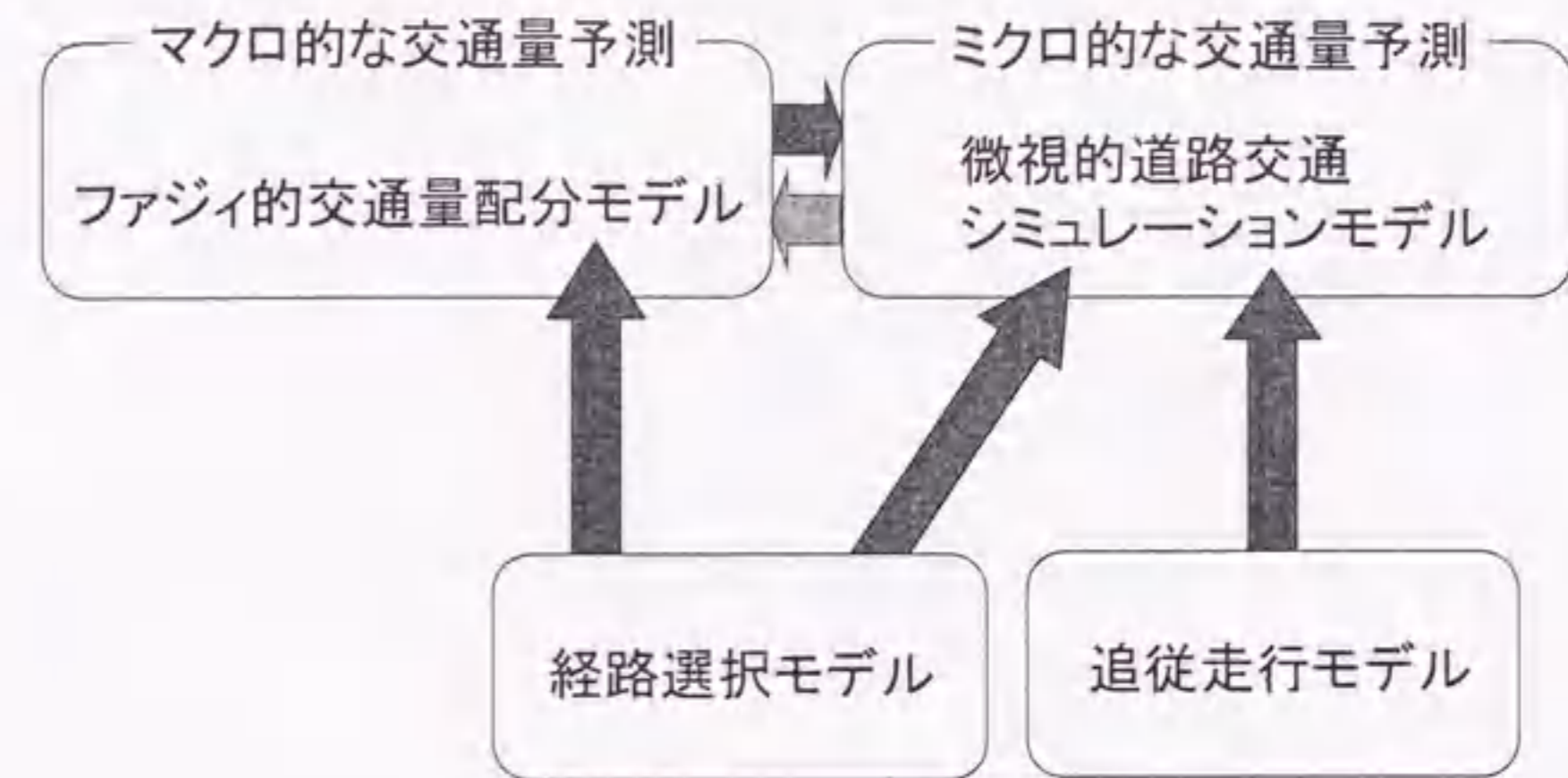


図 1.1 各モデルの相互関係

道路交通シミュレーションモデルを構築するが、各モデルの関係は図 1.1 のようになっている。ファジィ的交通量配分モデルは、都市圏のような広域でかつマクロ的な交通量を予測するツールとして位置付けられる。それに対して、都市内の限られた地域の中で、ミクロ的な交通量や渋滞長などを予測するツールとして微視的道路交通シミュレーションモデルが位置付けられる。通常は、都市圏を対象としたマクロ的な交通量予測を行なった後、その結果を用いて特に注目したい地域はミクロ的な交通量予測を行なうこと、場合によっては微視的道路交通シミュレーションモデルで得られた結果をパラメータとして交通量配分モデルに反映させることから、この2つのモデルは密接な関係を持っている。経路選択モデルは、この2つの交通量予測モデルに組み込まれる重要なモデルの1つである。また、追従走行モデルは微視的道路交通シミュレーションモデルに組み込まれ、シミュレーションの再現性を左右する重要なモデルであり、また運転補助サービスのような ITS の技術開発にも利用されるべきモデルである。

このように本研究で構築を行なうモデルは何れも密接な関係を持っており、これらのモデルを用いることで、都市圏レベルから都市内の細部に渡るまでの総合的な交通量予測を精度よく行なうことが可能となる。

1.3 本論文の構成

本研究は、図 1.2 に示す通り、第1章の序論と第2章から第8章の本論およ

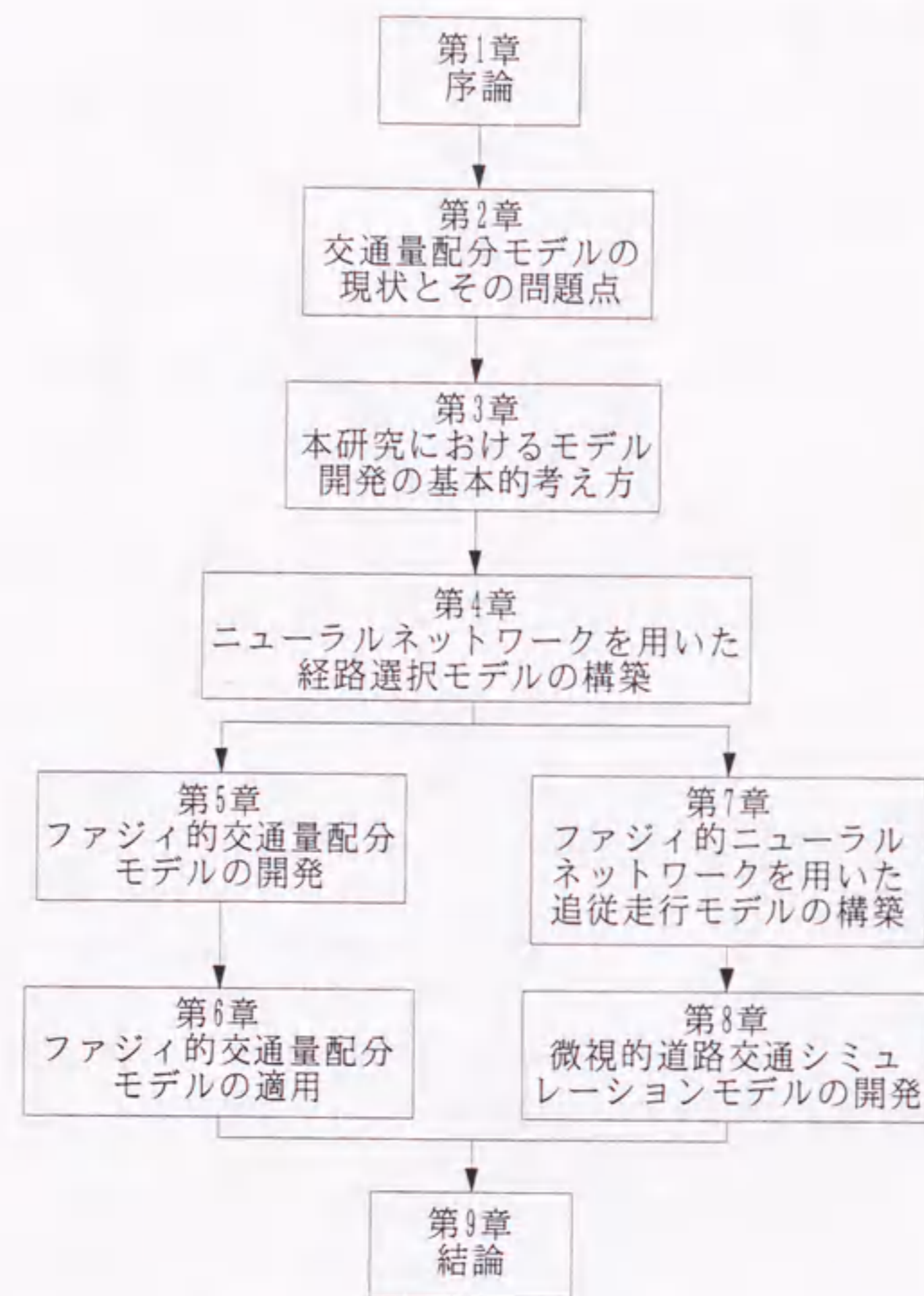


図 1.2 本論文の構成

び第 9 章の結論で構成されている。

第 1 章では、より論理性のある交通量配分モデルの開発の必要性に基づいて本研究を行なう目的について述べた。そして、本研究で構築するモデルの相互関係について述べた。

第 2 章では、交通量配分モデルの現状とその問題点について整理を行なう。既存研究についてレビューを行ないつつ、その問題点を明らかにし、今後の研究の方向性を示す。

第 3 章では、本研究におけるモデル開発の基本的考え方について、ファジィ理論とニューラルネットワーク理論の性質などを述べる。

第 4 章では、ニューラルネットワークを用いた経路選択モデルについて、モデルの開発の意義をはじめに述べ、モデル構築のために行なったアンケート調査の内容と集計結果を示す。次に、ニューラルネットワークを用いた経路選択モデルおよび推定結果を示し、その有用性について述べる。

第 5 章では、ファジィ的交通量配分モデルについて述べる。まず、開発の意義を述べ、次に 3 つの配分原則に関する定義を行ない、それぞれの配分原則の特性について考察を行なう。そして、問題を解くためのアルゴリズムを示す。

第 6 章では、第 5 章で構築を行なったファジィ的交通量配分モデルについて仮想道路網を用いて、他の配分モデルと配分結果の比較を行ない、考察する。次に、名古屋都市圏の実道路網を用いた配分計算を行ない、適用可能性を検証するとともに、従来の配分モデルと配分精度の比較を行なう。

第 7 章では、ファジィ的ニューラルネットワークを用いた追従走行モデルの構築について述べる。まず、測量用 GPS 受信機を用いた計測法を提案し、この方法を用いて 16 名の被験者を対象とした調査を行なった結果を示す。そして、ファジィ的ニューラルネットワークによりモデル化を行なった結果、運転者属性別に適合度の高いモデルが構築できたことを示す。

第 8 章では、微視的道路交通シミュレーションモデルについて述べる。まず、既存研究と本研究で構築を行なうモデルの特徴について述べる。次に、本モデルを豊田市都心部へ適用し、現況再現性の検討を行ない、モデルの有用性について考察する。さらに、詳細な OD データが得られているトヨタ自動車本社工場周辺地域へ適用することで、渋滞長などを基に現況再現性の検討を行ない、利用駐車場を指定した場合の交通予測を行なうことで、渋滞対策の可能性について考察する。

最後の第 9 章では、以上の研究成果について総括する。

参考文献

- 朝倉康夫, 羽藤英二(2000): 交通ネットワーク上の経路選択行動: 観測と理論, 土木学会論文集, No.660/IV-49, pp.3-13.
- 環境庁(2000a): 環境白書(総説), ぎょうせい, pp.228-233.
- 環境庁(2000b): 環境白書(各論), ぎょうせい, pp.21-35.
- 警察庁他(1999): 高度道路交通システム(ITS)に係るシステムアーキテクチャ, 道路・交通・車両インテリジェント化推進協議会.
- 北村隆一(1996): 交通需要予測の課題: 次世代手法の構築にむけて, 土木学会論文集, No.530/IV-30, pp.17-30.
- 北村隆一 他(2000): 新世紀における交通と都市, 土木学会誌, Vol.85-12, pp.3-57.
- 交通工学研究会(1999): 渋滞緩和の知恵袋-TDM モデル都市・ベストプラクティス集-, 丸善.
- 「交通ネットワーク」出版小委員会(1998): 交通ネットワークの均衡分析 - 最新の理論と解法 -, 土木学会.
- Matsoukis, E.C.(1986): Road Traffic Assignment - A Review Part I. Non-Equilibrium Methods, Transportation Planning and Technology, Vol.11, pp.69-79.
- 大口敬(2000): 高速道路単路部渋滞発生解析-追従挙動モデルの整理と今後の展望-, 土木学会論文集, No.660/IV-49, pp.39-51.
- 運輸省(2000): 運輸白書(平成 11 年版), 大蔵省印刷局, pp.28-29.

第2章 交通量配分モデルの現状とその問題点

道路交通量配分は交通需要予測のプロセス中の最終段階に位置するものであり, 与えられた OD 交通量から各道路区間の交通量を予測する作業である。これに関する研究は 1950 年代に all-or-nothing 法, 転換率曲線の研究から始まり, 現在までに多くのモデルが開発されている。また, 例えば星野(1969), Matsoukis (1986a)によって非均衡型の交通量配分問題に関するレビューが行なわれ, Matsoukis ら(1986b), 加藤(1988), 桑原ら(2000)によって均衡型の交通量配分問題を含んだレビューが行なわれている。

交通量配分の代表的なモデルを図 2.1 に示す。なお, 需要変動型モデルは, 交通量配分だけでなく, 分布交通量の予測・機関分担の予測などを同時に行なおうとするものである。

交通量配分モデルを実道路網に適用する際には, 通常は最短経路探索アルゴリズムが必要であり, このアルゴリズムの開発が交通量配分モデルを進展させたと言っても過言ではない。初期の代表的な最短経路探索アルゴリズムとしては, Shimbel(1954), Dantzig(1957), Moore(1959), Dijkstra(1959)により発表されている。また, 初期のレビューとしては Pollack ら(1960)によるものがある。Shimbel 法は, ノード間の距離を要素とした行列を用いて解く方法である。Dantzig 法は, シンプレックス法を基にして, 最小木問題で解く方法である。Moore 法はラベル修正法の一つであり, 1 起点当りの計算量はノード数を N とし, 計算量の上限値を評価する場合によく用いられているオーダー記号(関数などの漸近的な増加あるいは減少の程度を表す記号)を用いて表すと, $O(N^3)$ である。また, Dijkstra 法はラベル確定法の一つであり, 負の長さを持たないという条件下で, 適切な走査順序を示しており, 1 起点当りの計算量は $O(N^2)$ である。従って 1 回の配分での計算量は, セントロイド数を C とすると, $O(C \cdot N^2)$ となる。Dijkstra 法は, 大規模な交通ネットワークに適用する場合は, 比較的効率の良いアルゴリズムであり, 交通ネットワークだけでなく, 非負条件が成立する環境下では, 最短経路探索問題に広く用いられている方法である。これらの方法は 1 起点から全てのノードへの最短経路を求める方法であったが, 全てのノードから全てのノードへの最短経路を求める方法が Floyd(1962)によって開発されている。この方法の計算量は $O(N^3)$ であるが, 交通量配分に適用する際は, 起点になるノードは一部のノードであり, $C \leq N$ より $O(C \cdot N^2) \leq O(N^3)$ が成立するため, Dijkstra 法を繰り返し適用した方が効率的である。

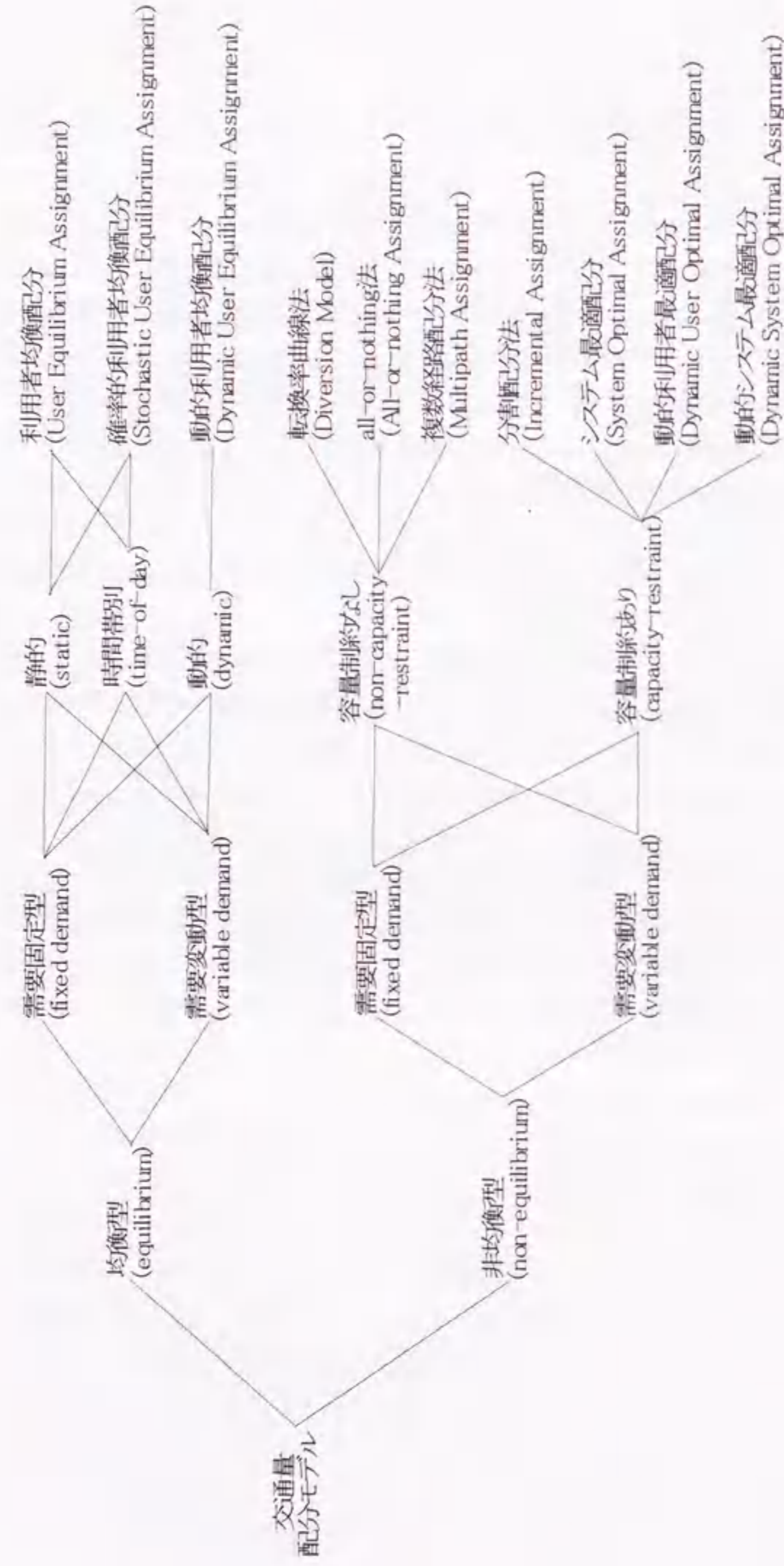


図 2.1 交通量配分モデルの分類

日本においては、北山ら(1967)によって分割配分法を適用した研究が行なわれた。この研究では、名古屋～大阪間の高速道路を含む道路網を扱っている。北山らによって行なわれた研究では、高速道路の扱いを時間評価値を用いて通行料金を時間に換算して負荷する方法をとっていたが、現在の実務では、高速道路への転換確率を求めて、高速道路と一般道路を別にして配分する高速転換率式併用分割配分法が主に用いられている。

現在では、建設省による交通量予測に関する調査研究委員会において、この高速転換率式併用分割配分法についての見直しを行なっている。その主な理由は、

- ① 分割回数や分割比率により、配分交通量が大きく変化し、道路規格の決定に影響を及ぼす可能性がある
- ② リンクパフォーマンス関数を表現する Q-V 式は、交通量予測を主眼として設定されており、所要時間や走行速度の予測には、必ずしも適さない可能性がある

である。この見直しにより、均衡配分を用いた手法へ段階的に移行させていく作業が進行中であり、今後は均衡配分が主流になるであろう。

均衡配分の一つである利用者均衡配分モデルでは、Wardrop(1952)の第 1 原則：

利用される経路の旅行時間は皆等しく、利用されない経路の旅行時間よりも小さいか、せいぜい等しい

を経路選択規範としている。これは、全ての利用者がネットワークの状況について完全な情報を持ち最短経路を選択することを意味する。しかしながら、現状では、情報収集装置は密に配置されていないため、ネットワークの状況について完全な情報を得ることは不可能である。また、VICS(Vehicle Information and Communication System)のような情報提供システムが 100%普及していないため、全ての利用者がネットワークの状況についての情報を持っているとは言えない。さらに、情報を得た全ての利用者は最短経路を選択するとは限らない。このようなことから、Wardrop の第 1 原則の仮定は非現実的であると言える。この非現実的な仮定を取り除くため、利用者の経路選択行動のばらつきを考慮した確率的利用者均衡配分モデルの等価最適化問題として Fisk(1980)によってエントロピー型モデル、Daganzo (1982)によってランダム効用理論を用いたモデルが開発された。その後、宮城ら(1984)によってこれらの 2 つのモデルは互いに双対関係であることが示された。これらのモデルは現実にもみられる利用者の経路選択の多様性や不確実性に注目して、非集計行動モデルに用いられるランダム効用最大化理論に基づいたものである。

このロジット型確率配分の解法としては、Dial(1971)のアルゴリズムが広く用

いられている。この方法では経路を列挙せずに配分計算を行なうことが出来るので、効率良く解を求めることが可能である。しかしながら、配分対象経路は起点から遠ざかるノードのみから構成されているものに限定されるという特性を持っているため、厳密には全ての経路を列挙した場合の配分結果とは一致しない。ネットワークの構造によっては、この特性が無視出来ない影響を与えることもあるため、適用の際には注意する必要がある。また、佐佐木(1965)は吸収マルコフ過程を用いた交通量配分モデルの開発を行なったが、Akamatsu(1996)によって遷移確率を特定の式で与えることにより、ロジット型確率配分と等価なフローパターンが得られることが示された。この方法を使うと、Dialのアルゴリズムで見られた配分対象経路を限定するという問題はないが、解が発散する可能性があることと、配分対象経路が増えることによりIIA特性が増幅される可能性がある。従って、両者の長所・短所を十分に理解し、検討してアルゴリズムの選定をするべきである。

プロビット型確率配分の解法としては、Monte Carlo Simulationによる方法がある。プロビット型では、IIA特性の問題を解決しており、理論的に優れているが、膨大な計算コストが必要なため、実際には特殊なケースでの計算以外には用いられていないのが現状である。

確率的利用者均衡配分モデルでは経路の所要時間の不確実性と利用者の選択行動のばらつきに同じ認知誤差を表す確率変数を用いている。しかしながら、これらの2つの曖昧性は、その性格が異なるため分けて考えた方がよい。所要時間の不確実性に注目した場合、不確実性を生じさせる要因は利用者にあるのではなく道路側にあり、また、その不確実性も完全にランダムではなく、ある程度の規則性を持っているため、効用関数に確率変数を導入したランダム効用最大化理論を用いるより、曖昧さを数学的に表現するファジィ理論を用いた方が妥当であると考えられる。また、利用者の選択行動のばらつきについては、ランダム効用最大化理論を適用することが最適であろう。この考えに基づいた配分法を第5章で述べる。

現在までに開発が行なわれてきた交通量配分モデルは、均一車種を対象としたものがほとんどであった。交通量配分モデルが単なる道路網計画だけでなく、各種の交通政策の評価にも用いられようとしている今日では、均一車種では不十分であることが考えられる。例えば、排出ガス量の予測を行なう場合、ディーゼルエンジンとガソリンエンジンとでは排出ガスの成分や量が大きく異なり、ディーゼルエンジンが主流の大型車とガソリンエンジンが主流の普通車とを同一に考えることは出来ないであろう。車種別の交通量配分に関する研究としては、河上ら(1991)によって普通車と大型車とをそれぞれ均衡させて配分する手法が提案された。等価な数理最適化問題を構成出来ないような問題では、変分不

等式問題に置き換える手法が注目されており、車種別の交通量配分モデルに適用することも可能であると考えられ、その開発が望まれる。

近年では、桑原ら(2000)のレビューにもあるように静的な交通量配分問題に時間軸を考慮した交通量配分問題の研究が活発に行なわれている。以前では、シミュレーションによる方法、藤田ら(1988)による時間帯別配分手法が主流であったが、動的な交通量配分モデルの開発も行なわれている。動的な交通量配分モデルは配分原則により次に述べる3種類が考えられる。

ある計画時間帯におけるネットワークシステム全体での総走行費用を最小化するような時々刻々のフローパターンを求める動的システム最適(DSO)配分モデルは、Merchantら(1978a,b)によって定式化された。この定式化では、交通量配分を離散時間で扱い、非凸型数理計画問題としている。Frieszら(1989)はMerchantらのモデルを連続時間として定式化を行なった。また、Ghaliら(1995)はlocal marginal delayを使用した多起点多終点の問題のアルゴリズムを示し、250リンクの道路網を対象として計算を行ない、その有用性を検証している。

瞬間的な最短経路へ時々刻々配分する動的利用者最適(DUO)配分モデルは、Wieら(1990)によって多起点多終点の問題が扱われた。その後、Lamら(1995)によって多起点1終点のネットワークでのアルゴリズムが示され、簡単な道路網を対象に計算が行なわれている。また、桑原ら(1997)によって、Physical Queueを扱った多起点多終点の問題の定式化とアルゴリズムが示された。

全ての瞬間における全ての利用者が選択した経路が事後的に見ても各自の真の最短経路となっているようなフローパターンを求める動的利用者均衡(DUE)配分モデルは、Gazis(1974)によって扱われた。その後、一般的な道路網を対象とした計算法はSmith(1993)、Frieszら(1993)によって開発が行なわれ始めた。また、Physical Queueを扱った問題がLiら(2000)によって定式化された。

近年の電子計算機の演算速度の大幅な向上と記憶領域の拡大によって、実道路網を用いた動的な交通量配分の計算も可能になりつつある。しかしながら、動的な交通量配分の計算にふさわしいODデータ等のデータの整備はまだ不十分であると言わざるを得ない。従来の記入式の調査法に替わり、PHS(Personal Handyphone System)等の携帯端末を使用した交通調査法が例えば高橋ら(1999)、寺部(1999)によって研究・提案され始めており、このような調査法に基づいた詳細なデータが十分に整備されれば、動的な交通量配分モデルが予測ツールとして有効に機能するであろう。

参考文献

- Akamatsu, T.(1996) : Cyclic Flows, Markov Process and Stochastic Traffic Assignment, *Transportation Research*, Vol.30B, No.5, pp.369-386.
- Daganzo, C. F.(1982) : Unconstrained External Formulation of Some Transportation Equilibrium Problems, *Transportation Science*, Vol.16, No.3, pp.332-360.
- Dantzig, G. B.(1957) : Discrete-variable Extremum Problems, *Operations Research*, Vol.5, pp.266-277.
- Dial, R. B.(1971) : A Probabilistic Multipath Traffic Assignment Model which Obviates Path Enumeration, *Transportation Research*, Vol.5, pp.83-111.
- Dijkstra, E. W.(1959) : A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, *Numerische Mathematik*, Vol.1, pp.269-271.
- Fisk, C.(1980) : Some Developments in Equilibrium Traffic Assignment Methodology, *Transportation Research*, Vol.14B, pp.243-245.
- Floyd, R. W.(1962) : Shortest Path, *Communications of the ACM*, Vol.5, No.6, pp.345.
- Friesz, T. L., J. Luque, R. Tobin, B. Wie(1989) : Dynamic Network Traffic Assignment Considered as a Continuous Time Optimal Control Problem, *Operations Research*, Vol.37, pp.893-901.
- Friesz, T. L., D. Bernstein, T. Smith, R. Tobin, B. Wie(1993) : A Variational Inequality Formulation of Dynamic Network User Equilibrium Problem, *Operations Research*, Vol.41, pp.179-191.
- 藤田素弘, 松井寛, 溝上章志(1988) : 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*, No.389/IV-8, pp.111-119.
- Gazis, D. C.(1974) : Modeling and Optimal Control of Congested Transportation Systems, *Networks*, Vol.4, pp.113-124.
- Ghali, M. O., M. J. Smith(1995) : A Model for the Dynamic System Optimum Traffic Assignment Problem, *Transportation Research*, Vol.29B, No.3, pp.155-170.
- 星野哲三(1969) : 交通量配分理論の分類と特質, *高速道路と自動車*, Vol.12, No.8, pp.27-34.
- 石畑清(1989) : アルゴリズムとデータ構造, 岩波書店, pp.260-276.
- 加藤晃(1988) : 交通量配分理論の系譜と展望, *土木学会論文集*, No.389/IV-8, pp.15-27.
- 河上省吾, 徐志敏, 広島康裕(1991) : 車種別均衡配分モデルに関する実証的な研究, *土木学会論文集*, No.431/IV-15, pp.57-66.
- 北山種夫, 戸山一雄, 堀江幸男(1967) : 新しい手法を応用した道路網の交通量配分, *高速道路と自動車*, Vol.10, No.8, pp.25-33.
- 「交通ネットワーク」出版小委員会(1998) : 交通ネットワークの均衡分析 - 最新の理論と解法 -, 土木学会.
- 桑原雅夫, 赤松隆(1997) : 多起点多終点 OD における渋滞延伸を考慮したリアクティブ動的利用者最適交通量配分, *土木学会論文集*, No.555/IV-34, pp.91-102.
- 桑原雅夫, 赤松隆(2000) : 動的ネットワーク解析—これまでの知見とこれからの展望—, *土木学会論文集*, No.653/IV-48, pp.3-16.
- Lam, William H. K., Hai-Jun Huang(1995) : Dynamic User Optimal Traffic Assignment Model for Many to One Travel Demand, *Transportation Research*, Vol.29B, No.4, pp.243-259.
- Li, J., O. Fujiwara, S. Kawakami(2000) : A Reactive Dynamic User Equilibrium Model in Network with Queues, *Transportation Research*, Vol.34B, pp.605-624.
- 松井寛(1998) : 次世代交通システムにおけるネットワーク分析手法の展開, 平成8・9年度科学研究費補助金(試験研究(B)(1))研究成果報告書.
- Matsoukis, E. C.(1986a) : Road Traffic Assignment - a Review Part I. Non-equilibrium Methods, *Transportation Planning and Technology*, Vol.11, pp.69-79.
- Matsoukis, E. C., P. C. Michalopoulos(1986b) : Road Traffic Assignment - a Review Part II. Equilibrium Methods, *Transportation Planning and Technology*, Vol.11, pp.117-135.
- Merchant, D. K., G. L. Nemhauser(1978a) : A Model and Algorithm for the Dynamic Traffic Assignment Problems, *Transportation Science*, Vol.12, pp.183-199.
- Merchant, D. K., G. L. Nemhauser(1978b) : Optimality Conditions for a Dynamic Traffic Assignment Model, *Transportation Science*, Vol.12, pp.200-207.
- 宮城俊彦, 加藤晃(1984) : ランダム効用理論を基礎とした交通統合モデル, *土木計画学研究・論文集* 1, pp.99-106.
- Moore, E. F.(1959) : The Shortest Path Through a Maze, *Proceedings of an International Symposium on the Theory of Switching*, PartII, pp.285-292.
- 森津秀夫(1990) : 交通ネットワーク表現と最短経路探索法, *交通工学*, Vol.25,

No.6, pp.21-31.

Pollack, M., W. Wiebenson(1960) : Solutions of the Shortest-route Problem-A Review, Operations Research, Vol.8, pp.224-230.

佐佐木綱(1965) : 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.

Shimbel, A.(1954) : Structure in Communication Nets, Proceedings of the Symposium on Information Networks, Polytechnic Institute of Brooklyn, pp.199-203.

Smith, M. J.(1993) : A New Dynamic Traffic Model and the Existence and Calculation of Dynamic User Equilibria on Congested Capacity-constrained Road Networks, Transportation Research, Vol.27B, pp.49-63.

高橋厚年, 羽藤英二, 朝倉康夫(1999) : 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, 土木学会土木計画学研究・講演集, No.22(1), pp.413-416.

寺部慎太郎(1999) : PHS位置情報データの交通行動分析における利用可能性, 土木学会土木計画学研究・講演集, No.22(1), pp.417-418.

Wardrop, J. G.(1952) : Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, Proceedings of the Institute of Civil Engineers Part II, pp.325-378.

Wie, B. W., T. L. Friesz, R. L. Tobin(1990) : Dynamic User Optimal Traffic Assignment on Congested Multidestination Networks, Transportation Research, Vol.24B, pp.431-442.

第3章 本研究におけるモデル開発の基本的考え方

道路の交通量は、個人が車を利用して、ある時刻に、ある出発地から目的地まで、任意の経路を使用して移動しようと思決定を行ない、行動した結果、生じるものである。人間の行動は、例えば「7時40分に出発し、所要時間が最も短い経路を使用する」というような厳密に決まったルールがあるわけではなく、「7時40分頃に出発し、だいたい早く行ける経路を選ぶ」というように曖昧性を持っている。従って、人間が行動した結果生じる交通現象の予測を正確に行なうことは容易ではない。

従来の交通経路選択では、Wardropの第1原則である等時間原則のような規範に従うという仮定に基づくモデルや人々の経路に対する評価の分布を効用の誤差項で表すと仮定したモデルが一般的に用いられてきた。これらの仮定はマクロ的な視点では、大きく実際からずれているとは言えないが、これらの仮定に基づいたモデルを用いて精緻な交通量の予測を行なうことには限界がある。

1965年にL.A.Zadehによりファジィ集合の概念が提案された。このファジィ集合は、言語の曖昧さを取り扱うことが出来るという特長を持つ。これは、先程の「7時40分頃に出発する」や「だいたい早く行ける経路を選ぶ」といった曖昧性を含んだ事象をそのまま記述することが可能であるということである。

例えば、「7時39分~41分に出発する」に対して7時42分に出発した場合、当たっているとは言えない。しかしながら、「7時40分頃に出発する」に対して7時42分に出発した場合、ほとんど当たっていると言える。また、7時45分に出発した場合は、少しだけ当たっていると言える。この当たり具合の程度を与える関数がメンバーシップ関数である。ファジィ集合でない一般的な集合であ

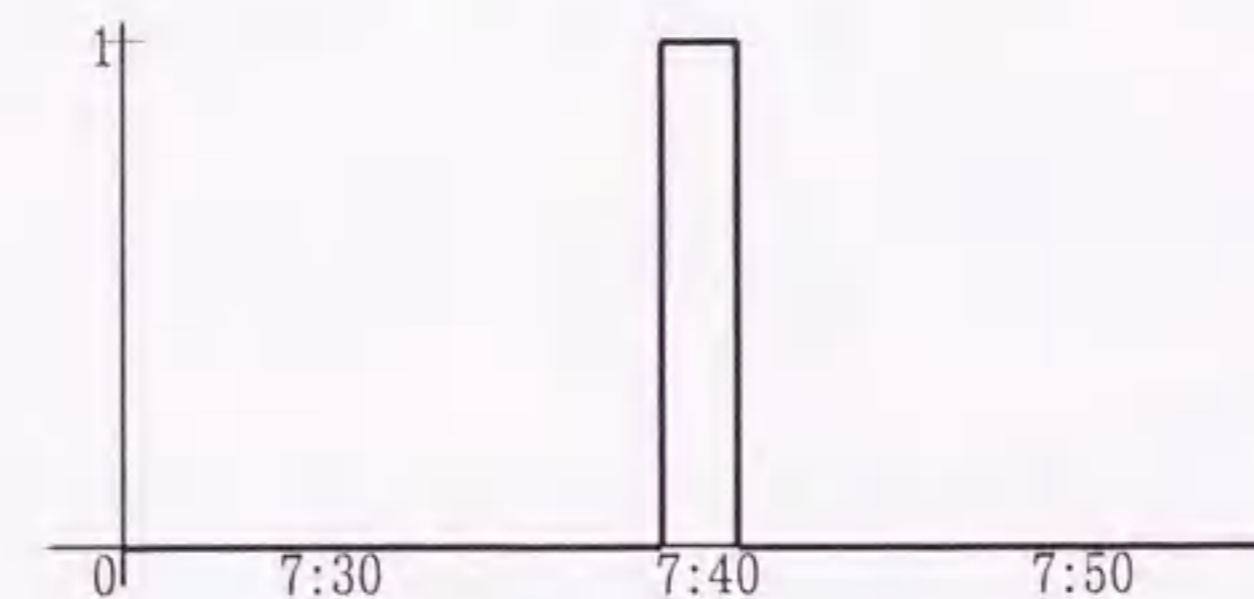


図 3.1 クリस्प集合のメンバーシップ関数

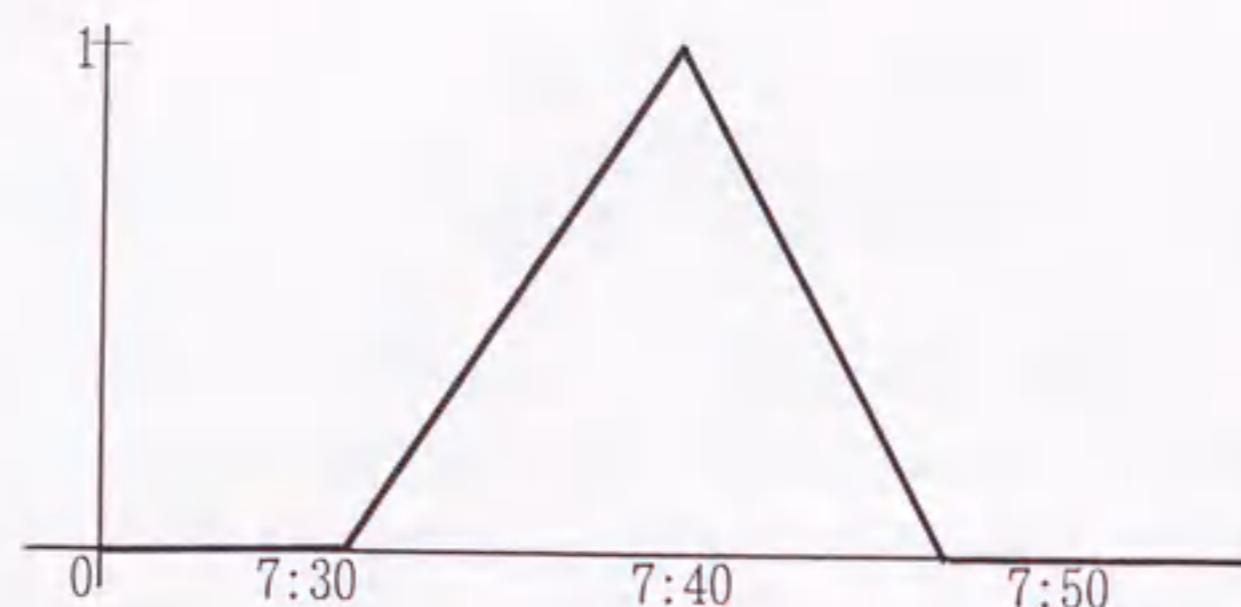


図 3.2 ファジィ集合のメンバーシップ関数

るクリスプ集合では、「7時39分～41分に出発する」のメンバーシップ関数は、図 3.1 のように表される。一方、ファジィ集合である「7時40分頃に出発する」のメンバーシップ関数は図 3.2 のように表すことができる。両者を比較すると、明らかにファジィ集合の方が人間の意思決定ルールに近い。従って、本研究で構築を行なっていくモデルにファジィ理論を組み込むことにより、人間の意思決定ルールにより近づいたモデルを作成することができる。

現在までに構築されてきたモデルは、モデルの推定と適用を別のプロセスで行なうことを前提とされてきた。例えば、一度推定されたモデルに新たにデータを1つ追加して再推定したい場合、最尤推定法では始めから計算をやり直さなければならない。近年では、情報収集技術が向上し、オンラインで各種の情報が得られるようになってきているが、これでは収集したデータを無駄にすることになりかねない。

1940年代から始まったニューラルネットワークに関する研究は、Rumelhartら(1986)による誤差逆伝播学習法の開発により注目を集め、現在では文字認識や株価予測などをはじめ、様々な問題に適用されている。また、ニューラルネットワークとファジィ理論を組み合わせた研究も盛んに行なわれている。ニューラルネットワークは、神経細胞をモデル化したものであり、学習を行なうことにより、望ましい出力を得ることが出来る。ニューラルネットワークによるモデル化は、教師データを順次与えて学習を行なっていくことから、データを追加して再推定する場合でも、計算を始めからやり直す必要はなく、モデルの推定と適用を同じプロセスで行なえることから、オンライン処理を行なう状況下では、有効な手段である。

また、人間の思考過程を単純な数式モデルで表すことは困難であると考えられる。ロジットモデルなどの非集計行動モデルでは、より単純なモデルで表すことを目指している。一般的には、モデルを単純化すると、省略した部分の影響が考慮されず、モデルの適合度が下がるため、適合度との兼ね合いでモデル

の構造を決定している。

フィードフォワード型のニューラルネットワークでは、以下の性質を持つ。

入力層、中間層、出力層の3層から成るフィードフォワード型ニューラルネットワークにより、どんな関数でも高い精度で近似できる。ただし、近似精度を高めるには、中間層の素子数を増やさなければならない。

この性質を利用することで、単純な数式モデルでは表すことが出来なかった人間の思考過程をモデル化することが可能である。

これらのことから、特に人間の行動した結果生じる交通現象などの予測には、場合に応じてファジィ理論、ニューラルネットワーク理論を使用することは有効な手段であると考えられるため、本研究ではこれらを使用したモデルを開発していく。

参考文献

- 土木学会(1995)：非集計行動モデルの理論と実際，土木学会，pp.33-90.
熊沢逸夫(1998)：学習とニューラルネットワーク，森北出版，pp.21-34.
Rumelhart, D.E., G. E. Hinton, R. J. Williams(1986): Learning Representations by Back-propagation Errors, Nature, 323, pp.533-536.
寺野寿郎, 浅居喜代治, 菅野道夫(1987)：ファジィシステム入門，オーム社，pp.1-37.
臼井支朗, 岩田彰, 久間和生, 浅川和雄(1995)：基礎と実践ニューラルネットワーク，コロナ社，pp.15-31.
Zadeh, L. A.(1984)：実用化が始まったファジィ理論 人工知能からプロセス制御まで実システムへの応用が進む，日経エレクトロニクス，No.357, pp.166-182.

第4章 ニューラルネットワークを用いた経路選択モデルの構築

4.1 経路選択モデルの開発の意義

交通量配分モデル等で用いられている運転者の経路選択基準は，最短所要時間経路を選択するとしたものが多い。しかしながら，我々が行なったアンケート調査によると，経路を選んだ理由で「所要時間が短い」の回答は1位であったが，全体の39%であった。このことから道路の走りやすさなども考えて経路を選択していると言える。

過去の主な経路選択行動の分析に関する研究で用いられている説明変数を表にしたものを表4.1，使用モデルを表4.2に示す。これらの説明変数は個人属性とトリップ属性，道路状況等に分類される。ITS技術の導入により，最近の研究では交通情報に関する項目が追加されたモデルも多く見られる。また，さまざまなダミー変数が導入されており，工夫を凝らしたモデルが数多く見受けられる。1つのモデルの中での説明変数の数は，所要時間の1つだけのものから，9個の説明変数を組み込んだものまで様々であるが，非集計行動モデルを用いたモデルは説明変数が多くなる傾向がある。これらの多くのモデルはロジットモデルあるいはファジィ理論を使用したモデルとなっている。ファジィ理論を使用したモデルでは，分析者がルールを設定し，メンバーシップ関数を決めることによってモデル化が行なわれている。人間の思考の複雑さを考えると，このような仮定を正確に行なうことは容易ではない。そのような場合，神経細胞をモデル化したニューラルネットワークを用いてモデル構築を行なうことは有効な手段である。

ニューラルネットワークを用いた経路選択モデルとしてはYangら(1993)によるものがある。このモデルでは，高速道路と一般道路の選択を扱っている。一般道路での複数の経路を対象とした選択モデルは，特定の経路を対象としたものは幾つか存在するが，一般的な道路網に適用可能なモデルは，ほとんど開発が行なわれていない。そこで本章では，まずアンケート調査の結果を分析することにより，経路選択行動の特性を分析し，一般的な道路網に適用可能な複数の経路を対象とした選択を行なうことが出来るモデルをニューラルネットワークを用いて構築する。

表 4.1 経路選択モデルの説明変数

説明変数	論文番号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
性別・ダミー				○				○		○
年齢・ダミー						○			○	○
初心運転者・ダミー				○						
年収・ダミー						○				
職業ドライバー・ダミー						○				
トリップ属性・ダミー					○					○
貨物車・ダミー						○				
トリップ頻度・ダミー						○				
目的地域・ダミー						○				
短距離トリップ・ダミー								○		○
代替ルート・ダミー										○
到着時間制約・ダミー										○
旅行距離の対数									○	
前回の経路・ダミー						○				
知覚所要時間	○	○			○		○			
経路2の知覚所要時間の分散								○		
経路1と2の知覚所要時間差								○		
経路1と2の知覚所要時間比									○	
経路1の旅行時間の信頼性・ダミー									○	
過去の走行速度			○							
知覚混雑度							○			
知覚危険度							○			
過去の遅れ時間			○	○						
交通情報への感度		○		○						
交通情報での指示・ダミー			○	○					○	
過去の指示に従った時の満足度			○							
指示に従わなかった時の満足度			○							
旅行前情報を受け取ったか・ダミー								○		
表示板供用開始からの経過時間						○				
最低速度					○					
信号密度					○					
車線数					○					
路線・ダミー					○	○				
高速利用・ダミー									○	

表 4.2 経路選択モデルの使用モデル

論文番号	使用モデル	著者
1	見込み走行費用による最短経路	飯田 恭敬ら(1996)
2	ファジィ理論	Tsippy Lotan ら(1993)
3	ニューラルネットワーク	Hai Yang ら(1993)
4	二項ロジットモデル	Kenneth M. Vaughn ら(1993)
5	ネステッドロジットモデル	藤井 聡ら(1994)
6	多項ロジットモデル	中原 正顕ら(1994)
7	ファジィ・ニューロモデル	坪井 兵太ら(1996)
8	二項ロジットモデル	Mohamed A. Abdel-Aty ら(1995a)
9	二項ロジットモデル	Mohamed A. Abdel-Aty ら(1995b)
10	ordered プロビットモデル	Richard H. M. Emmerink ら(1996)

4.2 アンケート調査の概要

経路選択行動を分析するためにアンケート調査を行なった。調査の概要を表 4.3, 対象地域を図 4.1 に示す。本調査では、通勤・通学時と買い物時とに分けて、利用経路、代替経路、各経路の最小・平均・最大所要時間、混雑状況・信号機や一時停止の数・道路の走りやすさの各評価、経路を利用する理由、経路を変更するための条件を聞いている。経路については地図上に実際に記入してもらった。本来であれば、混雑状況などについては例えば平均走行速度や混雑率などを質問することが望ましいが、回答者が数値を正しく答えてくれることは期待出来ない。従って、本研究では回答者が答え易い 5 段階評価で評価してもらい、後から地図に記入された経路を基に回帰分析によってそれらを推定する方式を採用した。

表 4.3 アンケート調査の概要

実施日	1999年6月・9月
配布/回収数	2000 / 307 部 (回収率 15%)
配布地域	名古屋市千種区東部および名東区西部 (対象地域の世帯数: 41,380 世帯)
配布・回収法	訪問配布・郵送回収

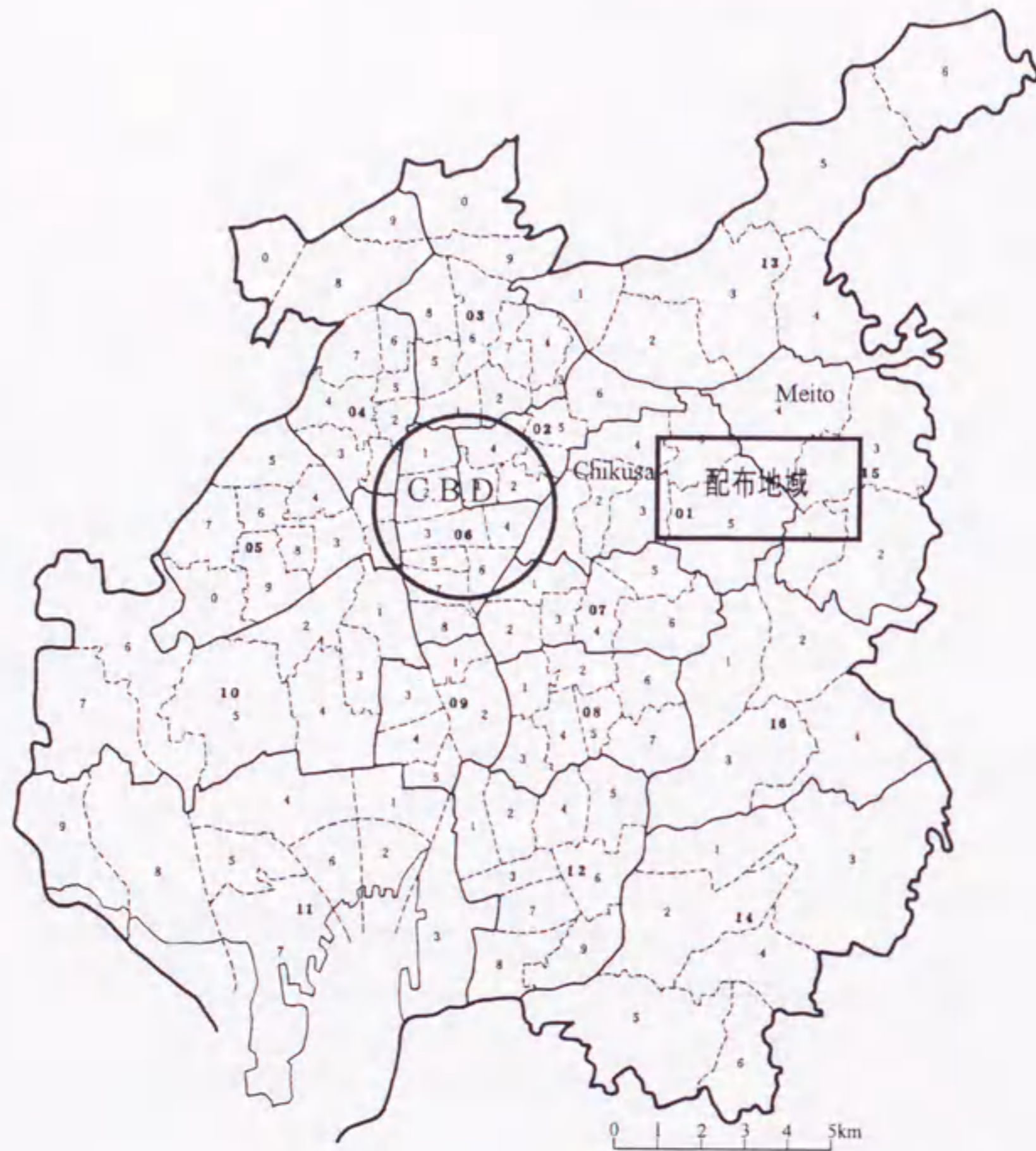


図 4.1 調査対象地域

4.3 アンケート調査結果の集計

通勤・通学時において普段利用する経路の平均所要時間の分布と 1991 年に行なわれた第 3 回中京都市圏パーソントリップ調査結果を対象地域で集計したものとの比較を図 4.2 に示す。両者を比較すると、若干のずれはあるものの、ほぼ同様の分布形になっていることが分かる。また、アンケート調査の結果では、10 分以内の回答が約 6%、11~30 分が最も頻度が高くなっている。そして、所要時間が 30 分以内が 56%、75%が 40 分以内であることが分かる。

普段利用する経路と代替経路の平均所要時間差の分布を図 4.3 に示す。約 7%

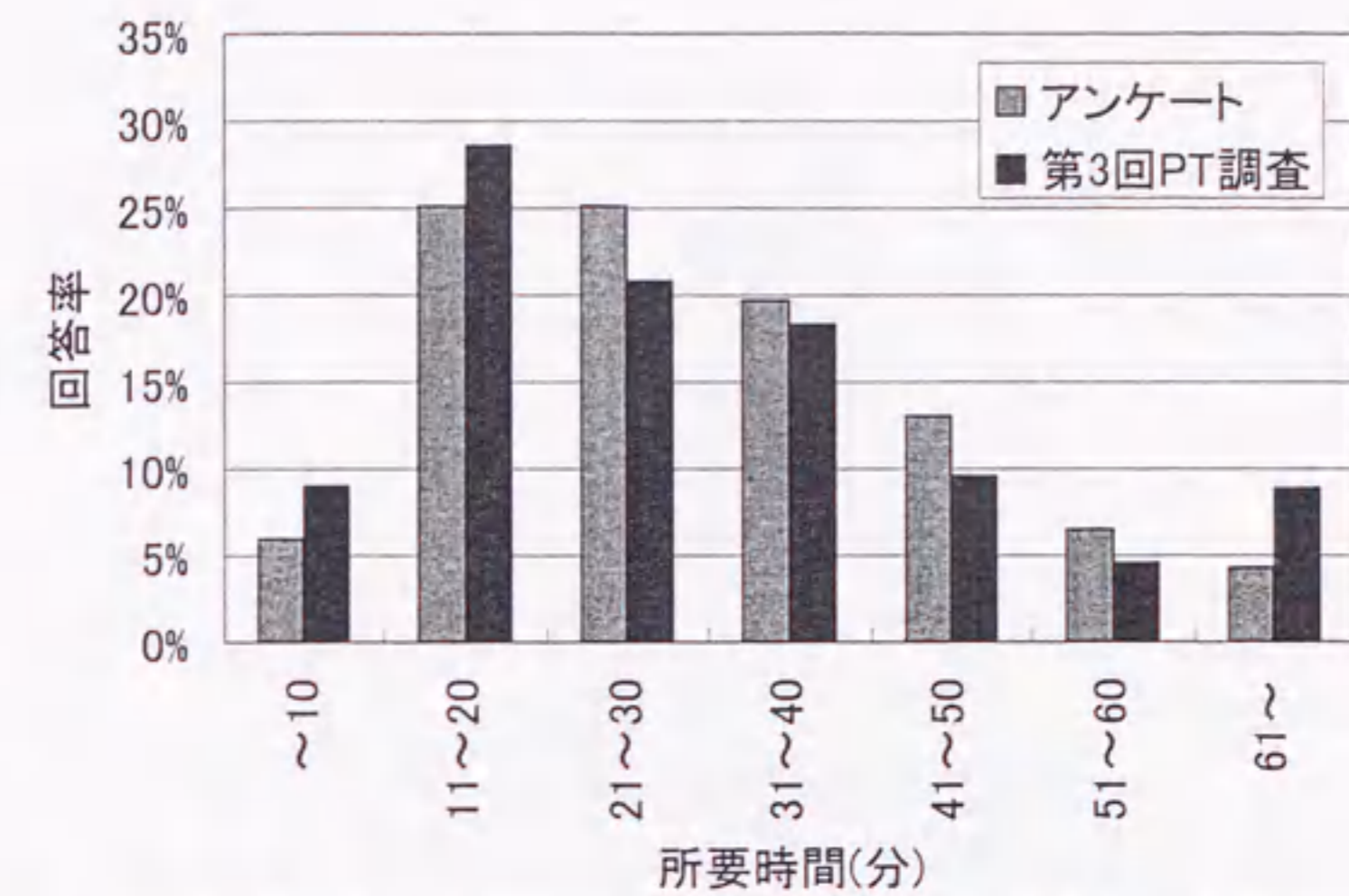


図 4.2 普段利用する経路の平均所要時間の比較(通勤・通学時)

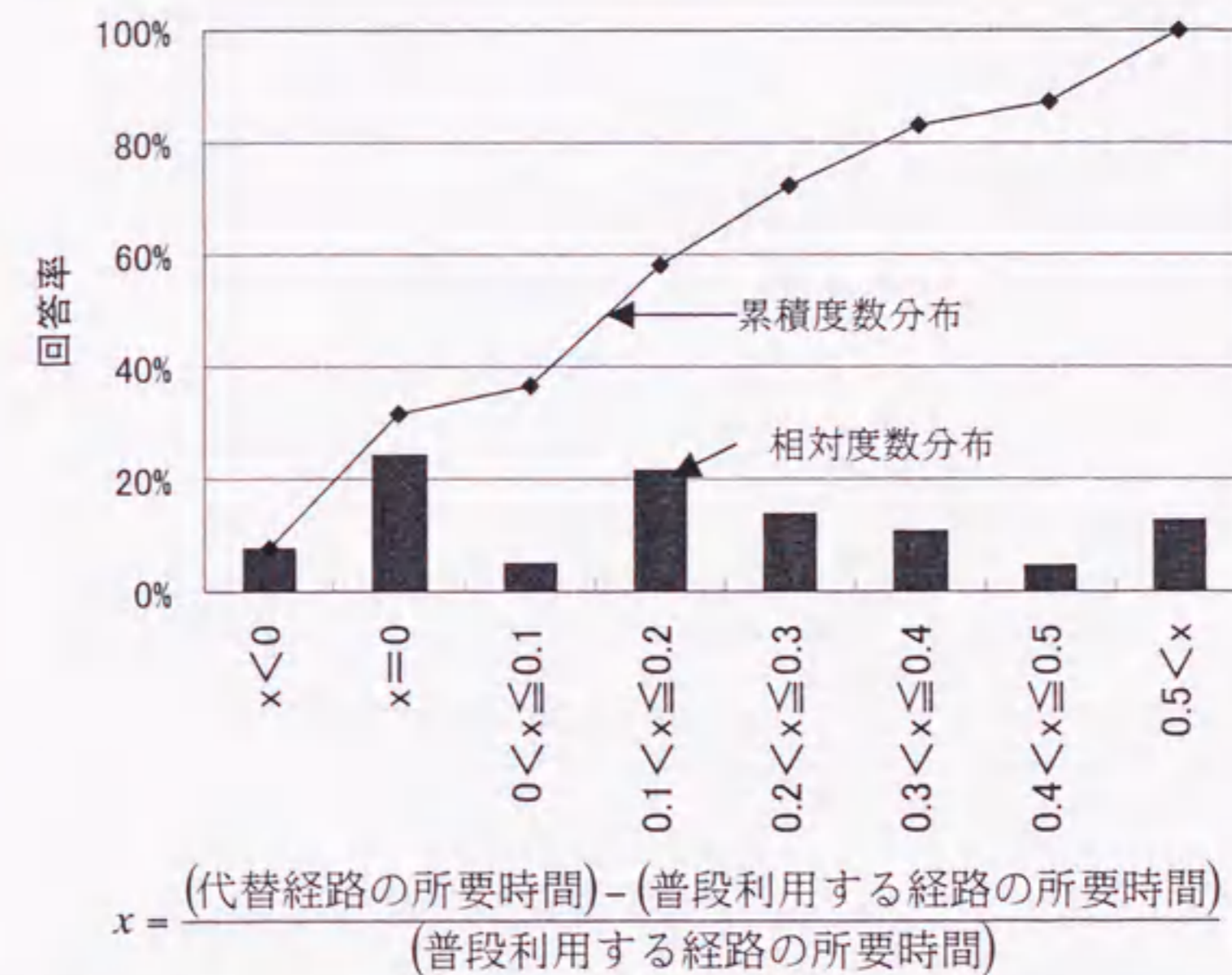


図 4.3 普段利用する経路と代替経路の平均所要時間差の割合

の運転者は所要時間が長い経路を選択しており、どちらも同じという回答を含めると、約 3 割になる。アンケート調査の所要時間は回答者の知覚値であるため、この 3 割の回答者は明らかに所要時間以外を考慮して経路を選択していると言える。

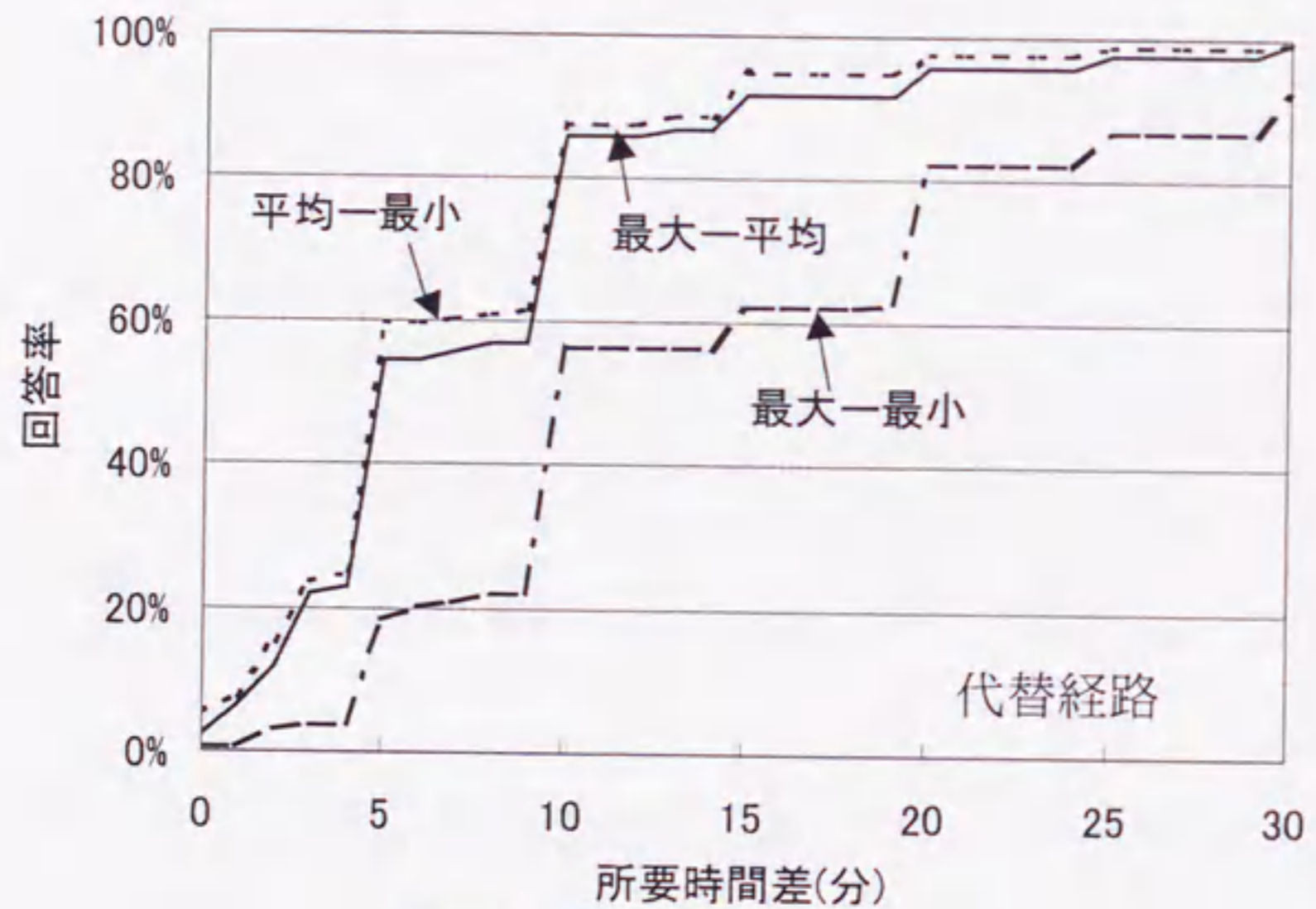
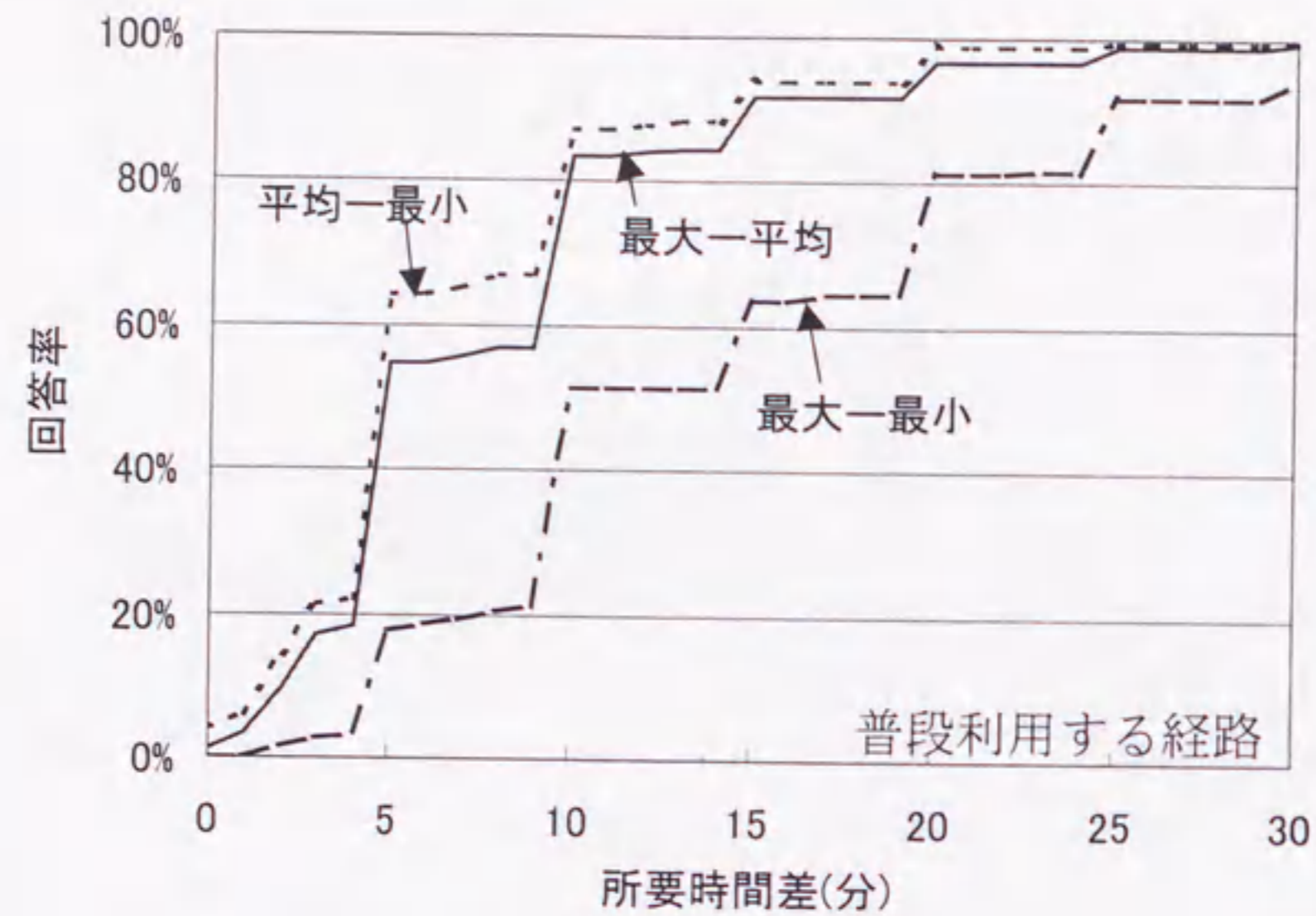


図 4.4 所要時間差の分布

平均所要時間と所要時間の最大値・最小値との関係を図 4.4, 図 4.5, 表 4.4 に示す。平均値と最大値・最小値との差は5分以内が半数以上を占める。また、普段利用する経路も代替経路も最小値と平均値との差より平均値と最大値の差の方が大きい。普段利用する経路と代替経路を比較すると、各所要時間差の平均値で見ると代替経路の方が小さくなっているが、標準偏差は大きくなっている。つまり、代替経路の方が回答者によるばらつきが大きいことが分かる。

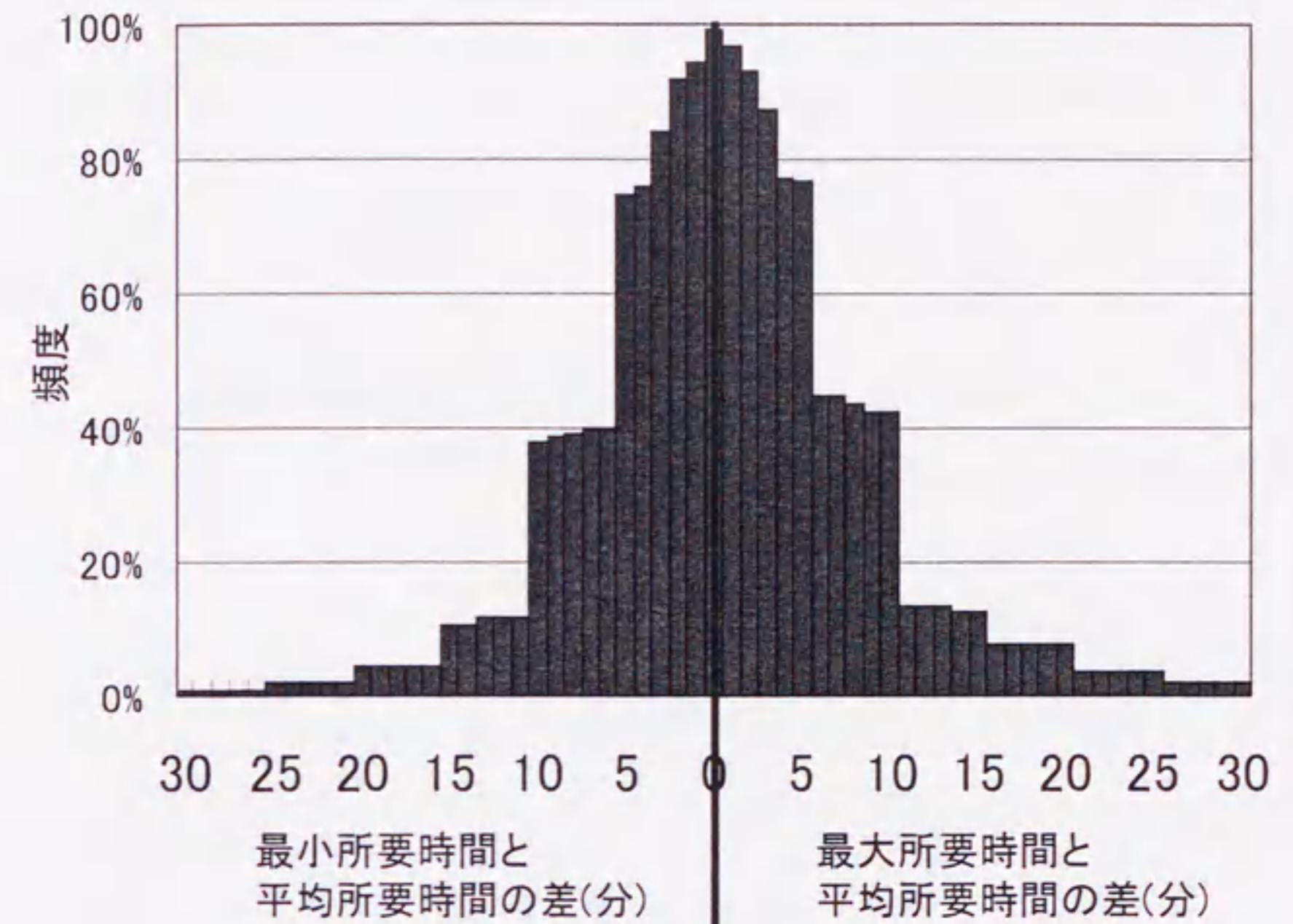


図 4.5 普段利用する経路の所要時間差の分布

表 4.4 所要時間差の集計結果

普段利用する経路			
	平均-最小	最大-平均	最大-最小
平均値(分)	7.0	8.2	15.2
標準偏差(分)	5.1	6.2	9.8

代替経路			
	平均-最小	最大-平均	最大-最小
平均値(分)	5.7	7.9	13.6
標準偏差(分)	10.9	10.6	12.2

普段利用する経路+代替経路			
	平均-最小	最大-平均	最大-最小
平均値(分)	6.3	8.1	14.4
標準偏差(分)	8.5	8.6	11.1

経路を利用する理由の集計結果を図 4.6 に示す。通勤・通学時においては所要時間のばらつきの少なさを重視し、買い物時においては道路の走りやすさや経路の分かりやすさを重視する傾向があることが分かる。

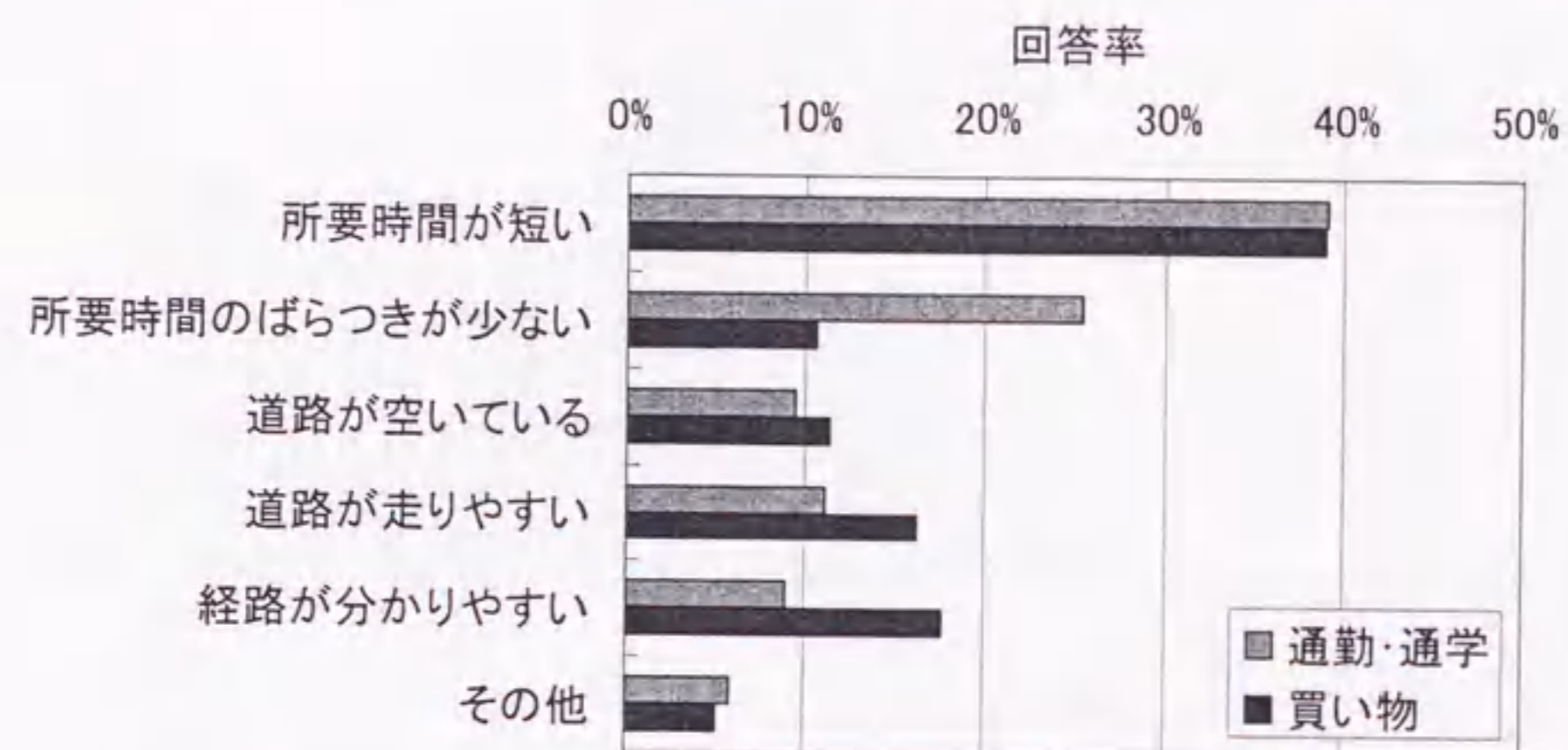


図 4.6 経路を利用する理由

表 4.5 通勤・通学時の数量化理論II類による分析結果

外的基準：経路を利用する理由(所要時間が短い, その他)

説明変数	カテゴリー	カテゴリスコア	レンジ	偏相関係数
混雑状況	1.2.空いている	-0.080	0.647	0.098
	3.普通	-0.339		
	4.5.混んでいる	0.308		
信号機や一時停止の数	1.2.少ない	1.802	2.442	0.325
	3.普通	-0.363		
	4.5.多い	-0.640		
道路の走りやすさ	1.2.走りやすい	-0.043	0.435	0.061
	3.普通	0.161		
	4.5.走りにくい	-0.274		
性別	男性	0.111	0.450	0.073
	女性	-0.339		
年齢	~29歳	1.483	1.636	0.142
	30~59歳	-0.074		
	60歳~	-0.153		

R²=0.12

次に、数量化理論II類を用いて所要時間の短さとそれ以外の理由の経路選択への影響度に関する経路選択構造の分析を行なった。外的基準は経路を利用する理由(所要時間が短い, その他)とした。通勤・通学時の分析結果を表 4.5 に示す。カテゴリースコアの大小から、年齢が若いほど所要時間を重視する傾向があると言える。また、偏相関係数やレンジから、信号機や一時停止の数の評価が最も所要時間に関係していることが分かった。

4.4 経路選択モデルの構築

4.4.1 ニューラルネットワークの適用

一般的に、ニューラルネットワークによるモデル化は以下の条件下でその特徴を発揮する。

- 1)メカニズムが複雑である
- 2)入出力の関係が不明である
- 3)数学的なモデル化が困難である
- 4)経験データが蓄積されている

本研究でモデル化を行なう経路選択行動は、人間の選択行動であることもあり、そのメカニズムは複雑であり、また一般的なモデル化も困難である。そして、アンケート調査の結果を経験データとして用いることが可能であるため、ニューラルネットワークによるモデル化が適切であると考えられる。

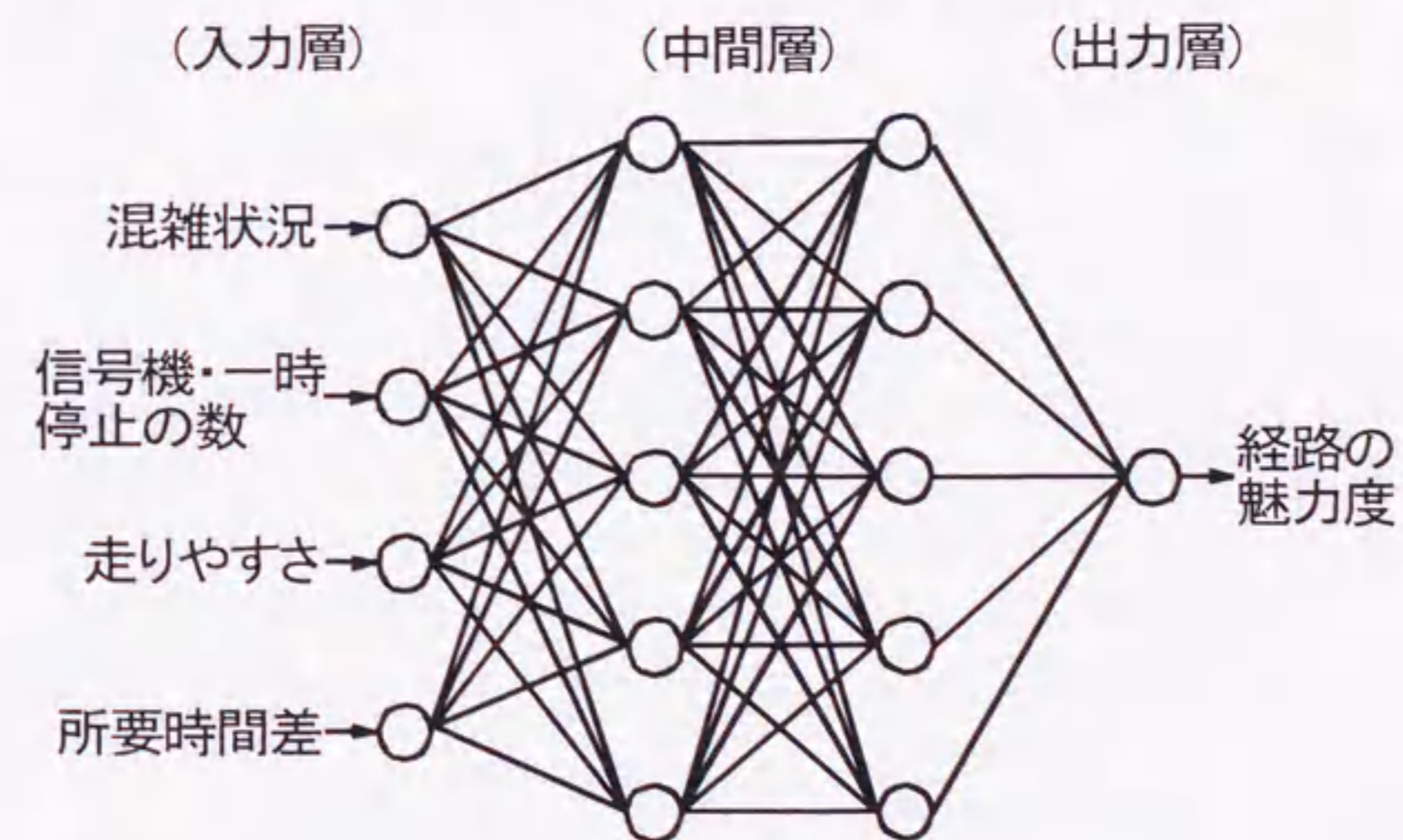


図 4.7 ニューラルネットワークによる経路選択モデル

本研究では、運転者は経路の混雑状況、信号機や一時停止の数、道路の走りやすさ、経験的な所要時間差を評価し、経路の総合評価としての魅力度を認識し、最大のものを選択すると仮定する。この過程を図 4.7 に示すニューラルネットワークで表現する。なお、経路の魅力度は 0 から 1 までの範囲である。ニューラルネットワークの学習には Rumelhart ら(1986) による誤差逆伝播アルゴリズム (error back-propagation algorithm) を用い、ニューロンの閾値関数には式(4.1)、図 4.8 に示すシグモイド(sigmoid)関数を用いた。

$$f(u) = \frac{1}{1 + e^{-u}} \quad (4.1)$$

このシグモイド関数は活性値 u の絶対値が大きい領域では微分値が小さくなる性質を持っているため、異常なデータに対しては鈍感となり、安定した学習が出来るという特徴を有する。また、学習データはアンケート調査の結果を用いることとし、表 4.6 に示す数値を用いた。所要時間差については、普段利用する経路の所要時間と代替経路の所要時間が同じである場合を 0.5 とするため、0.5 を加えた。また、所要時間差の下限は 0、上限は 1 とする。普段利用する経路の魅力度は、シグモイド関数の両端値が 1,0 への収束特性から一般的上限値を 0.9 とし、代替経路の魅力度の平均値は(0.1,0.9)の中間

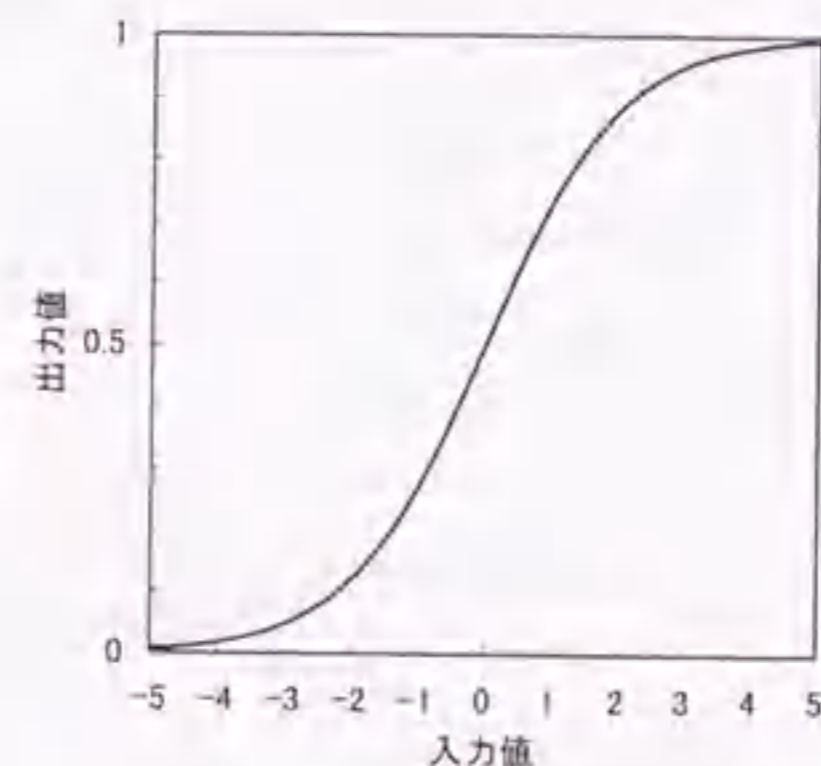


図 4.8 シグモイド関数

表 4.6 学習時に用いるデータ

入力層 (道路交通条件に与える数量)		
混雑状況	1.非常に空いている	1
	2.やや空いている	0.75
	3.普通	0.5
	4.やや混んでいる	0.25
	5.非常に混んでいる	0
信号機や一時停止の数	1.非常に少ない	1
	2.やや少ない	0.75
	3.普通	0.5
	4.やや多い	0.25
	5.非常に多い	0
道路の走りやすさ	1.非常に走りやすい	1
	2.やや走りやすい	0.75
	3.普通	0.5
	4.やや走りにくい	0.25
	5.非常に走りにくい	0
所要時間差	$\frac{\{(\text{代替経路}) - (\text{利用経路})\}}{(\text{利用経路}) + 0.5}$	

出力層 (経路の魅力度)

普段利用する経路	0.9
他の利用可能経路	0.5

値 0.5 に等しいと考えた。学習時に魅力度として与える数値の大小により推定時の魅力度の数値は変化するが、本モデルでは各経路で推定された魅力度の大小比較により利用経路を決定しているため、出力層で教師データとして与える魅力度の数値は大小関係さえ満足していればそれ程影響を与えないと考えられる。

4.4.2 経路選択モデルの推定結果

アンケート調査で関係する全ての質問に答えた 140 サンプルを用いて学習を行ない、係数を推定した。その結果、7 回目の繰り返しで二乗誤差が最小となったため、この時の係数を採用した。図 4.9 は信号機・一時停止の数、道路の走りやすさ、所要時間差の 3 つの入力値を固定し、混雑状況を変化させた感度分析を行なった結果、図 4.10 は所要時間差を変化させた結果である。信号機・一時停止の数、道路の走りやすさを変化させた時も図 4.9 と同様のグラフになった。このことから、所要時間差が最も経路の魅力度に影響を与えること、他の 3 要素の値が低いほど所要時間差の影響が大きくなる傾向があることが分かった。また例えば、経路 1 は所要時間が 10 分で所要時間差以外の 3 要素の評価が 0.25(悪い)、経路 2 は所要時間が 15 分で所要時間差以外の 3 要素の評価が 0.75(良い)とすると、魅力度の比較より経路 2 を選択することになる。

アンケート調査の結果を用いてモデル的中率を計算した。本来であれば、学習用データと的中率の計算データとは別のデータを使用することが望ましいが、アンケート調査のサンプル数が限られているため、ここでは同一のデータを用いて計算を行なった。その結果、的中率は 93%となりモデルの実用性が示された。

4.5 入力値として用いる指標の検討

4.4 節で構築を行なった経路選択モデルは入力値を運転者の知覚値としたため、モデルを道路交通網の選択にそのまま適用するのは困難である。そのため、現実の道路条件を用いた経路選択モデルの入力値を説明するモデルを構築する。ここでは、アンケート調査の結果を基にして、1)平均速度、2)所要時間のばらつき、3)平均車線数、4)単位距離あたりの信号機の数、5)単位距離あたりの右左折の回数を説明変数として、変数低減法により説明変数を抽出してモデルのパラメータ推定を行なった。

4.5.1 経路の混雑状況の定式化

経路の混雑状況の説明変数には、平均速度が選ばれた。回帰分析による推定

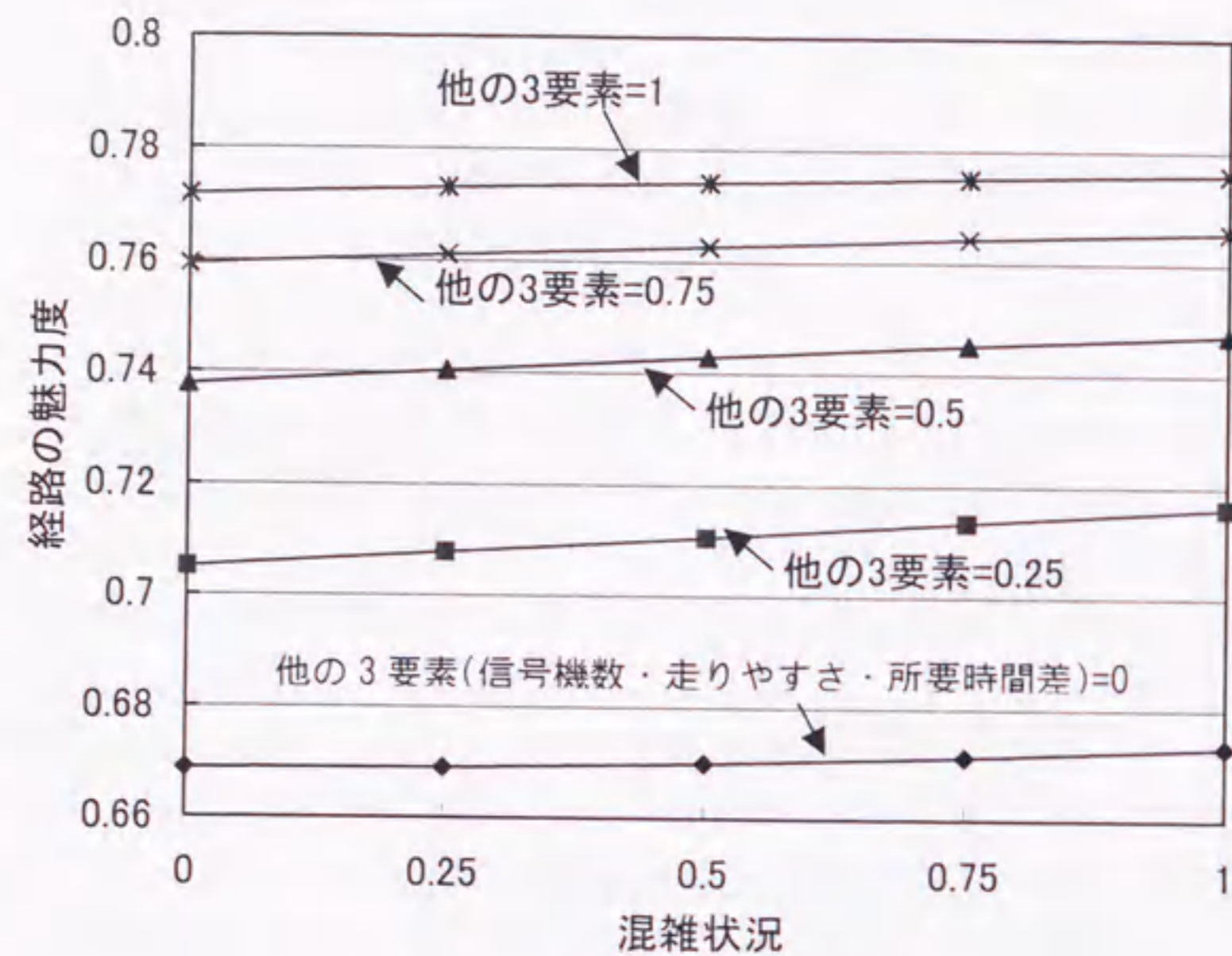


図 4.9 経路の混雑状況を変化させたときの経路の魅力度

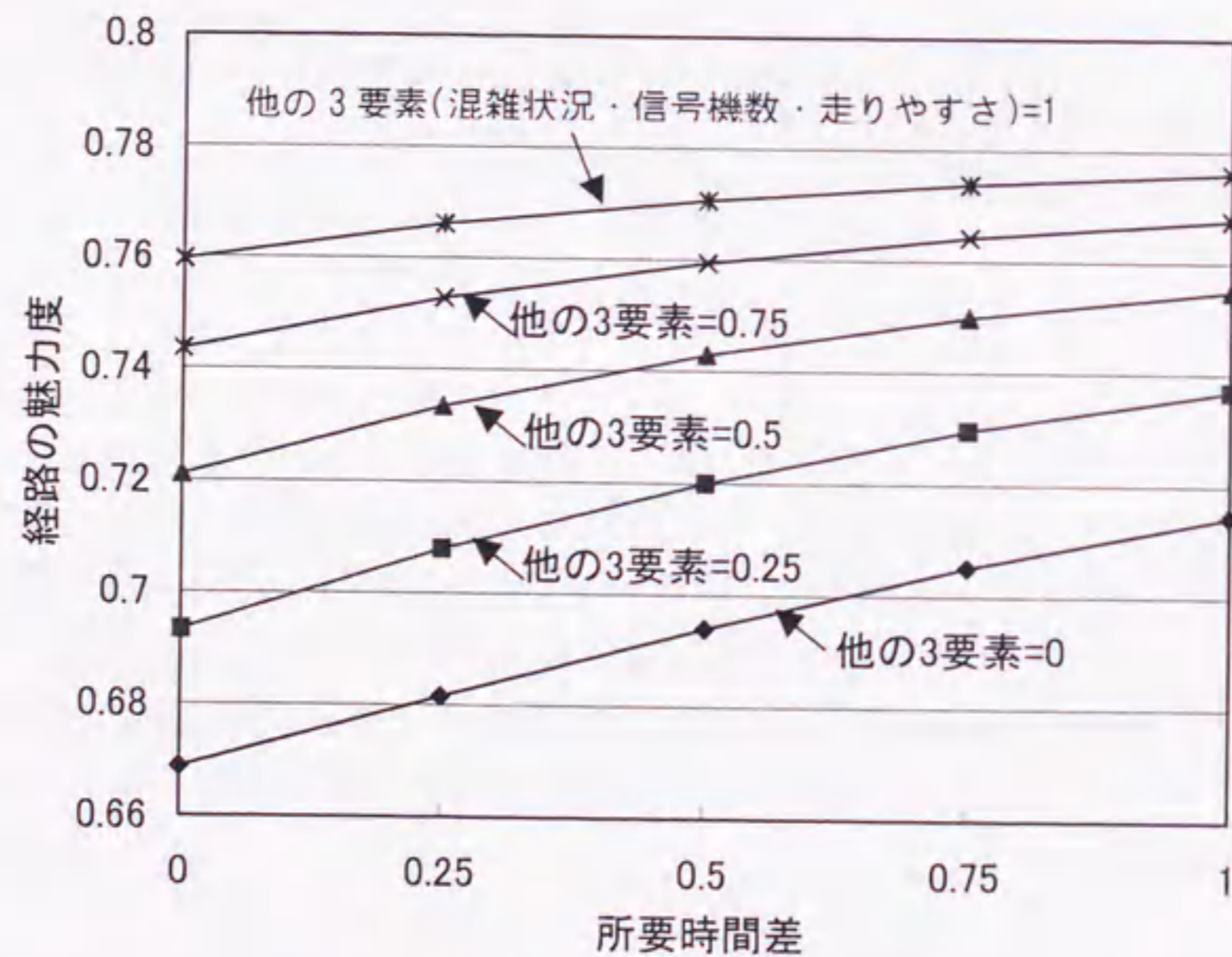


図 4.10 所要時間差を変化させたときの経路の魅力度

結果を表 4.7 に示す。パラメータは経路選択の論理的思考過程の符号条件を満足し、t 検定の信頼度は 95%以上である。相関係数は 0.33 であった。この推定結果より、平均速度が 19km/h の時に混雑状況の評価が普通であり、43km/h 以上で非常に空いていると感じる傾向があることが分かる。

表 4.7 混雑状況の回帰モデル

説明変数	係数	t-値
定数項	0.0876	1.4
平均速度 (km/h)	0.0212	5.1

(R=0.33)

4.5.2 信号機や一時停止の数の定式化

信号機や一時停止の数の説明変数には、1km 当りの信号機の数選ばれた。表 4.8 に回帰分析による推定結果を示す。パラメータは経路選択の論理的思考過程の符号条件を満足し、t 検定の信頼度は 95%以上である。相関係数は 0.30 となった。この結果より、信号機が 1km 当り 3.2 基の場合に、信号機や一時停止の数の評価が普通であり、7 基以上でやや多いと感じる傾向があることが分かる。

表 4.8 信号機・一時停止の数の回帰モデル

説明変数	係数	t-値
定数項	0.705	12.3
1km 当りの信号機の数	-0.0644	-4.5

(R=0.30)

4.5.3 道路の走りやすさの定式化

道路の走りやすさの説明変数には、平均速度、所要時間のばらつきが選ばれた。表 4.9 に重回帰分析による推定結果を示す。全てのパラメータは経路選択の論理的思考過程の符号条件を満足している。重相関係数は 0.26 となった。

表 4.9 道路の走りやすさの重回帰モデル

説明変数	係数	t-値
定数項	0.371	4.8
平均速度 (km/h)	0.0107	2.6
所要時間のばらつき (分/km)	-0.0169	-1.4

(R=0.26)

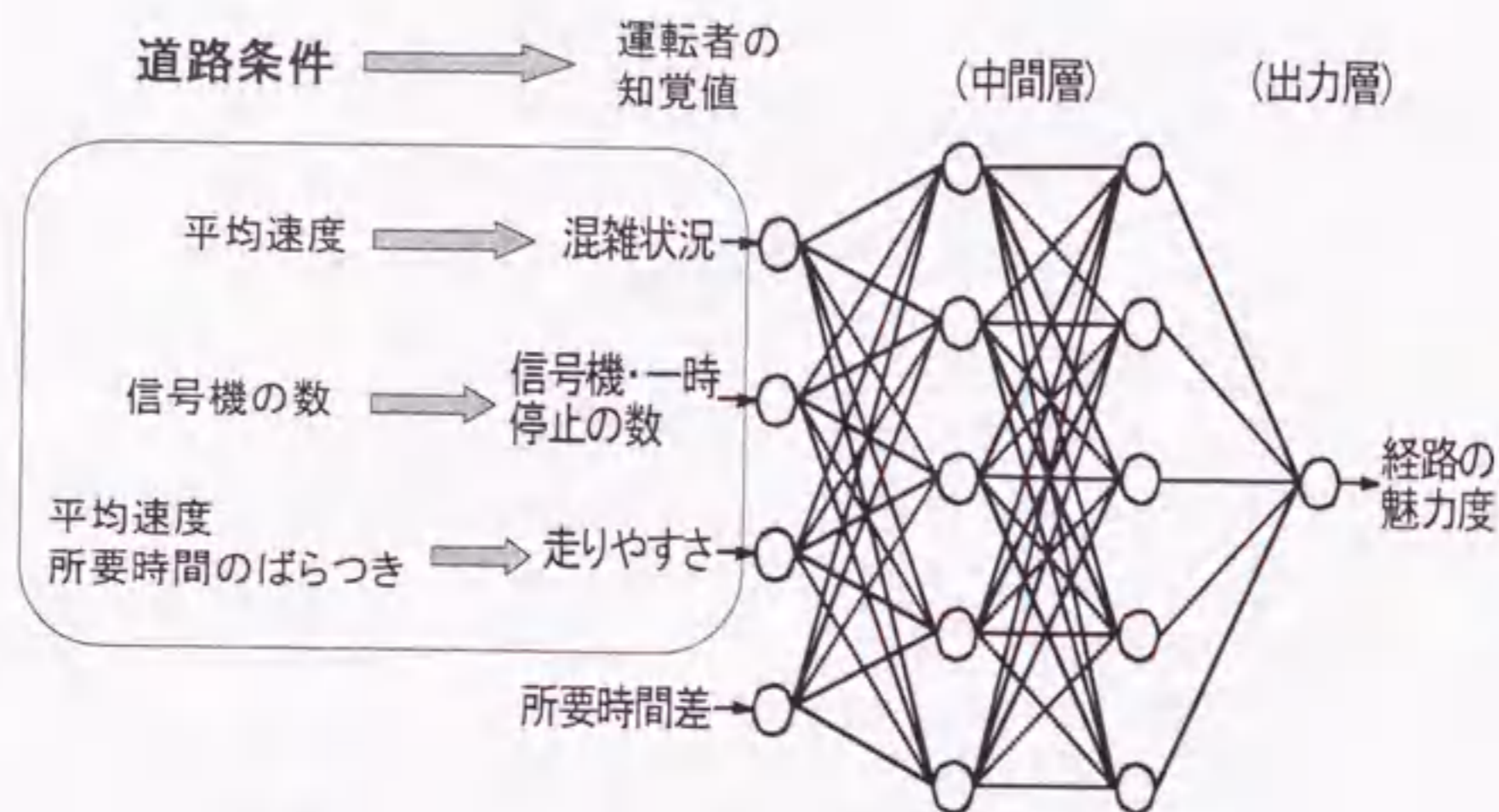


図 4.11 道路条件を入力値とした経路選択モデル

各回帰モデルは、相関係数で見ると決して説明力が高いモデルとは言えない。これは、あいまいな5段階評価の評価値を直線近似で説明しようとしているためであると考えられる。

ここで定式化を行なったモデルを使用して、図 4.11 に示す道路条件を入力値としたモデルの的中率を計算した結果、87%となった。前述の運転者の知覚値を入力値としたモデルと比較すると、6%的中率が減少した。本アンケート調査の結果では、所要時間が短い経路を選択するという選択基準で経路選択を行なった場合の的中率は、約 80%であることから、所要時間差以外の説明変数が機能していることが分かる。

4.6 ランダム効用理論を用いたモデルとの比較

従来のランダム効用理論を用いた経路選択モデルでは、選択確率の概念を用いているため、IIA(Independence from Irrelevant Alternatives)特性の問題が生じる場合もある。しかしながら、本章で構築を行なったモデルでは、観測不可能な要因も各ニューロンに分散記憶されるため、誤差項に現れるランダム効用理論と比較すると、類似性による影響は小さくなると考えられる。また、本章のモデルは、満足度が最大となる経路を選択する原則としているため、経路間に類似性があっても問題は生じない。

従来、構築が行なわれてきた経路選択モデルの中には、定数項を導入したモ

デルや、説明変数に路線固有のダミー変数を導入したモデルも幾つか見られる。説明変数に路線固有のダミー変数を用いた場合は、そのモデルを他路線に適用できないのは勿論であるが、定数項を用いた場合も、その定数項の中に路線固有の属性に関する影響も含まれると考えられるため、他路線への適用は出来ないであろう。本章で構築したモデルでは、説明変数に路線固有の属性に関する指標は導入しておらず、また経路を限定することなく学習を行なっているため、例えば稲垣ら(1999)による複数経路候補を抽出するアルゴリズムを併用することにより、交通量配分などに導入することが可能である。

4.7 選択肢集合に関する考察

経路選択モデルにおいては、モデル推定の段階、モデル適用の段階のそれぞれで利用者の持っている選択肢集合を考えなくてはならない。図 4.12 に示すとおり、ネットワーク上で OD 間を連結している経路の集合である存在経路のうち、利用者の認知している経路はその一部であり、認知経路と呼ばれている。その認知経路のうちで利用者の制約条件を満たす経路が利用可能経路であり、選択可能経路になるべきである。

モデル推定では、アンケート調査で回答された経路を基に行なっているため、選択可能経路のうちの一部であり、選択可能経路以外を用いた時に発生するバイアスは生じていない。また、アンケート調査で、ある利用者の選択可能経路を全て列挙してもらうのは困難であるため、本調査では普段利用する経路と代替経路をそれぞれ1本答えてもらい、モデル推定を行なっている。従って、選択可能経路数が少ないことによるバイアスは、IIA 特性を持つロジットモデル以上に生じている可能性がある。

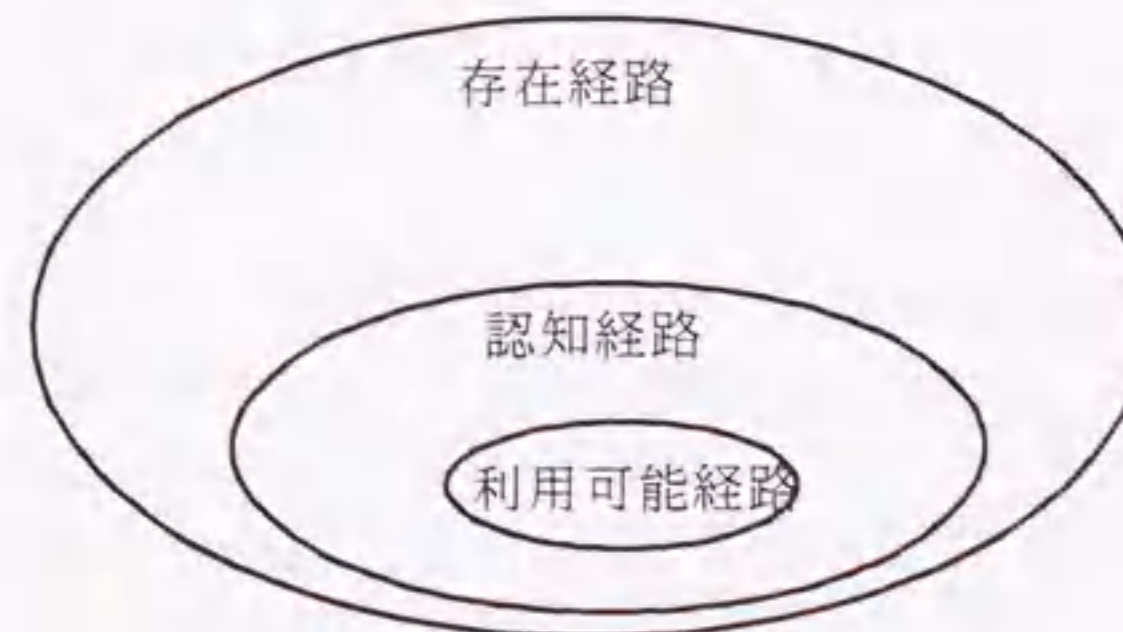


図 4.12 経路集合の関係

モデル適用の段階では、上述の複数経路候補を抽出するアルゴリズムを用いることが一手法として考えられるが、このアルゴリズムの良否がモデルの実用性を左右することになる。

4.8 まとめ

本章では、まず経路選択モデルを開発する意義について述べ、過去の経路選択モデルの特徴を整理した。次に、アンケート調査を基に経路選択行動の解析を行なった。その結果、自動車による通勤・通学時の平均所要時間は30分以内が56%、40分以内が75%であることが分かった。また、普段利用する経路と代替経路の平均所要時間差を見ると、7%の運転者は所要時間が長い経路を選択しており、どちらも同じという回答を含めると、約3割になることが分かった。平均所要時間と所要時間の最大値・最小値との差を普段利用する経路と代替経路とで比べた結果、各所要時間差の平均値で見ると代替経路の方が小さくなっているが、標準偏差は大きくなっており、代替経路の方が回答者によるばらつきが大きいことが分かった。経路を選択する理由で「所要時間が短い」の回答は1位であったが39%であり、通勤・通学時には所要時間のばらつきの少なさ、買い物時には道路の走りやすさや経路の分かりやすさも重視する傾向があることが分かった。また、数量化理論II類による所要時間の短さとそれ以外の理由の経路選択への影響度に関する経路選択構造の分析の結果、若者は所要時間の短さを重視する傾向があること、信号機や一時停止の数が所要時間に最も関係することが分かった。

混雑状況、信号機・一時停止の数、道路の走りやすさ、所要時間差を説明変数とした経路選択行動を表すニューラルネットワークモデルを構築し、アンケート調査の結果を学習データとして与えた。その結果、モデルの的中率は93%になり、経路選択行動を良く説明していることが分かった。感度分析を行なった結果、所要時間差が最も経路の魅力度に影響を与えること、他の3要素(混雑状況、信号機・一時停止の数、道路の走りやすさ)の値が低いほど所要時間差の影響が大きくなる傾向があることが分かった。

さらに、所要時間差以外の3つの入力値(混雑状況、信号機・一時停止の数、道路の走りやすさ)を説明する道路条件を抽出し、パラメータの推定を行なった。混雑状況の評価の回帰モデルより、平均速度が19km/hの時に混雑状況の評価が普通であり、43km/h以上で非常に空いていると感じる傾向があることが分かった。信号機や一時停止の数の評価の回帰モデルより、信号機の数が1km当り3.2基の場合に、信号機や一時停止の数の評価が普通であり、7基以上でやや多

いと感じる傾向があることが分かった。定式化を行なったモデルを使用して、ニューラルネットワークモデルの適合度を調べた結果、的中率は87%になった。運転者の知覚値を入力値としたモデルと比べると、的中率が6%減少したが、所要時間のみを説明変数とした経路選択モデルと比べると的中率は高く、所要時間以外の説明変数が機能していることが分かった。

参考文献

- Abdel-Aty, M. A., R. Kitamura, P. P. Jovanis(1995a) : Investigating Effect of Travel Time Variability on Route Choice Using Repeated-Measurement Stated Preference Data, *Transportation Research Record*, No.1493, pp.39-45.
- Abdel-Aty, M. A., R. Kitamura, P. P. Jovanis(1995b) : Exploring Route Choice Behavior Using Geographic Information System-Based Alternative Routes and Hypothetical Travel Time Information Input, *Transportation Research Record*, No. 1493, pp.74-80.
- 朝倉康夫, 羽藤英二(2000) : 交通ネットワーク上の経路選択行動 : 観測と理論, *土木学会論文集*, No.660/IV-49, pp.3-13.
- Dougherty, M.(1995) : A Review of Neural Networks Applied to Transport, *Transportation Research-C*, Vol.3, No.4, pp.247-260.
- Emmerink, R. H. M., P. Nijkamp, P. Rietveld, J. N. V. Ommeren(1996) : Variable Message Signs and Radio Traffic Information: an Integrated Empirical Analysis of Drivers' Route Choice Behaviour, *Transportation Research*, Vol.30A, No.2, pp.135-153.
- 藤井聡, 北村隆一, 矢部義雄(1994) : 個人の経路選択決定要因を把握するための非集計モデルの構築, *土木学会年次学術講演会講演概要集第 4 部*, Vol.49, pp.868-869.
- 飯田恭敬, 藤井聡, 内田敬(1996) : 道路網における経路選択を考慮した動的交通流シミュレーション, *土木学会論文集*, 536/IV-31, pp.37-47.
- 稲垣潤, 長谷山美紀, 北島秀夫(1999) : 遺伝的アルゴリズムを用いた経路探索における複数経路候補の決定法, *電子情報通信学会論文誌 D-I*, Vol.J82-D-I, No.8, pp.1102-1111.
- Lotan, T., H. N. Koutsopoulos(1993) : Route Choice in the Presence of Information Using Concepts from Fuzzy Control and Approximate Reasoning, *Transportation Planning and Technology*, Vol.17, pp.113-126.
- 中原正顕, 内田敬, 飯田恭敬(1994) : 所要時間情報を考慮した経路選択行動の分析, *土木学会年次学術講演会講演概要集第 4 部*, Vol.49, pp.784-785.
- 小川圭一(1999) : ファジィ積分型効用関数を用いた経路選択行動モデル, *日本ファジィ学会誌*, Vol.11, No.4, pp.690-694.
- Rumelhart, D.E., G. E. Hinton, R. J. Williams(1986): Learning Representations by Back-propagation Errors, *Nature*, 323, pp.533-536.

- 坪井兵太, 秋山孝正(1996) : ファジィ・ニューロモデルによる多経路選択行動の分析, *土木学会年次学術講演会講演概要集第 4 部*, Vol.51, pp.490-491.
- Vaughn, K. M., M. A. Abdel-Aty, R. Kitamura, P. P. Jovanis, H. Yang, N. E. A. Kroll, R. B. Post, B. Oppy(1993) : Experimental Analysis and Modeling of Sequential Route Choice Under an Advanced Traveler Information System in a Simplistic Traffic Network, *Transportation Research Record*, No.1408, pp.75-82.
- 樺島祥介(1998) : ニューラルネットワークによるモデル化と学習の理論, *数理学*, No.423, pp.19-25.
- Yang, H., R. Kitamura, P. P. Jovanis, K. M. Vaughn, M. A. Abdel-Aty(1993) : Exploration of Route Choice Behavior with Advanced Traveler Information Using Neural Network Concepts, *Transportation*, Vol.20, pp.199-223.
- 淀川英司 他(1995) : ニューラルネットワーク応用, オーム社, pp.1-26.

第5章 ファジィ的交通量配分モデルの開発

5.1 ファジィ的交通量配分モデルの開発の意義

交通量配分モデルの基本的なモデルである利用者均衡配分モデルでは、Wardrop(1952)が提唱した配分原則の1つであるWardropの第1原則：

利用される経路の旅行時間は皆等しく、利用されない経路の旅行時間よりも小さいか、せいぜい等しい

に従う交通均衡問題を扱った。しかしながら、この等時間原則を満足させるには、利用者について次のような前提条件が必要である。

- 1) 全ての利用者は常に旅行時間を最小とするように行動する
 - 2) 利用者は常に利用可能な経路についての完全な情報を得ている
- (財)道路交通情報通信システムセンターの資料によるとVICIS(Vehicle Information and Communication System)ユニットの累積出荷台数は2000年の上半期に200万台を超え、今後も高い伸び率で増加すると考えられるが、2)の前提条件は無理があると言わざるを得ない。

この非現実的な前提条件を克服するために、利用者の経路選択の多様性や不確実性に注目して、ランダム効用最大化理論に基づいた確率的利用者均衡配分モデルがFisk(1980)、Daganzo(1982)によって開発された。これは、利用者の効用関数に誤差項を導入したものであり、次の配分原則：

もはやどの利用者も経路を変更することによって自己の旅行時間をそれ以上短縮することはできないと信じている均衡状態

に従うものである。

経路選択を行なう際に生じる不確実性は大きく次の2つに分類できると考えられる。

- 1) 所要時間の不確実性
- 2) 運転者の経路選択基準の多様性

現実の道路交通では、各経路の所要時間を事前に正確に予測することは困難であり、第4章で述べたアンケート調査の集計結果からも運転者は各経路に対してある程度の時間幅を考えている。所要時間の時間幅を考える場合、効用関数に誤差項を導入したランダム効用最大化理論を用いても、効用のばらつきの程度はパラメータ θ で表現しているが、時間幅を正確に表現することは出来ない。

しかしながら、各経路の所要時間をファジィ数とすることにより、与えられた時間幅を正確に表すことが可能である。従って、ランダム効用最大化理論より、ファジィ理論を用いたほうが適切であると考えられる。可能性測度を用いた最短経路探索アルゴリズムは伊藤ら(1996)によって開発が行なわれている。また、このアルゴリズムを使用して可能性測度による交通量配分モデルが秋山ら(1997)によって検討されている。しかしながら、この方法では各ODペアの利用可能経路が既知である必要があるため、テストネットワークでは計算可能であるが、実ネットワークへの適用は難しい。また後述する通り、可能性測度を用いた場合は最小所要時間のみが考慮され、モデルとしては不十分である。

本章では、実ネットワークへの適用が可能な所要時間の不確実性をファジィ理論を用いてモデル化した配分手法の開発を行なうことを目的とする。

5.2 ファジィ的交通量配分モデルの配分原則

確定的な交通量配分モデルでは、配分原則の違いにより、利用者均衡配分モデル(User Equilibrium Traffic Assignment Model)、利用者最適配分モデル(User Optimal Traffic Assignment Model)、システム最適配分モデル(System Optimal Traffic Assignment Model)があった。これと同様に、ファジィ理論を用いたモデルでも数種類の配分原則を定義することが出来る。ここでは、可能性測度最大化配分モデル、満足度最大化配分モデル、不満最小化配分モデルを定義する。

5.2.1 可能性測度最大化配分モデル

(Maximization of Possibility Measure Assignment Model)

可能性測度最大化配分モデルの配分原則は、次のように定義される。

利用可能な経路のうち、その所要時間がある値以下となる可能性が最大となる経路を選択する

各経路の所要時間は、走行する毎に異なるが、ある値付近の集合と定義することが可能である。この各経路の所要時間のメンバーシップ関数は、Duboisら(1978)、(1980)によって提唱されたL-Rファジィ数を用いて、式(5.1)のように定義する。

$$\mu_{\bar{b}_i}(x) = \begin{cases} L\left(\frac{m_{ij} - x}{\alpha_{ij}}\right) & (x \leq m_{ij}) \\ R\left(\frac{x - m_{ij}}{\beta_{ij}}\right) & (x \geq m_{ij}) \end{cases} \quad (5.1)$$

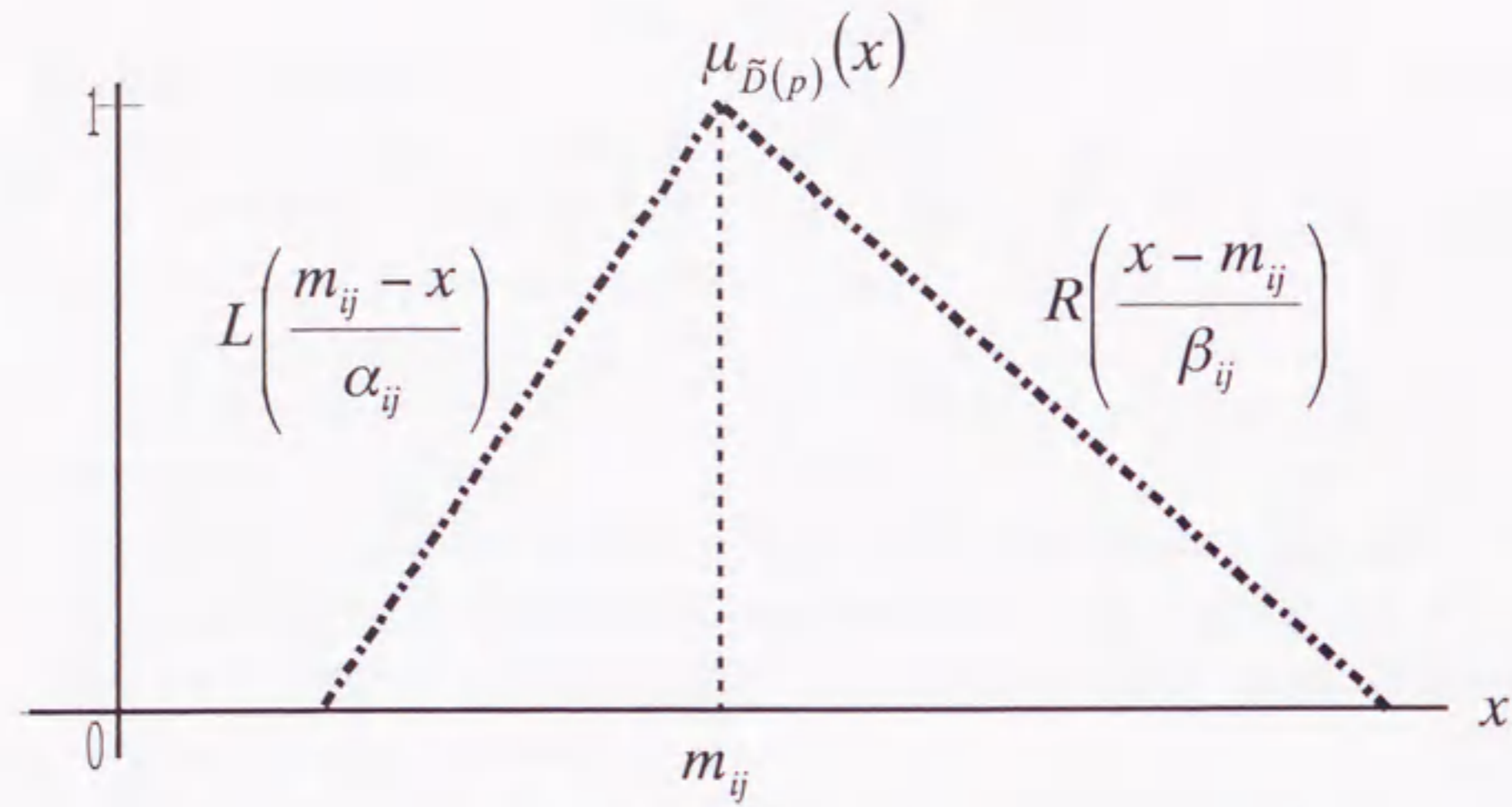


図 5.1 経路の所要時間のメンバーシップ関数

ここで、 $\alpha_{ij}, \beta_{ij} > 0$,

L は $L(0) = 1; L: [0, +\infty) \rightarrow [0, 1]$ となる狭義減少関数,
 R は $R(0) = 1; R: [0, +\infty) \rightarrow [0, 1]$ となる狭義減少関数.

これを図で表すと図 5.1 になる。

次に、ファジィ目標 G を設定する

G : 「経路の所要時間はだいたい B 以下である」

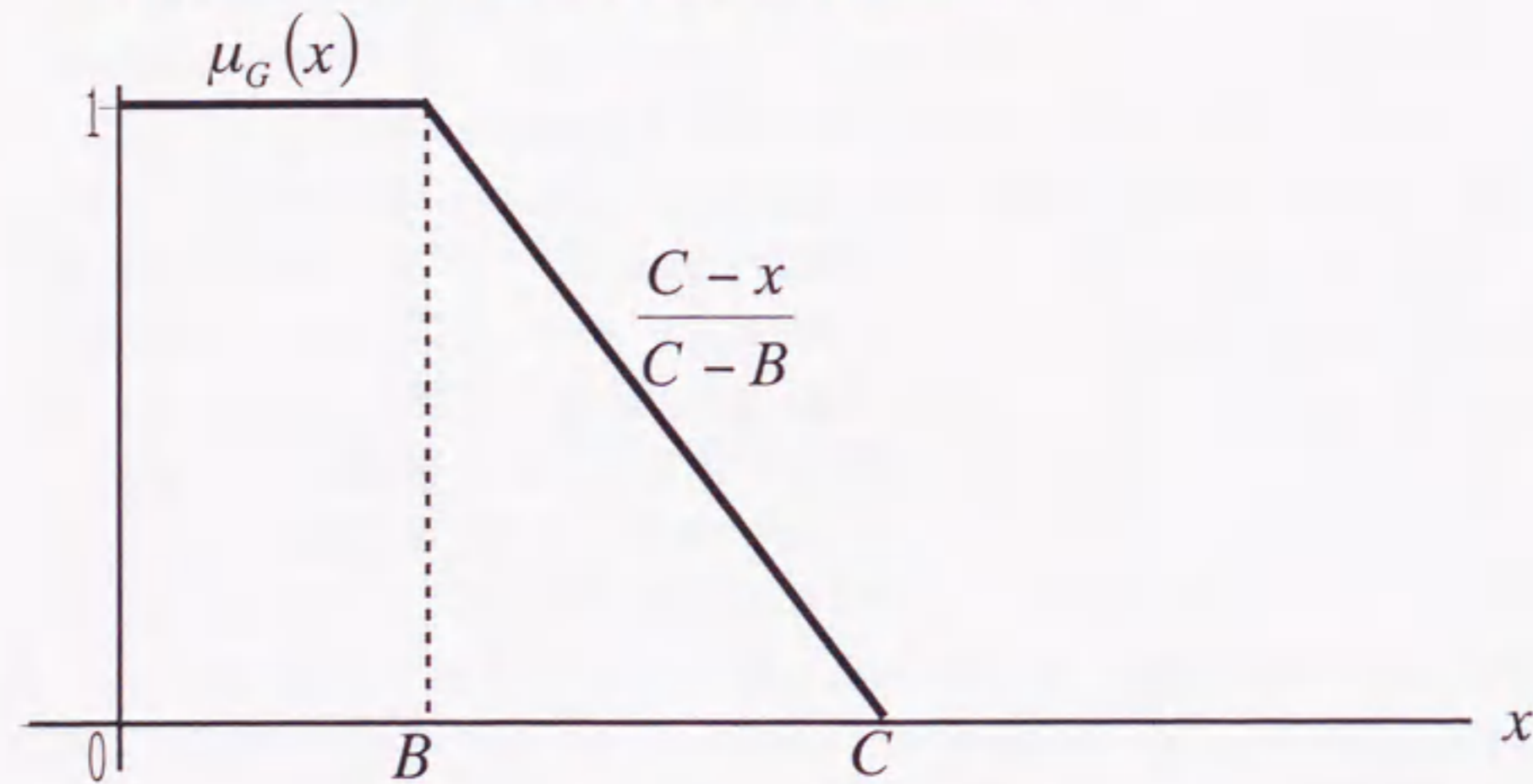


図 5.2 ファジィ目標のメンバーシップ関数

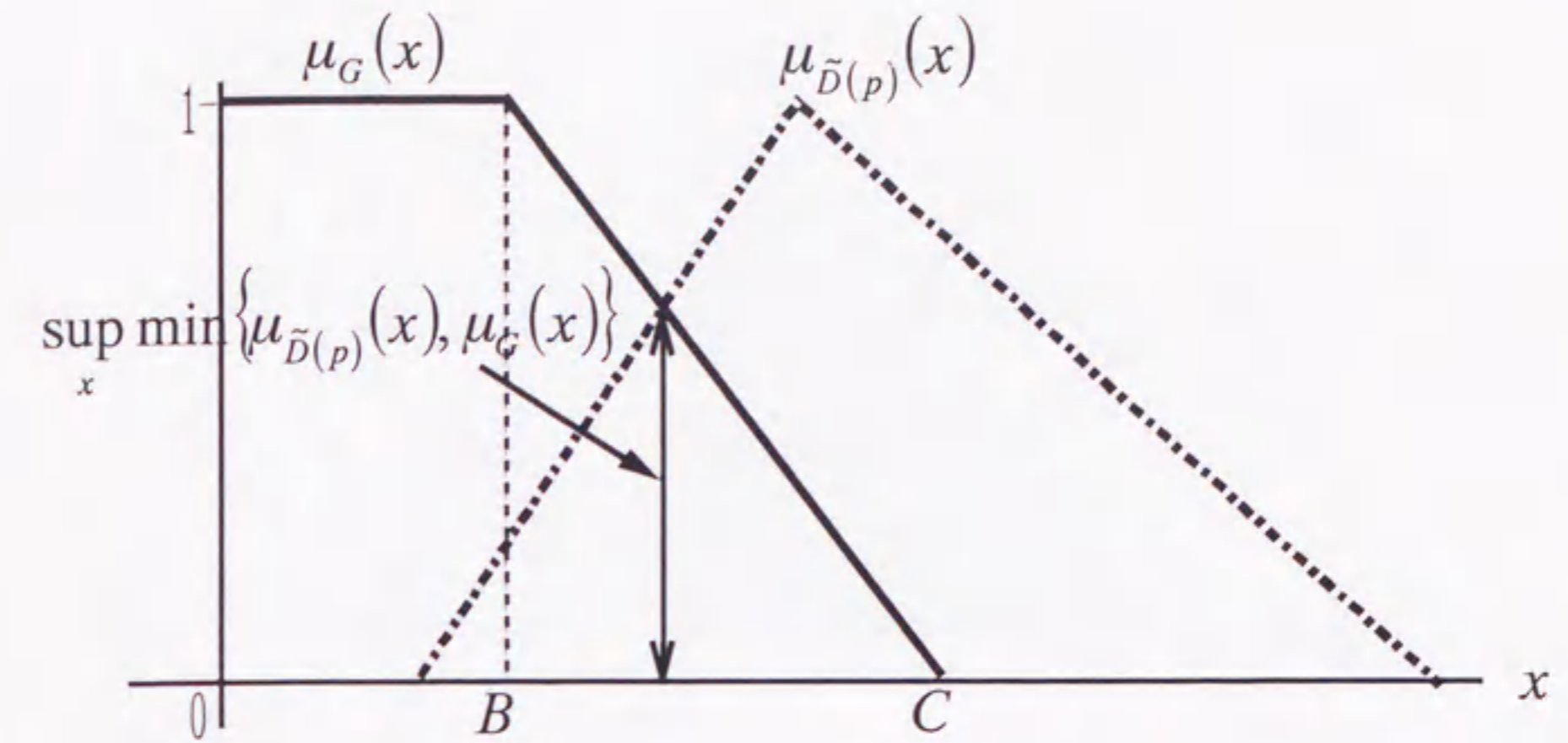


図 5.3 可能性測度最大化配分

$$\mu_G(x) = \begin{cases} 1 & (0 < x < B) \\ \frac{C-x}{C-B} & (B \leq x \leq C) \\ 0 & (x > C) \end{cases} \quad (5.2)$$

ここで、 B は OD 間の最短経路の所要時間を基に算出する。従って、 G のメンバーシップ関数は式(5.2)で定義する。

これを図で表すと図 5.2 になる。

可能性測度最大化配分の配分経路は式(5.3)のように定式化される。

$$\begin{aligned} & \text{Max. } \prod_{\bar{D}(p)}(G) \\ & \text{subject to } p \in P_n \end{aligned} \quad (5.3)$$

ここで、 $\prod_{\bar{D}(p)}(G)$ はファジィ目標 G に対する可能性測度であり、

$$\prod_{\bar{D}(p)}(G) = \sup_x \min\{\mu_{\bar{D}(p)}(x), \mu_G(x)\} \quad (5.4)$$

である。これは、図 5.3 において、経路の所要時間のメンバーシップ関数とファジィ目標のメンバーシップ関数の交点の y 座標値が可能性測度となり、複数経路のうち、この可能性測度が最大となる経路が配分対象経路となる。

5.2.2 満足度最大化配分モデル

(Maximization of Degree of Utility Assignment Model)

満足度最大化配分モデルの配分原則は次のように定義できる。

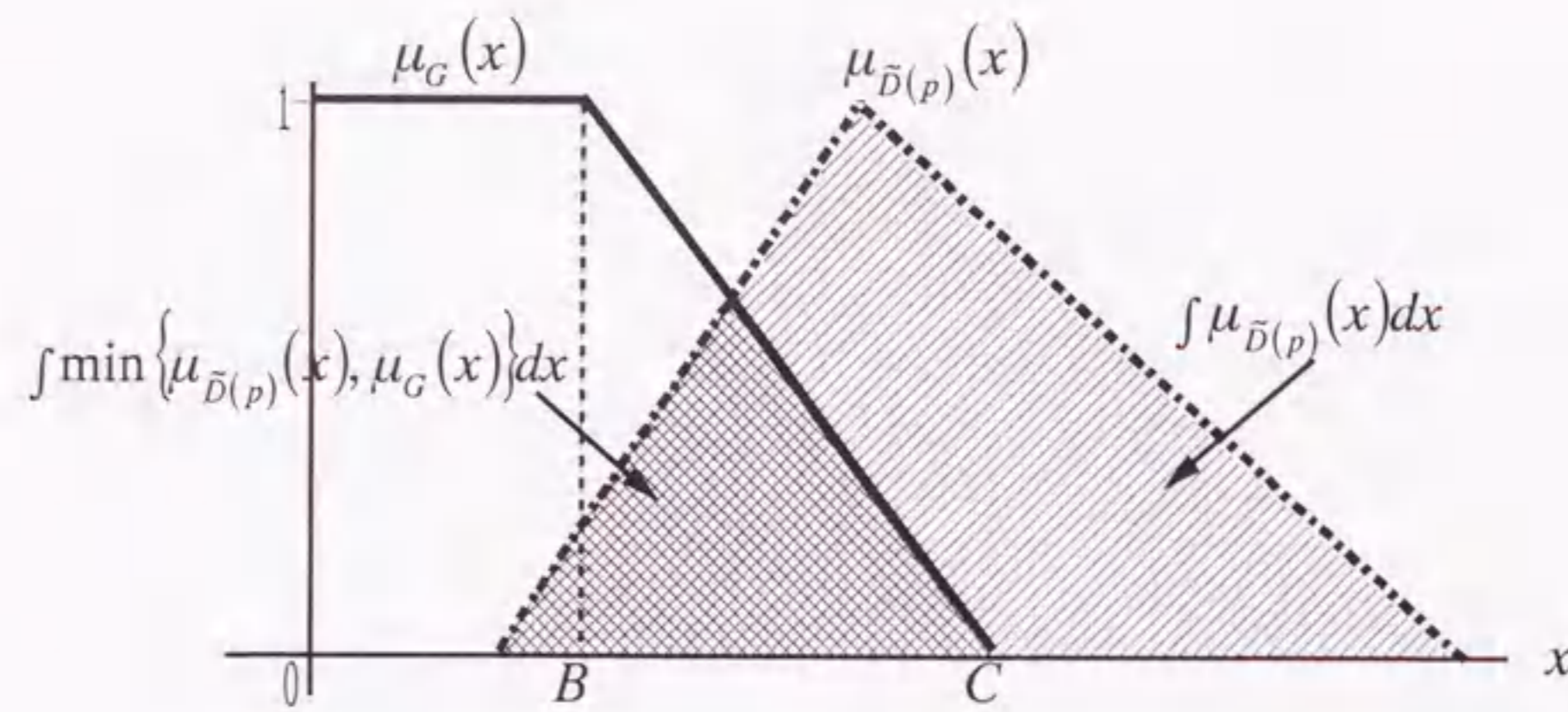


図 5.4 満足度最大化配分

利用可能な経路のうち、満足する可能性が最大の経路を選択する満足度最大化配分の配分経路は式(5.5)のように定式化できる。

$$\begin{aligned} \text{Max. } & \frac{\int \min\{\mu_{\bar{D}(p)}(x), \mu_G(x)\} dx}{\int \mu_{\bar{D}(p)}(x) dx} \\ \text{subject to } & p \in P_n \end{aligned} \quad (5.5)$$

これは図 5.4 に示す通り、経路の所要時間のメンバーシップ関数のうち、ファジィ目標を満たしている割合が最大である経路が配分対象となる。

5.2.3 不満最小化配分モデル

(Minimization of Disutility Assignment Model)

不満最小化配分モデルの配分原則は次のように定義できる。

利用可能経路のうち、満足しないことが最小になるような経路を選択するそして、不満最小化配分の配分経路は式(5.6)のように定式化できる。

$$\begin{aligned} \text{Min. } & \int \max\{\mu_{\bar{D}(p)}(x) - \mu_G(x), 0\} dx \\ \text{subject to } & p \in P_n \end{aligned} \quad (5.6)$$

満足度最大化配分では、満足する割合を最大化したのに対し、不満最小化配分では図 5.5 に示す通り、満足しない面積を最小にする経路を選択する。

可能性測度最大化配分は、経路の所要時間のメンバーシップ関数のうち、頂点より左側だけしか考慮されないという問題がある。不満最小化配分は、到着

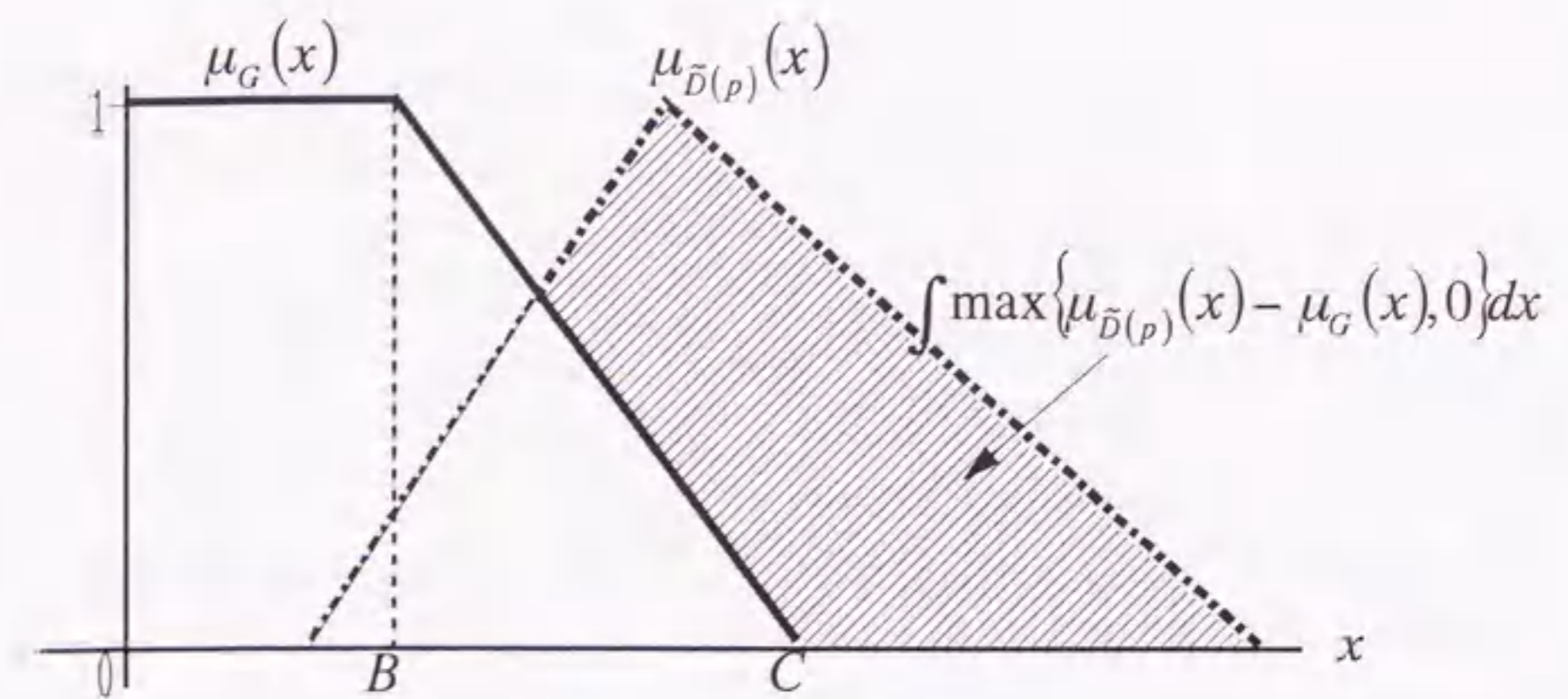


図 5.5 不満最小化配分

時刻に制約がある場合に運転者がとるであろう行動原則である。逆に、満足度最大化配分は到着時刻に厳しい制約がなく、通常の運転者がとるであろう行動原則であると言える。

例として、図 5.6 に示す 1-OD ペア、2 経路の道路網を考える。交通容量はどちらの経路も 1500 台である。リンク長はどちらの経路も 1km とした。リンクパフォーマンス関数は松井ら(1998)による幹線多車線道路のものを使用した。Route1 は最小所要時間・最大所要時間はリンクパフォーマンス関数から求められた標準的な値、Route2 は Route1 に比べて最小所要時間は小さいが、最大所要時間が大きい、つまり所要時間のばらつきが大きいと仮定する。また、OD 交通量は 2000 台とする。

通常の分割配分モデルや利用者均衡配分モデル、確率的利用者均衡配分モデルの場合、交通容量等の条件はどちらの経路も同じであるため 1000 台ずつ流れて均衡する。可能性測度最大化配分モデルの場合、図 5.7 に示すように最小所要時間のみが考慮される形になっているため、最小所要時間が小さい Route2 の方が若干多く流れる。また、満足度最大化配分モデルの場合、図 5.8 に示す

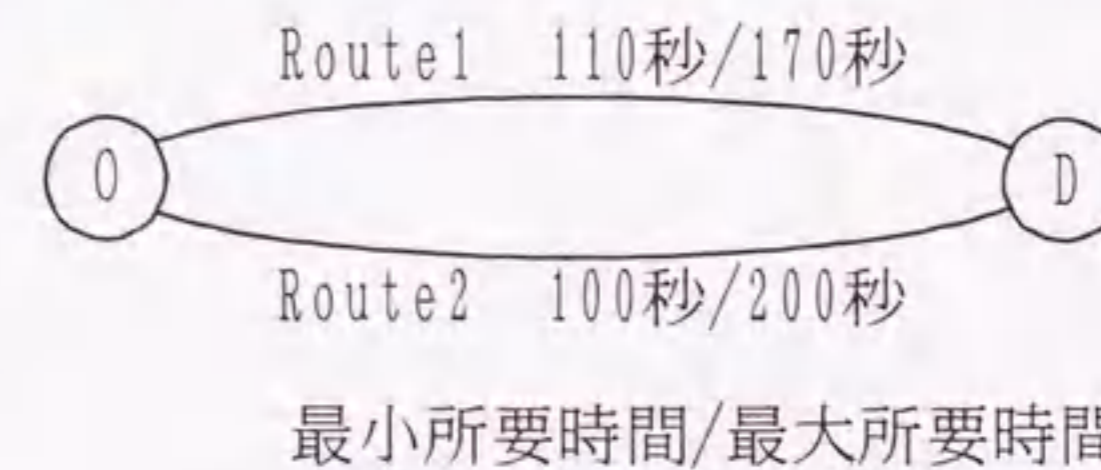


図 5.6 テスト道路網

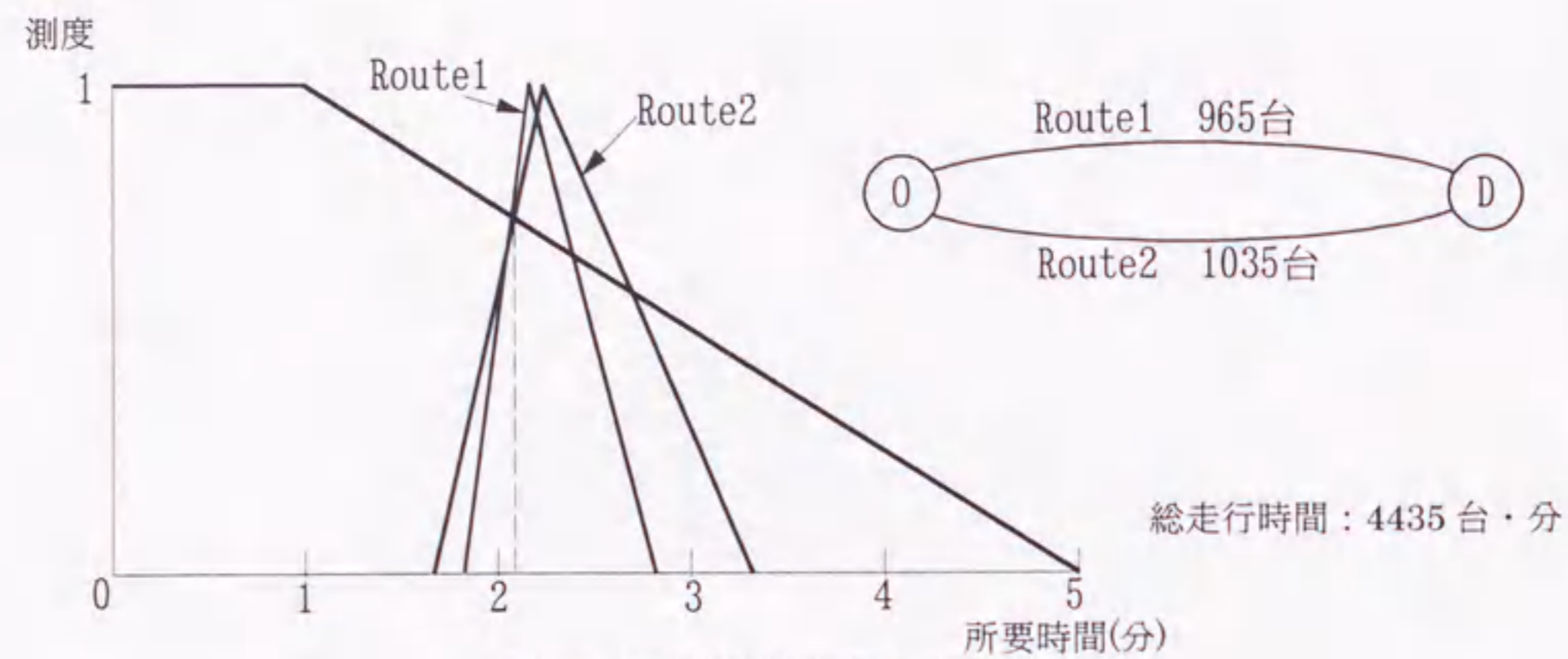


図 5.7 可能性測度最大化配分

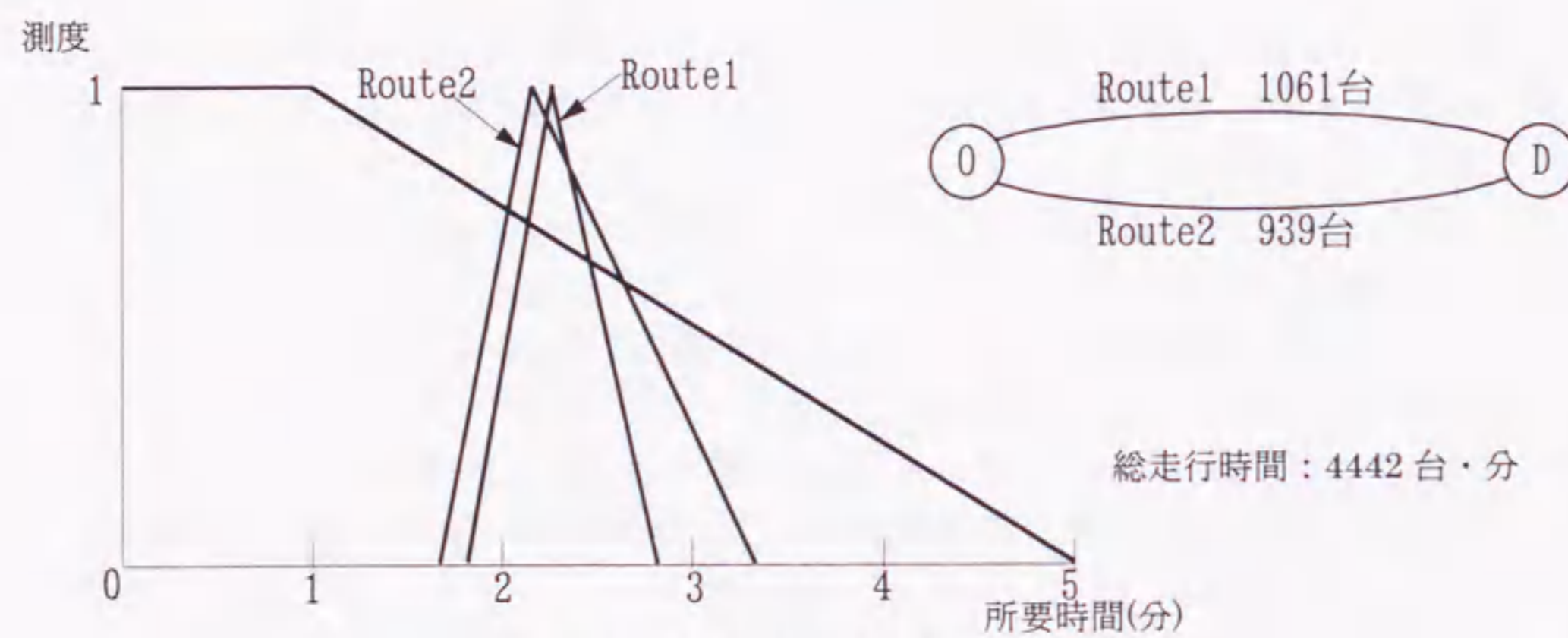


図 5.8 満足度最大化配分

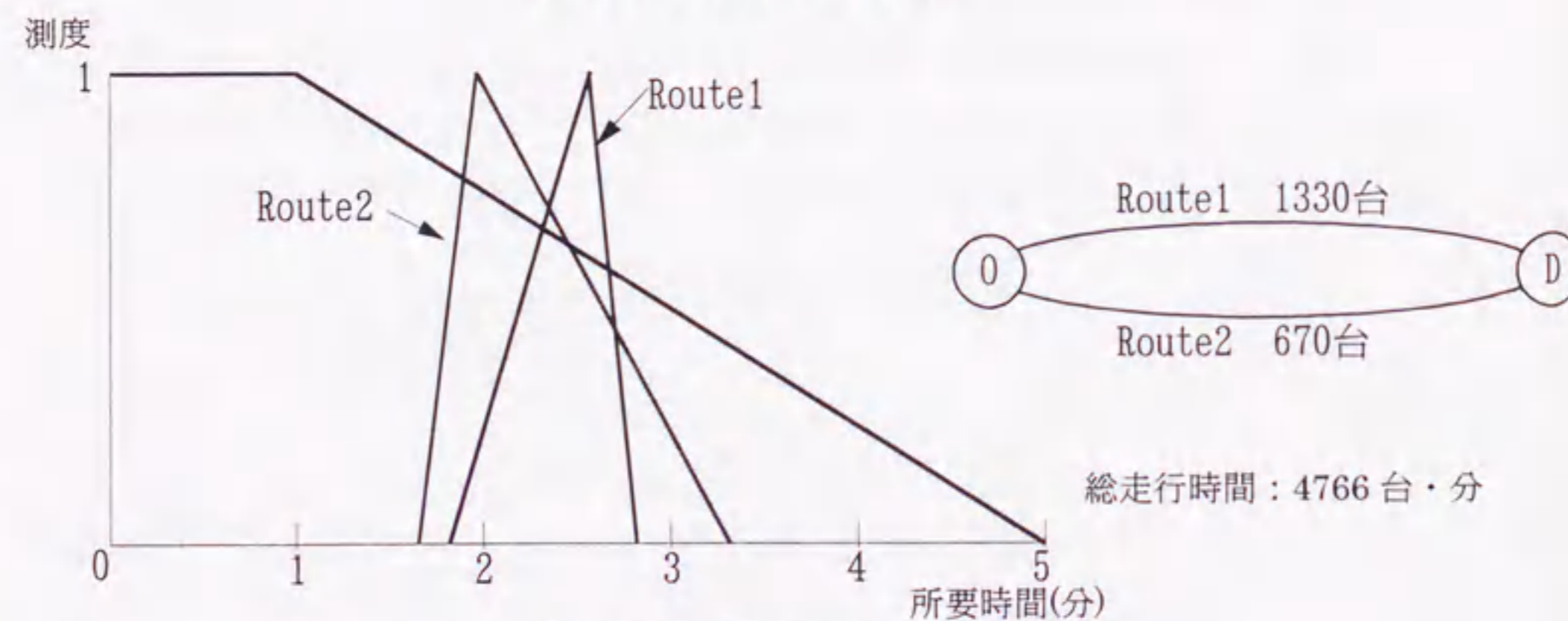


図 5.9 不満最小化配分

通り、所要時間のばらつきが少ない Route1 の方が多く流れている。不満最小化配分モデルの場合は、Route2 の最大所要時間が大きいいため、この経路を嫌う傾向があり、Route1 の方がかなり多く流れている。

総走行時間で見ると、通常の分割配分モデル、均衡配分モデルが 4431 台・分に対して、可能性測度最大化配分モデルでは 4435 台・分、満足率最大化配分モデルでは 4442 台・分、不満最小化配分モデルでは 4766 台・分であった。不満最小化配分モデルは通常の分割配分モデル、均衡配分モデルと比べて総走行時間が 7% 増加している。これは、Route1、Route2 と同じリンクパフォーマンス関数を用いているので、2 経路が均等に配分されている方が総走行時間は短くなり、逆に 2 経路の交通量に差がある時は総所要時間が長くなるためである。

本モデルでは、メンバーシップ関数の頂点となる時間をリンクパフォーマンス関数から求めているため、最小所要時間・最大所要時間の決め方によっては、リンクパフォーマンス関数から求めた時間が最小・最大所要時間から外れることもあるが、計算は可能である。

次に、Route2 の最小所要時間を変化させた場合の均衡交通量を図 5.10 に示す。各リンクの条件、OD 交通量は Route2 の最小所要時間以外は前に示したテ

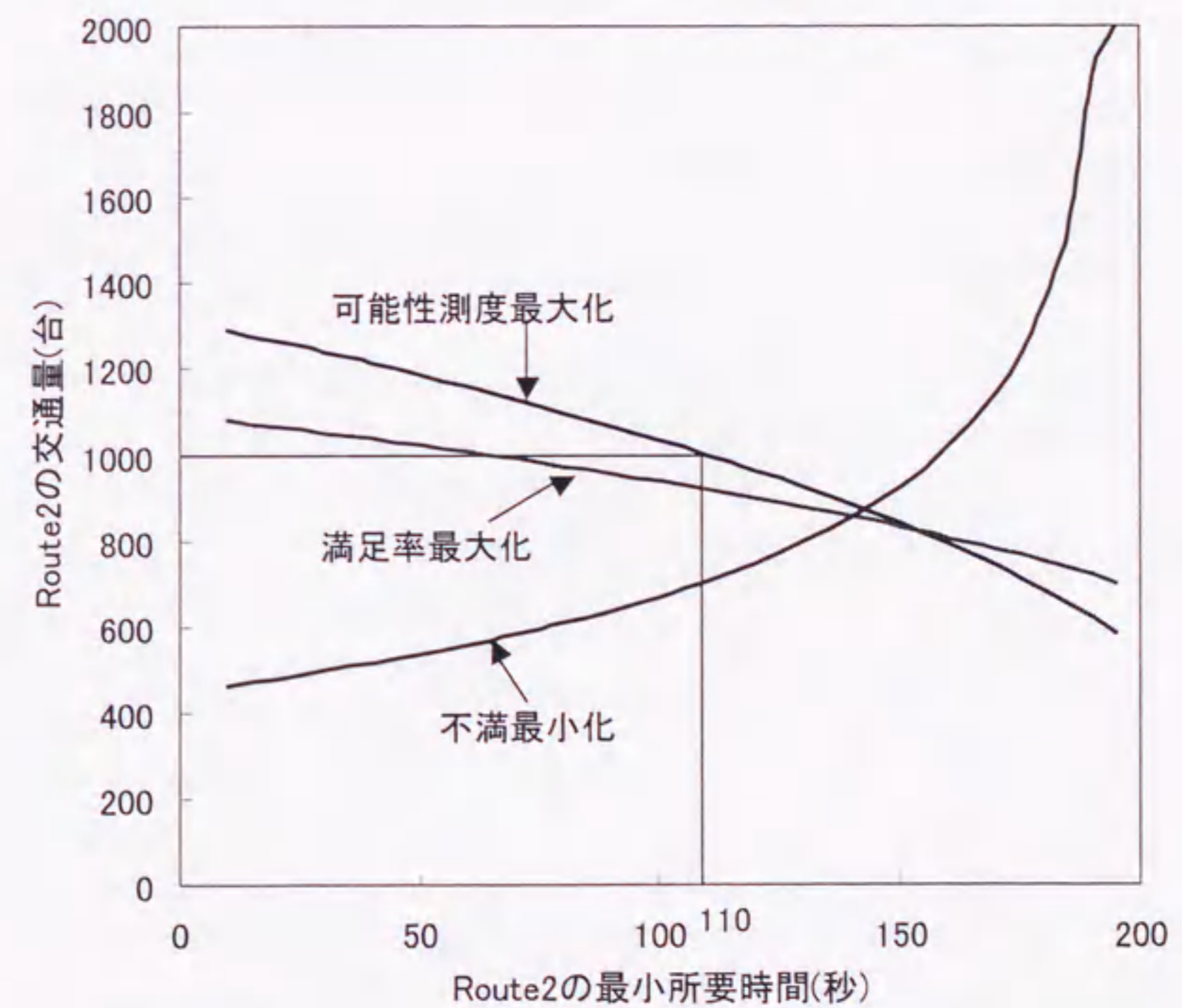


図 5.10 Route2 の最小所要時間を変化させた時の交通量の変化

スト道路網と同一である。ここで、注目すべきことは、不満最小化配分モデルでは、Route2の最小所要時間が小さい方がRoute2を嫌う傾向があることである。不満最小化配分モデルは経路の所要時間のメンバーシップ関数のうち、ファジィ目標を満たさない面積を最小にする原則であった。従って、最小所要時間が減少しても経路の所要時間のばらつきが大きくなるということであるため、所要時間のメンバーシップ関数の面積が増加して、この経路を嫌う傾向が出るのである。そして、所要時間のばらつきが小さい時の方が大きい時と比べて魅力度に与える影響は大きいことが分かる。また、満足率最大化配分モデルと可能性測度最大化配分モデルとを比較すると、満足率最大化配分モデルの方が勾配は緩やかである。可能性測度最大化配分モデルでは、Route2の最小所要時間が110秒でRoute1と等しい時、両経路とも1000台流れている。また、満足率最大化配分モデルで1000台ずつ流れるのは、Route2の最小所要時間が64秒の時である。これは、経路2の最大所要時間が経路1と比べて30秒長い時、経路2の最小所要時間が46秒短くないと同一交通量で魅力度が釣り合わないことを示している。従って、最小所要時間より最大所要時間の方が魅力度に与える影響が大きいと言える。これはファジィ目標のメンバーシップ関数が減少関数であるので、最大所要時間の変動の方が所要時間のメンバーシップ関数のうちファジィ目標を満たさない部分に与える影響が大きいからである。

可能性測度最大化配分モデルの代わりに図5.11に示す必然性測度(necessity measure)の概念を導入した場合、最大所要時間は考慮されることになるが、最小所要時間が考慮されなくなる。可能性測度最大化、必然性測度最大化の両方を満たす均衡解は存在しないため、可能性測度最大化配分モデルあるいは必然

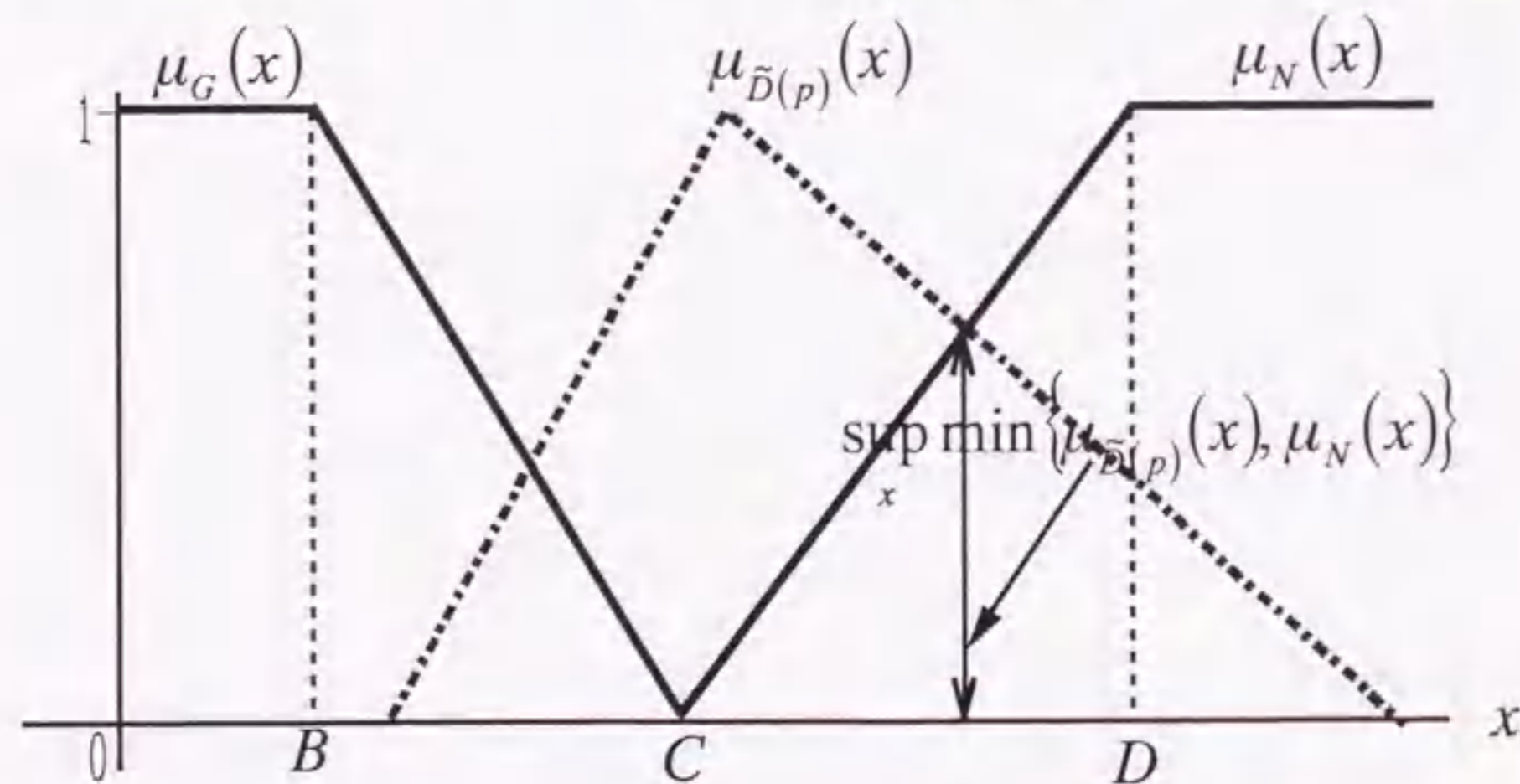


図 5.11 必然性測度最大化配分

性測度最大化配分モデルは理論的に不十分である。また、不満最小化配分モデルでは最小所要時間が減少すると経路の魅力が減少するという矛盾があるため、論理性に欠けていると言える。

5.3 ファジィ的交通量配分モデルのアルゴリズム

本節では、ファジィ的交通量配分モデルのうち、満足度最大化配分(MDUA)モデルのアルゴリズムについて考える。本配分モデルは、数理最適化問題とすることが困難であるため、利用者均衡配分などで用いられた Frank-Wolfe 法などのアルゴリズムは適用できない。そこで、ここでは交通需要予測ハンドブックに示されている IA*法を用いることにする。これは、OD を n 分割して配分し、次に配分された交通量が均衡解に近づくように修正を行なうものである。従って、得られる結果は均衡解とほぼ一致し、またリンクパフォーマンス関数も均衡配分で用いられるものと同じのものとするため、リンク旅行時間についても、均衡配分と同様のある程度信頼のある結果が得られる。

満足度最大化配分(MDUA)アルゴリズム

<Phase 0>

Step.0-1 初期リンクコストの設定

$$\text{リンクコスト } t_a^{(0)} = t_a(0); \quad \forall a \in A$$

<Phase 1>

Step.1-0 くり返し回数 $n=0$, 配分比率 $\epsilon=1/N_1$

Step.1-1 最短経路配分を行ない、それぞれの OD 間の所要時間を求める

Step.1-2 ファジィ目標の設定

Step.1-3 ファジィ最短経路アルゴリズムでそれぞれの OD 間のファジィ最短経路、満足度を求める

Step.1-4 OD 交通量の ϵ 倍をファジィ最短経路に乗せる

Step.1-5 リンクコストの改訂

Step.1-6 くり返し回数 $n < N_1$ であれば Step.1-1, そうでなければ Step.2-0 へ

<Phase 2>

Step.2-0 くり返し回数 $n=0$, 修正量 δ (十分小さな数) をセット

Step.2-1 各リンクの交通量を $(1-\delta)$ 倍する

Step.2-2 最短経路配分を行ない、それぞれの OD 間の所要時間を求める

Step.2-3 ファジィ目標の設定

Step.2-4 ファジィ最短経路アルゴリズムでそれぞれの OD 間のファジィ最短経路, 満足度を求める

Step.2-5 OD 交通量の δ 倍をファジィ最短経路に乗せる

Step.2-6 くり返し回数 $n < N^2$ であれば, Step.2-1 へ

満足度最大化配分(MDUA)に用いられるファジィ最短経路探索アルゴリズム

このアルゴリズムでは, Dijkstra 法と同様に, 一度の計算で 1 起点から全てのノードへのファジィ最短経路を求めることが出来る。

Step.0 テンポラリラベルを設定する

$$l_i = \begin{cases} \prod \tilde{D}_{li}(G) & (a_{li} \in A) \\ -\infty & (a_{li} \notin A) \end{cases}, \quad Par_i = \begin{cases} \{a_{li}\} & (a_{li} \in A) \\ \phi & (a_{li} \notin A) \end{cases}$$

$$P^*_i = \begin{cases} 1 & (i=1) \\ 0 & (i \neq 1) \end{cases}, \quad Route_i = \phi$$

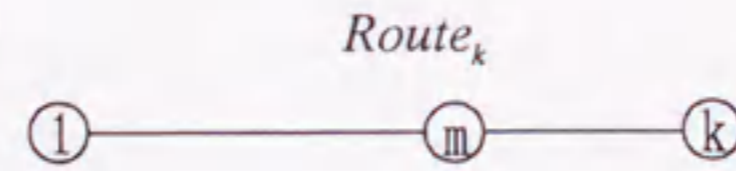
l_i はノード i のファジィ満足度, Par_i はノード i の検索対象経路集合, である

Step.1 l_i のうちで最大のものを選び, その時の i の値を k とする。

$$P^*_k = 1,$$

始点からの経路は $Route_k$

Step.2 $Route_k$ 上の k の隣接ノードを m として,



以下のように, ノード k の記憶経路に追加する条件が成立する場合は, 経路を記憶させる。

$$Par_k = Par_k \cup \{p + a_{mk} \mid p \in Par_m\}$$

経路 i が Par_k に追加される条件は, 以下の通りである。

$\forall r \in Par_k$ に対して,

$$mintime_i \leq mintime_r,$$

$$avgtime_i \leq avgtime_r,$$

$$maxtime_i \leq maxtime_r,$$

のうち, いずれか 1 つ以上が成立する場合

ここで, $mintime_i$, $avgtime_i$, $maxtime_i$ はそれぞれ経路 i の最小所要時間, 平均所要時間, 最大所要時間である。

Step.3 $i \in S(k) \setminus \{m, P^*_k = 0\}$ について

$$PPar_k = \{Route_i + a_{ik}\} \cup \{p + a_{ik} \mid p \in Par_i\}$$

$$Par_i = Par_i \cup \{Route_k + a_{ki}\} \cup \{p + a_{ki} \mid p \in Par_k\}$$

もし, Par_i に新しい経路が追加された場合は, ノード i を含む最適経路

上で

$$U = \{P^* = 1 \text{ で始点以外のノード}\}$$

$j \in U$ について経路を追加する。

$$Par_j = Par_j \cup \{p + \bar{a}_{ij} \mid p \in Par_i\}$$

また, ノード k の探索経路についても追加する。

$$Par_k = Par_k \cup PPar_k$$

Step.4 $i \in U$ について,

$j \in S(i) \setminus \{P^*_i = 1\}$ に対して

$$l_j = \max \left(l_j, \max_{p \in Par_i} \frac{\int \min \{ \mu_{\tilde{D}(p+a_{ij})}(x), \mu_G(x) \} dx}{\int \mu_{\tilde{D}(p+a_{ij})}(x) dx} \right)$$

また, $i \in S(k) \setminus \{P^*_k = 1\}$ について

$$l_i = \max \left(l_i, \frac{\int \min \{ \mu_{\tilde{D}(Route_k + a_{ki})}(x), \mu_G(x) \} dx}{\int \mu_{\tilde{D}(Route_k + a_{ki})}(x) dx}, \max_{p \in Par_k} \frac{\int \min \{ \mu_{\tilde{D}(p+a_{ki})}(x), \mu_G(x) \} dx}{\int \mu_{\tilde{D}(p+a_{ki})}(x) dx} \right)$$

Step.1 へ

他の配分原則においても, Step.4 の満足度の計算式が置き換わるだけで, 同様のアルゴリズムで計算することが可能である。

5.4 まとめ

本章では、まずファジィ的交通量配分モデルを開発する意義について述べ、従来の研究の問題点を指摘した。次に、可能性測度最大化配分モデル、満足度最大化配分モデル、不満最小化配分モデルの3モデルについて配分原則を定義し、満足度最大化配分モデル、不満最小化配分モデルについて定式化を行なった。1-ODペアの2経路の道路網を用いてこれらの配分モデルの特性について考察を行なった。その結果、配分原則の違いにより、配分結果が異なることが示された。可能性測度最大化配分モデルでは、最小所要時間のみが考慮されること、満足度最大化配分モデルでは最小所要時間より最大所要時間の変化の方が経路の魅力に与える影響が大きいこと、不満最小化配分モデルでは最小所要時間を減少させた場合、所要時間のばらつきが大きくなることから、その経路を嫌う傾向が出ること、満足度最大化配分モデルと可能性測度最大化配分モデルとを比較すると、可能性測度最大化配分モデルの方が最小所要時間の変化が経路交通量に与える影響が大きいことが分かった。

また、実ネットワークへの適用が可能な満足度最大化配分モデルの計算アルゴリズムの開発を行なった。

現在、ファジィ最短経路問題に関する研究が注目され、より効率的なファジィ最短経路問題の解法が島田ら(1998)、董(1999)などによって開発されつつあるので、これらの解法を組み込んだアルゴリズムの開発を行ない、それぞれの解法の比較、検討を行なうことが今後の課題として挙げられる。

参考文献

- 秋山孝正, 川原徹也(1997): ファジィ所要時間を用いた交通量配分モデル, 土木学会年次学術講演会講演概要集第IV部門, Vol.52, pp.624-625.
- Daganzo, C. F.(1982): Unconstrained External Formulation of Some Transportation Equilibrium Problems, *Transportation Science*, Vol.16, No.3, pp.332-360.
- 土木学会(1981): 交通需要予測ハンドブック, 技報堂出版, pp.105-106.
- 董彦文(1999): ファジィ最短経路解法とその解の評価, 福島大学経済学会商学論集, Vol.68, No.1, pp.61-74.
- Dubois, D., H. Prade(1978): Operations on Fuzzy Numbers, *International Journal of Systems Science*, Vol.9, No.6, pp.613-626.
- Dubois, D., H. Prade(1980): *Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications*, New York: Academic Press, pp.53-57.
- Fisk, C.(1980): Some Developments in Equilibrium Traffic Assignment Methodology, *Transportation Research*, Vol.14B, pp.243-245.
- 原元司, 阿部健一(1993): 確率的ネットワークにおける最短経路問題への分散学習オートマタアプローチ, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J76-D-II, No.9, pp.2116-2125.
- 伊藤健, 石井博昭(1996): 可能性測度によるファジィ最短経路問題の一モデル, 日本ファジィ学会誌, Vol.8, No.6, pp.1116-1124.
- 加藤誠巳(1998): 経路探索問題とその応用, *情報処理*, Vol.39, No.6, pp.552-557.
- 松井寛, 山田周治(1998): 道路交通センサデータに基づくBPR関数の設定, *交通工学*, Vol.33, No.6, pp.9-16.
- 島田文彦, 石井博昭, 伊藤健(1998): ファジィネットワーク上の最短経路問題, 日本ファジィ学会誌, Vol.10, No.2, pp.348-355.
- 菅野道夫, 室伏俊明(1993): ファジィ測度, 日刊工業新聞社, pp.73-86.
- Teodorovic, D., K. Vukadinovic(1998): *Traffic Control and Transport Planning: A Fuzzy Sets and Neural Networks Approach*, Kluwer Academic Publishers, pp.170-183.
- Wardrop, J. G.(1952): Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, *Proceedings of the Institute of Civil Engineers Part II*, pp.325-378.

第6章 ファジィ的交通量配分モデルの適用

6.1 仮想道路網による各種配分手法の比較

6.1.1 1-OD ペアの場合

図 6.1 に示すリンク数 17 本の仮想道路網を用いて、第 5 章で提案したアルゴリズムを用いた満足度最大化配分モデルと IA*法を用いた分割配分モデル、Frank-Wolfe 法を用いた利用者均衡配分モデル、Dial のアルゴリズムと部分線形化法を用いた確率的利用者均衡配分モデルの各モデル間の配分結果の比較を行った。

OD 交通量は、ノード 1→ノード 12 が 2500 台とした。ノード 7→ノード 9 の路線は一方通行、その他の路線は両方向通行である。また、リンクパフォーマンス関数は松井ら(1998)が平成 6 年度の全国ベースの道路交通センサスより推定した BPR 関数のうち、道路種別が幹線多車線道路のものを使用し、以下の通りとした。

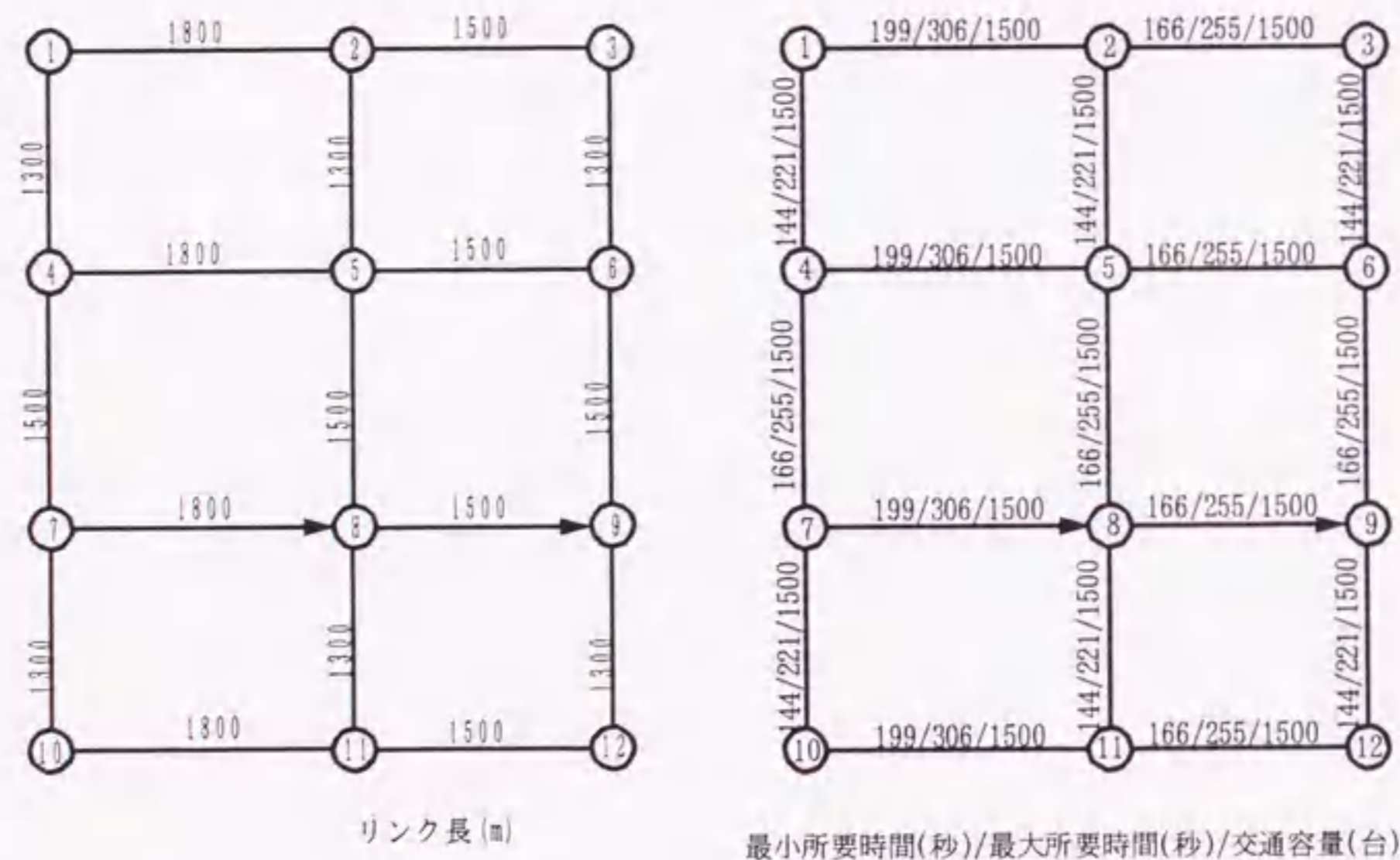


図 6.1 仮想道路網

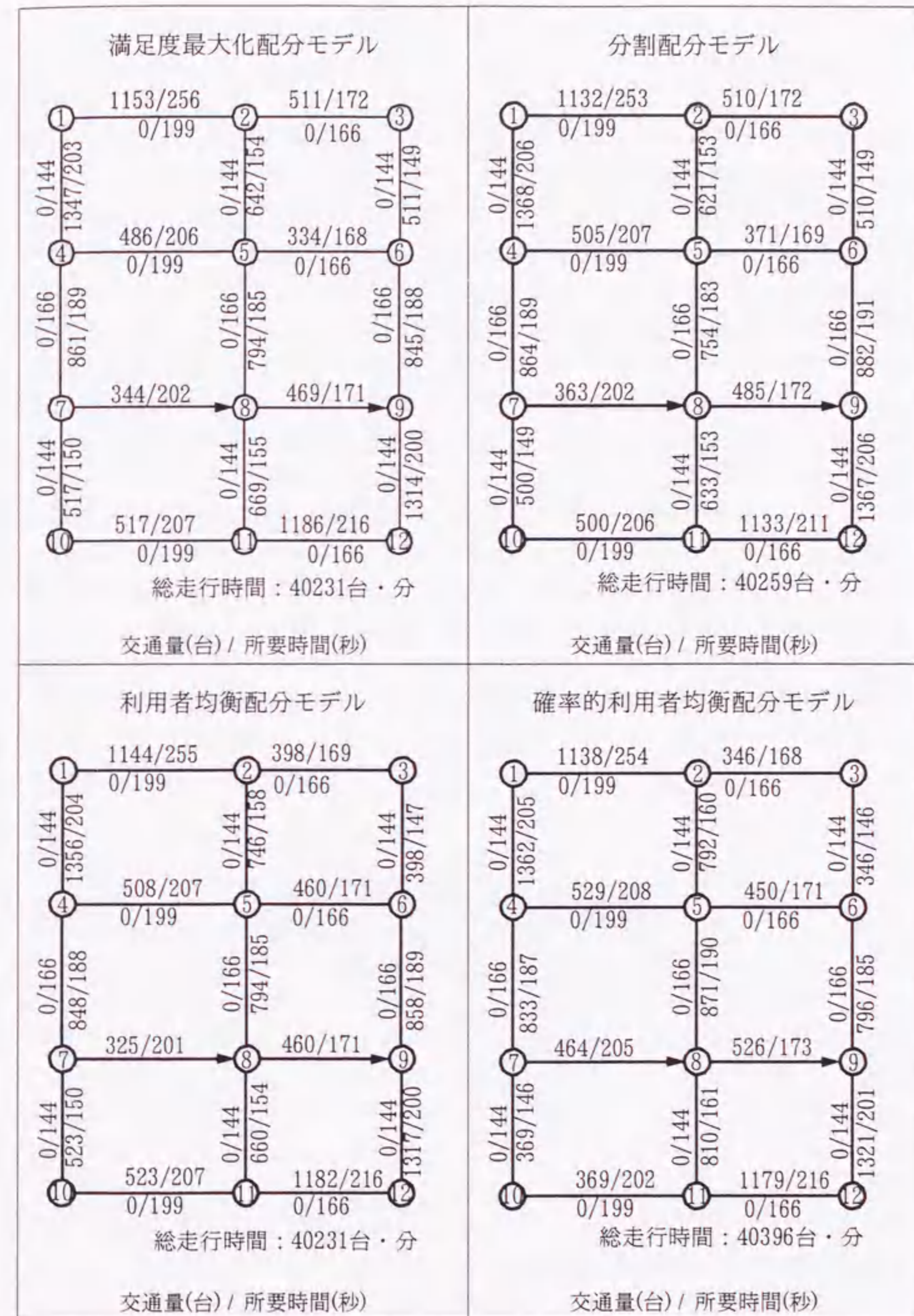


図 6.2 配分手法による配分交通量の比較(1-OD ペアの場合)

$$t_a = 1.84 \left\{ 1 + 0.54 \left(\frac{q_a}{c_a} \right)^{2.4} \right\}$$

但し、 t_a : 単位旅行時間(分/km), q_a : 時間交通量(pcu/時),
 c_a : 時間交通容量(pcu/時)

満足度最大化配分モデルで必要となる最小所要時間は、交通量を 0 台とした時のリンクパフォーマンス関数から求められる値、最大所要時間は交通量が交通容量である 1500 台流れたときのリンクパフォーマンス関数から求められる値を用いた。確率的利用者均衡配分において、ばらつきを表すパラメータ θ は 1.0 とした。

各リンクの配分交通量と所要時間を図 6.2 に示す。それぞれのモデルで配分結果にそれ程の差は見られないが、総走行時間で見ると、経路選択のばらつきを考慮している確率的利用者均衡配分モデルが若干長くなっている。

次に、満足度最大化配分モデルにおいて、最小所要時間は交通量を 0 台とした時のリンクパフォーマンス関数から求められる値を使用し、最大所要時間は、ノード 1 からノード 3 の路線およびノード 1 からノード 10 の路線は交通容量 1500 台に対して 1500 台流れた時の所要時間である 1km 当り 170 秒、ノード 4 からノード 6 の路線およびノード 2 からノード 11 の路線は激しく混雑する場合があると想定して 191 秒/km、ノード 7 からノード 9 の路線およびノード 3 か

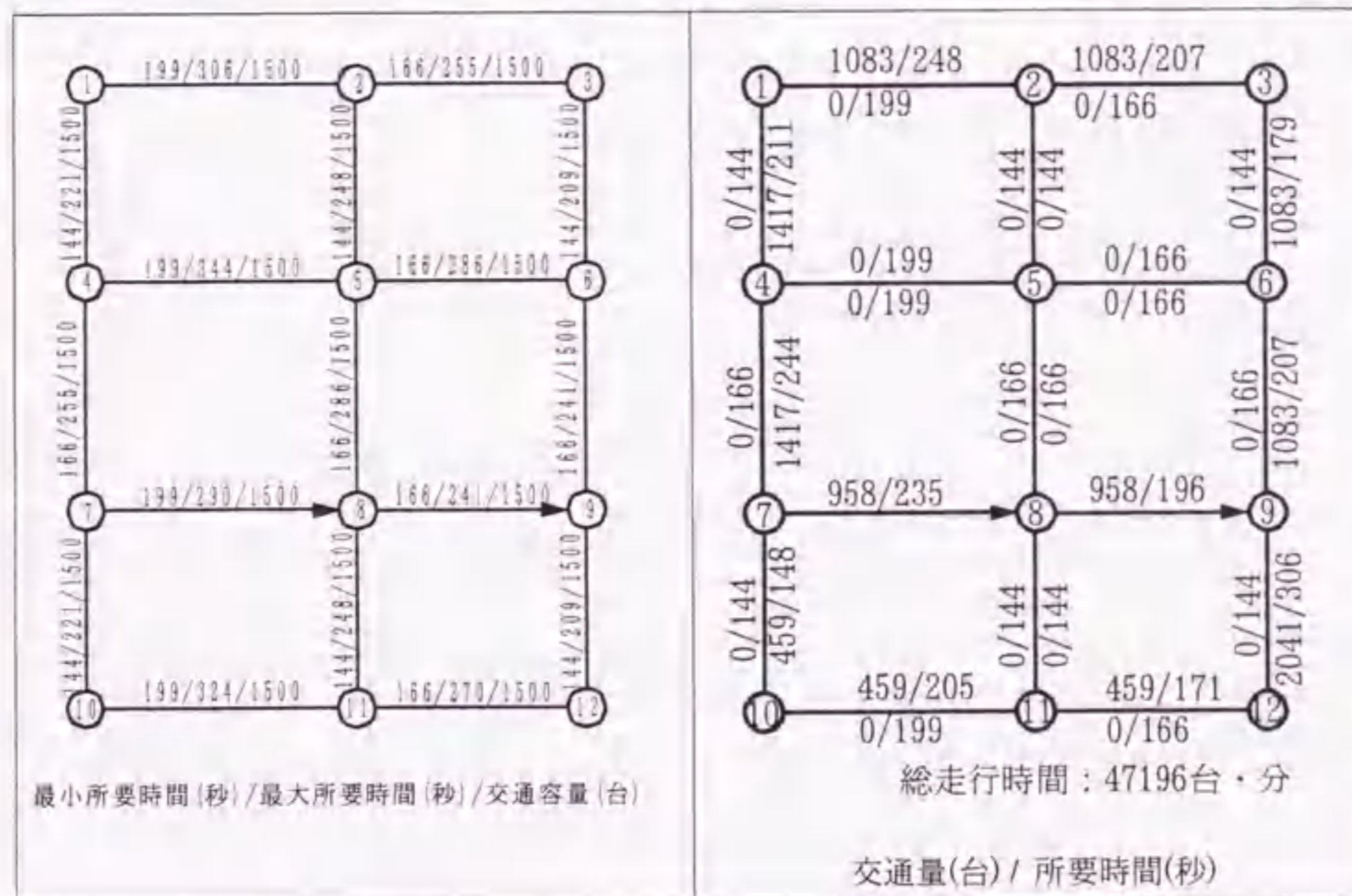


図 6.3 最大所要時間を変更した場合のリンク条件と配分結果

らノード 12 の路線はそれ程混雑しないと想定して 161 秒/km, ノード 10 からノード 12 の路線はやや激しく混雑する場合があると想定して 180 秒/km に設定した。

この条件で満足度最大化配分モデルを用いて計算を行なった各リンクの配分交通量と所要時間を図 6.3 に示す。このケースでは 1-OD ペアで OD 交通量も比較的少ないため、満足度最大化配分モデルでは、激しく混雑する場合があると想定した路線では交通量が 0 となり、それ程混雑しないと想定した路線が使用されていることが分かる。

満足度最大化配分モデルにおいて最大所要時間を同じにした場合と変更した場合の配分結果を比較する。総走行時間で見ると、最大所要時間を変更した方が変更しない場合と比べて 17% 増加している。最大所要時間を変更した場合は、運転者の各経路に対する思い込みにより、利用経路が集中して、結果的に走行時間が長くなったためであると考えられる。

最大所要時間を変更した満足度最大化配分モデルと利用者均衡配分モデルとを比較すると、利用者均衡配分モデルでは、配分原則より、利用された経路はどの経路も所要時間が同じ 966 秒に対して、満足度最大化配分モデルは、所要時間でなく満足度で均衡させるため、ノード 1 からノード 7, ノード 9 を経由してノード 12 に到達する経路が 1192 秒に対し、ノード 10 を経由する経路では 979 秒であり、経路間で最大 213 秒の所要時間差が出ている。しかしながら、満足度最大化配分モデルで最大所要時間を同じにした場合は、リンク条件が同じであることから、所要時間はどの経路でも同じになっている。

6.1.2 複数 OD ペアの場合

図 6.3 に示した最大所要時間を変更した仮想道路網を用いて、表 6.1 に示す OD 交通量を用いて満足度最大化配分モデルと利用者均衡配分モデルとの比較を行なった。各リンクの配分交通量と所要時間を図 6.4 に示す。やはり、この場合も満足度最大化配分モデルでは、激しく混雑すると想定した経路はほとんど交通量は配分されず、あまり混雑しないと想定した経路に多く配分されている。例えば、ノード 7-ノード 8 の区間は、あまり混雑しないと想定した路線であるが、利用者均衡配分モデルでは 509 台に対して、満足度最大化配分モデルでは 1130 台であり、約 2 倍の交通量が配分されている。また、ノード 1-ノード 3 の路線などは最大所要時間を交通容量である 1500 台を基に求めたが、配分された交通量は利用者均衡配分モデルより多くなっている。これは、激しく混雑すると想定した路線にはほとんど配分されなかったのが原因であると考えられる。総走行時間で見ると、満足度最大化配分モデルの方が 24% 多くなっている。

表 6.1 OD 交通量

O \ D	1	3	10	12
1	-	500	500	1,000
3	500	-	1,000	500
10	500	1,000	-	500
12	1,000	500	500	-

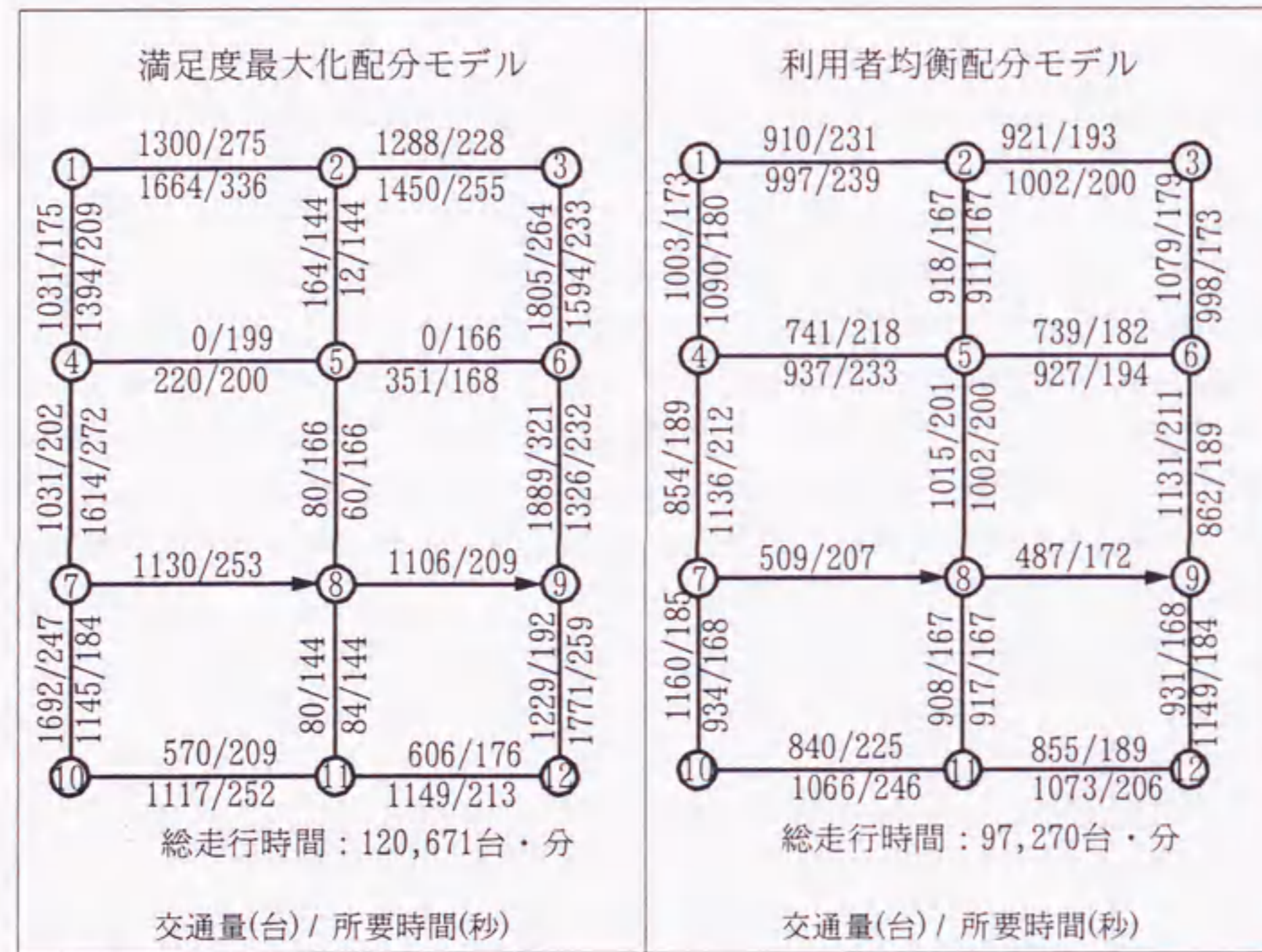


図 6.4 配分手法による配分交通量の比較(複数 OD ペアの場合)

満足度最大化配分モデルは最小所要時間，最大所要時間の与え方によって配分される交通量が大幅に変化することから，これらの与え方について十分検討する必要がある。IT(Information Technology)技術，ITS 技術の進展により，多くの車両の所要時間に関する情報収集が容易に行なうことが出来るようになれば，各道路区間で適切な最小・最大所要時間の値を与えることが出来るようになると期待される。

6.2 実道路網を用いた配分精度の検討

6.2.1 使用データの概要

リンクデータは，図 6.5 に示す名古屋都市圏の幹線道路を対象に作成した。リンク数は両方向を 1 本と数えて 4303 本である。この中には，東名・名神高速道路，中央自動車道，東名阪自動車道，名古屋高速道路，知多半島道路が含まれる。また，ノード数は 1304 である。OD データは平成 3 年に実施された第 3 回中京都市圏パーソントリップ調査をベースに平成 8 年度の OD 交通量の予測値を求めたものを使用した。ゾーン分割はパーソントリップ調査の小ゾーンを基本とし，名古屋市内を 108 ゾーン，名古屋市外を 171 ゾーンとした。



図 6.5 対象道路網

6.2.2 計算条件

ネットワークには東名高速道路、名古屋高速道路、東名阪自動車道などの有料道路が含まれているが、これらについては、通行料金を時間価値を用いて時間に変換し、それをリンク旅行時間に上乗せする料金抵抗法を用いて処理を行った。時間価値については日本総合研究所の「道路投資の評価に関する指針」より乗用車類の時間価値原単位である67.27円/台・分を用いた。

満足度最大化配分モデルに用いる最小・最大所要時間はリンクパフォーマンス関数から最小所要時間は交通量が0の時の値、最大所要時間は交通量が交通容量の時の値を用いた。



図 6.6 満足度最大化配分結果を用いた混雑状況(ピーク交通量)

6.2.3 配分計算結果

ピーク時間帯である午前7時から9時までの2時間のOD交通量を用いて配分を行なった。満足度最大化配分モデルを用いた配分結果を基に混雑度を計算した結果を図6.6、上下方向別の満足度最大化配分モデルの配分結果と現況交通量との比較を図6.7に示す。また、比較のために利用者均衡配分モデル、確率的利用者均衡配分モデルを用いて配分を行なった。評価指標の定義を表6.2に、それぞれの配分結果でのRMS誤差などの指標を表6.3に示す。

評価指標の値などを見ると、全ての配分モデルにおいて良い結果が得られなかった。これは、配分モデルだけでなくODデータの精度などにも問題があると考えられる。確率的利用者均衡配分においては、ばらつきを表すパラメータ θ は1.0としたが、利用者均衡配分モデルと比較すると、どの指標で見ても適合度は下がっている。この θ の値は大きくなるにつれ利用者均衡配分モデルの結果に近づくため、このケースでは1.0より大きい、つまり利用者によるばらつきが少ない方が適合度が高くなるのではないかと考えられる。それと同様に満足度最大化配分モデルにおいても利用者均衡配分モデルと比較して適合度は低い結果になった。また、道路種別ごとに見ると、都市間高速道路は交通量の観測地

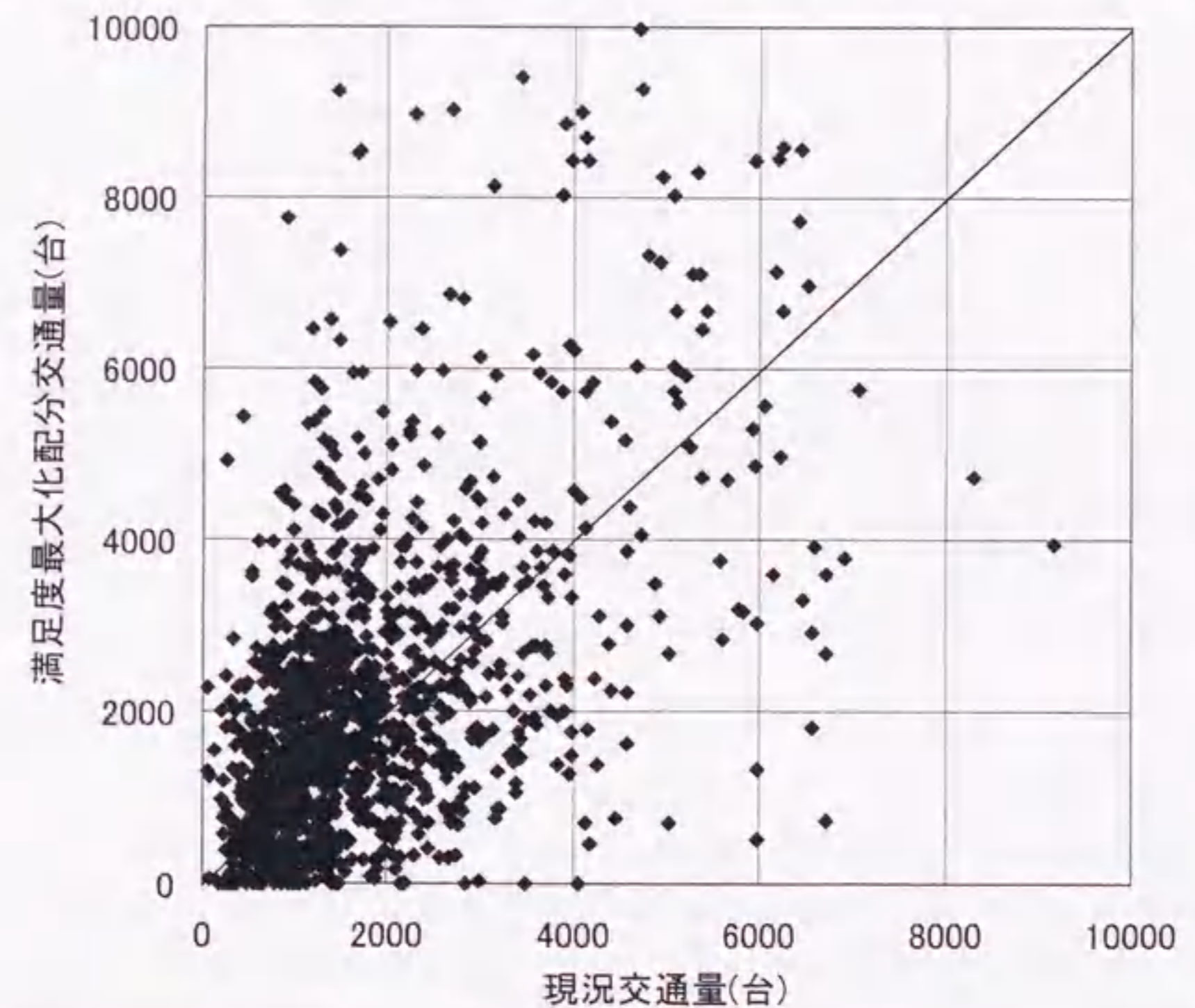


図 6.7 満足度最大化配分の配分結果と現況交通量との比較(ピーク交通量)

表 6.2 各評価指標の定義

評価指標	定義
平均絶対推計誤差	$e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i - A_i $
Abs.RMS	$Abs.RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - A_i)^2}{n}}$
%RMS	$\%RMS = \frac{Abs.RMS}{\bar{A}}$
平均誤差率	$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left \frac{P_i - A_i}{A_i} \right \times 100$
相関係数	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}}$

但し、 A_i, \bar{A} : 現況交通量とその平均値、 P_i, \bar{P} : 配分交通量とその平均値、 n : サンプル数

点数が少ないこともあり、どの配分モデルでも相関係数で見ると非常に悪いが、平均誤差率などの指標では、他の道路種別と比べてそれ程悪いとは言えない。次に、都市高速道路では、利用者均衡配分モデルが他の配分モデルと比べて適合度が高くなっている。また、一般道については、配分モデルによる差はほとんどない。

次に、日 OD 交通量を用いて配分を行なった。利用者均衡配分モデル、確率的利用者均衡配分モデルを用いた場合と、満足度最大化配分モデルを用いた場合の RMS 誤差などの評価指標を表 6.4 に示す。

全体で見ると、こちらも利用者均衡配分モデルが適合度が一番高く、確率的利用者均衡配分モデルは適合度が低くなっている。道路種別ごとに見ると、満足度最大化配分モデルでは幹線多車線道路の適合度が他の道路種別と比べて良い。

表 6.3 道路種別ごとのモデル精度の比較(ピーク交通量)

道路種別	評価指標	満足度最大化配分モデル	利用者均衡配分モデル	確率的利用者均衡配分モデル
全体 (1310)	平均絶対推計誤差	1,178	1,042	1,210
	Abs.RMS	1,780	1,484	1,769
	%RMS	0.99	0.83	0.98
	平均誤差率	91.7	85.9	94.4
	相関係数	0.59	0.57	0.23
都市間高速道路 (13)	平均絶対推計誤差	3,454	3,074	4,512
	Abs.RMS	4,208	3,811	4,751
	%RMS	0.81	0.73	0.91
	平均誤差率	72.4	63.7	85.0
	相関係数	-0.41	-0.41	-0.24
都市高速道路 (49)	平均絶対推計誤差	4,062	1,976	4,816
	Abs.RMS	5,134	2,407	5,067
	%RMS	1.05	0.49	1.04
	平均誤差率	112	46.4	97.8
	相関係数	0.28	0.50	0.20
幹線多車線道路 (778)	平均絶対推計誤差	1,177	1,101	1,162
	Abs.RMS	1,626	1,544	1,574
	%RMS	0.85	0.80	0.82
	平均誤差率	79.6	75.8	82.7
	相関係数	0.38	0.47	0.41
幹線2車線道路 (470)	平均絶対推計誤差	815	790	822
	Abs.RMS	1,105	1,089	1,148
	%RMS	0.94	0.92	0.97
	平均誤差率	110	107	113
	相関係数	0.39	0.50	0.49

表 6.4 道路種別ごとのモデル精度の比較(日交通量)

道路種別	評価指標	満足度最大化 配分モデル	利用者均衡 配分モデル	確率的利用者 均衡配分モデル
全体 (202)	平均絶対推計誤差	12,647	7,919	15,776
	Abs.RMS	17,782	11,023	20,413
	%.RMS	0.79	0.49	0.91
	平均誤差率	55.7	38.3	67.5
	相関係数	0.64	0.68	-0.03
都市間 高速道路 (12)	平均絶対推計誤差	24,900	15,233	28,059
	Abs.RMS	29,073	19,112	31,257
	%.RMS	0.68	0.45	0.73
	平均誤差率	56.3	34.6	66.9
	相関係数	0.86	0.85	0.42
都市 高速道路 (37)	平均絶対推計誤差	24,943	9,563	31,921
	Abs.RMS	29,712	13,006	32,663
	%.RMS	0.90	0.39	0.99
	平均誤差率	78.7	30.0	96.4
	相関係数	0.29	0.39	-0.08
幹線多車 線道路 (134)	平均絶対推計誤差	8,402	6,681	11,066
	Abs.RMS	11,522	9,110	14,990
	%.RMS	0.63	0.50	0.82
	平均誤差率	49.4	40.5	62.1
	相関係数	0.49	0.67	0.18
幹線2車 線道路 (19)	平均絶対推計誤差	10,896	8,837	9,795
	Abs.RMS	13,130	12,094	12,283
	%.RMS	0.72	0.66	0.67
	平均誤差率	54.7	41.2	49.2
	相関係数	0.30	0.27	0.15

満足度最大化配分モデルでは、最小・最大所要時間は現時点では適切なデータが得られていないため、リンクパフォーマンス関数から最小所要時間は交通量が0の時の値、最大所要時間は交通量が交通容量の時の値を用いたが、この仮定が適切ではなかったということも考えられる。事実、道路によってはいつも混雑しているところ、いつもスムーズに通ることが出来るところがあり、最小・最大所要時間はこのようなことを考慮して決定するべきである。前にも述べた通り、今後道路種別ごとあるいは各道路区間ごとに適切な最小・最大所要時間の設定を行なう必要がある。

参考文献

- 道路投資の評価に関する指針検討委員会(1998): 道路投資の評価に関する指針(案), 日本総合研究所, pp.6.
- 建設省中部地方建設局(1998): 平成9年度道路交通センサスー全国道路交通情勢調査 一般交通量調査箇所別基本表, 建設省中部地方建設局.
- 建設省道路局(1995): 平成6年度道路交通センサスー全国道路交通情勢調査 一般交通量調査箇所別基本表 第2分冊・西日本編, 交通工学研究会.
- 松井寛, 山田周治(1998): 道路交通センサスデータに基づくBPR関数の設定, 交通工学, Vol.33, No.6, pp.9-16.
- 溝上章志, 松井寛(1990): 均衡交通量配分手法の推定特性に関する実証的分析, 交通工学, Vol.25, No.6, pp.33-43.
- 日本道路協会(1984): 道路の交通容量, 丸善, pp.19-35.

第7章 ファジィ的ニューラルネットワークを用いた追従走行モデルの構築

7.1 追従走行モデルの開発の意義

追従走行モデルは、先行車の影響を受ける場合の後続車の走行状態を決定するためのモデルである。これに関する研究は、Pipes(1953)によって線形モデルが提案され、この中で2番目以降の車両の動きをラプラス変換を用いて解いたのが始まりであろう。線形モデルは、加速度が T なる反応遅れ時間を伴って先行車との速度差に関係するものと仮定したモデルである。このモデルを基に交通流の安定条件を導いた研究としては、Hermanら(1959)によるものなどがある。非線形モデルとしては、Gazisら(1961)によるものがよく知られている。このモデルでは、定常状態を仮定した場合、密度、速度および交通量の関係が導き出される。この非線形モデルの最適パラメータを求める研究がこれ以降、活発に行なわれており、例えばMayら(1967)によるものなどがある。これらの研究については、Brackstoneら(1999)、大口(2000)によって詳しくまとめられている。

Kometaniら(1959)は安全車間距離を用いたモデルを提案した。これは先行車に衝突しないように車間距離を保つことを前提に求めたモデルである。またGipps(1981)は、このモデルに幾つかの改良を加えた。

近年では、適切な車間距離を維持するAdaptive Cruise Control System等の安全運転支援システム、自動運転システムの開発のため、追従走行モデルの必要性が増加し、脚光を浴びている。その中で、Kikuchiら(1992)をはじめとして、人間行動の曖昧性を数学的に扱ったファジィ理論を用いたモデルも数多く提案されている。しかしながら、ファジィ理論の重要な部分であるメンバーシップ関数を交通調査によって求めたものはMcDonaldら(1997)によるもの以外はほとんどなく、現実に即したメンバーシップ関数を効率的に求めることが課題になっている。

そこで本章では、走行調査によりデータを取得し、ニューラルネットワークを援用したファジィ理論によるモデル化を行ない、運転者属性別にメンバーシップ関数を効率的に求める方法について論じる。

7.2 ファジィ的ニューラルネットワークを用いた追従走行モデル

7.2.1 追従走行モデルの概要

一般的に運転者は、前を走行している車両2台、左右を走行している車両、後ろを走行している車両の計5台の状況を把握しながら運転すると言われている。本来であれば、モデルにこれらの車両の影響を組み込むべきであるが、モデルが非常に複雑になること、挙動を解析するためのデータの取得が大がかりになるという問題がある。また、モデルの適用の際は、例えば、あるリンクの先頭車から順に速度を決定する場合、後ろを走行している車両についてはまだ計算されていないため、このようなモデルにした場合、そのまま適用することは不可能である。従って、ここでは前を走行している車両1台のみの影響を考え、加速度を決定するモデルを考える。

7.2.2 ファジィ的ニューラルネットワークについて

運転者は自動車を運転する際に、「走行速度が〇〇km/h、車間距離が××mであるので、 $\Delta\Delta m/s^2$ で加速しよう」とはあまり考えず、「走行速度が少し遅く、車間距離がかなり開いているので、少し加速しよう」などと考えてアクセル・ブレーキ操作を行なうのが一般的であろう。追従走行モデルでは運転行動を行動論的に再現する必要があるため、ここでは人間の持つあいまいな制御アルゴリズムを言語的表現のままに取り扱うことが出来るファジィ理論を使用してモデル化を行なう。しかしながら、ファジィ理論では制御アルゴリズムを正確に把握することは非常に困難であるという欠点を有するため、ファジィ理論のみの本モデル化への適用は難しい。

これに対してニューラルネットワークは神経細胞を工学的にモデル化したものであり、教師データを与えて学習を行なうことにより、望ましい入出力関係を実現するモデルである。これにより、知識を自動的に獲得することが出来るが、その知識はシナプス(synapse)の結合荷重として分散記憶されるため、その特性を定性的に把握することが難しいということが問題である。また、ニューラルネットワークの構造は、分析者が自由に設定できるが、これが学習の収束性、汎化能力に影響を与えることも問題の1つである。

近年、ファジィ理論とニューラルネットワークとを融合したファジィ・ニューラルネットワークに関する研究や遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm)と組み合わせた研究が注目され、数多くの手法が提案されている。例えば、遺伝的アルゴリズムと組み合わせた例では、井上ら(1996)によるものがある。しかし、この方法では実測値に合わせてメンバーシップ関数を設定することは出来ない。

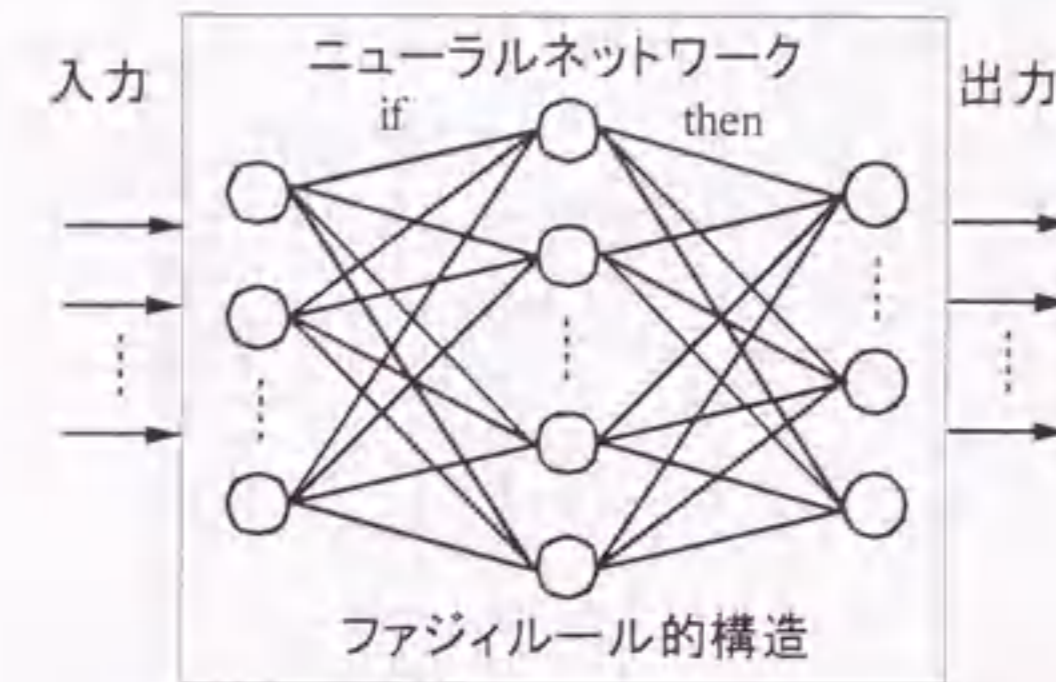


図 7.1 ファジィ的ニューラルネットワーク

本モデル化においては、堀川(1994)によるファジィ的ニューラルネットワークを用いる。これは、図 7.1 に示すファジィ推論の構造を持つニューラルネットワークである。モデルとしてはニューラルネットワークのみを用いているが、学習後の出力値は、ファジィ制御の推論値を表している。このモデルは、通常のニューラルネットワークと同様に所望の入出力関係を自動的に同定できるだけでなく、学習結果をファジィルールとしてわかりやすく表現できるという特徴を持つ。本モデル化においては、各運転者属性間でメンバーシップ関数を比較することにより、運転特性を把握できるという利点がある。

7.3 GPS を用いた走行データの収集

7.3.1 測量用 GPS 受信機を用いる利点と欠点

GPS(Global Positioning System)は 1970 年代に米国国防省(Department of Defense)により開発が行なわれ、GPS 衛星が 24 個打ち上げられており、高度約 20,000km の円軌道を、一周約 12 時間で回りながら地上に電波を送っている。GPS は複数の GPS 衛星からの電波を受信機で受信することにより位置を求めるシステムである。GPS による位置決定法には、単独測位と相対測位とがあり、それぞれ精度は図 7.2 の通りである。2000 年 5 月に SA(Selective Availability)が解除され、一般的な用途でも従来と比較して高精度の計測が可能となった。しかしながら、本研究では 2 台の車両の相対距離を数十 cm の精度で求める必要があるため、単独測位や現在カーナビゲーションシステムで用いられている Differential-GPS では不十分である。そこで、本研究ではキネマティック干渉測位を応用した方法を考案した。本来、キネマティック干渉測位法は 1 台の受信機を測量の基準点となるべき点に固定し、もう 1 台の受信機では、常に電波

単独測位	精度 16m
相対測位	Differential-GPS 精度 2~3m
	スタティック干渉測位 精度 1~2cm
	キネマティック干渉測位 精度 1~2cm

図 7.2 GPS による位置決定法の分類とその精度(2000年5月以降)

を受信しながら測点を順次移動しつつ1点あたり1分間前後計測する手法である。ここでは、移動中も常に電波を受信し続けているという点に注目した。データの取り込み間隔は、ここでは1秒間隔で固定とした。この設定した時間間隔で受信した地点すべてを測点とみなし、計算を行なうことによって各車両の軌跡を求めることとした。

本手法は従来の研究において一般的に用いられているビデオカメラによる方法、レーザー距離計を用いた方法と比較すると、機材が高価であり、衛星の状態により計測可能時刻が限られる、扱いが煩雑である、リアルタイムでデータを得ることが出来ないという欠点を持つが、走行位置が分かること、計測値にタイヤと路面との滑りの影響がなく安定した計測が行なえること、車両の違いによる計測速度の誤差がないこと、前後車両の時刻による同期がとれること、測定精度が非常に高いこと、三次元の座標値が得られるため勾配等も求めることが出来るという利点を持つ。

表 7.1 GPS 受信機(SOKKIA GSS1A)の仕様

受信帯域	L1 帯(1575.42MHz)
受信チャンネル数	8
観測種類	スタティック測量 短縮スタティック測量 キネマティック測量 R.T.K.測量
精度(基線精度)	
スタティック測量	$\pm(5+2p.p.m. \times D)mm$
キネマティック測量	$\pm(20+2p.p.m. \times D)mm$ (Dは測定距離, 単位は mm)
データ記録時間	74分 (512KB メモリーカード使用・測定時間間隔 1秒)

表 7.2 精度試験時の観測条件

受信衛星数	5
GDOP	4~5
基準点との距離	最大 670m
アンテナ間の距離	396.8cm

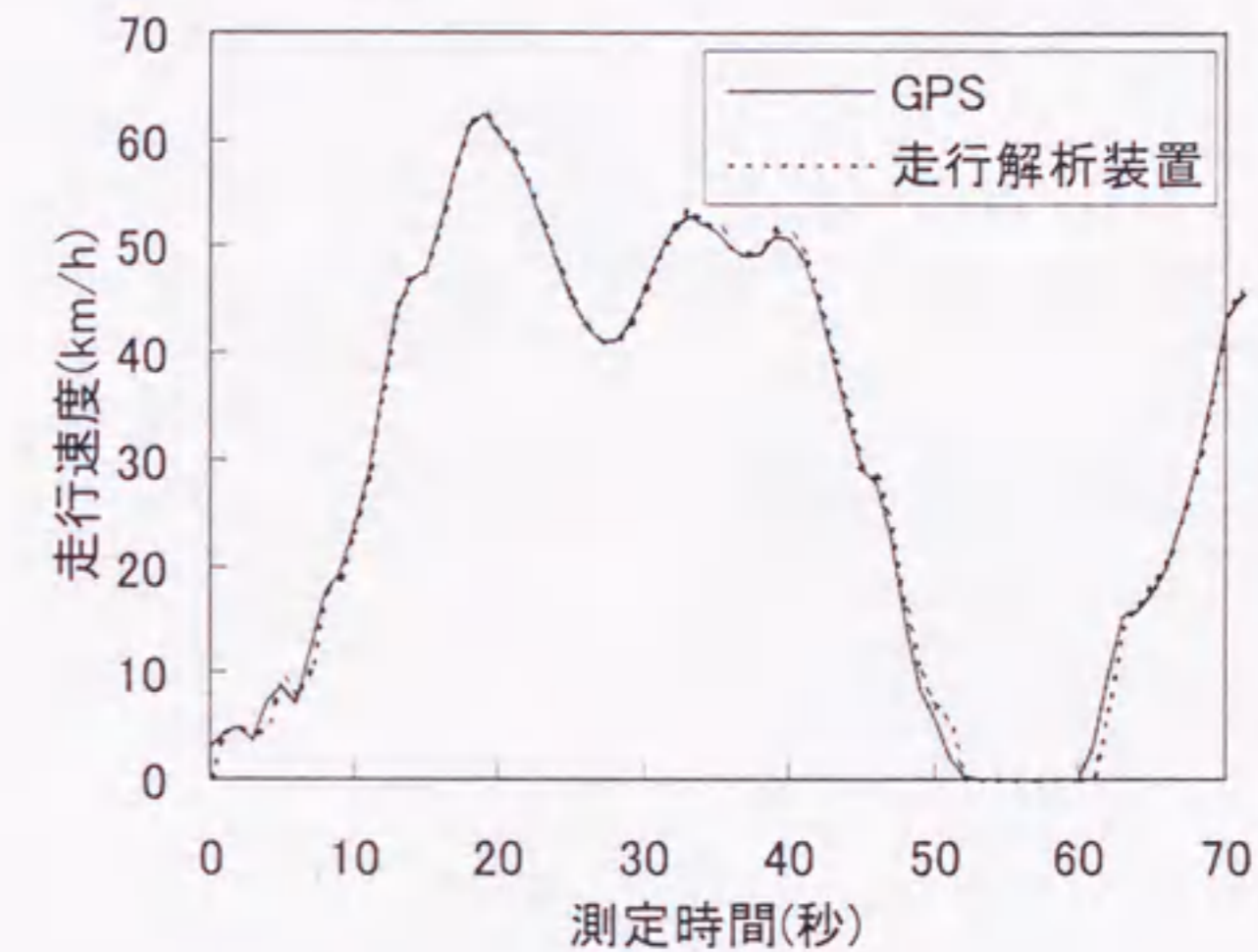


図 7.3 時系列の走行速度調査

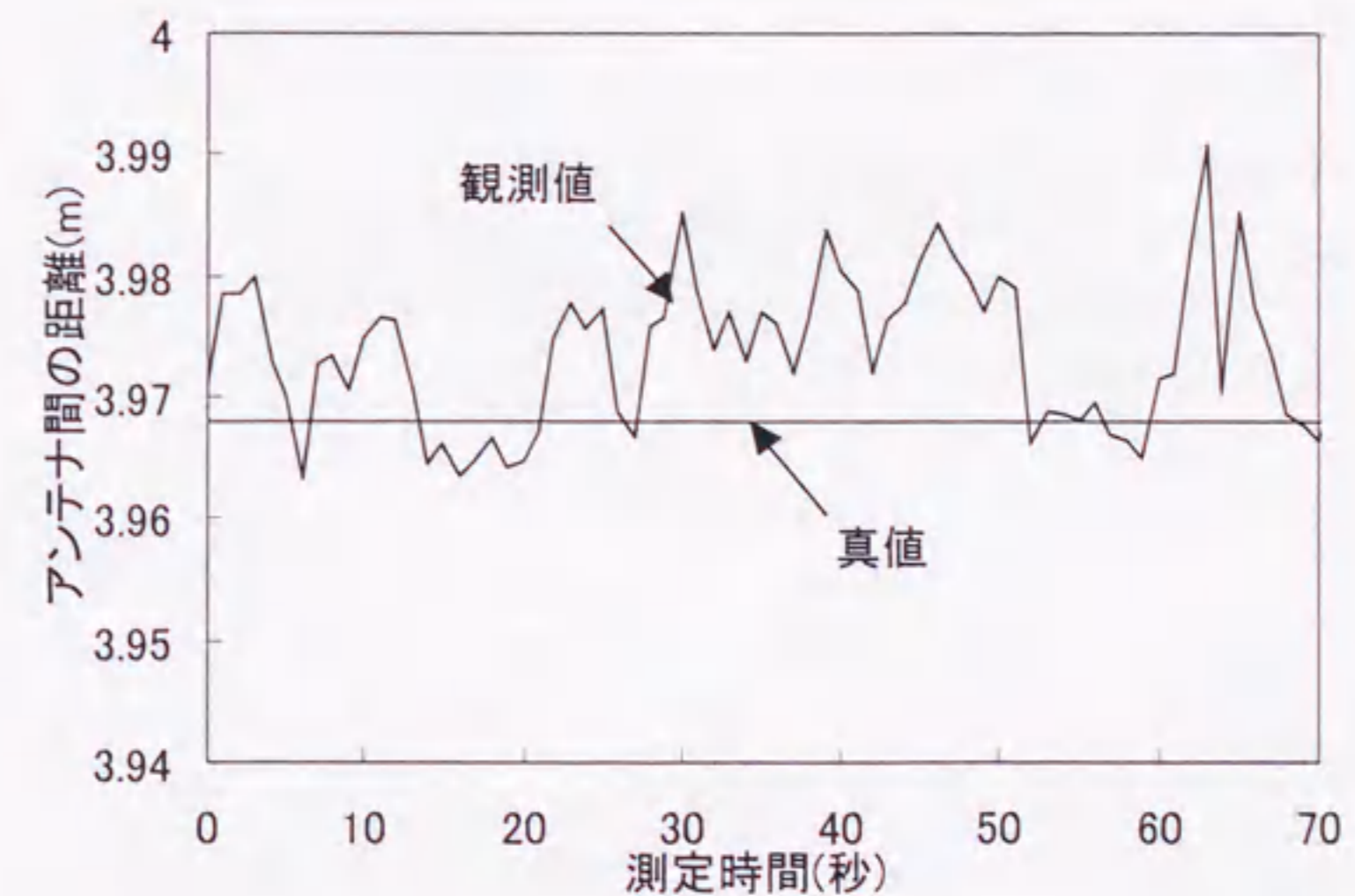


図 7.4 時系列のアンテナ間距離の測定

GPS 受信機は SOKKIA 製 GSS1A を用いた。主な仕様を表 7.1 に示す。本計測法の精度試験を行なうために、同一車両に 2 台の GPS 受信機を約 4m 離して設置し、最大 60km/h で走行を行なった。また、0.5 秒毎に自動車側からの速度が記録できる走行解析装置(YAZAKI 製 YAZAC-5064)により走行速度の計測を同時に行なった。観測条件を表 7.2 に示すが、これは 1 日のうちでもあまり良くない衛星の位置関係である。なお、GDOP(Geometrical Dilution Of Precision)とは、衛星の位置関係が測定に適しているかどうかを示す指標であり、値が小さいほど測定に適しており、5 以下であれば測定が可能であると言われている。GPS のデータより求めた走行速度と、走行解析装置より得られた走行速度との比較を図 7.3、時系列のアンテナ間距離の測定結果を図 7.4 に示す。距離についての誤差は 2.2cm 以内に収まっており、GSS1A での通常のキネマティック測量の公称精度である 2.1cm に近い精度である。このため速度も理論的に 0.01km/h のオーダーで非常に精度良く求められることが分かった。走行解析装置の結果と比べても走行速度はほぼ一致しており、十分実用的であることが実証された。なお、衛星の位置関係の条件が良い時間帯に調査を実施した場合、さらに精度が向上すると期待できる。

7.3.2 追従走行モデル構築のための走行調査

車両走行挙動のモデル化を行なうために、一般道路上での追従走行状態での走行データを得る目的で調査を行なった。車種区分については、道路交通法と道路運送車両法とはその定義は異なるが、ここでは道路運送車両法に示される小型自動車(総排気量が 2.00 リットル以下、自動車の長さ 4.70m 以下、幅 1.70m 以下、高さ 2.00m 以下)を乗用車、普通自動車(小型自動車、軽自動車、大型特殊自動車及び小型特殊自動車以外の自動車)をトラックと呼ぶこととする。また、調査に使用する車両はトラックについては最大積載量が 4,250kg のレンタル車両、乗用車については被験者の所有する車両を用いて行なった。被験者の属性を表 7.3 に示す。

調査は、次に示す方法で行なった。まず、図 7.5 に示すように、基準点・先導車・被験者車両に GPS 受信機を設置する。なお、GPS アンテナは無線アンテナ用マグネットを用いて車両の屋根に取り付けた。あらかじめ正確な座標値を求めた出発点から、先導車は速度を 0km/h から 60km/h まで変化させながら走行し、被験者車両は先導車の後ろを走行し、1 秒毎に GPS 観測データをメモリカードに記録する。測定終了後に測定データを解析ソフトウェア(自作プログラムと SOKKIA 製 GSPRO-1 plus)を用いて解析し、1 秒毎に各車両の 3 次元座標値を求め、この座標値から走行速度・加速度・車間距離などを計算する。

調査場所は他の交通の影響をほとんど受けず、また衛星からの電波の受信の

表 7.3 被験者一覧

No.	性別	年齢層	車種	調査場所
1	男性	20 歳台	トラック	弥富
2	男性	20 歳台	トラック	弥富
3	男性	60 歳台	乗用車	弥富
4	女性	60 歳台	乗用車	弥富
5	女性	20 歳台	乗用車	弥富
6	男性	20 歳台	乗用車	弥富
7	男性	20 歳台	乗用車	弥富
8	男性	70 歳台	乗用車	浄水
9	女性	40 歳台	乗用車	浄水
10	男性	20 歳台	乗用車	浄水
11	女性	60 歳台	乗用車	浄水
12	男性	30 歳台	乗用車	浄水
13	男性	20 歳台	乗用車	浄水
14	男性	70 歳台	乗用車	浄水
15	男性	50 歳台	乗用車	浄水
16	女性	20 歳台	乗用車	浄水

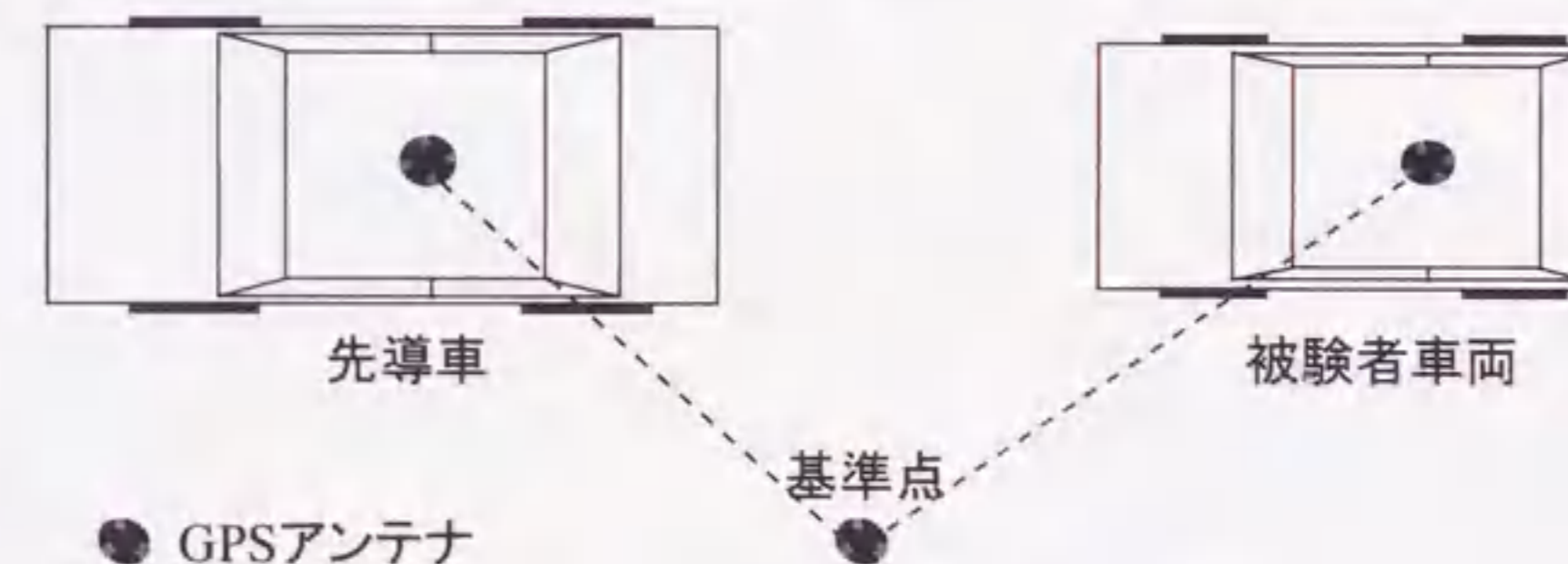


図 7.5 GPS による走行調査方法

障害になる建造物のない場所として、2 箇所選定した。1 箇所は図 7.6 に示す愛知県海部郡弥富町富浜緑地周辺とし、富浜緑地駐車場内に基準点を設け、出発点とした。また、測定距離は周回・折り返しも含めた約 12.5km とした。もう 1

箇所は、図 7.7 に示す愛知県豊田市浄水町の名鉄豊田線浄水駅周辺であり、浄水駅近辺と豊田浄水場グランド駐車場内に基準点を設けた。測定距離は折り返しを含めた約 2.6km である。なお、測定基準点はあらかじめ GPS によるスタティック測量を行ない、点を設置した。その座標値を表 7.4 に示す。

本調査は衛星からの電波の受信状態に左右されるため、あらかじめ各 GPS 衛星の軌道を計算しておき、受信可能衛星数が 7 以上でかつ、GDOP の値が 5 以下の時間帯を選んで調査を行なった。

走行調査では、1 被験者当たり 20 分以上の調査のため、1,200 以上の各車両の座標データが得られ、また走行速度もばらつきをもっており、追従挙動を解析するのに十分なデータが得られた。



図 7.6 調査実施場所(愛知県海部郡弥富町富浜緑地周辺)



図 7.7 調査実施場所(愛知県豊田市浄水町周辺)

表 7.4 測定基準点の座標値

基準点名	WGS84 緯度	WGS84 経度	楕円体高
富浜緑地	35° 02' 01.20" N	137° 46' 34.37" E	23.35m
浄水第 1	35° 07' 12.83" N	137° 08' 07.94" E	80.00m
浄水第 2	35° 07' 22.71" N	137° 08' 37.24" E	168.00m

WGS84 (World Geodetic System 1984) : 測地座標系の一つ

7.4 追従走行モデルの構築

追従走行を行なう際は、自車速度・前車速度・車間距離・前車加速度・前車の車種および運転者・路面状態など、様々な要因を総合的に判断してアクセル・ブレーキの操作を行なっていると考えられる。従来の追従理論においては前後車両の速度差(線形関係)・車間距離(非線形関係)・走行速度(非線形関係)を説明変数としているものが多い。しかしながら、微視的道路交通シミュレーションへの適用の際は、加速度の誤差が速度差に大きな影響を与え、シミュレーションの再現性が低下するため、1秒前の走行速度と車間距離とを用いて、追従走行

表 7.5 ファジィルール一覧

(速度 X, 車間距離 Y, 加速度 Z の関係)

X \ Y	short	middle	large
low	Rule1	Rule2	Rule3
	middle	high	high
middle	Rule4	Rule5	Rule6
	low	middle	high
high	Rule7	Rule8	Rule9
	low	low	middle

モデルの構築を行なうこととした。ここで、1秒前の速度・車間距離を用いた理由は、運転者の反応遅れ時間を考慮するためである。

モデル化に際して、まずファジィルールを設定する必要がある。ここでは、各説明変数、被説明変数でメンバーシップ関数を high, middle, low の3種類設定した。従って、ファジィルールは9通り設定される。速度を X, 車間距離を Y, 加速度を Z とすると、ルール1は、

if(X is low) and (Y is short) then (Z is middle).

とする。その他のルールは表 7.5 に示す。

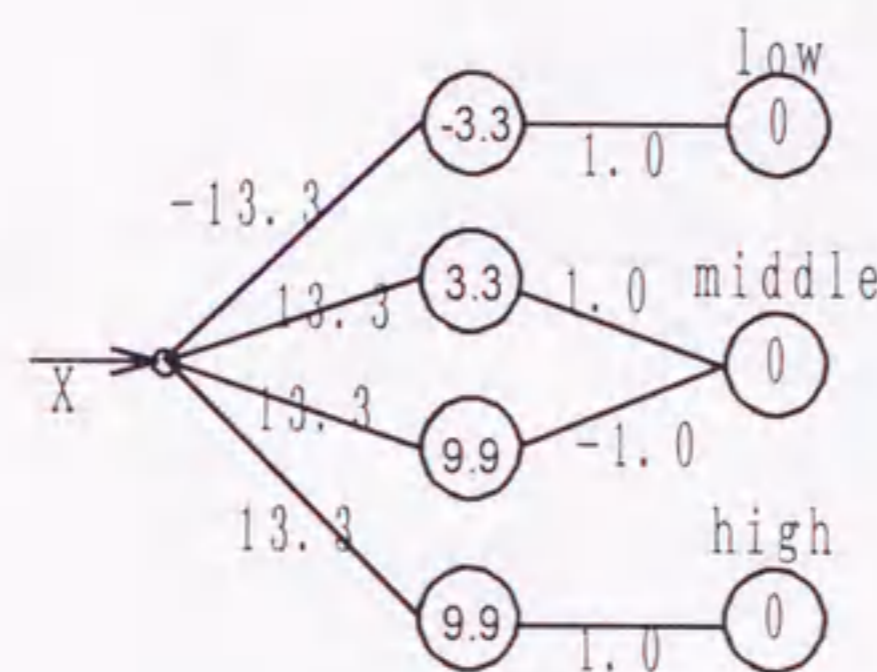
一般にファジィ推論の計算手順は次の通りである。

- ①前件部(ファジィルールにおける if-の部分)メンバーシップ関数値を求める
- ②各ファジィルールの前件部適合度を求める
- ③後件部(ファジィルールにおける then-の部分)出力推定値を求める

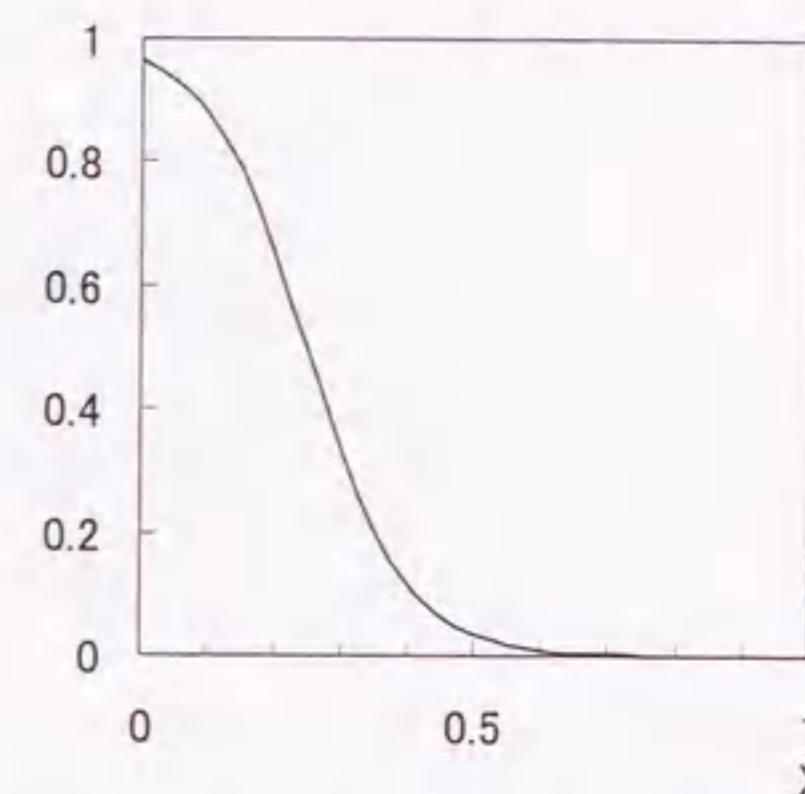
そこで、このファジィ理論を実現するニューラルネットワーク構造もこの手順で行なうように構築する。①の前件部メンバーシップ関数は2層のニューラルネットワークで表現する。low, short の各メンバーシップ関数は単調減少のため、1つのシグモイド関数をもつニューロンで近似する。high, large の単調増加の各メンバーシップ関数についても1つのニューロンで近似する。middle の三角型メンバーシップ関数は2つのニューロンを使用して、単調増加のメンバーシップ関数と単調減少のメンバーシップ関数を足し合わせて近似する。これらは、シナプス結合荷重、しきい値の初期値で関数形の初期値を定める。これらを図 7.8 に示す。また、ファジィ的ニューラルネットワークの全体構造を図 7.9 に示す。

求められた前件部メンバーシップ関数値をファジィルールに従い、第3層に入力する。この出力値が計算手順②の各ファジィルールの前件部適合度となる。

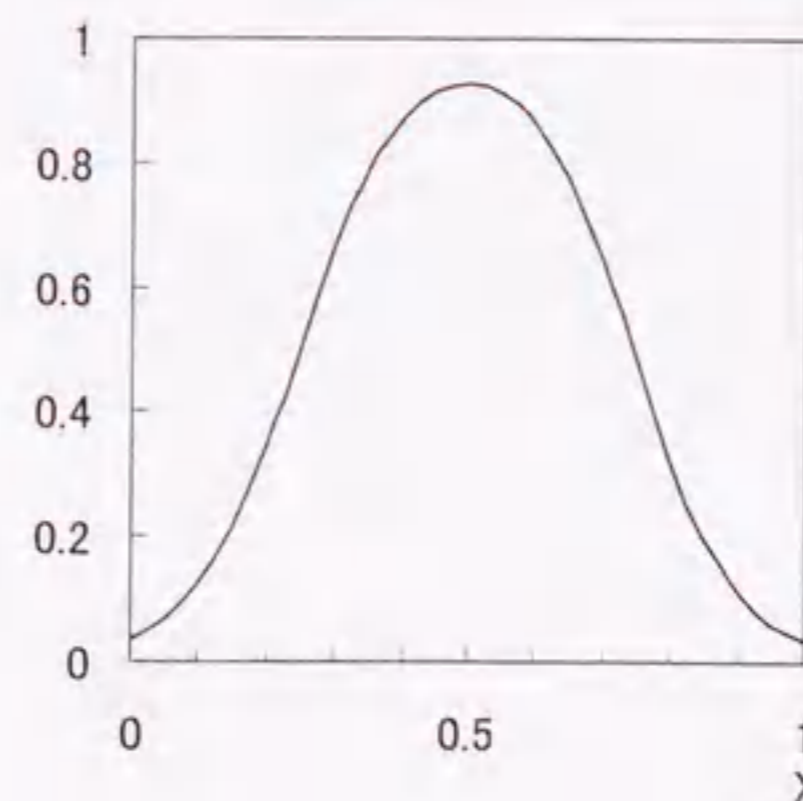
また、第3層と第4層との間の結合荷重が各ファジィルールの重要度を示す。前件部適合度をファジィルールに従い、線形積和演算および重心計算を行なうことにより出力値 Z を求める。5層目の各ニューロンは出力変数 Z の座標上にとられた点に対応させている。ここでは、ニューロンを5つ用いて Z=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 における値を計算するようにした。例えば、第4層の low から出ている5本のシナプス結合荷重の値は、各 Z の点でのメンバーシップ関数 low のグレードを示している。従って、適切な結合荷重の初期値を与える事により、出力値が求められる。



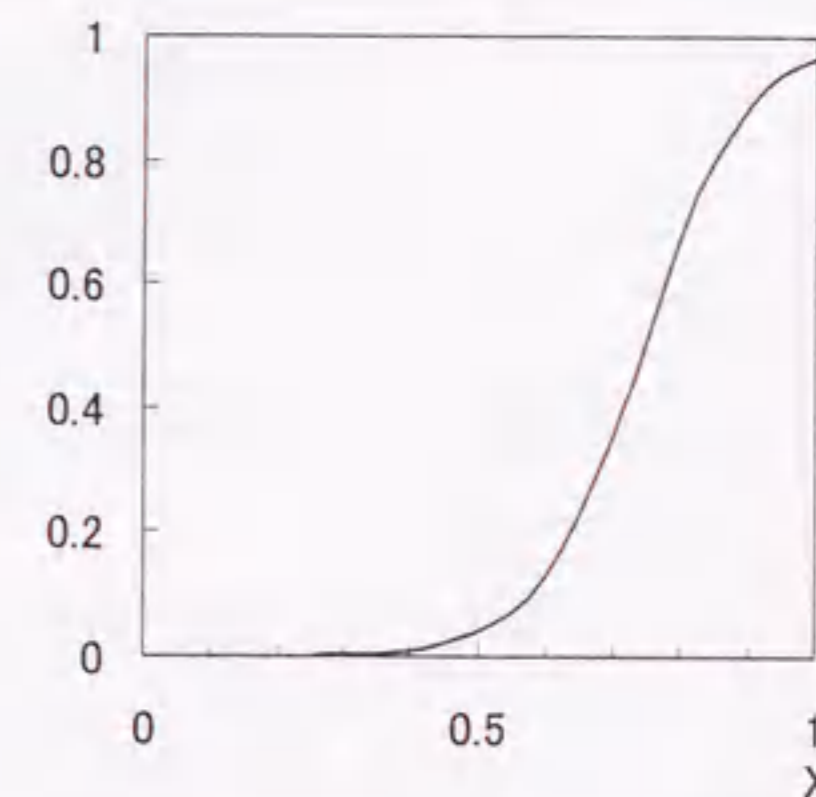
前件部メンバーシップ関数の構造



low, short のメンバーシップ関数



middle のメンバーシップ関数



high, large のメンバーシップ関数

図 7.8 ニューラルネットワークによる前件部メンバーシップ関数

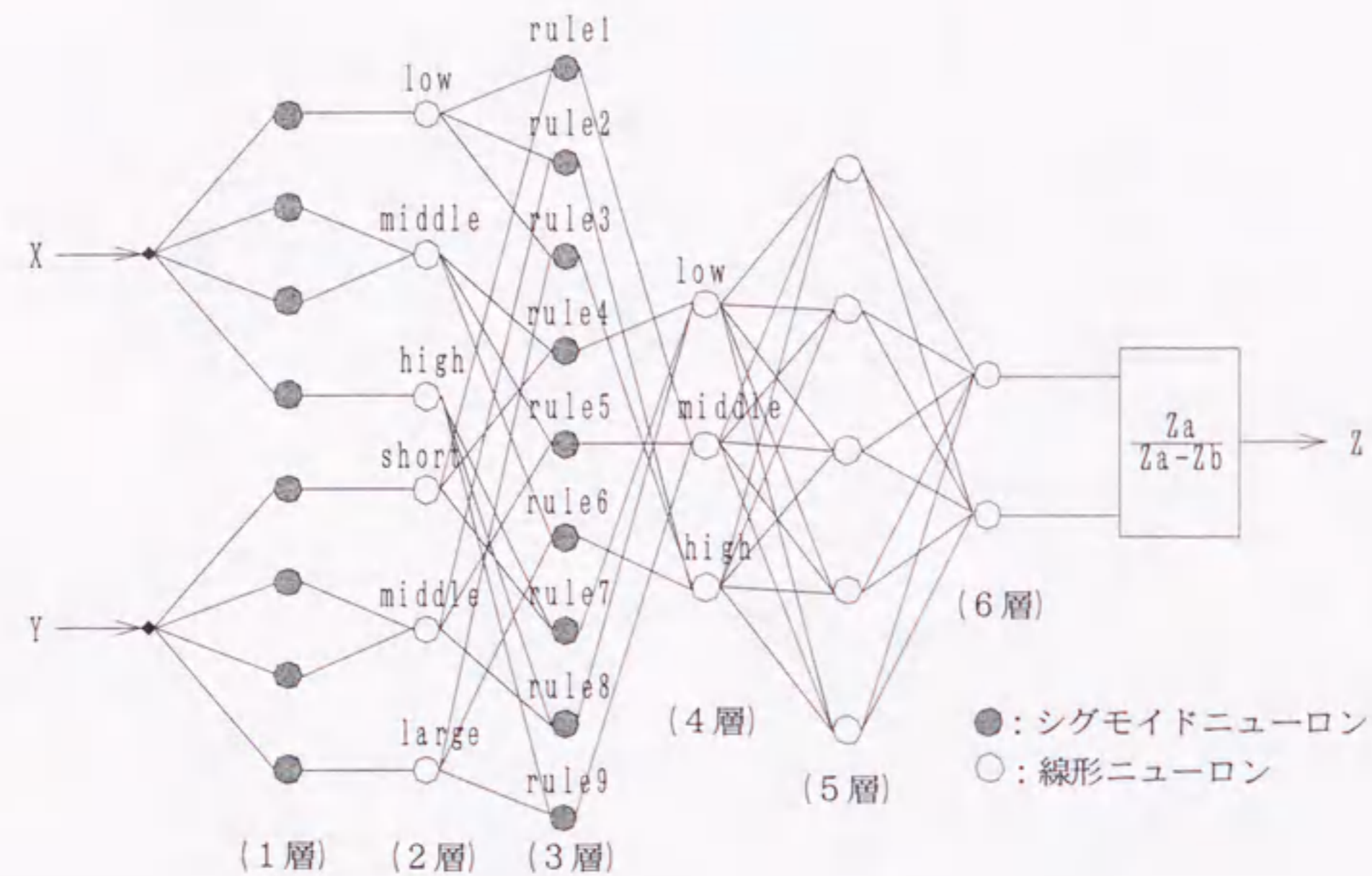


図 7.9 追従走行モデルのニューラルネットワーク構造

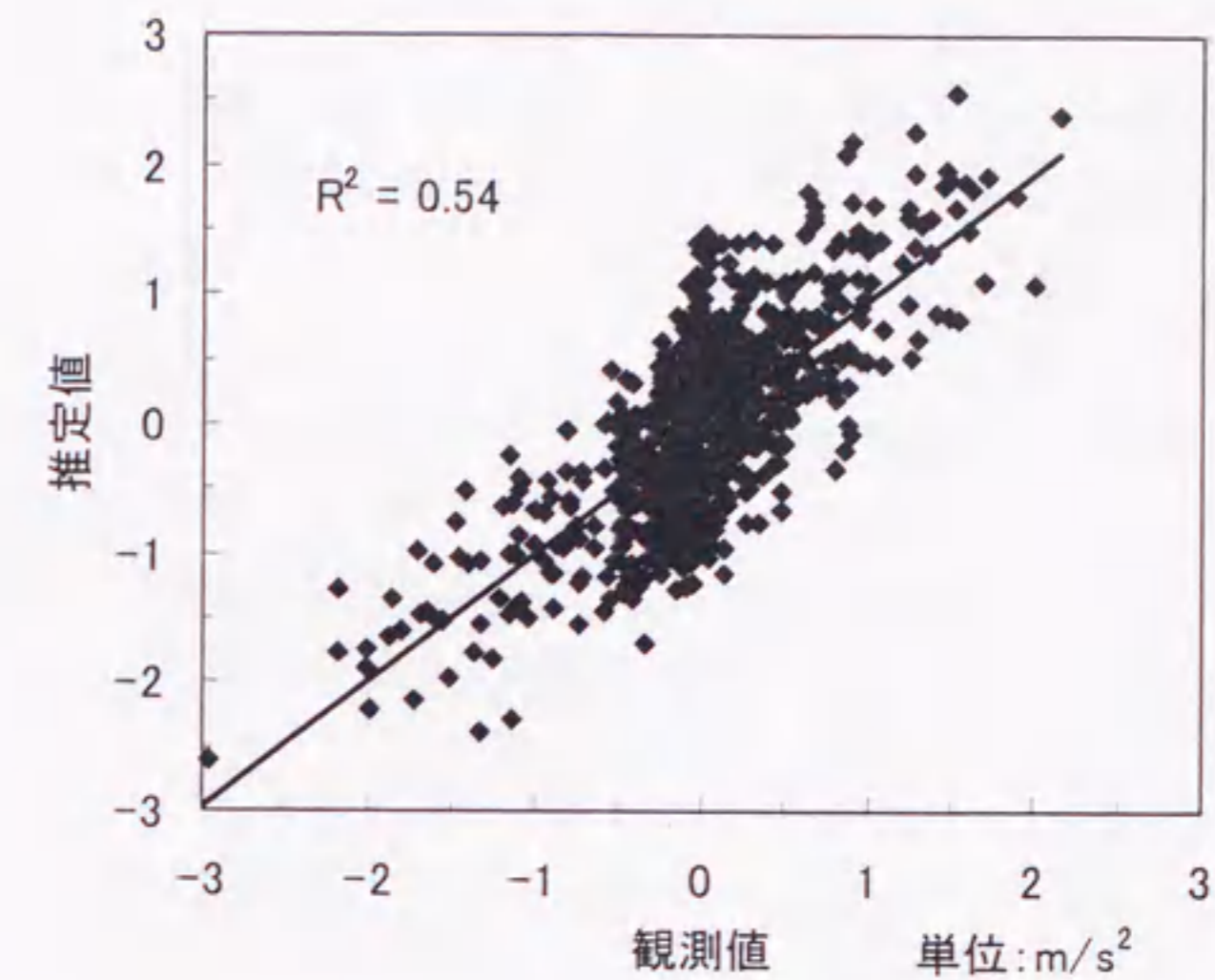
図 7.9 における計算の際は教師データより速度，車間距離，加速度のそれぞれの最大値，最小値をあらかじめ求め，X, Y, Z の値はこの最小値と最大値の間で 0~1 に正規化した値を用いる。

本研究で構築したニューラルネットワークは，6 層から構成されているが，式 (4.1) に示したシグモイド関数を使用しているニューロンは 2 層のみであり，第 4 章でモデル化を行なった経路選択モデルのような通常の 3 層程度のニューラルネットワークと比較して，処理速度などは劣らない。

7.5 追従走行モデル推定結果

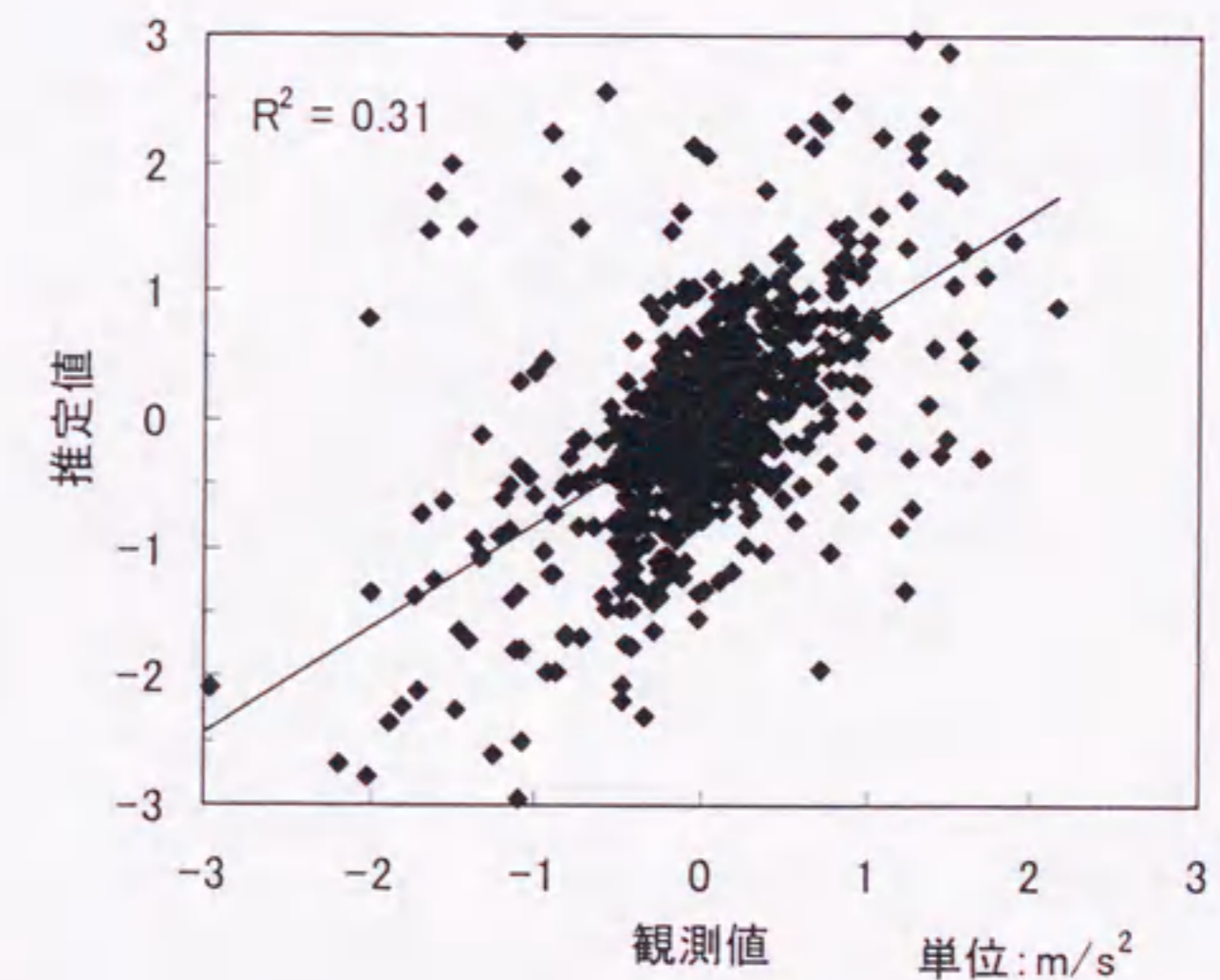
走行調査で得られた各被験者のデータを教師データとして与え，誤差逆伝播アルゴリズムにより学習を行ない，加速度の推定を行なった。学習の際は，過学習による汎化能力の低下を防ぐため，途中でテストデータを用いて性能を調べ，この性能が低下する時点で学習を終了する方式をとった。

例として図 7.10 に 60 歳以上女性の被験者の観測値と推定値との関係を示す。また，従来モデルとの比較を行なうために，線形追従理論を用いて加速度の推定を行なった。線形追従理論は式(7.1)で示される。



(60 歳以上女性運転者)

図 7.10 本モデルによる加速度の観測値と推定値との関係



(60 歳以上女性運転者)

図 7.11 線形追従理論による加速度の観測値と推定値との関係

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T) = \lambda[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)], \quad (7.1)$$

ここで x_n : n 番目の車両の位置,

T : 運転者の反応遅れ時間,

λ : 係数.

この線形追従理論による観測値と推定値との関係を図 7.11 に示した。線形追従理論による R^2 値が 0.31 に対して、ファジィ的ニューラルネットワークによるモデルでは、 R^2 値は 0.54 となり、線形追従理論による推定結果と比較すると良好な推定を行なっていることが分かった。その他の被験者についても同様に

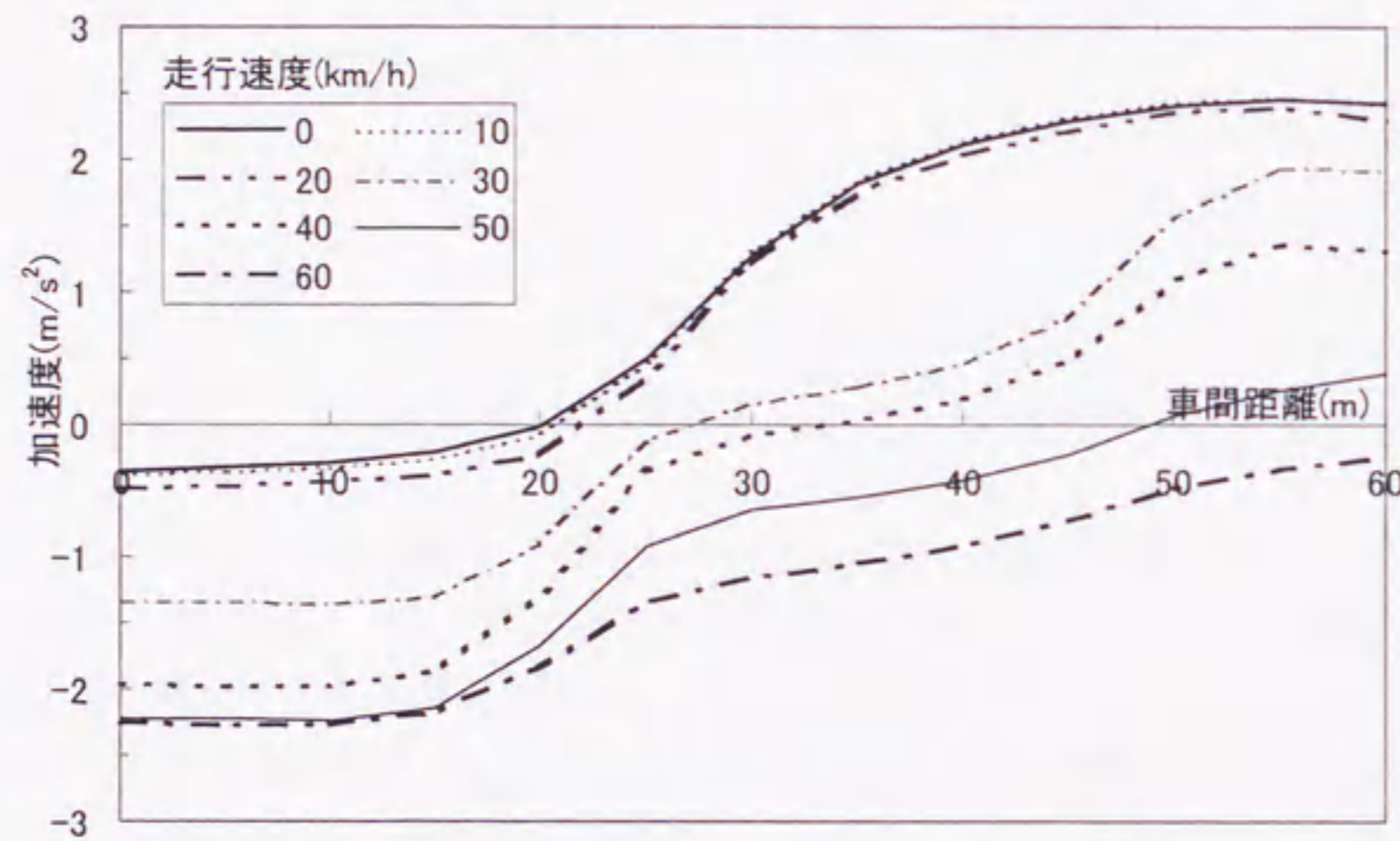


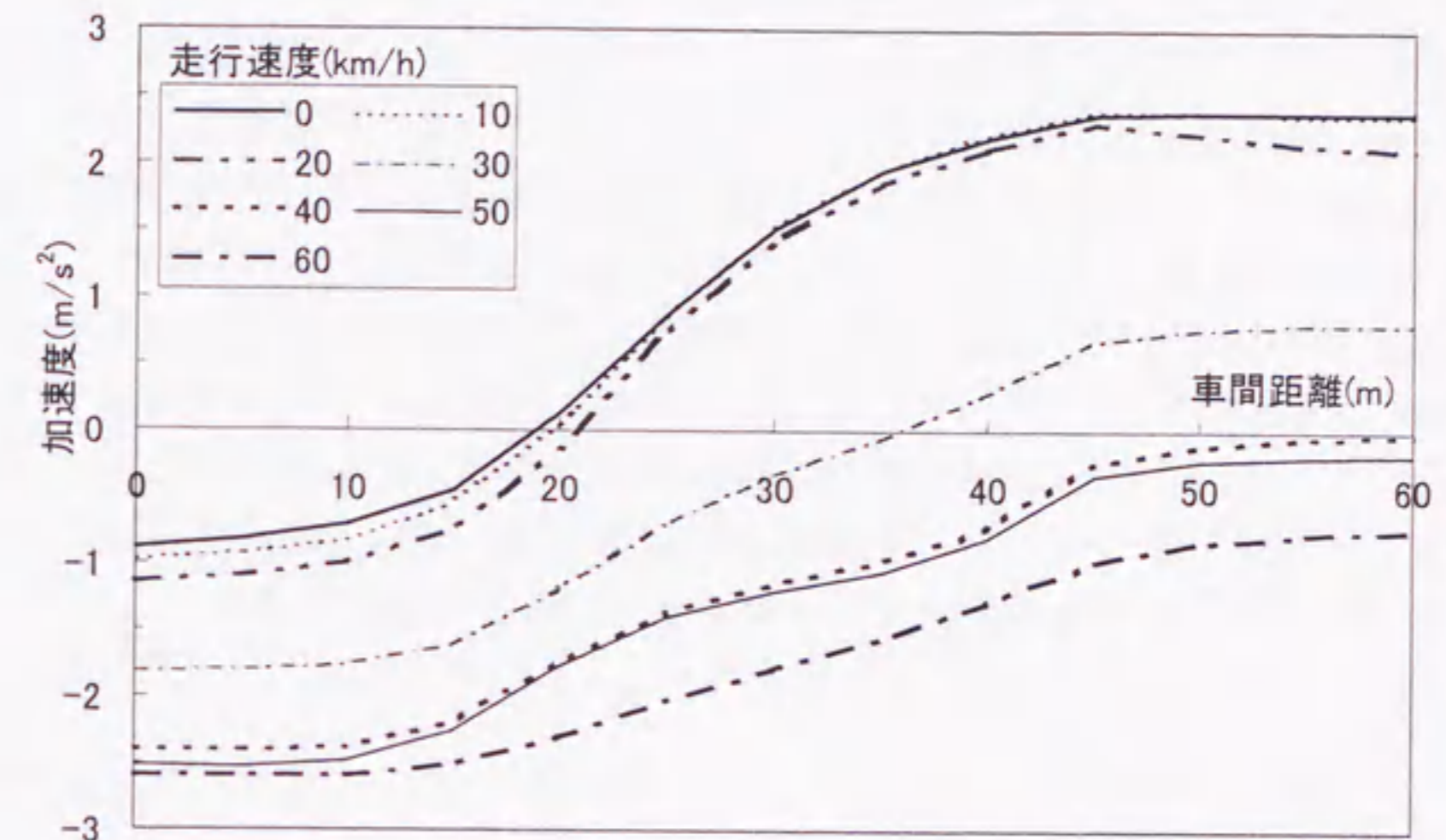
図 7.12 本モデルによる加速度の推定値(60 歳以上女性運転者)



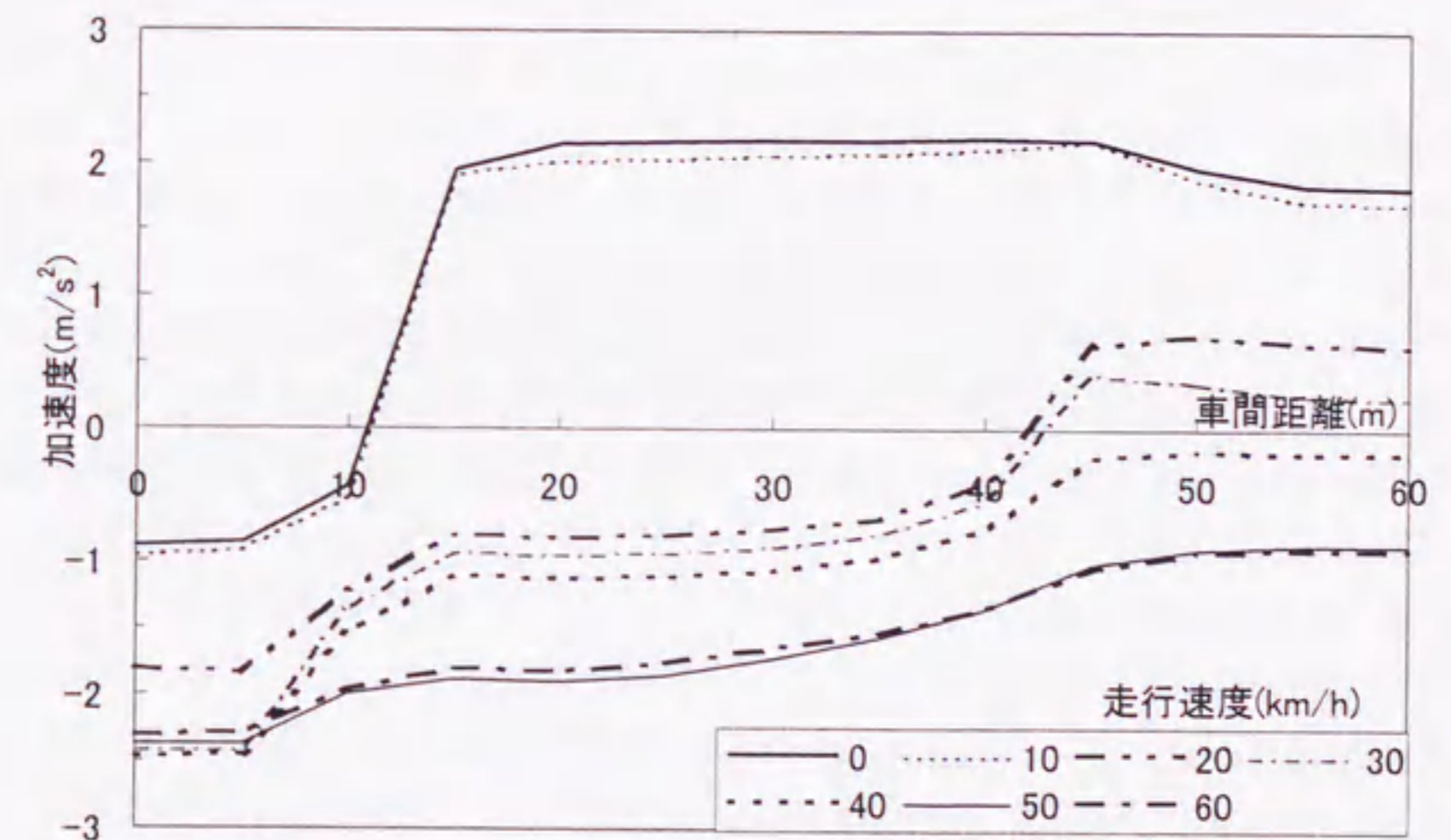
図 7.13 追従走行モデル属性別分類

観測値と推定値との関係を調べたところ、どれもファジィ的ニューラルネットワークによるモデルの方が良好な推定を行なっていることが分かった。

次に、同被験者の走行速度 10km/h, 車間距離 5m 毎に加速度を推定した結果を図 7.12 に示す。本モデルでは車間距離が 20m 以上になった時に初めて加速



Model B 60 歳以上男性群



Model D 60 歳未満男性群

図 7.14 各モデルにおける加速度の推定値

度が正の値になり、発進する。この値はやや長いと考えられるが、1秒間隔でデータを取得しているため、発進時に取得できるデータ数が他に比べて非常に少なくなっており、この付近についての学習が十分に行なわれていないのが原因であると考えられる。

各被験者について図 7.13 に示す分類を行ない、属性別にデータをプールしてモデル化を行なった。Model B, Model D について走行速度 10km/h, 車間距離 5m 毎に加速度を推定した結果を図 7.14 に示す。60 歳未満の運転者である Model D,E では、ある車間距離の範囲では加速・減速がほぼ一定である傾向が見られたが、60 歳以上の運転者である Model B,C では見られなかった。これは、60 歳未満の運転者は「ここまでの車間距離は保持しよう」と明確にしきい値を定めているのではないかと考えられる。自動車運転シミュレータを用いた高齢運転者のカーブでのハンドル操作に関する研究では、高齢運転者はやや不安定なハンドル操作をしており、曲率半径の認識が弱いという結果が出ており、車間距離についても同様の事が言えるのではないかと考えられる。

7.6 まとめ

本章では、まず追従走行モデルの開発の意義および既存研究について述べた。次に、追従走行挙動を解析するための走行調査を測量用 GPS 受信機を用いて行なう方法を示し、その精度を検証したところ、観測条件が悪い状況下でも距離の誤差は最大 2.2cm であり、非常に高精度で計測が可能であることが分かった。運転者属性の異なる 16 名の被験者を対象として富浜緑地周辺と浄水周辺で走行調査を行なった結果、非常に精度の高いデータを得ることが出来た。次に、ファジィ的ニューラルネットワークを用いて、加速度を被説明変数、1秒前の走行速度および車間距離を説明変数とする追従走行モデルを構築した。走行調査で得たデータを教師データとして与え、学習した結果、従来の線形追従理論によるモデルの R^2 値が 0.31 に対して、ファジィ的ニューラルネットワークによるモデルでは R^2 値が 0.51 であり、従来のモデルより適合度が高くなった。また、運転者属性別にデータをプールしてモデル推定を行なったところ、車間距離に対する認識の違い等、各運転者属性間に違いが見られた。本モデルを微視的道路交通シミュレーションに組み込むことにより、各種の交通政策の評価、メカニズムの解明をより精緻に行なうことが可能であると考えられる。

課題としては、次のことがあげられる。追従走行モデルにおける加速度の説明変数として速度・車間距離を用いたが、運転行動のメカニズムは非常に複雑であり、これら 2 つの要因から説明しきれない部分が存在する。従って、運転

行動のメカニズムを分析し、相対速度や周囲の車両の影響が加速度にどのような影響を与えるのかを考察する必要がある。また、説明変数を増やすことにより、より精緻なモデルになると考えられるが、その場合はファジィルールが増加し、ニューラルネットワーク構造が複雑になり、処理速度にも問題がある。そこで例えば、前件部メンバーシップ関数の構造を 2 段階のネスト型ネットワーク構造にするなど、ネットワーク構造の簡略化について検討を行なう必要がある。また、ここでは反応遅れを計測機器の性能から 1 秒と考えたが、これ以下の場合もありうるので、その検討も必要である。

参考文献

- Brackstone, M., M. McDonald(1999) : Car-following: a Historical Review, *Transportation Research*, Vol.F2, pp.181-196.
- Chandler, R. E., R. Herman, E. W. Montroll(1958) : Traffic Dynamics: Studies in Car Following, *Operations Research*, Vol.6(2), pp.165-184.
- Gazis, D. C., R. Herman, R. W. Rothery(1961) : Nonlinear Follow-the-Leader Models of Traffic Flow, *Operations Research*, Vol.9, No.4, pp.545-567.
- Gipps, P. G.(1981) : A Behavioural Car-Following Model for Computer Simulation, *Transportation Research-B*, Vol.15B, pp.105-111.
- Herman, R., E. W. Montroll, R. B. Potts, R. W. Rothery(1959) : Traffic Dynamics: Analysis of Stability in Car Following, *Operations Research*, Vol.7, No.1, pp.86-106.
- 堀川慎一(1994):ファジィニューラルネットワークの構成法とその応用に関する研究, 名古屋大学学位論文.
- 井ノ口弘昭, 荻野弘(1996):自動車運転シミュレータによる高齢者の運転特性分析, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp.617-618.
- 井上博行, 亀井且有, 井上和夫(1996): 遺伝的アルゴリズムと超円錐形メンバーシップ関数によるファジィルール自動生成手法の提案, *日本ファジィ学会誌*, Vol.8, No.6, pp.1104-1115.
- 岩崎征人(1981): 車両の追従挙動と巨視的交通現象に関する研究, 東京大学学位論文.
- Kikuchi, S., P. Chakroborty(1992) : Car-Following Model Based on Fuzzy Inference System, *Transportation Research Record*, No.1365, pp.82-91.
- Kometani, E., T. Sasaki(1958) : On the Stability of Traffic Flow (Report-I), *Journal of the Operations Research Society of Japan*, Vol.2, No.1, pp.11-26.
- Kometani, E., T. Sasaki(1959) : Dynamic Behaviour of Traffic with a Nonlinear Spacing-speed Relationship, In *Proceedings of the Symposium on Theory of Traffic Flow*, pp.105-119.
- Lyons, G.(1995) : Calibration and Validation of a Neural-Network Driver Decision Model, *Traffic Engineering & Control*, pp.10-15.
- May, A. D., H. E. M. Keller(1967) : Non-Integer Car-Following Models, *Highway Research Record*, No.199, pp.19-32.
- McDonald, M., J. Wu, M. Brackstone(1997) : Development of a Fuzzy Logic Based Microscopic Motorway Simulation Model, *IEEE Conference on*

Intelligent Transportation Systems, pp.82-87.

- 奥田邦晴, 安田明生(1992): GPSにおける測位誤差分布について, *電子情報通信学会論文誌*, Vol.J75-B-II, No.2, pp.138-144.
- 大口敬(2000): 高速道路単路部渋滞発生解析-追従挙動モデルの整理と今後の展望-, *土木学会論文集*, No.660/IV-49, pp.39-51.
- 王盾, 森川博之, 水町守志(1995): キネマティック GPS におけるサイクルスリップ実時間決定法, *電子情報通信学会論文誌*, Vol.J78-B-II, No.2, pp.78-88.
- Pipes, L. A.(1953) : An Operational Analysis of Traffic Dynamics, *Journal of Applied Physics*, Vol.24, No.3, pp.274-281.
- Ranney, T. A.(1999) : Psychological Factors that Influence Car-following and Car-following Model Development, *Transportation Research*, Vol.F2, pp.213-219.
- 桜井春輔, 川嶋幾夫, 山野辺裕一(1995): GPS 測定値から平面座標系への座標変換について, *土木学会論文集*, No.518/IV-28, pp.89-94.
- 重松文治(2000) : GPS の SA 解除について, *測量*, Vol.50, No.8, pp.50-52.
- 角知憲, 渡辺義則, 坂口裕司, 河原瑞将, 寺町賢一(1996) : 信号交差点を発進する車群先頭車のマン・マシン・システム・モデル, *土木学会論文集*, No.530/IV-30, pp.99-107.
- 内川嘉樹 他(1995) : ファジィ・ニューラルシステム, *日刊工業新聞社*, pp.115-150.
- Winsum, W.(1999) : The Human Element in Car Following Models, *Transportation Research*, Vol.F2, pp.207-211.

第8章 微視的道路交通シミュレーションモデルの開発

8.1 微視的道路交通シミュレーションモデルの開発の意義

交通需要予測に関する研究は広く行なわれているが、必要とされる交通政策に対応した方法が求められており、近年注目を集めているものの1つが従来の静的な均衡配分に時間軸を導入した動的な交通量配分理論に関する研究である。現在では、多起点多終点に対応したモデルも開発されつつあるが、各種の交通対策の効果を微視的に予測する場合や、排ガス量の予測などの道路交通の環境へのインパクトを予測する場合においては、様々な要因を考慮する必要があり、数理モデルの作成が困難となるため、交通量配分理論のみで解を求めることは難しいであろう。

このような数理モデルの作成が困難な場合は、シミュレーション手法を用いて実験的に解を求めることが有効な手段である。交通流シミュレーションモデルは、車頭距離-速度などの関係からその動きを記述する離散モデルと、道路区間で交通量の保存則と、交通量-密度などの関係からその動きを記述する流体近似モデルとに大きく分類することが出来る。流体近似モデルとしては、Leeds大学のHallら(1980)によるSATURN(Simulation and Assignment of Traffic in Urban Road Networks)、イギリスのTRLで開発されたTRANSYT(A Traffic Network Study Tool)、京都大学で飯田ら(1991)により開発されたBOXモデルなどが挙げられる。これらは大規模ネットワークに適用可能であるという利点を持つ反面、微視的な挙動を再現出来ないことから、動的な交通量配分理論と同様に微視的な効果予測や、環境へのインパクトの予測には適用しがたい。離散モデルとしては科学警察研究所の池之上ら(1975)により開発されたMICSTRAN-I (Microscopic Simulation of Traffic Networks)、科学警察研究所の木戸ら(1978)により開発されたDYTAM-I、FHWAのRathiら(1990a,b)によるTRAF-NETSIM(Traffic Simulation System in Network Simulation Model)、Edinburgh大のCameronら(1994)によるPARAMICS(PARAllel MICroscopic traffic Simulator)などがある。これらのモデルでは、数千リンクの大規模ネットワークでの計算は現在のコンピュータの性能では難しいが、ある程度の規模のネットワークの微視的な効果予測に適している。また、流体近似モデルと離散モデルとを組み合わせたハイブリッド型のシミュレーションモデルの研究も行

なわれており、例えば Horiguchi ら(1996)による AVENUE (an Advanced & Visual Evaluator for road Networks in Urban arEas)がある。

離散モデルには、車両1台を1単位とするモデル、計算速度を向上させるために同じ属性の車両数台を1単位とするモデルとがある。特に車両1台を1単位とするモデルにおいて、現況再現性を高めるためには、車両移動のロジックが重要な要素になる。近年の高齢化の伸展、女性運転者の増加等により自動車運転者の運転特性のばらつきが以前に増して大きくなっており、交通流を微視的に見た場合は、この影響が無視出来ないと考えられるが、従来の追従走行モデルでは個人の運転特性を考慮したものは、ほとんどなかった。そこで、本章では第7章で構築した追従走行モデルを組み込んだ微視的道路交通シミュレーションモデルを開発し、豊田市都心部およびトヨタ自動車本社工場周辺地域へ適用を行なうことによって、運転者属性を考慮した微視的道路交通シミュレーションシステムの有効性を検証する。

8.2 微視的道路交通シミュレーションモデルの概要

本研究では、自動車走行モデル、道路網モデルと経路選択モデルとを兼ね備えたシミュレーションモデル CaTS(Car-following-based Traffic Simulation)の構築を行なう。シミュレーションモデルには、システムの変化の状態を記述するイベントスキニング方式と、微小時間刻み Δt 毎にシステムの状態がどのように変化するかを記述するタイムスキニング方式がある。イベントスキニング方式は、事象の処理を実行するタイミングが予測できる場合は効率的である。それに対してタイムスキニング方式は、前の時刻の状態を前提に次の時刻の状態を記述するには、適した方法である。イベントスキニング方式は、その特徴から主に流体近似モデルにおいて、タイムスキニング方式は離散モデルにおいてよく用いられている。本シミュレーションモデルにおいても、タイムスキニング方式が適していると考えられるため、これを採用する。

自動車走行モデルでは、都心部での複雑な交通挙動を再現するため、車1台1台の動きをシミュレートする微視的モデルを採用している。各車両は必要に応じて経路選択モデル、車線変更モデルなどを用いて経路選択、車線変更などを行なう。また、信号交差点内の挙動も詳細に再現していることが特徴である。代表的な微視的道路交通シミュレーションモデルと本シミュレーションモデルとの比較を表8.1に示す。車両移動ロジックに実測を基にした運転者属性別のファジィ的ニューラルネットワークの追従走行モデルを用いていることが最大の特徴である。

表 8.1 代表的な微視的道路交通シミュレーションモデルとの比較

項目	CaTS	TRAF-NETSIM	MICSTRAN-I
車両の表現	個々の車両	個々の車両	個々の車両
車両発生	ポアソン分布に従って発生	一定の割合で発生	ポアソン分布, 二項分布, 信号周期に従って発生
車両移動ロジック	先頭車: 停止線や次のリンクの後続車など対象物との距離により速度決定 後続車: ファジィ的ニューラルネットワークを用いた追従走行モデルにより速度決定	先頭車: 指定速度に至るまで指定加速度で加速 後続車: 前車と安全停止距離を確保しながら加速	単独行動, 追従行動, 停止行動, 右左折行動の4行動様式により移動距離を算出し, 最も制約の強い値を移動距離に採用
車両属性	トラックと乗用車に分け, 乗用車は運転者の性別・年齢により4つに分け, 計5タイプに分類	普通車, トラック, バスの各カテゴリで最大16タイプに分類可能	車種別に有効車長を与え, 車両速度特性は4タイプに分類
車線変更	右左折のための車線変更, 追い越しのための車線変更のそれぞれで動機を持ち, 安全余裕がある場合に車線変更を行なう	車線が障害物で閉塞されたとき, ギャップを待って車線変更を行なう	低速車嫌い, 待ち行列嫌い等の車線変更動機を持ち, 安全余裕がある場合に車線変更を行なう
経路選択機能	過去30分間に通過した車両の所要時間を基にした最短経路を選択	なし	なし
スキニングタイム	0.1秒	1秒	1秒

8.3 道路網モデル

道路網モデルは図 8.1 に示すように, ブロック, レーン, 車両で構成される。図 8.2 に示すように, 1 方向のリンク(acdfで示される部分)をブロックとして定義し, このブロックを組み合わせて道路網を表現する。その中に 1 車線毎にレーン(abef および bcde)を定義する。信号機および交差点は, レーンの終端に付随しているものとする。ブロックには各レーンに共通するデータとして信号現示パターン, リンク長および交差点内の各方向への距離, 制限速度, ブロック内のレーン番号, 接続ブロック番号等のデータを持つ。また, レーンではレーンの先頭車・後尾車の車両番号, 交差点での右左折直進可否パターン等のデータを持つこととする。個々の車両には先行車・後続車の車両番号, 走行速度, 走行位置, 発着地等のデータを持たせる。信号現示パターンはオフセットを設定することにより, 系統信号制御の評価なども行なうことが出来る。

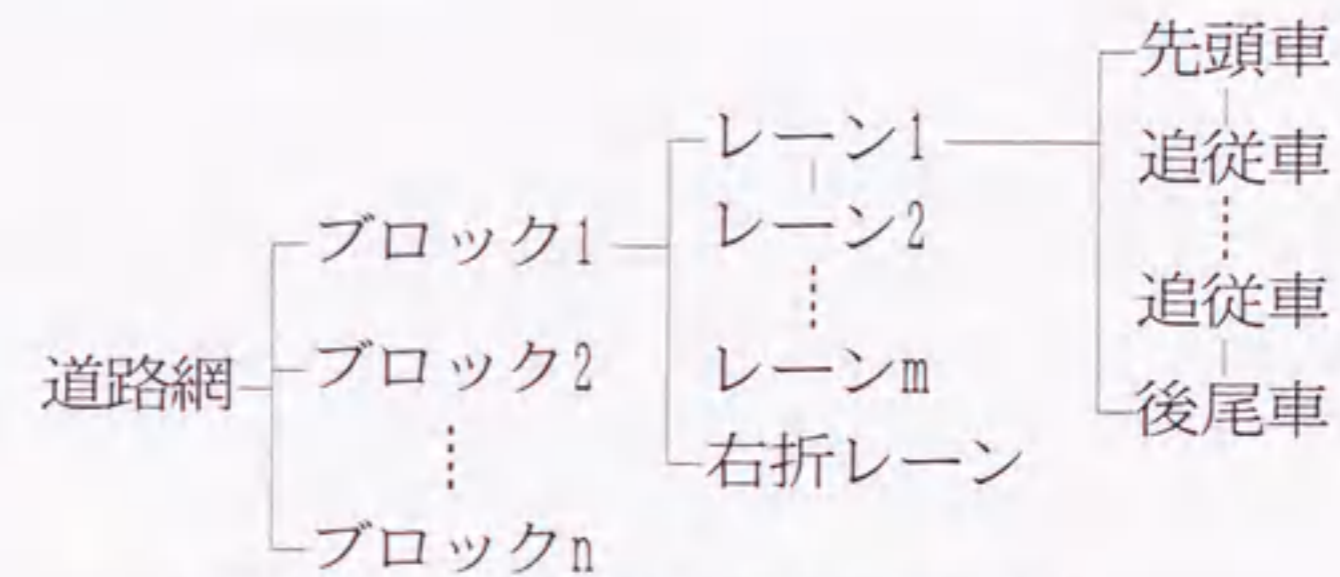


図 8.1 道路網と走行車両のデータ構造

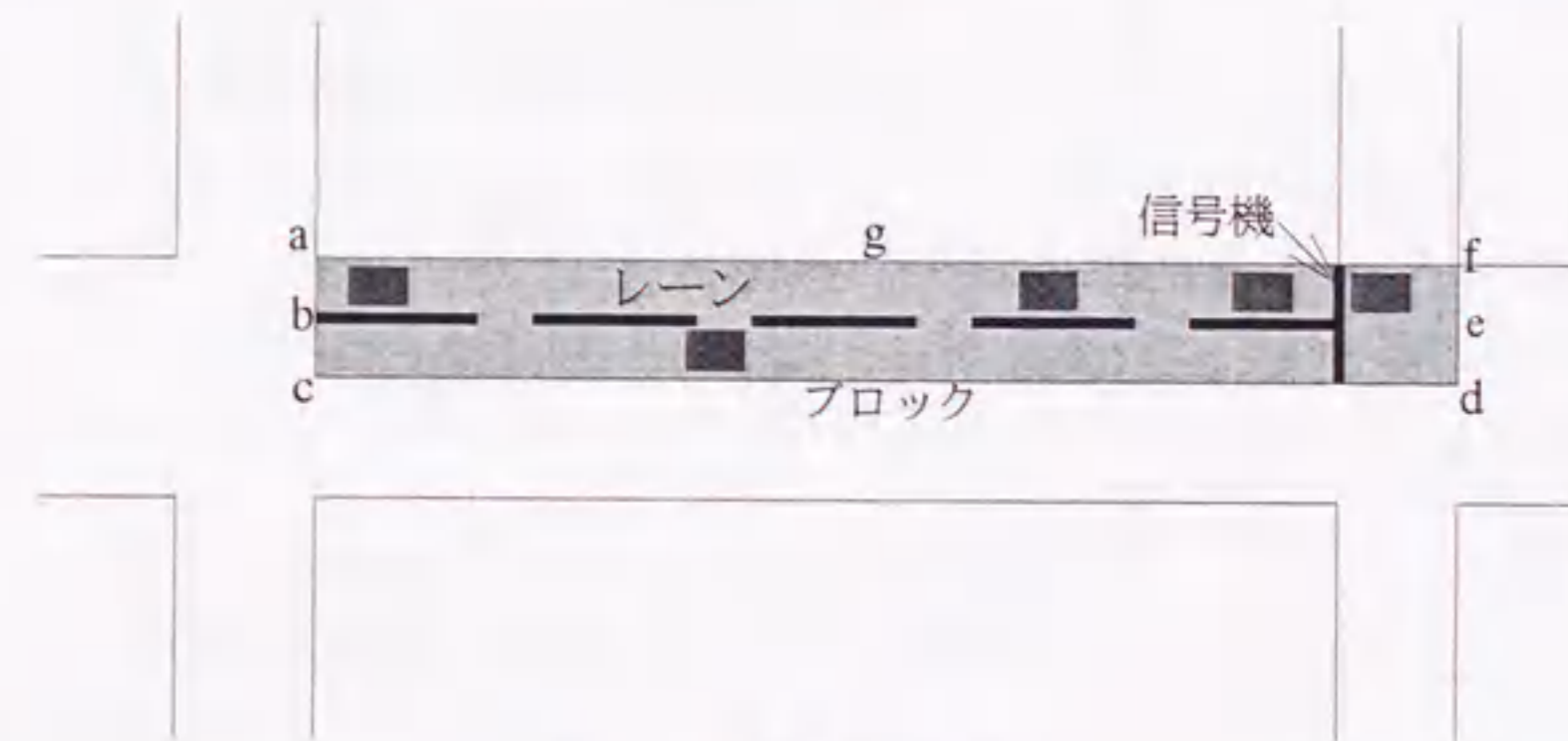


図 8.2 道路網モデル

8.4 道路走行モデル

8.4.1 速度決定モデル

先頭車と追従車とは速度決定メカニズムが異なると考えられるため、これを分けてモデル化を行なった。

1) 先頭車に対するモデル

自車と以下の対象物との距離により走行速度を決定する。

- ・ 交差点の停止線の手前にいる場合

信号現示に従い、次の対象物を考える。

青：次に走行するブロックの最後尾車

黄：停止線(減速が大きければ青処理とする)

赤：停止線

- ・ 交差点内の場合

左折・直進・右折(対向車線に入っている場合)時：次のブロックの最後尾車

右折(自車線内の場合)時：対向車との距離による判定を行ない、進んだ場合
に對向車が大幅に減速する場合は停止する

なお、以上で求めた速度に対して加速・減速の限界、および希望速度を考慮して修正を行ない、走行速度とする。ここでは、加速・減速とも高齢化社会に向けての交通問題研究会(1986)、野田(1997)による過去の実測結果を参考にして、その限界を 3.0m/s^2 とした。また、希望速度についても、過去の交通量が少ない条件での走行速度の実測結果より、性別・年齢層別に有為な差がないと認められているため、この実測結果である平均値(制限速度 $\times 1.2$)(km/h)、標準偏差(制限速度 $\times 0.18$)(km/h)の正規分布で与えた。

2) 追従車に対するモデル

追従車については、第7章で構築したファジィ的ニューラルネットワークを用いた追従走行モデルを適用する。この場合も、先頭車に対するモデル同様、加速・減速の限界、および制限速度を考慮して修正を行なう。また、先行車が交差点内におり、かつ自車が交差点外にいる場合、先行車は信号判定を行わないため、自車については先頭車に対するモデルも適用し、信号判定処理を行なう。

追従モデルをシミュレーションに適用する際は、各運転者属性の構成比率を設定する必要がある。車種の構成比率については、交通安全白書中の「自動車走行台キロ」、運転者属性の構成比率については「日本における年齢層別運転免許保有」より表8.2の比率とした。

表 8.2 車種および運転者属性の構成比率

トラック			14%	ModelA
乗用車	60歳以上	男性	10%	ModelB
		女性	2%	ModelC
	59歳まで	男性	42%	ModelD
		女性	32%	ModelE

8.4.2 車線変更モデル

追越しをする場合の車線変更と、右左折のため、道路の端の車線に寄る車線変更とはその性格が異なると考えられるため、これを分けてモデル構築した。

また、モデルの簡略化のため、車線変更に要する時間は考慮せず、その場で隣接車線に流入するものとする。

1) 追越しのための車線変更

希望速度と先行車の速度とに大きな差があり、かつ先行車が加速中でない場合は追越しをしたいと意思決定を行なう。

2) 右左折のための車線変更

当該ブロックに流入した時点で車線変更の意思決定を行なう。

上記のルールを基に、車線変更をしたいと意思決定を行なった車両は、池之上ら(1973)が実測により求めた安全余裕(Safety Margin)を基に、安全に車線変更が行なえるかを判断し、車線変更を行なう。

8.4.3 車両発生モデル

システムへの流入は、各ブロックの始端から行なうものとする。流入時の車頭時間分布が指数分布をしているものと仮定し、 k 台目の流入時刻 T_k を式(8.1)で与えた。

$$T_k = T_{k-1} + t_0 - (\bar{t} - t_0) \ln(1 - R_k) \quad (8.1)$$

ここで、 T_k ： k 台目の流入時刻

t_0 ：限界車頭時間

\bar{t} ：平均車頭時間

R_k ： k 番目の0~1の一様乱数

但し、乱数処理を行なう関係上、流入台数に誤差を生じるため、ここでは演算開始時にすべての車両の流入時刻をあらかじめ計算し、流入台数に合うように各流入時刻を補正した。

8.5 計算手順

計算手順について考えるにあたり、はじめに速度決定と車両を進める処理との関係について見る。まず、各車両について速度決定と車両を進める処理とを同時に行なった場合について考える。例えば、図 8.3 に示す道路ネットワークにおいて、計算の順序をブロック 3→ブロック 2→ブロック 1 とした場合は、全ての車両は先頭から計算されるため、問題は発生しない。しかしながら、計算の順序をブロック 1→ブロック 2→ブロック 3 とした場合は、ブロック 3 の車両が動く前、つまり 1 ステップ前の状態でブロック 2 の先頭車の速度が決定され、ブロック 2 の全ての車両に影響を与える。また、ブロック 1 についても同様である。このように、ブロックにより 1 ステップ前の状態で決定されたり、そのステップの状態で決定されたりすることは問題である。線的な道路ネットワークであれば、計算の順序を考えることによってこの問題は回避出来るが、面的な道路ネットワークでは問題を回避することは不可能である。また、この問題はサイクルタイムが長い場合は特に顕著に現れるため、注意する必要がある。

もう 1 つの例として、ブロック 1 の先頭車が右折してブロック 5 へ、ブロック 4 の先頭車が左折してブロック 5 へ進む場合を考える。計算の順序をブロック 1→ブロック 4 とした場合、右折交通の方が優先され、ブロック 4 の車両はなかなか左折出来ず、結果的にブロック 4 が渋滞する可能性がある。この問題もサイクルタイムが長い場合に発生しやすい。

これらの問題を回避するために、本シミュレーションでは、車両を動かす前に全ての車両について速度を決定しておき、その後、一斉に動かす方法を採用した。

計算は、図 8.4 に示す手順で行なうこととする。まず、車両発生モデルを用いて流入時刻をあらかじめ計算しておく。次に、各ブロックで流入時刻に達している車両の発生、信号現示の設定、最短経路探索を行なう。速度決定モデル

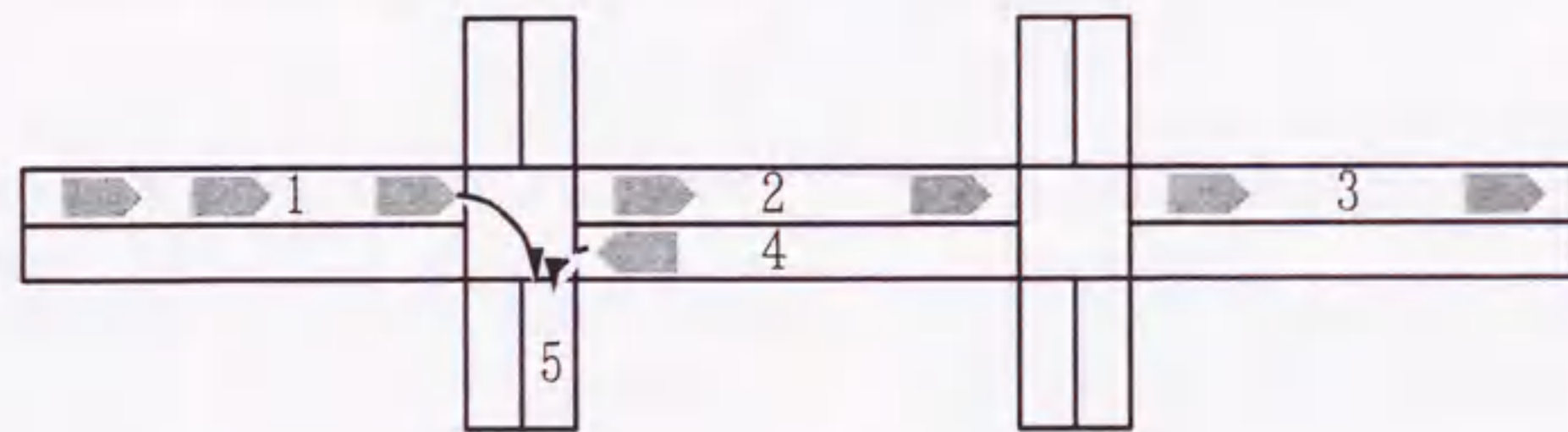


図 8.3 計算手順による不整合性の例

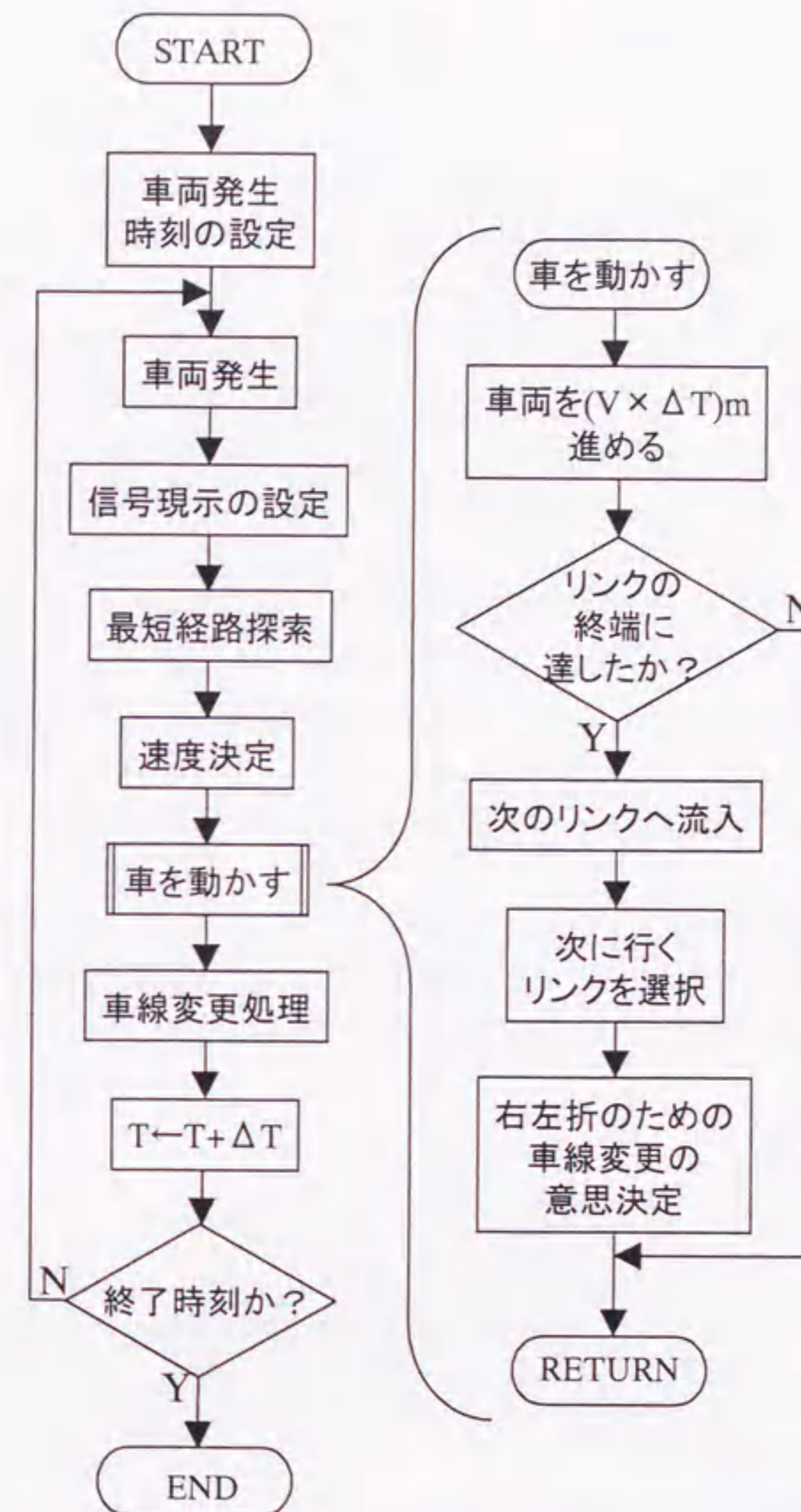


図 8.4 シミュレーション計算手順

を用いて全ての車両の速度を計算する。その後、計算された速度に応じて車両を進め、その車両がリンクの終端に達している場合は、各処理を行なう。車線変更モデルにより、車線変更の意思決定を行ない、判断処理を行なう。最後に、システムの時刻をスキッピングタイムだけ進め、車両発生のステップに戻る。

8.6 スキャニングタイムの検討

本シミュレーションにおいては、1ステップ前の状態を基にして車両1台1台を動かすため、例えば信号交差点で信号が赤から青に変わった時に1サイクルで1台しか動かないことになる。スキャニングタイムを10秒とした場合、時間交通量は最大でも6(台/分)×60分=360台しか流れない。単路部の基本交通容量である2200台を流すためには、1.6秒以下にする必要がある。

次に、1ステップで進む距離について考える。スキャニングタイムを1.6秒とした場合は、60km/hで走行する車両は1ステップあたり約27m進むことになる。これでは、信号交差点なども1ステップで通過してしまうことになる。ここでの目的は、都市内の複雑な交通挙動を交差点内を含めて詳細に再現することであるため、車長の1/2程度の精度を確保する必要がある。従って、スキャニングタイムを0.1秒に設定した。従って、60km/hで走行する車両は1ステップあたり約1.7m進むことになる。このスキャニングタイムは、シミュレーションの目的に応じて、制約条件、確保する精度、計算時間を考慮して決定すべきである。

経路選択モデルで使用される最短経路の計算は、1分毎に行なうこととした。これは、最短経路の計算に要する時間が長いので、交通量の大幅な変動がない1分間における最短経路はあまり変化しないことを考慮して、計算時間を節約するためである。

8.7 豊田市都心部への適用

8.7.1 ネットワークおよびデータの概要

対象地域は豊田市役所を中心とする約9km²とした。なお、この地域は中心市街地であり、通勤時間帯においては、対象地域外から対象地域に流入する車両および対象地域を通過する車両が多数を占めている。図8.5に示す通り、リンクは幹線道路を中心に設定した。リンク数は一方向を1本と数えて228、ノード数は83である。ODデータは、平成3年度中京都市圏パーソントリップ調査をベースとしているが、平成7年5月から実施されたトヨタ自動車の勤務体制変更の影響があること、平成3年度から現在までの成長を考慮することから、平成9年2月19日(水)に対象地域に流入、流出する車両についての交通量調査を行ない、ODデータを修正し、時間帯別に作成した。

リンクデータについては都市計画基本図を基にリンク長などを測定して作成



図 8.5 対象道路網

した。また、信号現示データについては、時間帯ごとに現示パターンを変えているため、シミュレーション対象時間帯に各信号機で計測して入手した。

シミュレーションは、午前6時～午前10時まで行なったが、はじめの1時間は安定していないため、午前7時～午前10時までを集計対象とした。

8.7.2 現況再現

作成したリンクデータおよびODデータを用いて、シミュレーションを行なった結果と、平成10年11月にビデオカメラを用いて2地点で旅行時間調査を行なった結果を表8.3に示す。名鉄バス車庫前の道路は国道153号線に接続しており、国道153号線の混雑の影響を若干受けること、および信号制御パターンが変わることなどから8時台の旅行時間は9時台に比べて交通量は少ないにもかかわらず、0.1分多くなっている。データ作成時点と調査実施日に差がある

表 8.3 シミュレーション結果とビデオ調査との比較

時間帯	豊田警察署前 リンク長：615m		名鉄バス車庫前 リンク長：302m	
	シミュレーション	調査	シミュレーション	調査
7:00～8:00	598	728	402	334
	1.3	1.3	0.5	0.5
8:00～9:00	773	820	425	470
	1.3	1.4	0.6	0.6
9:00～10:00	835	782	533	398
	1.5	1.4	0.5	0.6

上段：交通量(台)/下段：平均旅行時間(分)

表 8.4 シミュレーション結果と試験車両による旅行時間の比較

時間帯	路線名 区間長	シミュレーション値	測定値		
			測定値の平均値		
7:00～8:00	R153 東行き 2,490m	282	279	296	288
			287	343	
	R153 西行き 3,070m	330	326		
			417	440	428
R155 北行き 2,400m	397	486	611	569	
		555			
8:00～9:00	R153 東行き 2,490m	360	457	354	439
			417		
	R153 西行き 3,070m	426	348	520	434
			442		
R155 北行き 2,400m	452	459	424	442	
		528			
R155 南行き 2,400m	493	478	579	528	
		528			

(単位：秒)

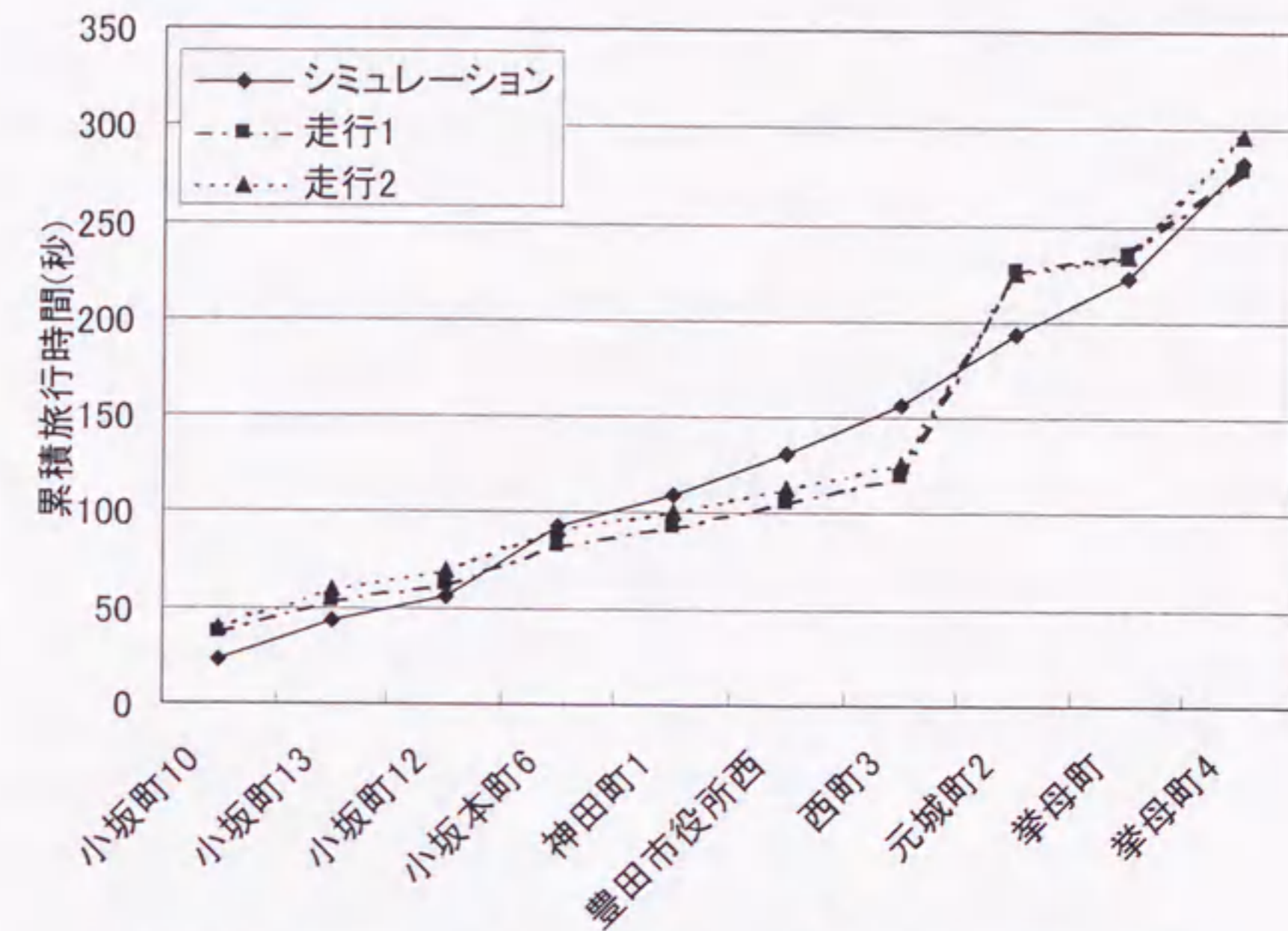


図 8.6 交差点間ごとの累積旅行時間 (7:00～8:00 R153 西行き)

表 8.5 シミュレーション結果と交通量調査との比較

時間帯	地点番号・地点名	シミュレーション値	測定値
7:00～8:00	P1・R153 東行	942	1042
	P2・R153 西行	1742	1875
	P3・R155 北行	244	254
	P4・R155 南行	408	438
8:00～9:00	P1・R153 東行	1125	1122
	P2・R153 西行	1489	1514
	P3・R155 北行	302	286
	P4・R155 南行	372	403

(単位：台)

ため、交通量は若干異なるが、旅行時間に関しては良好な結果が得られた。

また、平成 11 年 7 月 9 日(金)AM7:00～9:00 に試験車両による旅行時間計測調査及び交通量調査を行なった。旅行時間計測調査との比較を表 8.4、例として国道 153 号線の 7 時台の交差点間ごとの累積旅行時間を図 8.6 に示す。試験車

両による測定値は、信号待ちによる影響により、地点毎で見るとシミュレーションによる旅行時間の平均値とは差はあるものの、全区間で見るとはほぼ一致している。また、表 8.5 に示される交通量調査の結果を見ると、測定値とシミュレーションによる計算値とでは最大 10%の差があるものの、概ね良好な結果が得られたと言える。

本シミュレーションでは OD データの作成に第 3 回中京都市圏パーソントリップ調査の結果を用いたため、拡大係数が平均して 12 程度である。より精度の高い OD データを入力すると、精度の高い推計が出来るであろう。

8.8 トヨタ自動車本社工場周辺地域への適用

8.8.1 ネットワークおよびデータの概要

対象地域は、図 8.7 に示すように豊田市トヨタ町のトヨタ自動車本社工場を中心とする約 3.4km²の地域であり、幹線道路を中心として、リンク数は上下方向別で 101、信号交差点数は 19 である。また、この地域は朝の通勤時間帯においては、トヨタ自動車関連への通勤交通が多く、対象地域に流入する車両のうち、対象地域内を目的地とする交通が 42%と高くなっているのが特徴である。

信号現示は、時間帯によってパターンを変更している箇所があるため、信号現示データは実際に対象時間帯内で数回測定を行なって、その結果を用いて作成した。OD データは、平成 10 年 12 月 3 日(木)に豊田市が行なったナンバー読み取りによる交通量調査の調査結果を用いた。対象時間帯は午前 7 時から午前 9 時までで、30 分毎の OD 表を作成した。但し、シミュレーションは交通量が 0 の時点から開始するため、システムが安定していない最初の 30 分間の結果は使用しないこととした。出発ノードは 17、到着ノードは 10 および対象地域内を 4 ゾーンに分割した。対象地域内の到着車両に関しては、駐車場選択を行ない、目的駐車場を決定することとした。

8.8.2 駐車場の設定

ナンバープレート読み取りによる交通量調査では、対象地域内での調査地点の数が限られているため、対象地域内を目的地とする車両については目的駐車場までは特定することが出来ない。しかしながら、調査地点の位置により、対象地域内を 4 つのゾーンに分けることにより、目的地をゾーン単位で知ることは可能である。また、ナンバープレート読み取りの交通量調査とは別の日に、トヨタ自動車の駐車場に関しては、駐車場入り口で 1 時間ごとに出入り台数調査を行なっている。ゾーン内の駐車場の選択はこの調査結果の入庫台数を基に

行ない、目的駐車場を決定する。ゾーン内には、トヨタ自動車以外の駐車場および調査地点以外からの対象地域外への流出も若干あるが、これらについては、別の日に主要な地点で台数をカウントした結果を用いて推定した。なお、調査地点以外から対象地域外へ流出した車両は仮想的な駐車場(ゾーン 2 のエルエル抜け道と流出)に駐車したとして処理を行なった。また、ナンバープレート読み取り調査と駐車場出入り台数調査とは調査日が異なること、ナンバープレート読み取りの調査地点を通過せずに対象地域に流入した車両があること、考慮していない駐車場があることから、駐車場出入り台数調査結果の台数をゾーン内で足した数と、ナンバープレート読み取り調査でゾーン内を目的地とした台数と

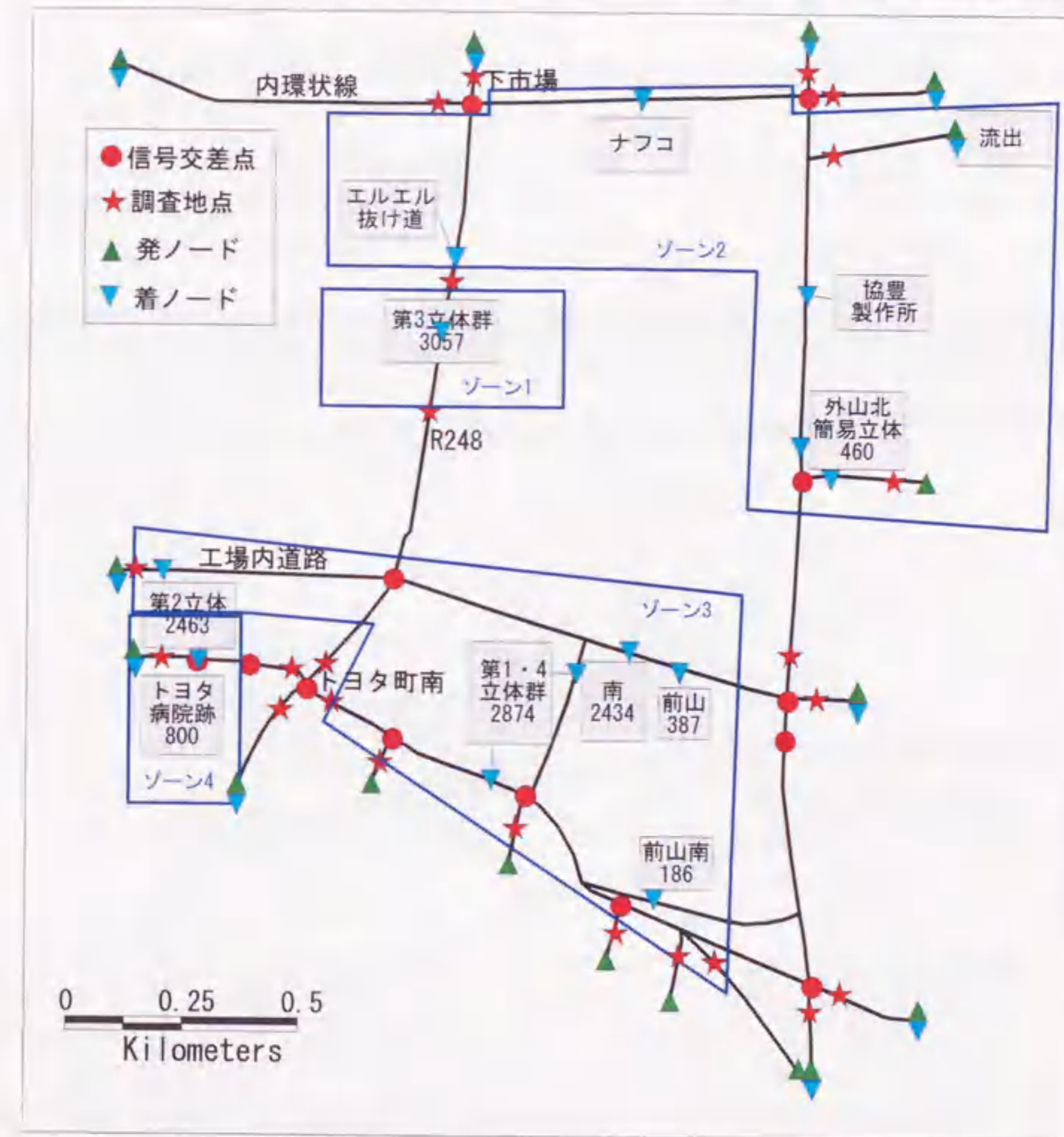


図 8.7 シミュレーション対象地域

は一致しない。OD データはナンバープレート読み取り調査の結果を使用することから、駐車場出入り台数調査の結果をナンバープレート読み取り調査の数に合わせて修正して用いた。

駐車場の選択は、対象ゾーン内の駐車場の空き台数を計算し、この空き台数を基に乱数処理を行なって目的駐車場を決定した。但し、エルエル抜け道に関しては、内環状線西行きへの抜け道であることから、出発地によっては選択されないように処理を行なった。目的駐車場が決定されたら、出発地を考慮して駐車場への流入ノードを決定した。

8.8.3 現況再現性の評価

7時45分現在の交通再現状況を図 8.8 に示す。なお、図中で青色のリンクは、リンクの終端に付随する交差点の信号機が青の灯火、黄色のリンクは黄色の灯火、赤色のリンクは赤色の灯火、緑色のリンクは青矢印の灯火、橙色のリンクは一時停止を意味する。また、駐車場名の下に数字は駐車台数/駐車可能台数である。なお、7時から9時までの計算に対して計算時間は約1時間である。



図 8.8 交通再現状況(7:45)

ナンバープレート読み取り調査と同時に渋滞長の調査も行なっているため、一般的に再現が難しいと言われている渋滞長に関して再現性の評価を行なう。ここでは、渋滞を以下のように定義する。

渋滞とは、対象交差点を先頭とし、自由走行が出来ずにほぼ徒歩速度(4km/h)以下の車両の列で、1回の信号で通過できるものは対象としない。また、近接する信号交差点を超えて車両の列が延伸している場合は、信号で一時的に列が途切れていても、次の青になったときに上記の状況にあれば対象とする。

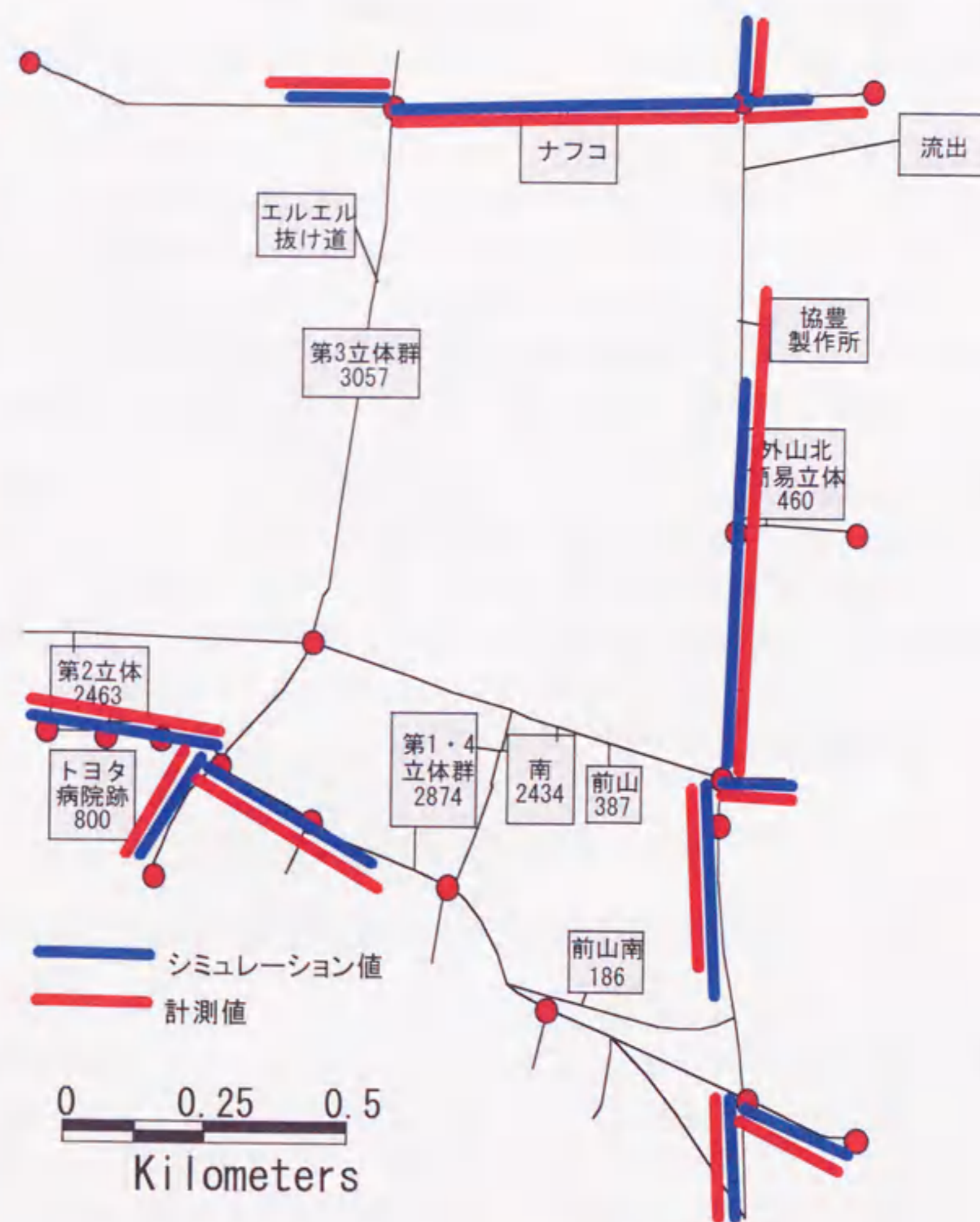


図 8.9 最大渋滞長(7:30~8:00)

渋滞長は信号現示の影響で時々刻々伸び縮みするため、ある瞬間の交通状態で調べても意味がない。また、入力する OD 交通量が 30 分毎であるため、ここでは 30 分間の最大渋滞長で評価を行なう。図 8.9 に 7:30~8:00 の最大渋滞長の計測値とシミュレーション値を示す。この図より渋滞長はかなり良好に再現出来ていることが分かる。他の時間帯においても外山北簡易立体駐車場付近のシミュレーションで求めた渋滞長が計測値の 70%になっている他は、良好な再現が出来ている。

8.8.4 利用駐車場指定方式にした場合の効果分析

対象地域に流入する車両のうち、対象地域内を目的地とする交通が 42%を占めることから、対象地域内を目的地とする交通のトリップ長を短くすることで、交通流が円滑になると予想される。そこで、トリップ長が短くなるように対象地域内に流入する交差点により利用駐車場を指定した場合の予測を行なった。但し、図 8.9 から分かる通り、北東部からの流入交通が対象地域内の渋滞発生の大いなる要因となっているため、北東部から対象地域内を目的地とする交通に対応できるように外山北簡易立体駐車場の駐車可能容量を増加させ、また南西部からの交通に対応できるように第 2 立体駐車場の駐車可能容量を増加させた。

7:30~8:30 に出発した車両の走行時間と走行距離を表 8.6 に示す。目的地が対象地域内の車両は、現況と比較して走行距離は約 1/2 に、走行時間が約 1/3 になっている。また、通過交通についても混雑が解消されたことにより平均走行時間は 1 台あたり 5 分 59 秒が 3 分 45 秒になり、2 分 14 秒短縮された。また、合計で見ると、総走行時間では現況の 54%に、総走行距離では現況の 84%になり、乗用車類の時間価値である 67.27 円/台・分を用いて貨幣換算すると、7:30~8:30 の 1 時間で約 160 万円の節減になる。

表 8.6 走行時間と走行距離の比較

	目的地	台数	総走行時間 (時間)	総走行距離 (km)	1 台あたり 走行時間(秒)	1 台あたり 走行距離(m)
現況	地区内	4445	248.4	4,514.8	201	1,016
	通過	6220	619.6	11,419.2	359	1,836
	合計	10665	868.0	15,934.0	293	1,494
P 指定	地区内	4445	82.0	2,243.7	66	505
	通過	6220	389.6	11,196.3	225	1,800
	合計	10665	471.5	13,440.0	159	1,260

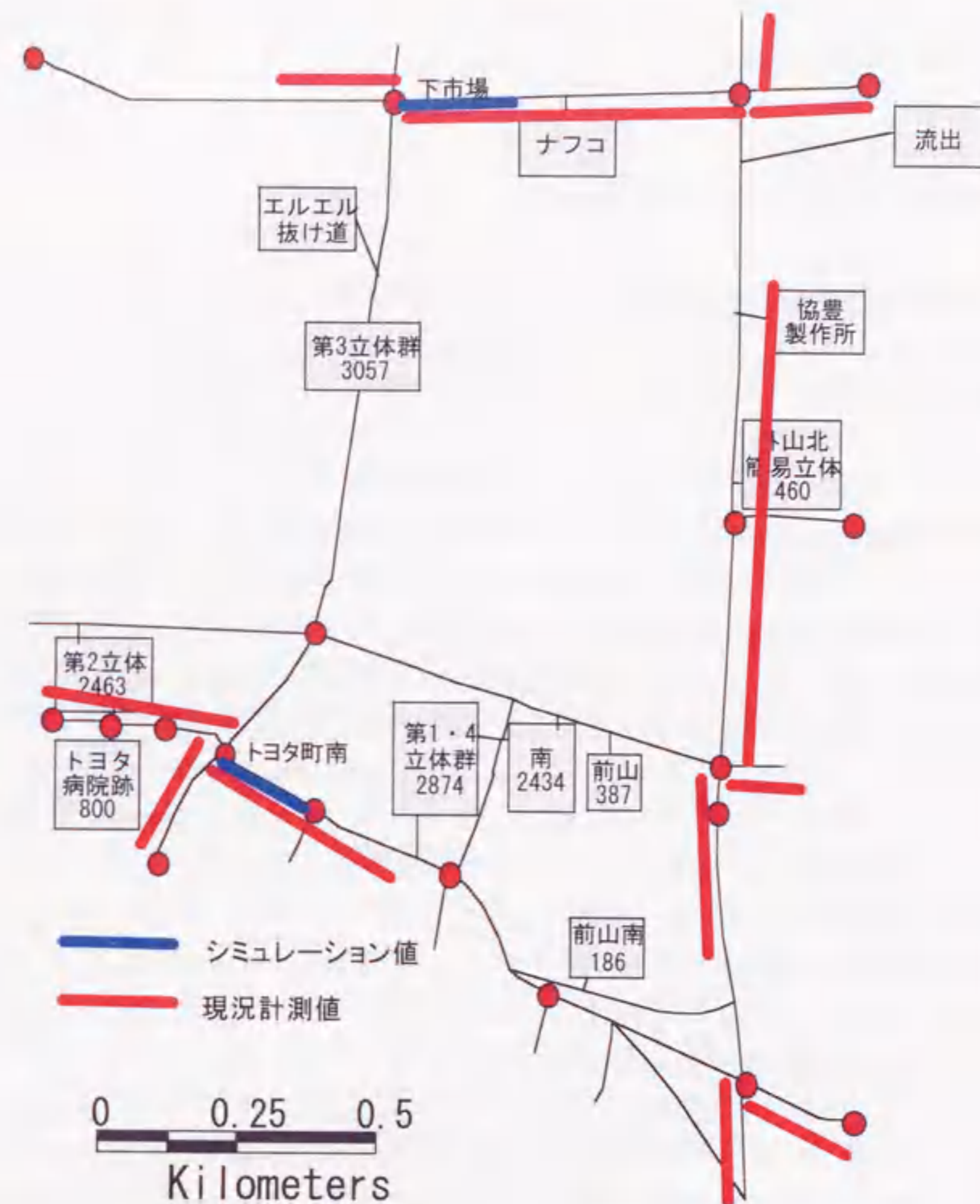


図 8.10 利用駐車場指定方式にした場合の最大渋滞長(7:30~8:00)

7:30~8:00 の最大渋滞長と現況の渋滞長の計測値を図 8.10 に示す。通過交通のみの場合と比較すると、トヨタ町南交差点の西行きで若干の渋滞が見られるが、その他は渋滞は発生していない。8 時台においても下市場交差点の西行きで最大 248m の渋滞が見られたが、他は見られなかった。

上で述べた通り、利用駐車場を出発地ごとに指定すると、その効果は大きいですが、駐車場利用者にとっては 2 分程度の時間短縮に過ぎない。駐車場から勤務地までの徒歩を考えると、利用者によっては通勤時間が増加することになる。

従って今後、出発地だけでなく勤務地までの徒歩距離を含めた駐車場利用の検討を行なう必要がある。

8.9 まとめ

本章ではまず、微視的道路交通シミュレーションモデルの開発の意義および既存研究を述べた。次に、本研究で提案するシミュレーションモデル(CaTS)の特徴および他のシミュレーションモデルとの比較について述べた。さらに、本シミュレーションモデルで用いている道路網モデル、道路走行モデルについて述べた。また、計算手順で速度決定と車両を進める処理を同時に行なった場合に不整合が生じるため、これを分けて行なう方法が良いことを示した。スキヤニングタイムの検討を行ない、最悪でも1.6秒以下にすること、また都市内の複雑な交通挙動を再現する場合は0.1秒程度にする必要があることを示した。

本シミュレーションモデルを豊田市都心部へ適用し、ビデオカメラによる旅行時間調査の結果、試験車両による旅行時間調査の結果と比較して、良好な再現が出来ていることが分かった。また、交通量調査の結果と比較すると、最大10%の差があるものの、調査日の違い、ODデータの精度を考えると、概ね良好な結果が得られたと言える。

次に、シミュレーションモデルを精度の高いODデータが得られているトヨタ自動車本社工場周辺地域へ適用した。最大渋滞長で現況再現性を見ると、概ね一致しており、再現性が高いことが示された。次に、対象地域に流入する車両のうちの42%を占める対象地域内を目的地とする交通について、トリップ長が短くなるように対象地域内に流入する交差点により利用駐車場を指定した場合の予測を行なったところ、ほぼ全ての箇所で渋滞は解消し、総走行時間では現況の54%に、総走行距離では現況の84%になり、走行時間の短縮を時間価値を用いて貨幣換算すると7:30~8:30の1時間で約160万円の節減になることが示された。

参考文献

- Cameron, G. D. B, B. J. N. Wylie, D. McArthur(1994) : PARAMICS - Moving Vehicles on the Connection Machine, Proceedings Supercomputing'94, IEEE Computer Society Press, pp.291-300.
- Coombe, R. D.(1989) : Review of Computer Software for Traffic Engineers, Transport Reviews, Vol.9, No.3, pp.217-234.
- Fritzsche, H. T.(1994) : A Model for Traffic Simulation, Traffic Engineering & Control, pp.317-321.
- Hall, M. D., D. V. Vliet, L. G. Willumsen(1980) : SATURN-a Simulation-Assignment Model for the Evaluation of Traffic Management Schemes, Traffic Engineering & Control, Vol.21, pp.168-176.
- Horiguchi, R., M. Kuwahara, M. Katakura, H. Akahane, H. Ozaki(1996) : A Network Simulation Model for Impact Studies of Traffic Management 'AVENUE Ver.2', Third Annual World Congress on Intelligent Transport Systems Abstracts, pp.128-129.
- 飯田恭敬, 内田敬, 藤井聡, 鷹尾和享(1991) : 渋滞の延伸を考慮した動的交通流シミュレーション, 土木計画学研究講演集, No.14(1), pp.301-308.
- 飯田恭敬, 藤井聡, 内田敬(1996) : 動的交通流シミュレーションを用いた道路網における情報提供効果に関する分析, 交通工学, Vol.31, No.6, pp.19-29.
- 池之上慶一郎, 斉藤威(1972) : 信号で制御される交通流のシミュレーションにおける車両の発生について, 科学警察研究所報告交通編, Vol.13, No.1, pp.1-11.
- 池之上慶一郎, 斉藤威, 花堂紘之(1973) : 街路交通流における車線変更現象のシミュレーション・モデル(SLCS-I), 科学警察研究所報告交通編, Vol.14, No.2, pp.85-107.
- 池之上慶一郎, 斉藤威, 花堂紘之(1975) : 街路交通のシミュレーション・モデル(MICSTRAN-I と MACSTRAN-I), 科学警察研究所報告交通編, Vol.16, No.1, pp.1-16.
- 木戸伴雄, 池之上慶一郎, 斉藤威(1978) : 街路網における経路探索・交通配分モデル(DYTAM-I), 科学警察研究所報告交通編, Vol.19, No.1, pp.1-10.
- 高齢化社会に向けての交通問題研究会(1986) : 中小地方都市における高齢者の運転特性と交通計画上の課題, pp.61-87.
- 交通工学研究会(1994) : 交通信号の手引き, 交通工学研究会, pp.125-141.
- 交通工学研究会(2000) : やさしい交通シミュレーション, 丸善.
- McDonald, M., J. Wu, M. Brackstone(1997) : Development of a Fuzzy Logic

Based Microscopic Motorway Simulation Model, IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, pp.82-87.

Messmer, A., M. Papageorgiou(1990) : METANET: a Macroscopic Simulation Program for Motorway Networks, Traffic Engineering & Control, pp.466-470.

宮城俊彦, 浅井敦司, 岡昭二(1996) : フレックスタイム制導入に伴う道路交通環境変化のネットワークシミュレーション分析, 交通工学, Vol.31, No.1, pp.35-43.

野田宏治(1997) : アクセレーションノイズと微弱電波を用いた地方都市の道路交通環境の評価に関する研究, 名古屋工業大学学位論文, pp.22-90.

荻野弘(1985) : 街路網交通信号制御手法に関する基礎的研究, 名古屋大学学位論文.

Rathi, A. K., A. J. Santiago(1990a) : Identical Traffic Streams in the TRAF-NETSIM Simulation Program, Traffic Engineering & Control, pp.351-355.

Rathi, A. K., A. J. Santiago(1990b) : Urban Network Simulation: TRAF-NETSIM Program, Journal of Transportation Engineering, Vol.116, No.6, pp.734-743.

総務庁(1995) : 交通安全白書(平成7年版), 大蔵省印刷局, pp.159-161.

豊田市(1999) : 平成10年度豊田都市圏新渋滞対策調査業務委託報告書.

Wong, S. Y.(1990) : TRAF-NETSIM: How It Works, What It Does, I.T.E. Journal, Vol.60, pp.22-27.

Yang, Q., H. N. Koutsopoulos(1996) : A Microscopic Traffic Simulator for Evaluation of Dynamic Traffic Management Systems, Transportation Research-C, Vol.4, No.3, pp.113-129.

第9章 結論

道路網の経路別交通量を求めるための交通量配分モデルは単なる道路網計画にとどまらず、交通運用計画、交通管理計画、道路交通情報提供などソフトウェア的対策にも利用されるようになり、人間の交通行動に基づいた、より論理性のある配分理論の開発が必要になってきている。このような背景により、本研究ではファジィ理論、ニューラルネットワーク理論を利用して、より論理性のある人間行動に基づいた交通モデルの開発を行なった。

第1章では、本研究の意義と目的について述べ、続いて本研究で開発を行なう経路選択モデル、追従走行モデル、交通量配分モデル、微視的道路交通シミュレーションモデルは互いに密接な関係を持ち、またこれらのモデルを用いることで、都市圏レベルから都市内の細部に渡るまでの総合的な交通量予測を精度よく行なうことが可能であることを述べた。

第2章では、交通量配分モデルについて既存研究を整理しつつ、それらの問題点を明らかにし、今後の研究の方向性を示した。その中で、交通量配分モデルに用いる経路探索アルゴリズムは、Dijkstra法が効率的であること、車種別交通量配分モデル開発の必要性、動的交通量配分モデルの整理、計算のためのODデータ等の整備の必要性などについて述べた。

第3章では、既存モデルの問題点とファジィ理論、ニューラルネットワーク理論の性質について述べ、人間の行動した結果生じる交通現象などの予測には、場合に応じてファジィ理論、ニューラルネットワーク理論を使用することは有効な手段であることを示した。

第4章では、経路選択モデルを開発する意義について述べ、続いてアンケート調査を基に経路選択行動の解析を行なった。その結果、経路を選択する理由で「所要時間が短い」という回答は1位ではあったが39%であり、通勤・通学時においては所要時間のばらつきの少なさ、買い物時においては道路の走りやすさや経路の分かりやすさも重視する傾向があることなどが分かった。混雑状況、信号機・一時停止の数、道路の走りやすさ、所要時間差を説明変数とした経路選択行動を表すニューラルネットワークモデルを構築し、アンケート調査の結果を学習データとして与えた結果、モデルの的中率は93%になり、経路選択行動をよく説明していることが分かった。さらに所要時間以外の3つの入力値(混雑状況、信号機・一時停止の数、道路の走りやすさ)を説明するモデルのための道路条件を抽出し、パラメータの推定を行ない、このモデルを組み込んだ

ニューラルネットワークの適合度を調べた結果、的中率は87%であった。

第5章では、まずファジィ的交通量配分モデルを開発する意義について述べ、従来の研究の問題点を指摘した。次に、可能性測度最大化配分モデル、満足度最大化配分モデル、不満最小化配分モデルの3モデルについて配分原則を定義し、定式化を行なった。そして、これらの配分モデルの特性を調べた結果、可能性測度最大化配分モデルでは最小所要時間のみが考慮されること、満足度最大化配分モデルでは最小所要時間より最大所要時間の変化の方が経路の魅力度に与える影響が大きいこと、不満最小化配分モデルでは最小所要時間を減少させた場合、所要時間のばらつきが大きくなることからその経路を嫌う傾向が出ることなどが示された。また、実ネットワークへの適用が可能な満足度最大化配分モデルの計算アルゴリズムの開発を行なった。

第6章では、第5章で開発を行なった配分モデルを仮想道路網と名古屋都市圏の道路網に適用し、利用者均衡配分モデルなどとの比較を行なった。仮想道路網を用いた配分結果から、満足度最大化配分モデルでは最小所要時間、最大所要時間の与え方で配分結果が大きく異なること、総走行時間は他の配分モデルより長くなることなどが分かった。また、名古屋都市圏の道路網を用いて、7～9時のOD交通量と1日のOD交通量を用いて配分計算を行なった結果、RMS誤差などの評価指標では、利用者均衡配分モデルが最も適合度が高かった。満足度最大化配分モデルでは、道路種別ごとあるいは各道路区間ごとに適切な最小・最大所要時間の設定を行なう必要があることが分かった。

第7章では、まず追従走行モデルの開発意義および既存研究について述べた。次に測量用GPS受信機を用いて走行調査を行なう方法を提案し、その精度試験を行なったところ、観測条件が悪い状況下でも距離の誤差は最大2.2cmであり、非常に高精度で計測が可能であることが分かった。そして、16名の被験者を対象に富浜緑地周辺と浄水周辺で走行調査を行ない、追従走行挙動のデータを取得した。加速度を被説明変数、1秒前の走行速度および車間距離を説明変数とするファジィ的ニューラルネットワークを用いた追従走行モデルを構築し、走行調査の結果を教師データとして与えて学習した結果、従来のモデルと比べて適合度が高いことが示された。そして、運転者属性別にモデル推定を行なったところ、車間距離に対する認識の違いなど、各運転者属性間に違いが見られた。

第8章では、まず微視的道路交通シミュレーションモデルの開発意義および既存研究について述べた。次に、本研究で提案するシミュレーションモデル(CaTS)の特徴および他のシミュレーションモデルとの比較について述べ、さらにシミュレーションモデルで用いている各モデルについて述べた。そして、計算手順、スキミングタイムの検討を行なった。本モデルを豊田市都心部へ適用し、実測データと比較したところ良好な再現が出来ていることが分かった。

また、精度の高いODデータが得られているトヨタ自動車本社工場周辺地域へ適用した結果、最大渋滞長はかなり良い精度で再現できていることが分かった。また、対象地域内を目的地とする交通についてトリップ長が短くなるように対象地域内に流入する交差点において利用駐車場を指定した場合の予測を行なったところ、ほぼ全ての箇所で渋滞は解消し、総走行時間では現況の54%に、総走行距離では現況の84%になり、走行時間の短縮を時間価値を用いて貨幣換算すると7:30～8:30の1時間で約160万円の節減になることが示された。

以上、本研究の成果について述べたが、今後に残された問題点として、以下のことが明らかとなった。

- (1) 本研究で構築を行なった交通量配分モデルは、単一車種を対象としているが、車種によって走行挙動が異なると考えられる。従って、車種別の交通量配分モデルを構築する必要がある。
- (2) ファジィ交通量配分モデルをより効率的に解くアルゴリズムを開発する必要がある。
- (3) 満足度最大化配分モデルで用いる最小・最大所要時間を適切に設定する方法の開発を行なう必要がある。
- (4) 非常に複雑である運転行動のメカニズムを解析し、より適合度が高くなるような追従走行モデルの説明変数について検討を行なう必要がある。

謝 辞

本論文をまとめるに至るまで、多くの方からご指導、ご鞭撻、ご協力をいただいた。

河上省吾教授には、数多くのディスカッション等を通じて、懇切丁寧なご指導を頂いた。森川高行教授、倉内慎也助手には、終始暖かいご指導・ご助言を頂いた。林良嗣教授、中村英樹助教授、加藤博和助手には、本論文の細部にわたりご助言やご指導を頂いた。諸先生方をはじめ、土木工学専攻および地圏環境工学専攻に対し、衷心より深く感謝しお礼を申し上げる次第である。

私が豊田工業高等専門学校に在学中から現在に至るまで、公私ともども終始ご指導を頂いた豊田工業高等専門学校 環境都市工学科 荻野弘教授、野田宏治助教授には、衷心より深く感謝しお礼を申し上げる次第である。

(財)豊田都市交通研究所の伊豆原浩二氏、津坂英司氏、鈴木一宏氏、山崎基浩氏をはじめとする研究員の方々には、データの提供等も含め、研究を進めるにあたって多大なご協力を頂いた。(株)長大の岡田良之氏には、交通量配分についての実務面からのアドバイスを頂いた。豊橋技術科学大学に在学中は、赤松隆助教授(現、東北大学助教授)よりご指導を頂いた。

調査を実施するにあたり、名古屋大学 社会資本計画学講座の卒業生・学生、豊田工業高等専門学校の職員および交通工学研究室の学生、(株)サンデリカ 名古屋事業所の方々のご協力を頂いた。また、(株)ゼンリンからは地図の複製利用の許可を頂いた。

これらの全ての方々に衷心よりお礼を申し上げる次第である。

平成 13 年 1 月

井ノ口 弘昭

付 録

- ・経路選択アンケート調査調査票

自動車利用時の経路選択についての実態調査

調査のお願い

この実態調査は、都市内部における交通を円滑に処理し、道路をより利用しやすくする交通計画策定のための基礎的資料を得る目的で、自動車を運転される方を対象に行うものです。あなたのお答えにより、より望ましい交通計画の策定が可能となります。

お答えいただいた内容は、統計的処理を行い、交通計画のための資料として使うのみで、その他の目的で使うことはありません。

お忙しいところ、誠に恐れ入りますが、何とぞ協力下さいますようお願い致します。

平成 11 年 9 月

ご記入について

- 1.設問は(1)から(21)まであります。(1)から(9)までは普段の通勤・通学時について、(10)から(17)までは自動車による買い物等について例を1つあげてお答え下さい。(18)から(21)まではあなた自身のことをお聞かせ下さい。なお、通勤・通学に自動車を利用されない方は、(10)からお答え下さい。
- 2.各設問の回答は、その番号に○印を付けるか、()には具体的な内容、地図には経路を指定された色で記入して下さい。
- 3.せっかく回答していただいた調査票に記入漏れがあったりしますとその調査票は無効になり、調査結果に反映されないこととなります。ご面倒ですが、再度回答漏れがないかの確認をお願いします。
- 4.回答がすみしたら、ご面倒ですが、この調査票を封筒に入れて1週間以内に投函して下さい。
- 5.この調査に関するご質問、ご意見は下記までお願いします。

調査実施機関

名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻
社会資本計画学講座 教授 河上 省吾
担当者：井ノ口 弘昭 (博士後期課程2年生)
〒464-8603 名古屋市千種区不老町
Tel(052)789-3730 FAX(052)789-3738
E-mail: inokuchi@civil.nagoya-u.ac.jp

1. 普段の通勤・通学時についてお答え下さい。

(1) 出発地(自宅)と目的地(パークアンドライド[P&R]の場合はP&R駐車場の住所を記入してください。
(パークアンドライド[P&R]:最寄の駅まで自動車で行き、駅周辺に駐車して公共交通機関で目的地まで行くこと)

出発地:() 区 () 町 () 丁目
目的地:() 区 () 町 () 丁目() 駅周辺)

(2) 普段、通勤・通学に使用する経路を次頁の地図に赤線で、地図の範囲内で記入して下さい。

(3) (2)で答えた経路を使用した場合、所要時間は何分程度ですか?

早い時で()分、遅い時で()分、平均()分

(4) (2)で答えた経路以外で利用可能な経路を次頁の地図に黒線で、地図の範囲内で記入して下さい。

(5) (4)で答えた経路を使用した場合、所要時間は何分程度ですか?

早い時で()分、遅い時で()分、平均()分

(6) それぞれの経路の以下の項目についての評価をお答え下さい。

経路の交通状況	(2)で答えた普段利用する経路	(4)で答えた他に利用可能な経路
混雑状況	1.非常に空いている 2.やや空いている 3.普通 4.やや混んでいる 5.非常に混んでいる	1.非常に空いている 2.やや空いている 3.普通 4.やや混んでいる 5.非常に混んでいる
信号機や一時停止の数	1.非常に少ない 2.やや少ない 3.普通 4.やや多い 5.非常に多い	1.非常に少ない 2.やや少ない 3.普通 4.やや多い 5.非常に多い
道路の走りやすさ	1.非常に走りやすい 2.やや走りやすい 3.普通 4.やや走りにくい 5.非常に走りにくい	1.非常に走りやすい 2.やや走りやすい 3.普通 4.やや走りにくい 5.非常に走りにくい

(7) 目的地に到着しなければならない時刻は何時ですか? また、普段は何時頃に着きますか?

時 分 まで/頃/以降 (○印を付けて下さい) に到着しなければならない

普段は 時 分頃に到着する

(8) (2)で答えた経路を利用する理由で最重視するものに◎、次に重視するものに○を付けて下さい。

1.所要時間が短い 2.所要時間のばらつきが少ない 3.道路が空いている
4.道路が走りやすい 5.経路が分かりやすい 6.その他()

(9) (2)で答えた経路から(4)で答えた経路に変更するための条件をお答え下さい。

(4)で答えた経路の所要時間が()分短縮される

その他の条件()



2. 自動車による買い物等について例を1つあげてお答え下さい。

(10) 目的地の住所を記入してください。

目的地：(店舗名) (駅周辺)
もし分かれれば(区 町 丁目)

(11) 普段、目的地へ行くために使用する経路を次頁の地図に赤線で、地図の範囲内で記入して下さい。

(12) (11)で答えた経路を使用した場合、所要時間は何分程度ですか？

早い時で()分、遅い時で()分、平均()分

(13) (11)で答えた経路以外で利用可能な経路を次頁の地図に青線で、地図の範囲内で記入してください。

(14) (13)で答えた経路を使用した場合、所要時間は何分程度ですか？

早い時で()分、遅い時で()分、平均()分

(15) それぞれの経路の以下の項目についての評価をお答え下さい。

経路の交通状況	(11)で答えた普段利用する経路	(13)で答えた他に利用可能な経路
混雑状況	1.非常に空いている 2.やや空いている 3.普通 4.やや混んでいる 5.非常に混んでいる	1.非常に空いている 2.やや空いている 3.普通 4.やや混んでいる 5.非常に混んでいる
信号機や一時停止の数	1.非常に少ない 2.やや少ない 3.普通 4.やや多い 5.非常に多い	1.非常に少ない 2.やや少ない 3.普通 4.やや多い 5.非常に多い
道路の走りやすさ	1.非常に走りやすい 2.やや走りやすい 3.普通 4.やや走りにくい 5.非常に走りにくい	1.非常に走りやすい 2.やや走りやすい 3.普通 4.やや走りにくい 5.非常に走りにくい

(16) (11)で答えた経路を利用する理由で最重視するものに◎、次に重視するものに○を付けて下さい。

- 1.所要時間が短い 2.所要時間のばらつきが少ない 3.道路が空いている
4.道路が走りやすい 5.経路が分かりやすい 6.その他 ()

(17) (11)で答えた経路から(13)で答えた経路に変更するための条件をお答え下さい。

(13)で答えた経路の所要時間が()分短縮される

その他の条件 ()



3. 最後にあなた自身のことをお聞かせ下さい。

(18) 性別 1.男性 2.女性

(19) 年齢 ()歳

(20) 運転歴 ()年

(21) 職業

- 1.農林漁業従事者 2.採鉱・採石従事者 3.技能工・生産工程従事者 4.販売従事者
5.サービス業従事者 6.運輸・通信従事者 7.保安職業従事者 8.事務的職業従事者
9.技術的・専門的職業従事者 10.管理的職業従事者 11.学生
12.主婦(職業従事者を除く) 13.無職・その他

以上で質問は終わりです。ご協力ありがとうございました。

この調査票を同封の封筒に入れて1週間以内に投函して下さい。

