

図・本館

高度交通情報提供による交通行動変化の 定量的分析と交通計画へのインプリケーション

(課題番号：11450193)

平成 11・12 年度 科学研究費補助金 (基盤研究 (B) (2))

研究成果報告書

平成 14 年 1 月

研究代表者 森川 高行

(名古屋大学大学院環境学研究科教授)

はしがき

本報告書は、平成 11 年および平成 12 年の 2 年間にわたって交付された文部省（現文部科学省）科学研究費補助金基盤研究（B）（2）「高度交通情報提供による交通行動変化の定量的分析と交通計画へのインプリケーション」の研究成果をとりまとめたものである。

近年、交通計画をめぐる情勢は著しく変化している。都市の過密化や地価高騰、財政的制約などの社会的背景を受け、従来のような交通基盤整備の新規拡充に頼った交通問題の解消には限界が見え始めてきている。そのような中、昨今めまぐるしい発達を遂げる情報技術を積極的に活用した交通システムが交通問題解決の切り札として脚光を浴びている。いわゆる ITS（Intelligent Transportation Systems、高度情報化交通システムまたは高度道路交通システム）である。既に実用化されている VICS（Vehicle Information and Communication Systems：路車間情報システム）を用いた車載ナビゲーションはその代表的なものであり、ドライバーに渋滞や経路の所要時間情報を逐次提供し、空いている経路への変更を促すことにより、交通混雑が緩和されるものと期待される。

しかし、これはひとつの理想像であり、必ずしも情報提供が正の効果をもたらすとは断言できない。例えば、先のナビゲーションの例では、情報提供により空いている経路に過大な交通流が流入し、混雑を引きおこし、結果として先に混雑していた経路の混雑が緩和し、再びその経路に交通流が流入するといったハンチング現象が観測されている。また、情報を獲得した全てのドライバーが常に取得した情報を参照して経路を変更するとは限らないため、提供される情報の質によっては、情報提供がない時よりも総走行時間を増大させる場合があることが室内実験により報告されている。ITS は莫大なマーケットを有していることから、民間主導のもとで、様々なサービスが実用化されつつあるが、それ以前に情報提供の交通計画上の意義や問題点を早急に議論する必要があると言えよう。

本研究では、そのような認識のもと、様々な交通情報が交通需要にどのような影響を与え、その結果交通計画にとってどのような意味合いを持つかを提示することを目的として、主に、情報提供下における行動主体の行動変更や、都市圏レベルの道路ネットワークにおける情報提供効果を定量的に計測できるようなモデルの開発を行なった。

本研究を進めるに当たり研究室の学生諸君に多大な協力を得た。ここに感謝を記す。

平成 14 年 1 月

研究代表者
名古屋大学大学院教授 森川高行

研究組織

研究代表者：森川高行（名古屋大学大学院環境学研究科教授）

研究分担者：河上省吾（名古屋大学大学院工学研究科教授）

倉内慎也（名古屋大学大学院工学研究科助手）

研究経費

平成11年度	3,300千円
平成12年度	2,200千円
合計	5,500千円

研究発表

(1) 学会誌等

倉内慎也，森川高行，岡田良之，佐々木邦明：プレトリップ情報提供下における短期的交通行動変更抵抗のモデル分析，土木計画学研究・論文集，No.16，pp.763-768，1999.

井ノ口弘昭，河上省吾，荻野弘：ファジィ的ニューラルネットワークを用いた微視的道路交通シミュレーションモデルの開発，土木計画学研究・論文集，No.16，pp.911-918，1999.

(2) 口頭発表

倉内慎也，森川高行，中山隆：補償型・非補償型意思決定ルールを同時に考慮した交通手段選択モデル，土木計画学研究・講演集，No.22(1)，pp.389-392，1999.

金森亮，河上省吾：高速道路を含む道路網における配分交通量予測法の比較，土木学会第54回年次学術講演会講演概要集，第4部，pp.712-713，1999.

Kurauchi, S. and Morikawa, T.: Discrete Choice Model with Latent Classes Considering Heterogeneity of Decision Making Rules, Paper Presented at 9th International Association for Travel Behaviour Research Conference, Gold Coast, Australia, 2000.

三村健太郎, 森川高行, 三輪富生: 都市圏レベルの均衡配分手法の適用性とリンクパフォーマンス関数の修正に関する研究, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), 2000.

小林圭, 森川高行: 情報の不完全性を考慮したネットワーク配分手法と情報提供効果に関する研究, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), 2001.

目次

はじめに	1
1. 研究の背景と目的	1
2. 全体の構成	1
第一部 離散型選択モデルに基づく情報提供下での交通行動の変更に関する分析	3
1. プレトリップ情報提供下における短期的交通行動変更抵抗のモデル分析	4
2. 意思決定方略の異質性を考慮した離散型選択モデルの開発とダイナミック パークアンドライド行動の分析	20
第二部 均衡配分手法に基づく都市圏レベルでの道路網における情報提供効果の 分析に関する研究	34
1. 都市圏レベルの均衡配分手法の適用性とリンクパフォーマンス関数の修正 に関する研究	35
2. 情報の不完全性を考慮したネットワーク配分手法と情報提供効果に関する研究	53
付録 関連資料	82
1. 高速道路を含む道路網における配分交通量予測法の比較	83
2. ファジィ的ニューラルネットワークを用いた微視的道路交通シミュレーション モデルの開発	98

はじめに

1. 研究の背景と目的

高度情報化の波が交通の分野にも押し寄せている。いわゆる ITS (Intelligent Transportation Systems, 高度情報化交通システムまたは高度道路交通システム) である。ITS は、VICS (Vehicle Information and Communication Systems : 路車間情報システム) を用いた車載ナビゲーションや ETC (Electronic Toll Collection : 自動料金収受システム) に代表されるように、莫大なマーケットを有している事から、民間企業主導のもと様々な技術開発やマーケティングが行われるなど、本来の交通計画上の意義や問題点が議論される前に次々に実用化されていく様相を呈している。

交通計画の分野においても、近年、ITS がもたらす意義についての議論からその効果に関する定量的な分析まで、様々な研究がなされているが、まだ十分な評価をできる段階には至っていない。そもそも限られた情報の下、すなわち不確実性下の交通行動に関する研究は蓄積が少ない。また、情報提供による便益の計測も走行時間の減少といった計量の易しい局面に限られている。これは、不確実性下の交通行動を経済学的に厳密にモデル化し、実証的にそのモデルの未知パラメータを定めることが行われなかったためであると考えられる。また、これまで研究されてきた情報提供下の交通行動分析は、極めて単純化したネットワーク (例えば1つの起終点ペアで2つの経路など) 上での、混雑情報による経路または出発時刻の変更というものがほとんどであり、複雑なネットワークを有する都市における交通計画へのインプリケーションは不明であった。

本研究の目的は、様々な交通情報が交通需要にどのような影響を与え、その結果交通計画にとってどのような意味合いを持つかを定量的に提示することであるが、そのための下位目標がいくつかある。まず不確実性下の意思決定問題を明示的に取り込んだ旅行者の行動モデルを数学的に表し、プレトリップ情報及びオンルート情報を受けた際の交通手段、パークアンドライド行動などの選択行動を定量的に予測するモデルを開発することである。次に、オンルートの混雑情報を得た際のドライバーの経路選択行動をネットワーク均衡配分モデルを用いて表現し、混雑情報の精度が均衡状態に及ぼす影響、車載機の普及程度が個々のドライバーの便益 (所要時間短縮) に与える影響を分析し、混雑情報の質と量のあるべき姿を提示する。

2. 全体の構成

本研究では、情報提供効果を分析するにあたり、情報を享受する個々の交通主体の行動やその背後に潜む意思決定過程にまで立ち返ったミクロな視点、及び、情報提供に伴う都市圏全体での交通需要と交通ネットワークのパフォーマンスの変化に着目したマクロな視点、の双方のアプローチを用いて分析を行なった。前者を第一部、後者を第二部にて報告する。

情報提供が個々人の交通行動に及ぼす影響の分析では、特に行動の変更に着目して分析を行なった。これは、ロジットモデルに代表される従来の交通行動モデルがいわば定常状態の選択行動を表すものであるため、中長期的な予測には適しているものの、リアルタイムな所要時間情報提供のような情報リソ

ースの効果の分析においては、行動の変更というより動的な側面を検討することが極めて重要であるとの認識によるものである。

そこで、まず、交通情報に関するニーズや情報提供に伴う行動変化を尋ねたアンケートデータを用いて分析を行なった。既存の研究においても報告されているように、交通行動の変更には、交通サービスの認知レベルに相当する効用差以外に変更抵抗がかかるものと考え、その変更抵抗を定量的に算出する方法論を展開した。次いで、提案した方法論を用いて、プレトリップ所要時間情報の提供に伴う交通手段選択行動を対象に、提供される情報の種類および変更前後の交通手段ごとに変更抵抗を算出し、情報提供のあり方について考察を行なった。詳細については、第一部の1. にて報告する。

上記分析では、行動変更を引き起こす意思決定メカニズムについてはブラックボックスとして扱っているため、次に、交通行動の背後に潜む意思決定過程にまで立ち返った分析を行なった。相対的に重要な低い属性に関する情報や情報提供前後の認知レベルの差が小さい場合には、行動変更は極めて生じにくいとの認識から、非補償型行動原理及び行動変更の閾値効果を考慮した離散選択モデルを構築し、都心部への買い物交通を対象にダイナミックパークアンドライドの需要予測分析を行なった。詳細については、第一部の2. にて報告を行なう。

情報提供が都市圏全体での交通需要に及ぼす影響の分析では、需要予測のアカウントビリティという観点から、理論的に優れている均衡配分手法を用いて分析を行なった。均衡配分手法を用いて情報提供効果を分析するためには、ドライバーの完全情報の仮定を緩和した配分手法の開発が不可欠である。本研究では、それをリンクパフォーマンス関数に求める手法と、配分原則に求める手法の2つのアプローチを用いて分析を行なった。

まず前者に関して、現実の道路網においてはWardropの等時間原則は成立しておらず、むしろ道路ネットワークの認知等を含めた効用レベルで均衡しているとの認識のもと、リンクパフォーマンス関数にそれら要因の影響を反映できるような形に修正する方法論を展開した。その方法論を用いて、中京都市圏道路ネットワークを対象として配分を行なった結果、特にオフピーク時において、都市高速道路の現況再現性が向上するなど、その有効性が確認された。詳細については、第二部の1. にて報告する。

後者については、ドライバーの情報の不完全性を考慮した配分手法として、ドライバーを所要時間及び道路ネットワークの認知状況に応じて、完全情報を有している場合は確定的利用者均衡配分、所要時間が不完全な場合は最短経路へのall-or-nothing配分、ネットワーク情報が不完全な場合は経路集合を限定した確定的利用者均衡配分というように異なるセグメントに分割し、その構成比率を変化させて配分を行なった。その結果、全体の約20%のドライバーが不完全情報下で経路選択を行なっているとした場合に最も現況再現性が高いという結果が得られた。また、提案モデルを用いて、通常時及び事故・災害時における経路所要時間情報の効果を算出したところ、共にかかなり大きな便益が得られることが示された。詳細については、第二部の2. を参照されたい。

最後に、上記分析を行なう準備段階として、均衡配分手法を都市道路ネットワークへ適用する際に問題となる高速道路への転換交通の記述法の検討、及び個々のドライバーの詳細な挙動を組み込んだ動的交通流シミュレーションモデルに関する研究を行なった結果を付録に掲載した。

第一部

離散型選択モデルに基づく情報提供下での 交通行動の変更に関する分析

1. プレトリップ情報提供下における短期的交通行動変更抵抗のモデル分析
2. 意思決定方略の異質性を考慮した離散型選択モデルの開発とダイナミックパークアンドライド行動の分析

プレトリップ情報提供下における短期的交通行動変更抵抗のモデル分析

1. はじめに

情報化の急速な進展に伴い、交通情報提供システムが数多く開発されてきている。それを受けて、様々な視点からシステム導入の効果に関する研究がなされているが、まだ十分な評価をできる段階には至っていない。その本質的な理由として、提供された情報に対する個人の交通行動の変化が決して安定していないことが挙げられる。例として、比較的交通行動の変化がおこりやすいと思われる VICS 等の経路誘導システムの導入効果を考えてみると、モデル分析上の仮定としてドライバーは所要時間が最も短い、あるいは得られる効用が最も大きい経路を選択するとして予測されている。しかし実際のドライバーの情報提供に対する反応行動は、その人のそれまでの経験や知識に大きく依存し、また情報自体の質にも大きく関係しており、実際には予測ほどの行動の変化は生じないと考えられる。このような傾向はダイナミックパークアンドライドのような交通手段の変更を旨とした場合にはより顕著に現れると考えられ、交通行動の変化が定常状態の所要時間差や効用差によって対称的に生ずると仮定している従来のアプローチでは効果を過大に評価する危険性があると言える。

そこで本研究では、交通行動の変更には定常状態の効用差以外に変更費用 (transaction cost) がかかるとして、情報提供下における交通行動の変化に着目した分析を行う。この transaction cost は、どの交通手段からどのような交通手段にシフトするのにかよって、また個人間によっても大きく異なり、その差異が個人の選好に影響を及ぼすとの立場から、交通情報提供による交通管理の効果を分析する上で、交通行動の変更を非対称的な現象として捉えた 1 つのアプローチとして位置づけられる。本研究ではこのアプローチの第一段階として、非集計行動モデルを利用し transaction cost の定義・定量化を行ない、それを被説明変数とした重回帰分析を行い、交通情報が意思決定に与える影響についての考察を行う。

2. 既存研究のレビュー

情報提供効果の影響に着目した研究は、カーナビゲーションシステムや VICS 等の情報提供システムの開発・実用化に伴い急速に増加している。それらは主に、意思決定者の交通情報に対する評価構造や反応行動の解明を目的とした非集計的な研究と、情報提供による交通ネットワーク上の経路配分に対する影響や渋滞緩和効果などの算出を目的とした集計的な研究に分けることができる。

前者に関しては、所要時間や駐車待ち時間などの不確実性を含む要因をいかに効用関数に組み込むかが研究の焦点となる。W.B.Jackson ら¹⁾ は交通手段の定時性を評価するために線形効用関数の説明変数として平均所要時間とその分散値を用いた Mean-Variance モデルを提案しており、Hall ら²⁾ や山下³⁾ では意思決定者の遅刻回避行動を定義し、余裕時間と所要時間及び遅刻確率からなる実効旅行時間を説明変数として用いている。他にも所要時間の分散をパラメトリックに分布させ、所要時間の不確実性を考

慮したモデル⁴⁾や、効用関数に一般化平均概念を導入し、所要時間の最大値や最小値、平均値など複数の評価属性の代替性を表現したモデル⁵⁾など、様々な方法が提案されている。また、提供される情報の精度とそれに対する反応行動の分析が、ドライバーの経路選択行動を対象として盛んに行われている。例えば飯田ら⁶⁾は被験者に繰り返し仮想的な状況における経路選択行動を尋ねた SP 実験により、各経路の所要時間の予測値よりも前回の所要時間の予測値と実現値との乖離が重要な経路選択要因となっていることを指摘しており、小林⁷⁾は「不確実な経路の走行条件に関して、ドライバーは利用可能な経路情報に基づき合理的な期待を行い期待効用を最大にするような経路を選択する」という合理的期待形成仮説を設け、ドライバーが学習行動を通じて主観的期待を更新する過程をモデル化しドライバーの合理的期待均衡に関して分析を行っている。また情報提供の影響に伴う交通行動の変更に関連する研究として、河上・広島⁸⁾は鉄道開通前後のデータを用いて交通手段選択分析を行い、変更前の利用手段による評価構造の差異が存在することを実証し、藤井ら⁹⁾はパネルデータを用いてセミマルコフモデルを適用し、個人の交通行動の遷移過程を連続時間軸上で再現するモデルを構築している。これらの分析は、交通行動の変更には状態依存等の *transaction cost* が存在するため選択行動は非対称的であることを示唆しており、パネルデータを用いた動的分析の必要性を述べている。

一方、後者の集計的な分析に関して、Mahmassani et al.¹⁰⁾は仮想的なネットワーク上の配分シミュレーションから平均所要時間を算出し、所要時間情報提供の効果を検討しており、Arnott et al.¹¹⁾では情報の精度と旅行費用の関係を検討し、質の低い情報は情報のない時よりも旅行費用を増大させる場合があることを指摘している。国内では、飯田ら¹²⁾はドライバーを経路固定層・経験利用層・情報利用層の3つのセグメントに分割し、動的交通流シミュレーションモデルを用いて路車間情報システムの道路網交流への効果を分析した。また、森津・中島¹³⁾は経路選択モデル、リンク旅行時間予測モデル、経路変更モデルを用いて、経路選択行動を表現している。

3. 本研究に用いるアンケート調査

3. 1 アンケート調査の概要

本研究では、市民の交通情報に関するニーズを把握するために、平成9年3月に名古屋市計画局が行ったアンケート調査データを使用した。調査は住民基本台帳をもとに3,000世帯を無作為に抽出し、郵送配布・回収形式で行われた。通勤交通及び都心（栄地区）への私事交通を対象に各1票ずつのアンケート用紙が送付され、以下の項目に関するデータが得られている。

- ・社会経済属性（住所、性別、年齢、免許保有、自動車保有、家族構成）
- ・トリップ属性（通常利用手段、旅行時間、旅行費用など）
- ・通常利用する交通手段の選択理由
- ・選択しなかった交通手段のトリップ属性
- ・現在の交通情報入手手段と場所
- ・入手したい情報の種類と場所
- ・仮想の交通情報提供下での交通行動変更の意思

なお、アンケート回答数は通勤交通 842 票、私事交通 1,363 票であった。

3. 2 アンケート調査の集計分析

(1) 通勤交通

(a) 勤務先までの主な交通手段

自動車利用は 52.6%、鉄道やバスの公共交通機関（マストラ） 27.5%となっており、第3回中京都市圏 PT 調査（平成3年）の機関分担率（通勤目的市内発生）と比較すると、やや自動車利用が高くなっているが、傾向としてはほぼ一致している（図3.1参照）。

交通手段を選択する理由は、自動車利用ではマストラの速達性や駅まで遠いこと等のサービス水準の低さが 46.2%と約半数を占めている。マストラ利用では「停留所、駅が近いから」が 23.6%と最も多く、その他のマストラの利便性の高さの理由を含めると 47.2%と約半数を占める。

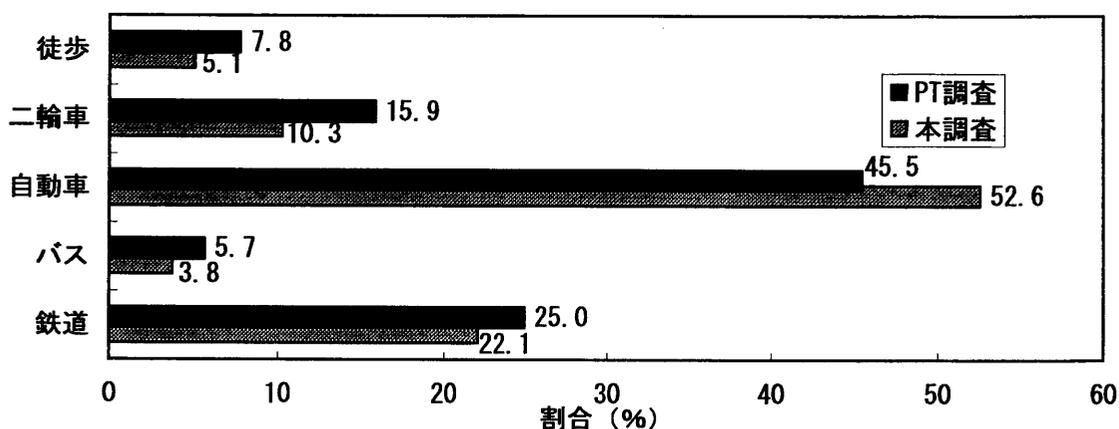


図3.1 通勤交通の機関分担率

(b) 通勤時の交通情報提供

現況において 75%の人が通勤時の交通情報を入手しており、この数字は徒歩・二輪車を除くほとんどの人が情報を入手していることを示していると考えられる。メディアとしては、テレビ（66.0%）・ラジオ（61.3%）が主力になっている。交通手段別に見ると自動車利用者は移動中のラジオで、マストラ利用者は自宅のテレビにより情報を入手するパターンが多い。

通勤時の交通情報に関しては、80.5%の人が「必要である」と回答しており、情報提供の重要性が確かめられた。どのような情報が必要とされているのかは交通手段によって異なっているが、自動車利用者は道路渋滞（36.5%）や交通規制（52.1%）等の道路情報が 88.6%を占めており、マストラ利用者は鉄道・バスの遅れ時間（43.7%）等のマストラに関するものが 62.1%となっている。

(c) 通勤時の交通情報提供による交通行動の変化

通勤時の情報提供によって交通手段・経路を変更する可能性は自動車利用者が 56.2%、マストラ利用者が 44.1%となっており、どちらも約半数程度の変更の可能性がある。変更先の手段は、自動車利用者のうちマストラへ転換する人は 40.5%、自動車の経路変更が 53.4%となっており、マストラ利用者では別のマストラを利用する人が 51.9%を占めている（図3.2参照）。

変更する理由であるが、自動車利用者では道路渋滞が 89.1%と殆どを占めている。それを渋滞による

遅延時間別で見ると、10分の遅れ時間では6.8%、20分の遅れ時間では28.9%、30分の遅れ時間では79.8%が自動車からマストラへ転換する結果になっている。ところが、自動車利用者はあらかじめ日常の経験から渋滞による遅れを予想して勤務地までの所要時間を予測していることが考えられる。実際に自動車利用者の内、67.1%が「渋滞している」「一部渋滞している」と回答しており、(通勤時間-渋滞のない所要時間)より平均的な遅れ時間を算出すると、遅れ時間が発生しない0分が24.7%ある一方で、1~10分の遅れが45.0%、10分以上の遅れ発生が30.2%となっている。したがって、この渋滞による遅延時間はその人の予測以上の超過分の遅れ時間、つまり、この値は突発的な道路渋滞や交通規制による遅れ時間分であると考えられる。

一方、マストラ利用者が変更する理由ではマストラの遅れが59.3%と最も多く、道路渋滞が23.1%と次いでいるが、これは道路渋滞によるバスの遅れによるものと考えられる。

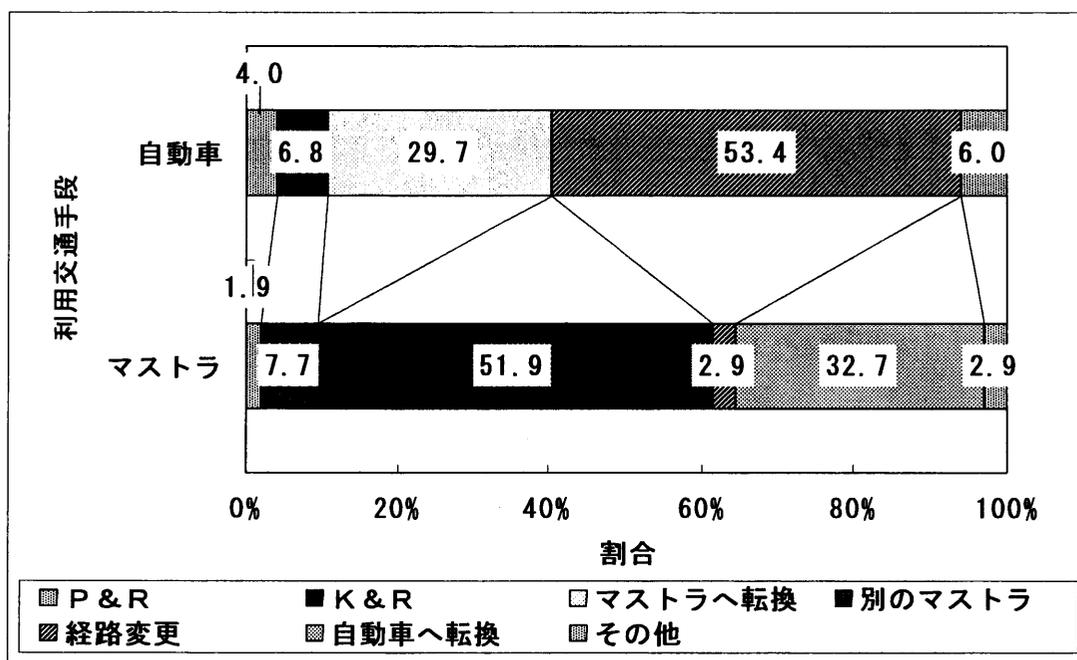


図3. 2 交通情報提供による交通手段・経路変更 (通勤交通)

(d) 通勤時の交通情報提供による出発時間変更

交通情報提供により出発時間の変更する可能性のある人は、自動車利用者が49.7%、マストラ利用者が38.2%で自動車利用者の方がやや高くなっている。また、(c)の交通手段・経路を変更する可能性と比較すると、両方の値とも低くなっている。

(e) 通勤時に交通情報を入手するための費用負担

通勤時に交通情報を入手するための費用負担は、「有料ならあきらめる」が自動車利用者が88.1%、マストラ利用者が87.7%で、両者とも85%以上と非常に高い割合を占めており公共サービスの一環として無料提供する方策を検討することが必要と考えられる。

(2) 私事交通

(a) 都心部 (栄地区) までの主な交通手段

私事（買物）目的で都心へ出る時の主な交通手段は、マストラ利用が47.4%と約半数を占め、自動車利用が32.4%と続いている。PT調査の機関分担率（私事目的中区集中）と比較すると、徒歩が極端に少ないが、これは対象とするトリップの目的地を栄地区に限定したためであると考えられる。しかし、マストラ：自動車=3：2程度であり、傾向としてはほぼ一致している（図3.3参照）。

交通手段を選択する理由は、自動車利用ではマストラの不便性を理由としている人が36.0%であり、通勤時（46.2%）と比較して少なくなっており、一方「車の方が快適だから」（23.0%）、「荷物があるから」（26.5%）等、自動車の利便性の高さが58.6%と過半数を占めている。マストラ利用では「停留所、駅が近いから」が30.1%と最も多く、その他のマストラの利便性の高さの理由を含めると65.1%になっており、通勤時（47.2%）と比較して多い。

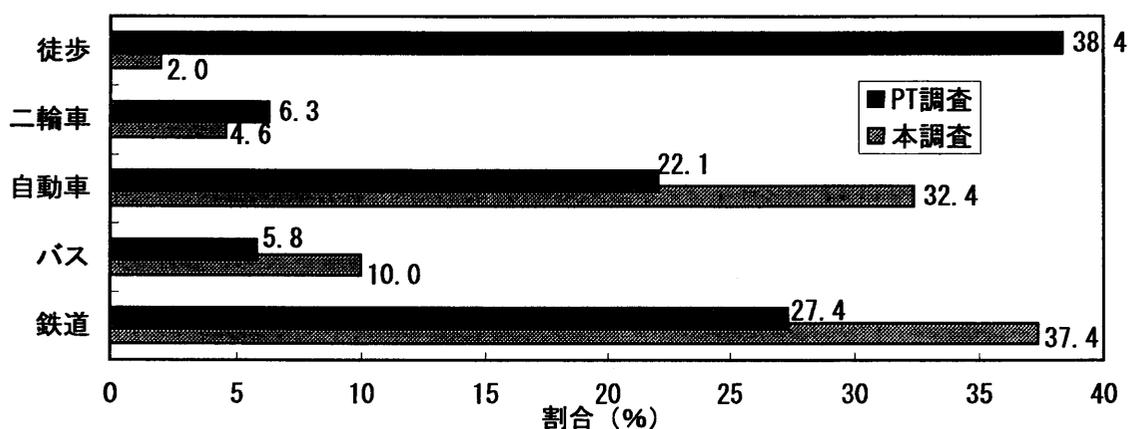


図3.3 私事交通の機関分担率

(b) 都心部へ出かける時の交通情報提供

現況において50%程度の人が入手しており、通勤時の75%と比較すると少ない。これは私事目的であるために時間的制約がないためであると考えられる。メディアとしては、テレビ（53.2%）・ラジオ（58.7%）が主力になっている。交通手段別に見ると、通勤交通と同様に自動車利用者は移動中のラジオで、マストラ利用者は自宅のテレビにより情報を入手するパターンが多い。

ただし、交通情報は78.1%の人が「必要である」と回答しており、通勤時（80.5%）と同様に情報提供の重要性が確かめられた。私事交通は非日常利用の交通手段を利用する人が多く、これらの人に分かり易い情報提供が課題であると考えられる。

交通手段別で、どのような情報が必要とされているのかを見てみると、自動車利用者は道路渋滞（24.3%）や交通規制（20.5%）等の道路情報が65.7%を占め、マストラ利用者は鉄道・バスの遅れ時間（13.0%）等のマストラに関するものが26.6%となっている。通勤交通と比較すると、都心地区内の駐車場に関する情報が多くなっている（自動車利用者で17.3%）ことと、マストラ利用者も道路交通情報を必要としている（42.0%）ことが特徴として見られる。

(c) 都心部へ出かける時の交通情報提供による交通行動の変化

情報提供によって交通手段・経路を変更する可能性は自動車利用者が60.7%、マストラ利用者が51.0%となっており、どちらも約半数以上の変更の可能性があり、変更先の手段は、自動車利用者のうち自動

車からマストラへ転換する人は 51.0%を占め、K&R、P&R を含めたマストラへの転換が 71.0%となっており、通勤交通と比較すると経路変更が 24.1%と少なくなっている（通勤交通で 53.4%）。マストラ利用者では別のマストラを利用する人が 45.9%と約半数を占め、次いで自動車への転換が 30.7%となっている（図 3. 4 参照）。

変更する理由であるが、自動車利用者では道路渋滞が 62.1%と最も多い。それを渋滞による遅延時間別で見ると、10 分の遅れ時間では 4.3%、20 分の遅れ時間では 31.5%、30 分の遅れ時間では 70.1%が自動車からマストラへ転換する結果になっている。次に多いのは駐車場の混雑（28.8%）で、これも通勤交通と異なる点である。

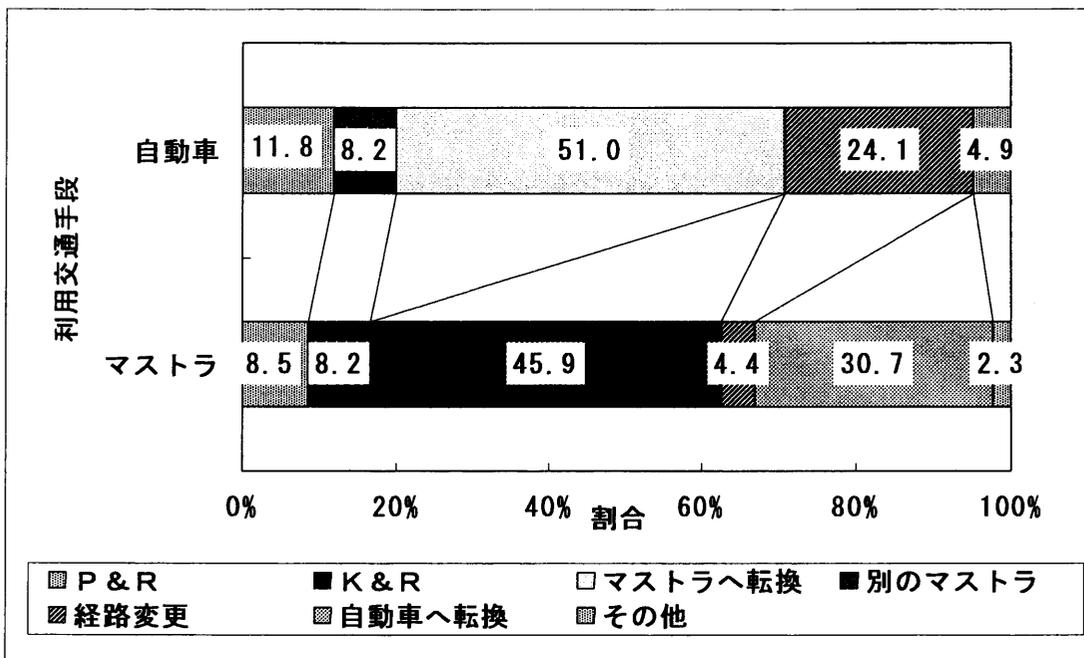


図 3. 4 交通情報提供による交通手段・経路変更（私事交通）

(d) 都心部に出かける時の交通情報提供による出発時間変更

交通情報提供により出発時間の変更する可能性のある人は、自動車利用者が 58.3%、マストラ利用者が 49.4%で自動車利用者の方がやや高くなっている。通勤交通の場合の可能性と比較すると、両方の値とも高くなっている（通勤時でそれぞれ 49.7%と 38.2%）。

(e) 都心部に出かける時に交通情報を入手するための費用負担

交通情報を入手するための費用負担は、「有料ならあきらめる」が自動車利用者が 85.6%、マストラ利用者が 89.6%で、両者とも 85%以上と非常に高い割合を占め、通勤交通と同様の傾向で無料ででの情報提供が必要となるであろう。

4. 交通手段選択モデルの構築

4. 1 交通手段選択行動モデルの特定化

本節では、交通手段選択行動モデルの特定化と、それに用いる RP, SP データの概略について述べる。

モデルの特定化には、個人の交通手段選択行動を、自動車を利用するか・マストラを利用するかの2種類の選択肢の選好を行う二項選択であると仮定し、ロジットモデルを採用した。ただし、交通手段は自動車、鉄道（鉄道のみ・鉄道とバス）、バスの3種類に分類した。また、旅行の目的が違う場合には個人の意思決定構造は異なると考えられるので、通勤交通と私事交通で別々の効用関数を定義する。

RP データとしては、実際に行った旅行に対して、利用した交通手段、旅行時間、旅行費用などのトリップ属性及び個人の社会経済属性であり、トリップ属性に関しては、通常選択している交通手段および代替手段について回答を得ている。

SP データとしては、仮想の交通情報提供に対して、「交通手段の変更を考えるか」「どのような交通手段に変更するのか」「その理由はどんな情報によるものか」などの回答を得ている。そこで、交通情報が提供された時に「通常手段から代替手段に変更する」と回答した個人のデータを用い、その個人が交通手段を変更した理由となった情報の内容によって RP データのトリップ属性を変化させて、それを SP データとして扱う。つまり、通常は自動車（旅行時間=30分）を利用している個人が、道路渋滞による遅れが20分の時、マストラ（旅行時間=40分）に変更するケースでは、自動車（旅行時間=50分）vs.マストラ（旅行時間=40分）の選択になる。その他のケースを表4.1に示す。

表4.1 SP データの種類

	通常利用交通手段	変更先交通手段	変更理由
ケース1	自動車	マストラ	道路渋滞による遅れが（ ）分
ケース2	自動車	マストラ	マストラが（ ）分短縮*注1
ケース3	マストラ	自動車	マストラの遅れが（ ）分
ケース4	マストラ	自動車	自動車が（ ）分短縮*注2

*注1：情報提供により、代替手段であるマストラの旅行時間がその個人の知覚旅行時間よりも短いと分かった場合。

*注2：情報提供により、代替手段である自動車の旅行時間がその個人の知覚旅行時間よりも短いと分かった場合。

次に、各交通手段の効用関数における確定項の特定化を行う。

通勤交通

$$\begin{aligned}
 V_{\text{CAR}} &= \beta_1 + \beta_3 X_1 \\
 V_{\text{RAIL}} &= \beta_2 + \beta_3 X_1 + \beta_4 X_2 + \beta_5 X_3 \\
 V_{\text{BUS}} &= \beta_3 X_1 + \beta_4 X_2 + \beta_5 X_3
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

ここに、

$$\begin{aligned}
 V & : \text{効用の確定項} & X_2 & : \text{アクセス時間} & \beta & : \text{未知パラメータ} \\
 X_1 & : \text{車内旅行時間} & X_3 & : \text{イグレス時間}
 \end{aligned}$$

私事交通

$$\begin{aligned} V_{\text{CAR}} &= \beta_1 + \beta_3 X_1 + \beta_4 X_2 + \beta_5 X_3 \\ V_{\text{RAIL}} &= \beta_2 + \beta_5 X_3 + \beta_6 X_4 \\ V_{\text{BUS}} &= +\beta_5 X_3 + \beta_6 X_4 \end{aligned} \quad (4.2)$$

ここに、

$$\begin{array}{lll} V & : \text{効用の確定項} & X_2 : 50 \text{ 歳未満ダミー} & X_4 : \text{アクセス時間} \\ X_1 & : \text{男性ダミー} & X_3 : \text{車内旅行時間} & \beta & : \text{未知パラメータ} \end{array}$$

4. 2 推定結果

前節のモデルの特定化に基づいて、RP モデル、SP モデル、RP/SP モデルのパラメータ推定をそれぞれ行った。その推定結果を表 4. 2 に示す。

旅行費用に関する説明変数がどのモデルにも入っていないのは、通勤交通では費用が通常支給されると考えられるため交通手段選択をする際に大きな要因にならないことと、実際に自動車の旅行費用はその定数項に含まれるとの仮定の下で、旅行費用をマストラの説明変数として導入して推定を行っても有意な結果が得られなかったことが理由でモデルから除外した。そして、イグレス時間が私事交通のモデルに含まれていないのは、目的地の対象を名古屋の都心部である栄地区にしており、対象地区全体に地下鉄と私鉄の駅、バスの停留所が多数存在することからイグレス時間をすべての人に 0 分であると仮定しているためである。

RP モデルにおいて、推定された係数値を見てみると、通勤・私事交通いずれも車内旅行時間が有意な係数値をとっている。その一方で、アクセス時間の係数は、私事交通では有意な値をとり、その大きさも車内旅行時間のそれと同程度であり十分に説明力を持っているが、通勤交通では有意性を失っている。これは、通勤交通においてはアクセス時間よりもイグレス時間の方が個人の選好に重要な要素であること、つまり、勤務地の近くに駅・停留所があるかどうかを選択の決め手になっていることを示している。それは、車内旅行時間の係数と比較して、イグレス時間の方がかなり大きな値を取っていることから裏付けられる。個人属性に関しては、私事交通では正の範囲で有意になっており、男性と 50 歳未満の人に自動車支持される傾向があることが分かる。通勤交通についても、2 つのダミーをモデルに導入して推定を行ったが、いずれの係数値も有意な値を取らず、個人属性による選好の違いを見いだすことはできなかつたため除外してある。

RP モデルと SP モデルを比較すると、通勤と私事で共通して、車内旅行時間の係数が 2 倍近く大きくなっており、他の説明変数すべてについて、その係数の有意性が失われるという特徴がある。これは、SP データの作成の際に、RP データの車内旅行時間に交通情報による遅延時間、短縮時間を単純に足したり、引いたりしたことにより、2 つの選択肢の車内旅行時間のばらつきが大きくなってしまったことが原因であると考えられる。モデルの適合度を示す値も非常によいが、車内旅行時間だけで決まってしまう、他の要因が選択に影響を及ぼさないためモデルとして強すぎるとの指摘ができる。

RP/SP モデルでは、各係数の t 値をみるとその有効性を増している係数が多い。スケール・パラメータは、SP モデルの RP モデルに対するスケールを表しているが、この値より通勤交通の SP モデルのランダム項の標準偏差は RP モデルの約 3 分の 1 であり、私事交通の場合は約 2 分の 1 であることがわかる。

表4. 2 モデルの推定結果 (t 値)

Variable name	通勤交通			私事交通		
	RP	SP	RP/SP	RP	SP	RP/SP
RP 定数項 (車)	1.47 (2.7)		1.55 (2.9)	-0.77 (-1.8)		-0.66 (-1.6)
RP 定数項 (鉄道)	1.13 (2.1)		1.04 (2.0)	-0.86 (-2.7)		-0.90 (-2.8)
SP 定数項 (車)		-0.97 (-0.6)	-1.05 (-1.7)		-1.99 (-1.0)	-1.46 (-1.9)
SP 定数項 (鉄道)		-0.56 (-0.4)	-0.04 (-0.1)		-1.09 (-0.7)	-0.40 (-0.5)
男性ダミー				0.80 (2.9)	0.81 (0.5)	0.76 (2.9)
50 歳未満ダミー				0.61 (2.4)	2.66 (1.4)	0.64 (2.8)
車内旅行時間 (時間)	-2.69 (-3.3)	-4.02 (-3.3)	-3.20 (-4.2)	-7.11 (-8.9)	-18.1 (-2.4)	-7.14 (-9.0)
アクセス時間 (時間)	-1.26 (-0.5)	-2.43 (-0.4)	-3.34 (-1.8)	-7.82 (-4.1)	-5.71 (-0.7)	-6.67 (-3.6)
イグレス時間 (時間)	-6.90 (-3.9)	0.43 (0.1)	-4.41 (-3.2)			
スケール パラメータ			3.28 (2.3)			1.93 (2.8)
L(0)	-201.66	-33.96	-275.40	-315.31	-49.20	-421.33
L($\hat{\beta}$)	-117.86	-17.30	-149.60	-226.59	-9.09	-274.57
ρ^2	0.416	0.491	0.457	0.281	0.815	0.348
$\bar{\rho}^2$	0.409	0.441	0.446	0.278	0.746	0.342
N	291	49	340	455	71	526

5. 交通行動変更のモデル分析

5. 1 RP モデルによるセグメンテーション

4. 2 節で構築した RP モデルを利用して、交通情報による交通行動変更の意思の有無によるマーケット・セグメンテーションを行う。その目的は、変更意思の有無による意思決定要因の違いを明らかにすることができないかと考え、RP モデルによりそれを定量的に分析することにある。その結果を表 5. 1 に示す。なお、通勤・私事交通ともに 2 つのサンプル数 N の合計が全体のそれに等しくなっていないのは、回答不明者が存在するためである。

各モデルでスケールの大きさが異なるため、推定された係数値を単純にその大きさを比較することには意味がないが、それぞれのモデル内の有意性を保っている係数値の比を取って特徴を見いだすことは可能である。通勤交通の車内旅行時間とイグレス時間、私事交通の車内旅行時間とアクセス時間の係数

値の比を取ると、通勤交通で約1:1.3（意思有り）と約1:3.6（意思無し）、同じく私事交通で約1:0.8と約1:1.5という結果になる。これは両交通とも、変更意思ある人の方が車内旅行時間を重視する傾向にあるととらえることができる。つまり、両者の意思決定の要因が異なることが考えられる。

その統計的正当性を確かめるために、セグメントに分けたそれぞれのモデルの係数パラメータの等価性の検定を尤度比検定により行った。結果を表5. 2に示す。通勤と私事いずれにおいても係数パラメータの等価性が有意水準5%で棄却された。つまり変更意思のある人とない人の選好には有意な差があると考えられる。

表5. 1 マーケット・セグメンテーションの推定結果（t値）

variable name	通勤交通			私事交通		
	全体	有り	無し	全体	有り	無し
定数項（車）	1.47 (2.7)	1.35 (1.9)	1.42 (1.7)	-0.77 (-1.8)	-0.38 (-0.6)	-1.20 (-1.6)
定数項（鉄道）	1.13 (2.1)	0.37 (0.5)	1.68 (2.0)	-0.86 (-2.7)	-1.04 (-2.3)	-0.81 (-1.4)
男性ダミー				0.80 (2.9)	0.74 (2.0)	0.74 (1.6)
50歳未満ダミー				0.61 (2.4)	0.45 (1.3)	0.57 (1.4)
車内旅行時間 (時間)	-2.69 (-3.3)	-2.98 (-2.8)	-2.82 (-1.9)	-7.11 (-8.9)	-6.43 (-6.3)	-8.18 (-5.9)
アクセス時間 (時間)	-1.26 (-0.5)	-2.40 (-0.8)	1.83 (0.5)	-7.82 (-4.1)	-5.03 (-2.1)	-12.2 (-3.4)
イグレス時間 (時間)	-6.90 (-3.9)	-4.24 (-2.0)	-11.3 (-3.3)			
$L(\hat{\beta})$	-117.86	-63.74	-47.15	-226.59	-127.25	-84.00
$\bar{\rho}^2$	0.409	0.432	0.390	0.278	0.273	0.297
N	291	166	115	455	255	175

表5. 2 係数パラメータの等価性の検定

	検定値	自由度	$\chi^2_{0.05}$
通勤交通	13.94	5	11.07
私事交通	30.68	6	12.59

5. 2 transaction cost の定義

transaction cost（取引費用）とは、経済学の分野でよく用いられる言葉で、ある選択肢から別の選択肢にシフトするとき新たな選択肢に関わるコストとは別に要するコストのことである。例えば、居住地の転居に伴う、引っ越し費用がそれにあたる。交通手段変更についても、transaction cost が存在すると考えられる。普段乗り慣れていない交通手段をいざ利用しようとする時に、自動車から鉄道に変更する場合、そのダイヤや路線の知識、旅行時間の知覚の不足から生じる心理的な抵抗、また、鉄道から自動車に変更する場合は、その経路の選択や駐車場の情報の不足から生じる抵抗が含まれるのである。その

他にも、例えば、「20分遅れている」と聞いて本当に20分遅れていると思うのか、という情報自体への信頼性である。特に道路の場合、多くの人が交通情報により行動を変更した結果、自分が行く頃には変わっているかもしれないと思う人がいることは、容易に想像できる。このような主観的な情報の信頼性も transaction cost に含まれる。

今、通常使っている交通手段、その代替交通手段、及びそれらのトリップ属性などが同じ状況にある2人がいて、この2人に同じ交通情報を与えたときに、1人は交通手段を変更し、もう1人は変更しなかったという状況を仮定する。このような状況は、transaction cost による影響の存在を考えることにより説明できる。つまり、変更した人の transaction cost が、変更しなかった人のそれに比べ小さかったとすればよいのである。

transaction cost は個人によって異なり、また変更先の交通手段によっても異なると考えられ、transaction cost を定量化・分析して、もしその存在の理論的な有効性が示すことができれば、情報提供が与える影響の分析をするためのアプローチのひとつになるはずである。

5.3 transaction cost の定量化

定量化に用いるデータは、4.1節と同じ方法でRPデータのトリップ属性を加工したSPデータである。ただし、変更後の交通手段にパーク・アンド・ライド (P&R)、キス・アンド・ライド (K&R) を新たにつけ加えたものになっている (表5.3参照)。

表5.3 SPデータの種類

ケース	変更前 (A)	変更後 (B)	変更理由	サンプル数	
				通勤	私事
SP1	自動車	P&R	道路渋滞による遅れが () 分	3	13
SP2	自動車	K&R	道路渋滞による遅れが () 分	6	10
SP3	自動車	自動車	道路渋滞による遅れが () 分	66	44
SP4	自動車	マストラ	道路渋滞による遅れが () 分	32	51
SP5	自動車	P&R	P&R が () 分短縮	0	1
SP6	自動車	K&R	K&R が () 分短縮	0	1
SP7	自動車	マストラ	マストラが () 分短縮	5	11
SP8	マストラ	自動車	マストラによる遅れが () 分	7	13
SP9	マストラ	自動車	自動車が () 分短縮	5	14
合計				124	158

transaction cost (以下、Tと略す) をアンケート調査などから直接観測することは困難であるため、表5.3のSPデータと、4.2節で推定したRP/SPモデルの係数ベクトル $\hat{\beta}$ を用いて、ある個人nの変更前の交通手段Aの期待効用 $\hat{V}_n(A)$ と、変更後の交通手段Bの期待効用 $\hat{V}_n(B)$ を算出し、transaction cost (T_n) の定量化を試みる。

T_n を定量化する式は、 T_n 、 $\hat{V}_n(A)$ 、 $\hat{V}_n(B)$ の関係を明らかにすることにより、導出することができる。Aの遅れ時間の増大に伴い効用が低下し、Bへの変更を考え始める。そして、変更意思が発生する点は $\hat{V}_n(B)$ から T_n の分だけ減った所になる。これを、図示したものが図5.1である。

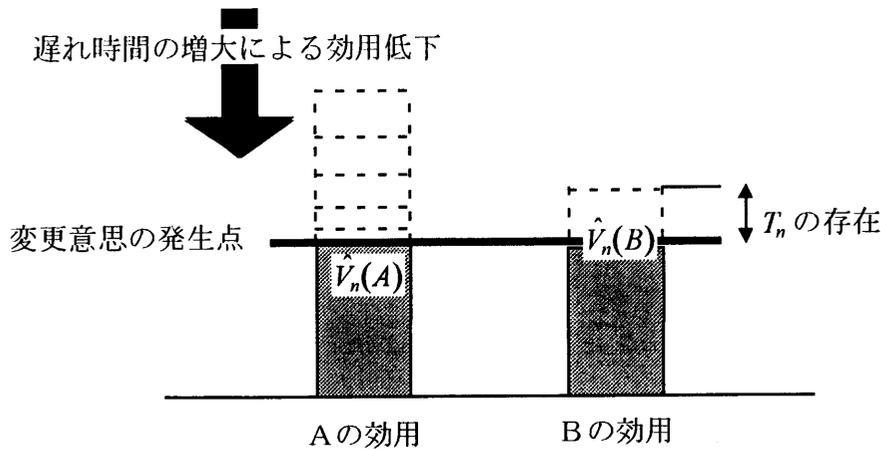


図5. 1 T_n , $\hat{V}_n(A)$, $\hat{V}_n(B)$ の関係

これを式で表すと、式 (5.1) のように T_n を算出できる。

$$\begin{aligned}\hat{V}_n(A) &= \hat{V}_n(B) - T_n \\ T_n &= \hat{V}_n(B) - \hat{V}_n(A)\end{aligned}\tag{5.1}$$

5. 4 transaction cost の回帰分析

前節で定量化した T_n は個人ごとに異なり、また、同じ個人でも、どのような交通手段に変更するかにより異なると考えられる。したがって、それらの関係を定量的に分析することを目的として、 T_n を被説明変数とした重回帰分析を行う。式 (5.1) で計算される T_n は、効用タームで計測されており、その値の大きさの解釈が難しいため、 T_n を 4. 2 節で推定した RP/SP モデルにおける、車内旅行時間の係数値の絶対値で除し、旅行時間タームに直したものを被説明変数として行った。説明変数には、表 5. 3 に示した各ケースを表わすダミー変数（通勤では SP7 を、私事交通では SP5 を 0 に固定）、普段利用している交通手段の総旅行時間（遅れ・短縮時間を考えない旅行時間）、及び年齢、性別などの個人属性を用いた。推定結果を表 5. 4 に示す。

この回帰式は、各 SP ダミーと定数項の和が SP データの種類ごとの定数項を示しており、それぞれ異なるような構造になっている。通勤交通の方では、SP2 を除くすべての SP ダミーが有意であり、パラメータの値を見るとマストラから自動車への変更をするときの T_n が、他の変更パターンに比べて大きいことが特徴となっている。有意ではないが、同様な傾向が私事交通の方にも言えるものと考えられる。また、普段利用している交通手段の総旅行時間が、長い人ほど T_n が大きいこともわかる。個人属性の相違を表現した説明変数である、男性ダミー、50 歳未満ダミーのパラメータも有意ではないが、個人属性による違いを見いだすことができる可能性が十分にあることを示すことができたと思われる。しかしながら、モデルの精度を表す \bar{R}^2 の値が非常に低い（特に私事交通）という問題点を抱えている。これは、適切な説明変数を入れることができなかったことが最も大きな原因であると思われる。

表 5. 4 回帰分析の推定結果

variable name	通勤交通	私事交通
定数項	-23.9 (-2.9)	-24.0 (-1.1)
SP1 ダミー	23.4 (2.0)	25.9 (1.3)
SP2 ダミー	7.73 (0.8)	11.0 (0.6)
SP3 ダミー	31.4 (4.2)	25.3 (1.3)
SP4 ダミー	19.9 (2.6)	24.3 (1.2)
SP5 ダミー		16.0 (0.6)
SP6 ダミー		10.6 (0.5)
SP7 ダミー		
SP8 ダミー	67.5 (7.0)	37.1 (1.8)
SP9 ダミー	38.1 (3.6)	18.8 (0.9)
総旅行時間 (分)	0.266 (2.5)	0.745 (5.9)
男性ダミー	3.96 (0.9)	
50 歳未満ダミー		3.06 (1.0)
R^2	0.460	0.267
\bar{R}^2	0.422	0.217
N	124	158

(注：通勤交通には、SP5、SP6 のサンプルはない)

ここで重要なのは、 T_n の分析の結果から情報提供の効果を探ることである。表 5. 4 だけでは、それを分かり易く捉えることができないため、総旅行時間が 40 分の人を例にとり、変更パターンごとに T_n の値を算出した。その結果を、図 5. 2 に示す。

まず、渋滞の遅れを理由に経路を変更する SP3 のケースでは、 T_n の値を計算すると通勤で約 18 分、私事では約 30 分になる。つまり、余程の遅れがないと普段利用している経路から、慣れていない経路へ変更しないということで、特に、行う頻度があまり高くなく、道路網全体の情報把握が出来ていないと思われる私事交通にその傾向が強いことがわかる。したがって、5 分・10 分程度の遅れに関する情報を提供しても、それに対してドライバーはあまり関心がなく、むしろ、事故や工事などの非日常的な規制によって生じる大きな遅れを伝え、かつ適切な代替経路への誘導を行う方が効果的ではないかと考えられる。

次に、自動車を自宅の最寄り駅付近に駐車し、そこからマストラを利用する P&R の需要促進に対する情報提供の効果について考えることにする。そこで、SP1 と SP2 の T_n の値に着目すると、その差を取ると通勤で約 15 分、私事では約 13 分ほど P&R の方が K&R よりも大きくなっている。この差の意味するものは、乗ってきた自動車を駐車しておくかどうかの違いであり、駐車スペースの確保が出来ない不安が T_n に含まれるためだと考えられる。したがって、駅付近の駐車場の場所・料金・混雑状況等に関する情報が事前に与えられればこの差は解消され、P&R の利用促進に貢献できると思われる。

また、先にも少し述べたが、このグラフを全体的に見ると、マストラから自動車に変更するときの値が大きくなっていることに気付く。これも、P&R の場合と同じように駐車場を確保することの困難さが大きな原因であると考えられ、特に、休日の都心部では駐車場の混雑が著しく、休日に行うことの多い私事交通の場合はなおさらではないだろうか。しかしながら、都心部内の駐車場の収容能力自体に限

界があり、駐車場情報の提供のみでは解消できる問題ではないと思われる。

このように、 T_n の値を変更パターンごとに見ていくことによって、どのような情報を与えれば、どのような効果が得られるかを考えていくことが可能であり、交通情報提供の効果を分析する際の新たなアプローチと位置づけることができる。

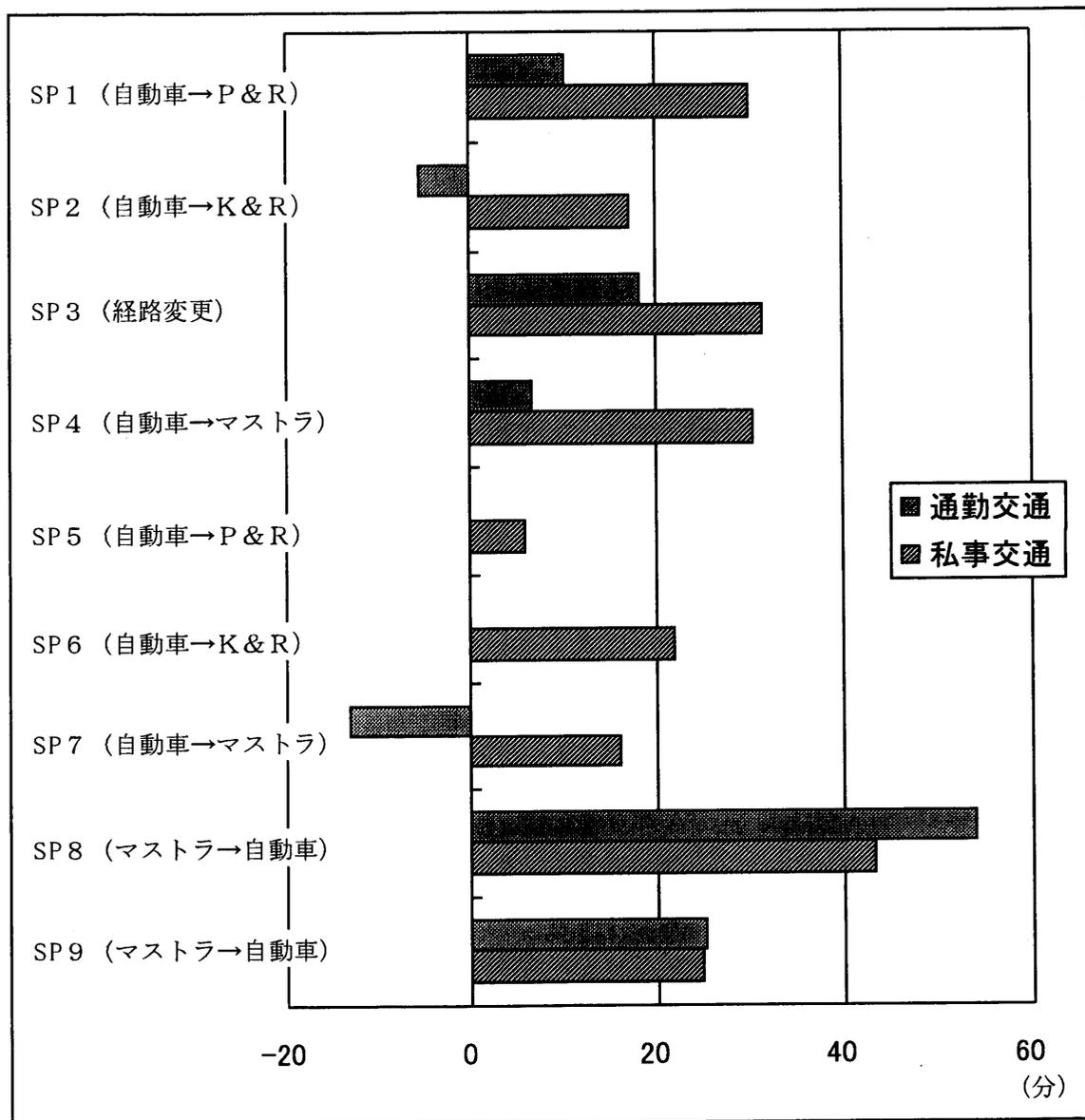


図5. 2 変更パターンごとの T_n の値 (総旅行時間が40分の場合)

6. 結論

6. 1 本研究の成果

本研究の成果として、以下のことが挙げられる。

- 1) アンケート調査の集計分析を行うことによって、実際の交通情報利用状況や、交通行動変化、要求される情報の種類、そして情報への支払意思額などを把握することができた。

- 2) RP データを用いた交通手段選択モデルを使って、交通情報提供による手段変更意思の有無で、セグメンテーションを行い、両者の手段選択時における選好の違いを統計的に証明した。
- 3) 手段変更時にかかる **transaction cost** の概念を説明した。そして、**transaction cost** には、個人または変更パターンによる違いが存在すると考え、RP/SP モデルを使って定量化し、重回帰分析による分析を行った。
- 4) 本研究の中での **transaction cost** の分析は、統計的に有意な結果を得ることはできなかったが、変更パターンごとの **transaction cost** の値に着目し、情報提供が与える効果についていくつかの考察を行った。これは、今後の交通管理システムの効果の分析をする際の、新たな視点を投げかけたと言える。

6. 2 今後の課題

今後、本研究で提案した **transaction cost** によるアプローチの精緻化と、それを用いた情報提供の効果分析を可能にする方法論を確立するためには、以下の課題が残されている。

- 1) **transaction cost** の定量化を 2 つの交通手段の期待効用の確定項の差で表すという、簡易な方法で行っても良いのかをよく考慮する必要がある。
- 2) **transaction cost** に影響を及ぼす説明変数を、データからできるだけ多く集めることにより、より高精度で、説明力に優れた分析が望まれる。
- 3) **transaction cost** の存在を考える時と考えない時では、仮想の情報提供下での各交通手段の需要予測にどのような違いが生じるのか検証し、このアプローチの有用性を確かめる必要がある。

謝辞

本研究で使用したデータを快く提供して下さった名古屋市計画局都市計画部街路計画課の方々に、この場を借りて深く感謝いたします。

参考文献

- 1) W. B. Jackson & James V. Jucker: An Empirical Study of Travel Time Variability and Travel Choice Behavior, *Transportation Science*, pp.460-475, 1982.
- 2) Hall, R. W.: Travel outcome and performance the effect of uncertainty on accessibility, *Transportation Research*, Vol.17B, pp.275-290, 1983.
- 3) 山下智志, 黒田勝彦: 交通機関の定時性と遅刻回避型効用関数, *土木学会論文集*, No.536/IV-31, pp.59-68, 1996.
- 4) 高嶋裕治, 谷下雅義, 鹿島茂, 荒井徹: 所要時間の不確実性を考慮した自動車運転者の出発行動モデル, *土木計画学研究・論文集*, No.14, pp.663-669, 1997.
- 5) 森地茂, 目黒浩一郎, 小川圭一: 一般化平均概念を用いた交通情報提供の影響分析手法に関する研

- 究, 土木学会論文集, No.555/IV-34, pp.15-26, 1997.
- 6) 飯田恭敬, 内田敬, 宇野伸宏: 通勤者の旅行時間予測機構に関する実験分析, 土木計画学研究・講演集, No.13, pp.335-342, 1990.
 - 7) 小林潔司, 藤高勝己: 合理的期待形成を考慮した経路選択モデルに関する研究, 土木学会論文集, No.458/IV-17, pp.17-26, 1993.
 - 8) 河上省吾, 広島康裕: 利用者の主観的評価を考慮した非集計手段選択モデル, 土木学会論文集, No.353/IV-2, pp.83-92, 1985.
 - 9) 藤井聡, 米田和也, 北村隆一, 山本俊行: パネルデータを用いた連続時間を考慮した個人の離散選択行動の動的モデル化, 土木計画学研究・講演集, No.20(2), pp.177-180, 1997.
 - 10) Mahmassani, H. & Jayakrishnan, R.: System performance and user response under real-time information in a congested traffic corridor, *Transportation Research*, Vol.25A, pp.309-318, 1991.
 - 11) Arnott, R., A. de Palma & R. Lindsey: Does providing information to drivers reduce traffic congestion?, *Transportation Research*, Vol.25A, pp.309-318, 1991.
 - 12) 飯田恭敬, 藤井聡, 内田敬: 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.19-28, 1996.
 - 13) 森津秀夫, 中島正樹: 動的経路誘導のための経路選択行動モデルに関する一考察, 土木計画学研究・論文集, No.14, pp.621-630, 1997.

意思決定方略の異質性を考慮した離散型選択モデルの開発と ダイナミックパークアンドライド行動の分析

1. INTRODUCTION

Discrete choice models such as logit and probit generally use the linear-in-attributes utility functions. Such models are called “compensatory model” in the sense that a low score with one attribute (e.g., high travel cost) can be compensated by a high score with another (e.g., low travel time). The linear-in-attributes models have been successfully applied for both theoretical and practical fields in transport demand analysis due to their computational convenience for both estimation and prediction. And also, they make it easy to interpret the individuals’ choice behavior from estimated parameters and leads to straightforward and handy procedures for cost-benefit analysis.

Furthermore, they are applied not only for mode choice but also for the situations with high degree of freedom such as destination choice of sightseeing trip and activity choice. Choice situations with explicit uncertainty such as route choice under the advanced traveler information system are also analyzed. In such situations, heterogeneity in decision making protocols takes an important role.

The compensatory decision making rule, however, is merely one rule in numerous decision making protocols. Many researchers mainly in cognitive psychology and marketing research have been suggesting that alternative decision rules such as non-compensatory and sequential decision ones are closer to the actual choice process at particular circumstances than the compensatory decision one (e.g., Wright, 1975). Although most of those suggestions are derived from the observations of actual market choices of commodities and consumer durables and of hypothetical choices in experimental situations, the ideas can be extended to the decision making situations of travel behavior.

This paper aims to propose a methodology to describe the heterogeneity of decision making rules across individuals considering not only compensatory but also other decision rules. More specifically, with the use of the detailed information in the data source on decision making rules in the mode choice context, the objectives are:

- 1) to investigate to what extent the compensatory rules represent the actual choice,
- 2) to identify alternative decision making rules than compensatory ones,
- 3) to model the alternative decision making rules which can easily be implemented in the ordinary model,
- 4) to develop a model with explicit consideration of heterogeneity in decision making rules across individuals, and
- 5) to analyze the model performance and compare it with the existing compensatory model.

2. LIMITATION OF COMPENSATORY DECISION MAKING RULE

Compensatory models may be theoretically and empirically inadequate mainly at the following two points. Firstly, the decision makers in such models are explicitly or implicitly modeled as “they evaluate all the attributes of all the available alternatives simultaneously, and then select the alternative with the highest utility considering trade-offs among all the attributes”. This assumption, however, may overestimate the human beings’ information-processing capabilities particularly under the choice situation that includes a large number of alternatives or attributes such as destination choice and route choice.

On the other hand, there exist a wide variety of decision making strategies that have been proposed in the literature in consumer behavior and psychology (see Bettman *et al.*, 1991 and Payne *et al.*, 1993 for recent comprehensive review), and they have suggested that individuals employ more simplified decision rules, such as the satisficing concept of Simon (1955) and non-compensatory rules (see Foerster, 1979 for the review of typical rules), to avoid the search costs associated with the gathering of necessary information in the above situations. Particularly, hierarchical or sequential decision rules such as lexicographic and Elimination by Aspects (Tversky, 1972), where alternatives are processed attribute-by-attribute, is considered to be closer to the actual choice process and supported by empirical findings in a number of studies (e.g. Wright, 1975). In transportation research field, Recker and Golob (1979), Williams and Ortuzar (1982), and Gensch and Svestka (1985) indeed propose the models that apply the semi-ordered lexicographic rule, and show their efficiency in terms of the reproducibility and predictive accuracy compared to the compensatory model.

The second point is about the predictive performance of compensatory models. In the policy analysis using a compensatory model, even trivial improvements of transportation services, e.g., 10 cents reduction of bus fare, increase the share due to its linear-in-attributes structure. However, in perceptions of attributes of the choice alternatives, there is considerable evidence in psychophysics that an individual’s perception is characterized by threshold or cutoff value called “just noticeable differences” (e.g. Guilford, 1954; Svenson, 1996) to cause travel behavior changes. This concept is also supported in transportation research field by the studies of Krishnan (1977), Recker and Golob (1979), Williams and Ortuzar (1982), and Gensch and Svestka (1985), where Krishnan (1977) introduces the utility threshold, and others introduce the attribute threshold. Therefore, the aggregate share for the change in attribute values must show more complicated performance due to the threshold effect. If this is the case, the smooth prediction by the compensatory model may mislead the policy analysis.

Unlike the large amount of theoretical developments and empirical evidence for non-compensatory decision rules and attribute/utility threshold, their applications are very limited except for the fact that conjunctive rule is often applied to describe the choice set generation process (e.g., Swait and Ben-Akiva, 1987). The main reason for this is the lack of the statistical estimation techniques for non-compensatory models as accessible and easy as MNL model. In addition, non-compensatory rules such as conjunctive and disjunctive cannot necessarily produce the unique choice. On the other hand, various efforts have been taken to mimic non-compensatory process through the functional form and parameter vectors in the compensatory utility function (e.g., Johnson *et al.*, 1989). The well-known models such as Random Coefficient Model (Daganzo, 1979), Mass Point Model (Nishii *et al.*, 1995), Mixing Distribution Model (Hensher and Wringly, 1986), and Latent Class Model (Kamakura *et al.*, 1994) can be also interpreted as the examples of those efforts, where the parameters in the utility function vary across individuals. Those models, however, are still based on the compensatory structure, and the effect of omitted decision rules and thresholds are

included in the random component of utility function. Williams and Ortuzar (1982) verify empirically the inconsistency of the parameter estimates that can arise when the decision rules adopted by individual decision makers are misspecified. Furthermore, nonlinearities in the compensatory utility function makes it difficult to interpret the behavioral features through the estimated parameters since it implicitly includes underlying behavioral causes, such as the effect of different decision rules and thresholds. Therefore, it is strongly required to develop a flexible methodology to incorporate the various decision making rule and threshold effect which permits to isolate those effect from other sources of nonlinear preference functions.

3. OUTLINE OF THE DATA USED

3.1 Survey Design

The data used in this study is on the mode choice context and was collected in Nagoya, Japan, in 1997. The survey was conducted to investigate the user adoption to the dynamic park and ride (DP&R) regarding hypothetical shopping trips, where origins are in a suburb area and destinations are at CBD. The respondents were requested to give their choices whether they would drive directly to CBD or do the DP&R according to the information supplied by the variable message signboard. Attributes given to the respondents consist of travel time, travel cost, the distance from parking lot to the transit station for DP&R, and the parking congestion level in CBD. Seven hypothetical scenarios were provided for each respondent as shown in the Table 1.

3.2 Descriptive Statistics

This section presents the descriptive statistics of the sample used for modeling purpose. Figure 1 presents the fraction of reported choice patterns in SP experiments described in the above section.

We can see that 29% of the individuals reported that they would always choose car through the 7 hypothetical situations indicating that they may be captive to car or they are reluctant to change. Also, 10% of the sample population seem to be captive to DP&R or they either attach great

Table 1
Examples of level of service variables in stated preference experiment

	Travel Time (min.)		Travel Cost (yen)		Distance from Parking Lot to the Transit Station for DP&R	Parking Congestion Level in CBD
	Car	DP&R	Car	DP&R		
Q1	40	20	500	500	Far	Fully Occupied
Q2	40	30	500	1500	Near	Few Vacancy
Q3	40	10	500	900	Near	Vacant
Q4	30	20	500	900	Near	Few Vacancy
Q5	30	10	500	1500	Near	Fully Occupied
Q6	30	10	500	500	Far	Few Vacancy
Q7	30	20	500	1500	Near	Vacant

importance to travel time or avoid parking in CBD.

Other 61% of the individuals reported they would change the choices according to the situations. 4% of the individuals reported they would choose DP&R only if travel cost for DP&R was equal to car's implying that they are travel cost conscious. 7% of the samples would also drive except for the situation where parking lots in CBD are fully occupied. Also, 6% of the sample population seems to be travel time conscious since they reported to use DP&R only if DP&R is much faster than car. From these observations, those individuals may evaluate the alternatives not in the utility level but attribute-by-attribute with some cutoff or threshold value. Regarding the remaining 44%, they can not be classified into a group in which decision making process is seemingly rule-based since they evaluated the alternatives with respect to at least two attributes, they are likely to adopt the compensatory decision making rule.

Accordingly, we can reach the following two hypotheses:

- 1) there are two types of individuals: one is captive to one mode, while the other changes the choice according to the service level,
- 2) the latter can be classified into two groups: one adopts the sequential decision making process with some cut-off or threshold value with respect to their important attributes, while the other evaluates the alternatives considering multiple attributes simultaneously like as compensatory decision making rule.

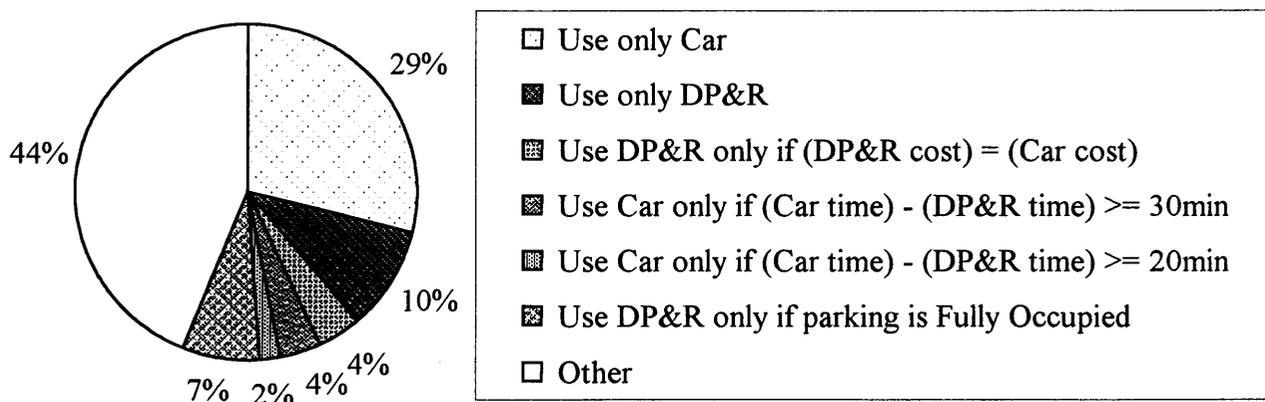


Figure 1
Reported choice patterns in stated preference experiments

4. MODEL DEVELOPMENT

As suggested in a number of literatures and the choice statistics of our empirical data, decision makers often adopt non-compensatory rules when only a few attributes are considered to be important. Specifically, the sequential decision making rules with some attribute thresholds are very commonly observed. One of the most intuitively reasonable ones is the semi-ordered lexicographic rule proposed by Coombs (1964). We, therefore, adopt this rule to represent the non-compensatory decision making rule.

Firstly, some notations and assumptions are introduced to characterize the choice environment.

Consider a decision maker, n , faced with choosing an alternative from a set, C_n , of I_n feasible alternatives available to individual. Then we assume that each alternative can be described by the set of M_n attributes. Each individual may have a different importance rank of attributes associated with these attributes and $\mathbf{a}_n = \{a_{1n}, a_{2n}, \dots, a_{Mn}\}$ denotes the individual n 's ranking in descending order. This ranking, which is assumed to be invariant across alternatives in C_n , is used to determine the sequence of attributes through which the alternatives are processed.

In the semi-ordered lexicographic rule, decision maker is assumed to adopt the standardized value $Z_{ia,n}$, which represents the relative evaluation of alternative i with respect to attribute a_{in} by individual n compared to the most desirable alternative,

$$\tilde{Z}_{ia,n} = \frac{\left| \underset{k \in C_{1,n}}{opt} (X_{ka,n}) - X_{ia,n} \right|}{\underset{k \in C_{1,n}}{opt} (X_{ka,n})} \quad (1)$$

where opt denotes the appropriate maximization or minimization (e.g. maximum "comfort" or minimum "travel cost", etc.). Equation (1) can be directly applied if X is continuous variables. For the categorical or dummy variables, Box-Tukey transformation can be applied to transform into continuous variables:

$$\frac{(X + \alpha)^\lambda - 1}{\lambda}, \quad X + \alpha \geq 0 \quad (2)$$

where λ and α are unknown parameter. Handling of a categorical variable is described in the section of the empirical case study.

Next, we consider the threshold values in the semi-ordered lexicographic rule. Denoting the threshold for attribute a_{in} for individual n by $\tau_{a,n}$, the probability of alternative i being rejected with respect to attribute a_{in} by individual n , $q_{in}(a_{in})$, is expressed by,

$$q_{in}(a_{in}) = prob[\tilde{Z}_{ia,n} > \tau_{a,n}] \quad (3)$$

If we assume $\tau_{a,n}$ to be log-normally distributed with mean v_{a_i} and variance $\zeta_{a_i}^2$ (because \tilde{Z} by definition takes non-negative value according to equation (1)), $q_{in}(a_{in})$ is given by,

$$q_{in}(a_{in}) = \Phi \left(\frac{\ln \tilde{Z}_{ia,n} - \mu_{a_i}}{\sigma_{a_i}} \right) \quad (4)$$

$$\mu_{a_i} = \ln v_{a_i} - \frac{1}{2} \sigma_{a_i}^2$$

$$\sigma_{a_i}^2 = \ln \left(1 + \frac{\zeta_{a_i}^2}{v_{a_i}^2} \right)$$

where

$\Phi(\cdot)$: cumulative distribution function of standard normal distribution.

As shown in Figure 2, the smaller mean ν and variance ζ imply the value of q closer to one, which indicates that the alternative will be rejected with regard to the attribute of interest.

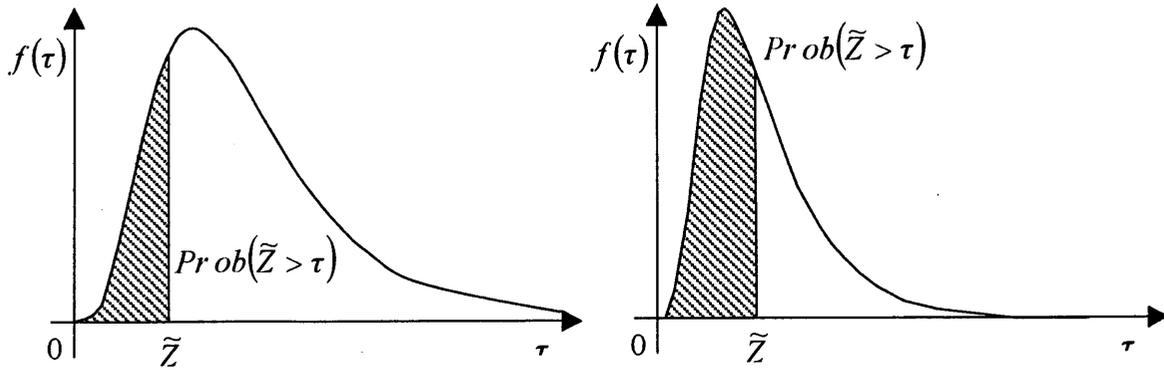


Figure 2

Relationship between threshold and the probability an alternative being rejected

We next consider the situation that a decision maker, n , is processing the alternatives with respect to the l th important attribute of his/her own hierarchy. Since whether each alternative is rejected or not is probabilistically represented, the set which he/she faces on processing the l th attribute, $C_{l,n}$, is also expressed probabilistically. Given his/her own hierarchy, \mathbf{a}_n , the probability that an individual n faces the choice set $C_{l,n}$ on processing the l th attribute, $P_n(C_{l,n}|\mathbf{a})$, is expressed by,

$$P_n(C_{l,n}|\mathbf{a}_n) = \left[\prod_{k \in C_{l,n}} \prod_{j=1}^{l-1} \bar{q}_{kn}(a_{jn}) \right] \times \left[\prod_{k \notin C_{l,n}} \left\{ 1 - \prod_{j=1}^{l-1} \bar{q}_{kn}(a_{jn}) \right\} \right] \quad (5)$$

where

$$\bar{q}_{kn}(a_{ln}) = 1 - q_{kn}(a_{ln}).$$

Given \mathbf{a}_n and $C_{l,n}$, the probability that alternative i is chosen by individual n at importance level l , $P_n(i|C_{l,n}, \mathbf{a}_n)$, is expressed as the probability that all alternatives but i in the set $C_{l,n}$ are rejected with respect to attribute a_{ln} :

$$P_n(i|C_{l,n}, \mathbf{a}_n) = \bar{q}_{in}(a_{ln}) \prod_{k \in C_{l,n}, k \neq i} \bar{q}_{kn}(a_{ln}) \quad (6)$$

Considering all possible sets of $C_{l,n}$, the marginal probability that an individual n chooses the alternative i out of universal set C_n at importance level l is expressed by,

$$P_n(i|\mathbf{a}_n) = \sum_{C_{l,n}} P_n(i|C_{l,n}, \mathbf{a}_n) P_n(C_{l,n}|\mathbf{a}_n) \quad (7)$$

Similarly, considering all importance level, that is, from 1 to M_n , the marginal probability that an individual n chooses the alternative i out of universal set C_n according to the semi-ordered lexicographic rule, $P_n(i|\mathbf{a}_n)^{Lex}$, is expressed by,

$$P_n(i|\mathbf{a}_n)^{Lex} = \sum_{l=1}^{M_n} P_n(i|\mathbf{a}_n) \quad (8)$$

There exist some situations where more than two alternatives can remain after all attributes are processed according to the semi-ordered lexicographic rule. In such cases, decision maker is assumed to consider the trade-offs among all the attributes of the remaining alternatives represented by linear-in-attributes utility function. Thus, the proposed model includes both compensatory and non-compensatory rules within a single framework. Considering all possible sets of $C_{M_n+1,n}$, which represents the set of alternatives remain after all attributes are processed, the marginal probability that an individual n chooses the alternative i according to the compensatory rule, $P_n(i|\mathbf{a}_n)^{Com}$, is expressed by,

$$\begin{aligned} P_n(i|\mathbf{a}_n)^{Com} &= \sum_{C_{M_n+1,n}} P_n(i|C_{M_n+1,n}, \mathbf{a}_n) P_n(C_{M_n+1,n}|\mathbf{a}_n) \\ &= \sum_{C_{M_n+1,n}} \frac{\exp(V_{in})}{\sum_{k \in C_{M_n+1,n}} \exp(V_{kn})} P_n(C_{M_n+1,n}|\mathbf{a}_n) \end{aligned} \quad (9)$$

where

V : systematic component of linear-in-attribute utility function.

Accordingly, given the importance rank of attributes \mathbf{a}_n , the probability that an individual n chooses out of choice set C_n is expressed by,

$$P_n(i|\mathbf{a}_n) = P_n(i|\mathbf{a}_n)^{Lex} + P_n(i|\mathbf{a}_n)^{Com} \quad (10)$$

Since the hierarchy of attributes may also vary across individuals and is often unobservable for the analyst, it should be probabilistically modeled. The latent class approach (see, for example, Kamakura *et al.*, 1994) is employed to incorporate the heterogeneity of the hierarchy of attributes. Suppose that Y^* denotes the membership function that determines the importance rank of attributes. Y^* can be represented by a linear function in individual's socio-economic characteristics:

$$Y_{a_i n}^* = \Gamma_{a_i} \mathbf{s}_{a_i n} + \xi_{a_i n} \quad (11)$$

where

$Y_{a_i n}^*$: individual n 's membership function of attribute a_{in}

Γ_{a_i} : unknown parameter vector

$\mathbf{s}_{a_i n}$: socio-economic characteristics of individual n 's

$\xi_{a_i n}$: error component of membership function

Assuming logit type membership probability, that is, i.i.d. Gumbel distribution for $\xi_{a_i n}$, the probability that individual n 's first ranked attribute being a_{1n} , $Q_n(a_{1n})$, is expressed by,

$$Q_n(a_{1n}) = \frac{\exp(Y_{a_{1n}}^*)}{\sum_{k=1}^{M_n} \exp(Y_{a_{kn}}^*)} \quad (12)$$

Accordingly, the probability that hierarchy of attributes for individual n being $a_n = \{a_{1n}, a_{2n}, \dots, a_{Mn}\}$ is expressed by rank logit model:

$$Q_n(a_n) = \frac{\exp(Y_{a_{1n}}^*)}{\sum_{k=1}^{M_n} \exp(Y_{a_{kn}}^*)} \times \frac{\exp(Y_{a_{2n}}^*)}{\sum_{k=2}^M \exp(Y_{a_{kn}}^*)} \times \dots \times \frac{\exp(Y_{a_{M-1n}}^*)}{\exp(Y_{a_{M-1n}}^*) + \exp(Y_{a_{Mn}}^*)} \quad (13)$$

Using equation (10) and (13), the marginal probability that the individual n choose alternative i can be expressed by,

$$P_n(i) = \sum_{a_n} P_n(i|a_n) Q_n(a_n) \quad (14)$$

This model is general since it is equivalent to the non-compensatory lexicographic model when all the thresholds are equal to zero, and is equivalent to ordinary MNL model when all the thresholds are set to be large number. Unknown parameters in the utility function, membership function and the threshold of each attribute are estimated simultaneously using the maximum likelihood estimation method setting the probability in equation (14) as individual's likelihood.

5. CASE STUDY

5.1 Estimation Result

Using the data described in the previous section, we estimated the proposed model. The degree of freedom of the model is so high (considering the combinations of the hierarchy of the attributes and the alternatives' being rejected or not, two alternatives with four attributes produce 64 patterns of heterogeneous decision making processes) that we estimated a specific form of the proposed model. That is, the semi-ordered lexicographic rule is applied only for the most important attribute. Assuming that, it can be reduced to 5 latent segments.

The explanatory variables used are defined in Table 2. Regarding dummy variables, "Distance from Parking Lot to the Transit Station for DP&R", we substitute 1 for X in Box-Tukey transformation with Fully Occupied, 2 with Few Vacancy, 3 with Vacant, and 4 for DP&R option. Similarly, regarding "Parking Congestion Level in CBD", substitute 1 for Far, 2 for Near, and 3 for car. Regarding the membership functions, the observable component of "Distance from Parking Lot to the Transit Station for DP&R" was set to be zero for the purpose of standardization.

Table 3 shows the estimation results. The second column represents the estimation result of the proposed model. The first column shows the result of an ordinary MNL model with the same set of explanatory variables used in the proposed model. Since it is difficult to interpret through the estimated coefficient, we calculated, average probability of alternatives' being rejected with respect to each attribute (Table 4), and aggregate share for decision making process (Table 5).

Firstly, regarding the estimates associated with the threshold value distribution, we could not obtain strongly significant results, especially for the dummy variables. It may be caused by the fact that the data come from the SP experiments where the variances of the attributes are too small to specify the means of thresholds. It may also be due to the Box-Tukey transformation, where the differences between the categories are forced to 1. This means that some improvements are required to transform dummy variables into the continuous form.

Judging from Tables 4 and 5, however, the estimated thresholds reflect the actual mode choice behavior for shopping trips, where in general transfer especially from car to transit is a strong barrier. Furthermore, the results in Table 5 are consistent with the result in Figure 1, where about half of the samples seem to adopt the compensatory decision rule.

Regarding the threshold of “Distance from Parking Lot to the Transit Station for DP&R”, it may also reflect various unobserved aspects of car, such as the advantages in carrying shopping bags and accommodation of privacy, since 29% of the sample are captive to car as shown in Figure 1. Similarly, the threshold of “Parking Congestion Level in CBD” may represent that 10% of the sample are captive to DP&R. These facts imply that unobserved factors may influence not only the alternative specific constant in the utility function but also the threshold on each attribute in our model. If the latter is ignored, forecasts from policy analysis may be biased.

With regard to the utility function, absolute values of the estimates became large compared to those in the MNL model. This implies that the effects of non-compensatory decisions are excluded from the utility function. Also implied is that the variance of error terms in the utility function becomes small since the unobserved heterogeneity of decision rules is explicitly considered.

Table 2
Description of explanatory variables used for estimation

< Explanatory Variables Included in Compensatory Utility Function >	
DP&R-cst	alternative specific constant for DP&R option.
Cost	total travel cost (1,000 yen).
Time	total travel time (hour).
Dist-near	=1, if the station is close to the present point; =0, otherwise.
Park-f-v	=1, parking lot in CBD is few vacant; =0, otherwise.
Park-full	=1, parking lot in CBD is fully occupied; =0, otherwise.
< Explanatory Variables Associated with the Membership Function >	
Ytime-cst	constant term in the membership function for the travel time consciousness
Ycost-cst	constant term in the membership function for the travel cost consciousness
Ypark-cst	constant term in the membership function for the parking place consciousness
Child	=1, if the individual has a child (or children) in the household; =0, otherwise.
Male	=1, if the individual is a male; =0, otherwise.
Age30	=1, if the individual's age is less than 30; =0, otherwise.
Age60	=1, if the individual's age is over 60; =0, otherwise.
Student	=1, if the individual is a student; =0, otherwise.
Low-inc	=1, if the individual's income is over 10 million yen per year; =0, otherwise.
Carown2	=1, if the individual owns more than 2 cars in the household; =0, otherwise.

It should be noted that the parameters in terms of socio-demographic characteristics are statistically more significant than the ordinary MNL model. It can be said that socio-demographic characteristics should not be used directly in the additive manner in the utility function but be used to represent the membership probabilities.

Table 3
Estimation result (t-statistics)

Variables	MNL	Proposed Model	
		<Compensatory Utility function>	
DP&R-cst	-1.79 (-8.2)	-3.22 (-3.7)	
Cost	-0.816 (-9.2)	-0.547 (-4.2)	
Time	-3.38 (-8.5)	-7.14 (-6.3)	
Dist-near	0.383 (5.2)	0.585 (2.8)	
Park-rest	0.307 (2.6)	0.962 (3.7)	
Park-full	1.38 (13.8)	3.20 (8.5)	
		<Membership Function for Travel Time>	
Ytime-cst		0.0827 (0.8)	
Child	-0.302 (-4.2)	-1.62 (-4.7)	
Male	-0.350 (-5.1)	-2.49 (-6.6)	
Age60	0.170 (1.8)	-0.471 (-1.2)	
		<Membership Function for Travel Cost>	
Ycost-cst		-1.05 (-1.2)	
Male		-0.718 (-2.4)	
Age60		-0.514 (-0.8)	
Student	-0.214 (-1.3)	1.29 (1.5)	
Low-inc	0.0561 (0.4)	0.164 (0.9)	
		<Membership Function for Parking Place>	
Ypark-cst		-2.34 (-2.6)	
Carown2	-0.0469 (-0.6)	-0.0206 (-0.1)	
Child		-0.450 (-2.8)	
Age30	-0.00312 (-0.03)	-5.17 (-0.7)	
Age60		0.699 (4.9)	
		<Parameters Associate with Threshold Values>	
		μ_{time}	σ_{time}
		1.41 (2.1)	0.561 (2.4)
		μ_{cost}	σ_{cost}
		-0.263 (-1.6)	0.282 (3.0)
		λ_{dist}	α_{dist}
		1.05 (0.2)	-0.193 (-1.4)
		μ_{dist}	σ_{dist}
		-0.0148 (-0.6)	3.93 (0.7)
		λ_{park}	α_{park}
		6.87 (0.03)	-0.328 (-0.4)
		μ_{park}	σ_{park}
		-4.30 (-4.7)	0.361 (0.3)
N	4778	4778	
$L(\hat{\beta})$	-2747.842	-2727.679	
AIC	5521.684	5519.358	

Entirely, the goodness-of-fit measured by AIC of the proposed model is better than that of the MNL model, indicating that explicit consideration of the heterogeneity of decision making rules among individuals is effective to reproduce even this simple SP responses.

Table 4
Average probability of alternatives' being rejected on attributes (in %)

$q_{car}(time)$	$q_{DP\&R}(time)$	$\bar{q}(time)$	$q_{car}(cost)$	$q_{DP\&R}(cost)$	$\bar{q}(cost)$
7.3	-	92.7	-	58.8	41.2
$q_{car}(park)$	$q_{DP\&R}(park)$	$\bar{q}(park)$	$q_{car}(dist)$	$q_{DP\&R}(dist)$	$\bar{q}(dist)$
100	-	0	-	54.7	45.3

Table 5
Aggregate share for various decision making processes (in %)

Non-Compensatory				Compensatory
time	cost	Park	dist	50.3
1.2	10.0	4.9	33.6	

5.2 Model Performance

The model performance is analyzed compared with the ordinary MNL model. Here, we focus only on the changes in travel time and travel cost since we could not obtain significant results on the threshold with respect to the dummy variables representing distance to the station and parking congestion in CBD. The aggregate share was calculated by sample enumeration method. The left hand side of Figure 3 shows the share of DP&R according to the change in travel cost, setting "Distance from Parking Lot to Station" to "near" and "Congestion Level in Parking Lots" to "fully occupied". Similarly, the right hand side represents the share of DP&R according to the change in travel time.

Regarding the improvement of DP&R in travel cost, it is observed that predicted share dramatically changes around its estimated threshold value. In the regions distant from the threshold, the marginal share change is smaller than that of MNL model. More specifically, trivial improvement cannot draw enough shares due to the existence of threshold value in terms of travel cost. Also, excessive improvement cannot draw as much shares as MNL predicts since the proposed model can capture the individuals who are captive to one mode due to its non-compensatory structure and almost all individuals who can potentially change the travel mode may have already changed to DP&R. Conversely, the ordinary MNL model increases the share constantly according to the improvement of DP&R. We can, therefore, conclude that predictive accuracy of proposed model may be intuitively superior to the ordinary MNL model. On the other hand, improvement in DP&R in terms of travel time cannot draw enough shares due to the threshold for it being over the upper range. This kind of phenomena is often observed in real world situation where, in general, travel cost is much more important attributes than travel time in the shopping trips. This also implies that the performance of the proposed model is intuitively more practical than that of the

MNL model. Conversely, the ordinary MNL model could produce counter intuitive demand forecast and mislead the policy decisions.

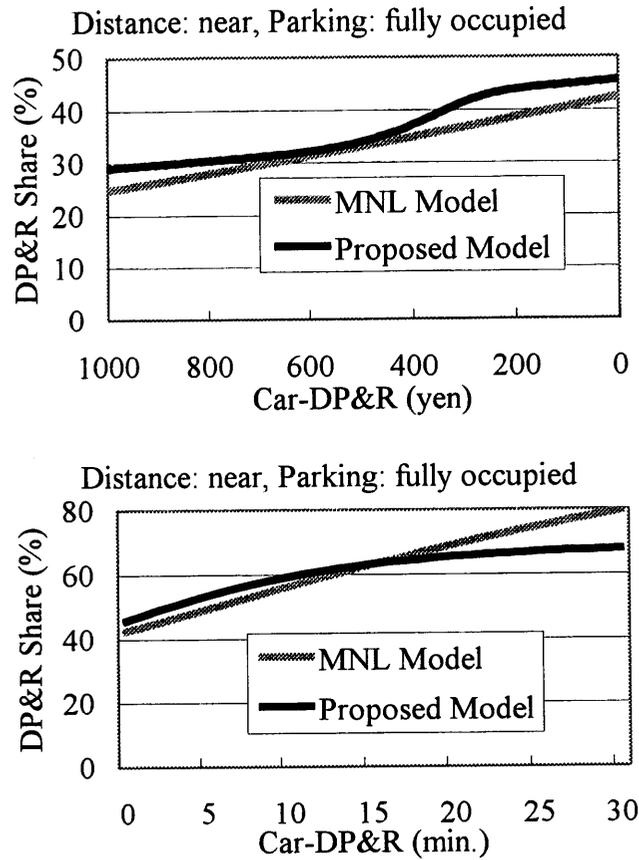


Figure 3
Model performance according to the change in attributes

6. DISCUSSION AND SUMMARY

This study develops discrete choice model with latent classes, assuming that the latent classes represent homogeneous subgroups of the decision making rule. The decision making rules explicitly considered in this research are both compensatory and non-compensatory ones. We adopt the semi-ordered lexicographic rule to describe the non-compensatory decision making process. Compensatory decision rule is used only if more than two alternatives are left through the elimination by semi-ordered lexicographic rule.

The proposed model was applied to the mode choice behavior. Although we could not obtain significant results from the data set used, the hypothesis that there exist the individuals who adopt non-compensatory decision making process and have cut-off or threshold value with respect to their important attributes is justified. In addition, the proposed model yielded better fit to the data and provided various important insights for the decision making process compared with the simple MNL model. Furthermore, in the analysis for model performance, the predicted aggregate share sharply changes around the estimated threshold values.

This research is the first attempt of applying the methodology and, therefore, problems to be solved

are left out for further research, listed as follows:

- 1) Further empirical analysis of the proposed model in comparison with existing choice models ought to be conducted in a variety of decision contexts.
- 2) Uniqueness and stability of the unknown parameters should be theoretically derived.
- 3) Treatment of the dummy variable is to be developed.
- 4) Though it takes about 30 minutes to estimate the model using the standard personal computer, it is impractical to apply the proposed model for the multiple alternative situations since the calculation load exponentially increases for the additional alternatives. Simplification is, therefore, highly required.
- 5) Modeling framework has to be expanded since the proposed model is imperfect in the sense that it is incapable of assimilating all aspects of a choice environment.

REFERENCES

- Bettman, J., Johnson, E. and Payne, J. (1991) Consumer decision making. In: *Handbook of Consumer Behavior* (T. Robertson and H. Kassarian, eds.), pp.50-84. Prentice-Hall, New York.
- Coombs, C. H. (1964) *Theory of Data*. New York: John Wiley.
- Daganzo, C. (1979) *Multinomial Probit*. Academic Press.
- Foerster, J. F. (1979) Mode choice decision process models: a comparison of compensatory and non-compensatory structures. *Transportation Research*, **13A**, 17-28.
- Gensch, D., and Svestka, J. (1984) A maximum likelihood hierarchical disaggregate model for predicting choices of individuals. *Journal of Mathematical Psychology*, **28**, 160-178.
- Guilford, J. P. (1954) *Psychometric Methods*. McGraw-Hill, New York.
- Hensher, D. A. and Wringly, N. (1986) Statistical modeling of discrete choices in discrete time with panel data. *Behavioral Research for Transportation Policy*, VNU Science Press, 97-116.
- Johnson, E., Meyer, R. and Ghose, S. (1989) When choice models fail: compensatory models in negatively correlated environments. *Journal of Marketing Research*, **26**, 255-270.
- Kamakura, W. A., Kim, B. and Lee, J. (1996) Modeling preference and structural heterogeneity in consumer choice. *Prepared for 3rd Choice Symposium*, New York.
- Krishnan, K. S. (1977) Incorporating thresholds of indifference in probabilistic choice models. *Management Science*, **23**, 1224-1233.
- Nishii, K., Kitamura, R., Kondo, K. and Genma, T. (1995) Parameter estimation methods for repeated measurement data: Mass Point Model and Mixing Distribution Model (In Japanese). *Journal of Infrastructure Planning and Management*, **506/IV-26**, 25-33.
- Payne, J., Bettman, J. and Johnson, E. (1993) *The Adaptive Decision Maker*. Cambridge University Press, New York.
- Recker, W. W. and Golob, T. F. (1979) A non-compensatory model of transportation behaviour based on sequential consideration of attributes. *Transportation Research*, **13B**, 269-280.
- Svenson, O. (1996) Decision making and the search for fundamental psychological regularities: what can be learned from a process perspective? *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, **65(3)**, 252-267.
- Simon, H. A. (1955) A behavioral model of rational choice. *Quarterly Journal of Economics*, **69**, 99-118.
- Swait, J. and Ben-Akiva, M. (1987) Incorporating random constraints in discrete models of choice set generation. *Transportation Research*, **21B**, 91-102.
- Tversky, A. (1972) Elimination by aspects: a theory of choice. *Psychological Review*, **79**, 281-299.

- Williams, H. C. W. L. and Ortuzar, J. D. (1982) Behavioural theories of dispersion and the mis-specification of travel demand models. *Transportation Research*, **16B**, 91-102.
- Wright, P. (1975) Consumer choice strategies: Simplifying vs optimizing. *Journal of Marketing Research*, **12**, 60-67.

第二部

均衡配分手法に基づく都市圏レベルでの道路網に おける情報提供効果の分析に関する研究

1. 都市圏レベルの均衡配分手法の適用性とリンク
パフォーマンス関数の修正に関する研究
2. 情報の不完全性を考慮したネットワーク配分手
法と情報提供効果に関する研究

都市圏レベルの均衡配分手法の適用性と リンクパフォーマンス関数の修正に関する研究

1. 序論

1. 1 背景と目的

交通量配分の主たる目的は、交通網計画作成の基礎情報を提供することであり、そのために、交通量配分によって各リンク交通量を予測し、交通網上のボトルネックを知ることや、また OD 間の旅行時間を予測することによって、ネットワークのサービス水準を知ること、交通ネットワークの計画や評価を行うことである。しかしながら、時とともに交通量配分の目的が単なる交通網計画にとどまらず、交通運用計画、交通管理計画、交通情報提供等ソフト的対策にも利用範囲が広がってくると、人間の交通行動に基づき、より理論性のある配分理論が当然要求されるようになってきた。このような要請に対応できる最も有力な配分理論は今のところ利用者均衡配分である。

いわゆる交通均衡問題の研究は、1952年に発表された Wardrop 均衡に始まるが、その後理論の精緻化とともに応用範囲の拡大がはかられ、また解法についても大きな発展をみて、今や実用段階に達している。したがって、今日の交通量配分モデルは大別して均衡型配分と、非均衡型配分に分類されるといってよい。今まで実務面では従来から用いられてきた転換率曲線による配分や、分割配分法など非均衡型配分が主流であったが、これらの配分法は理論的拡張が難しく、また均衡配分法の近似計算に過ぎないことや、ネットワークの設定や分割回数などプランナーの経験に頼る部分が多く、説明力に欠けるといった欠点をもつ。そこで近年では、理解こそ容易ではないものの理論が明確であり、論理的な拡張が可能である均衡配分に主流が移りつつある。しかし、実務面で主流になりつつあるにもかかわらず、現在のところ分割配分に比べて精度が上がらないのが現状である。したがって、均衡配分法の精度向上は早急になさねばならない最も大きな課題の一つであるといえる。

本研究では、リンクパフォーマンス関数に着目し、これを用いて均衡配分法を理論的に修正することによって、この手法の精度向上をめざすことを目的とする。また修正されたリンクパフォーマンス関数による均衡配分結果から、均衡配分法や作成ネットワークにおける新たな問題点、道路利用者のネットワークに対する認知に関して検証を行う。

1. 2 本論文の構成

本論文は6章で構成されている。まず第2章では、利用者均衡配分の概観として、リンクパフォーマンス関数、利用者均衡配分、確率的利用者均衡配分について説明する。第3章では本研究で用いるリンクパフォーマンス関数と、修正リンクパフォーマンス関数のモデルについて説明し、第4章ではネットワークデータの概要を示した後、本研究で用いるモデルをネットワークに適用する。第5章ではそれらの結果を整理し考察を行い、第6章でその結論と、今後の課題について述べる。

2. 利用者均衡モデルの概観

2. 1 ネットワーク均衡分析

交通ネットワーク分析における均衡の概念の必要性は、リンクの抵抗がリンク交通量に依存するということから生じる。ある起・終点間を交通しようとする人々の数がわかっており、その間に利用可能な経路が複数存在するとき、これらの経路にどのように分かれていくかを予測する際、もし、リンク抵抗がリンク交通量に依存せず一定であれば、すべての利用者が所要時間の最も短い単一の経路に殺到するであろう。しかし、現実にはそのようなことが起これば、その経路は混雑が生じて所要時間は増加し、もはや所要時間は最小とはなっていないかもしれない。そうなるに幾人かは代替的な経路のうちでもっとも所要時間の小さい経路を使おうとするが、その数によってはその代替的な経路も所要時間が増加して、最小所要時間経路ではなくなるということが起こる。このような行動が繰り返されるとその平衡状態として Wardrop の第一原則を満足するようなフローが実現するのは想像に難くない。利用可能経路上の交通量は、フローの保存条件を満足するリンク交通量とそれに対応したリンク抵抗とのある種の均衡解として決定される。任意のリンクの交通量は、多くの OD 間で交通を行おうとしている人々の経路選択行動結果としての経路交通量を当該リンク上で総和したものであり、個々のリンクごとに独立に定義されるわけではない。一方、リンクパフォーマンス関数は、その上を通るリンク交通量とリンク抵抗との物理的関係を表現する関数として、別途、当該リンク固有に定義される。このように、独立した2つのシステムが交通ネットワーク上で相互に依存しあいながら達成される交通量とリンク抵抗についてのある均衡状態を需要 - パフォーマンス均衡と呼ぶ。また、このような均衡状態を求める問題をネットワーク均衡問題といい、均衡概念によってネットワーク上の交通需要分析を行う方法を交通ネットワーク均衡分析という。

2. 2 リンクパフォーマンス関数について

利用者均衡配分問題の基本モデルは、凸集合を形成する制約条件付きの非線型最小化問題として定式化される。その目的関数は $\sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(w) dw$ であり、各リンクのパフォーマンス関数についての予測リンク交通量までの定積分値をすべてのリンクで合計したものである。この問題が一意的な解を持つための条件が、リンクパフォーマンス関数が交通量 x_a に関して狭義の単調増加関数であることである。そのため、均衡配分問題の数値計算法として、Frank-Wolfe 法を導入する際には、交通量 x_a のすべての領域で定義され、かつリンクの容量は無限大であるような単調増加のリンクパフォーマンス関数が仮定される。

これらの条件を満足し、その操作性の高さから交通均衡配分問題によく用いられるリンクパフォーマンス関数は米国道路局 (US Bureau of Public Road) で開発されたモデルである。これは、BPR 関数と呼ばれ、

$$t_a(x_a) = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{x_a}{c_a} \right)^\beta \right\} \quad (2.1)$$

のような関数形をしている。ただし、 α 、 β はパラメータであり、オリジナルでは $\alpha=0.15$ 、 $\beta=4$ である。しかし、関数形の導出の理論的根拠とパラメータ推定のためのデータやその推定法については不明である。米国と日本では道路規格がかなり異なることから、 α と β のオリジナル値をそのまま適用するのは適切でないと考えられる。そこで、道路規格が日本のものと比較的類似しているといわれるオランダで開発された修正 BPR 関数を我が国では用いることが多い。修正 BPR 関数は、その関数形は式(2.1)と同一であるが、パラメータ値が $\alpha=2.62$ 、 $\beta=5$ である。しかし、これらのパラメータの推定方法については BPR 関数と同様、明らかでない。

溝上ら¹⁾によれば、単位時間帯に観測される所要時間サンプルを、平均値が時間交通量と可能容量を用いた BPR 関数で表される正規分布に従う確率変数であると仮定し、ピーク時、オフピーク時の走行法から得た所要時間をデータとした最尤推定法によって α 、 β を推定した結果、 $\alpha=0.96$ 、 $\beta=1.20$ と推定されている。西谷ら²⁾は、 t_0 、 c をあらかじめ設定し、線形化することで、回帰分析を行い、パラメータを推定している。その結果は、 $\alpha=0.6\sim 0.7$ 、 $\beta=2.9\sim 3.0$ と推定されている。松井ら³⁾の論文では、道路の区分を6種類に分類し、パラメータの推定には、信号交差点密度、指定最高速度、DID率、混雑度などを用いている。パラメータは $\alpha=0.34\sim 1.00$ 、 $\beta=2.2\sim 3.3$ と推定されている。

2. 3 利用者均衡モデル

均衡配分手法は、以下に示すことが前提条件となる。

Wardrop の第一原則

利用される経路の旅行時間はみな等しく、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。

ただし、①すべ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

すなわち、すべての利用者は常に旅行時間最小化という同一の価値基準で行動し、かつその旅行時間情報は完全に正しいということが前提である。

第一原則によって実現する交通均衡状態は次のように表現できる。

Wardrop 均衡

均衡状態においては、もはやどの利用者が経路を変更することによって事故の旅行時間をそれ以上短縮することはできない。

Wardrop の利用者均衡は配分原則として合理的であったが、現実規模のネットワークにおいてその解を得ることは当初非常に困難であった。そのような状況において Beckmann ら⁴⁾は、利用者均衡の定義が以下に示す数理最適化問題として置き換えられることを示し、利用者均衡の数学的な位置づけを明確にした。その利用者均衡の定義と等価な最適化問題は以下のようなになる。

$$\min. Z_p = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(w) dw \quad (2.2)$$

subject to

$$\sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs} - Q_{rs} = 0 \quad \forall rs \in \Omega \quad (2.2a)$$

$$x_a = \sum_{k \in K_{rs}} \sum_{rs \in \Omega} \delta_{a,k}^{rs} f_k \quad \forall a \in A \quad (2.2b)$$

$$f_k^{rs} \geq 0, x_a \geq 0 \quad (2.2c)$$

ここで,

- $t_a(x_a)$: リンク a のリンクコスト関数
- x_a : リンク a のリンク交通量
- f_k^{rs} : OD ペア rs 間第 k 経路の経路交通量
- Q_{rs} : OD ペア rs 間分布交通量
- Ω : OD ペア集合
- A : リンク集合

2. 4 確率的利用者均衡モデル

利用者は必ずしも最小旅行時間の経路を利用するとは限らず, また利用者の持つ経路情報は完全に正しいとはいえない. そこで現実に見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利用者均衡問題に拡張したのが, 確率的利用者均衡配分である. 確率的利用者均衡は Wardrop 均衡をさらに一般化した概念であり, 次のように定義される.

確率的利用者均衡

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状態.

この均衡問題を等価な最適化問題に置き換えると次のようになる.

$$\min. Z(x) = \sum_{ij} \int_0^{x_{ij}} t_{ij}(\omega) d\omega - \frac{1}{\theta} \sum_r \{HL(x^r) - HN(x^r)\} \quad (2.3)$$

subject to

$$\sum_i x_{ik}^r - \sum_j x_{kj}^r + \sum_s q_{rs} \delta_{rk} - q_{rs} \delta_{sk} = 0 \quad \forall k \in N, \forall r \in R \quad (2.3a)$$

$$x_{ij} = \sum_r x_{ij}^r \quad \forall (i, j) \in A \quad (2.3b)$$

$$x_{ij}^r \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, \forall r \in R \quad (2.3c)$$

ここで, 目的関数中に現れる HL, HN は以下のように起点別リンク交通量 x_{ij}^r を用いて定義されたエントロピー関数である.

$$HN(x^r) \equiv -\sum_j (\sum_i x_{ij}^r) \ln(\sum_i x_{ij}^r) \quad (2.3d)$$

$$HL(x^r) \equiv -\sum_{ij} x_{ij}^r \ln x_{ij}^r \quad (2.3e)$$

ここで,

- $t_{ij}(x_{ij})$: ノード ij 間のリンクコスト関数
- q_{rs} : OD ペア rs 間分布交通量
- δ_{rk} : k が起点なら 1 そうでなければ 0
- x_{ij}^r : 起点別交通量
- θ : パラメータ
- N : ノード集合
- R : 起点集合
- A : リンク集合

3. 本研究で用いるモデルの概要

3. 1 リンクパフォーマンス関数

本研究で使用するリンクパフォーマンス関数は以下のような BPR 関数型とする。

$$t = t_0 + A \left(\frac{q}{c} \right)^B \quad (3.1)$$

ここで,

- t_0 : 指定最高速度により計算される自由走行時間
- A, B : パラメータ
- q : 時間交通量
- c : 時間可能交通容量

本研究では t_0 の値は指定最高速度から求めている。これは、溝上¹⁾、西谷²⁾の推定結果ではほぼ指定最高速度から求められる自由走行時間と近い結果が得られているためである。

3. 2 配分手法について

配分については、確定的均衡配分手法と、確率的均衡配分手法 2 つについて行う。配分対象時間は、朝ピーク 3 時間 (7 時, 8 時, 9 時) と夜オフピーク 3 時間 (21 時, 22 時, 23 時) について行う。これは、道路利用者は一日におけるさまざまな時間帯において、その行動目的や、時間価値などが大きく変動するものと考えられる。そこで対象とする時間帯において、道路利用者の行動目的や時間価値が比較的に変動を小さくするためである。

また高速道路の処理については料金抵抗法を用いる。時間価値については、ピーク時は 62.5 円、オフピーク時は 37.3 円とする。リンクパフォーマンス関数の修正の対象には、確率的均衡配分の結果を用い

る。

3. 3 修正リンクパフォーマンス関数

3. 3. 1 修正リンクパフォーマンス関数の考え方

本研究では、次のような式を提案する。

$$t = (t_0 - \gamma_i X_i) + (A + \gamma_i X_i) \left(\frac{q}{c} \right)^B \quad (3.2)$$

ここで、均衡配分法の配分結果は全経路に対して等時間となるように配分される。しかし混雑度の低い、夜オフピークなどの時間帯は現実には幹線等の認識されやすい、またはその他の何かで説明できるような経路を利用者は選択すると考えられる。この時、現実の交通状況において、等時間原則は成立していない。そこで各リンクにはその所要時間以外にも利用者が交通行動を行ううえで、なんらかの効用が存在するものと考えられる。

そこで、本研究においては通常のリンクパフォーマンス関数を図3. 1のように修正する。

これは、『配分計算では、混雑度が低いとき（オフピーク時）には、幹線道路等、本来、利用者に何らかの正の効用を与えるであろうリンクに関しては、過小推計され、その他の道路が過大推計されているという現象を修正するものである。リンク交通量が可能交通容量に近い状態（ピーク時）においては現実の道路状況はほぼ均衡状態に近いと考えられ、すべてのリンクについて正しくそのリンク交通量は推定されている。』という仮定のもとに考えられる。C（リンクの可能交通容量）を超えるものに関しては、修正前のリンクパフォーマンス関数に従うものとする。

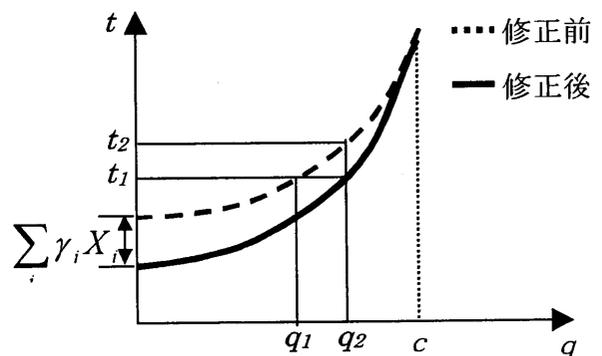


図3. 1 修正方法

3. 3. 2 方法論

本研究において、リンクパフォーマンス関数は次のように修正する。

あるリンク a において、均衡配分の結果は q_1 である。その時、実測のリンク交通量は q_2 流れているとする。均衡配分法を用いてネットワークの均衡状態を求めたときに、 q_1 ではなく、 q_2 のリンク交通量を得ることができるように修正する。

均衡状態が成立するためには、リンク a の所要時間（負の効用）は t_1 必要である。修正前、 q_1 の交通量が流れることで得られる効用を修正後には q_2 のリンク交通量により同じ効用を選られるようにする。そこで、修正前のリンクパフォーマンス関数を用いて q_2 流れたとき、 t_2 かかる所要時間（負の効用）を、修正後では t_1 まで下げる（効用を上げる）。

ここで、修正前のリンクパフォーマンス関数を用いることによる均衡状態で、リンク a の負の効用は

$$t_{a1} = t_{a0} + A \left(\frac{q_{a1}}{c_a} \right)^B \quad (3.3)$$

修正後においては、同じリンクの負の効用は次式のようなになる。

$$t_{a1} = \left(t_{a0} - \sum_i \gamma_i X_i \right) + \left(A + \sum_i \gamma_i X_i \right) \left(\frac{q_{a2}}{c_a} \right)^\beta \quad (3.4)$$

この時、次式が成立する。

$$t_{a0} + A \left(\frac{q_{a1}}{c_a} \right)^\beta = \left(t_{a0} - \sum_i \gamma_i X_i \right) + \left(A + \sum_i \gamma_i X_i \right) \left(\frac{q_{a2}}{c_a} \right)^\beta \quad (3.5)$$

これを变形すると

$$\sum_i \gamma_i X_i = A \frac{\left(\frac{q_{a2}}{c_a} \right)^\beta - \left(\frac{q_{a1}}{c_a} \right)^\beta}{1 - \left(\frac{q_{a2}}{c_a} \right)^\beta} = A \frac{q_2^\beta - q_1^\beta}{c_a^\beta - q_2^\beta} \quad (3.6)$$

ここで意味を捉えやすくするために变形してみると

$$\sum_i \gamma_i X_i = A \left\{ \frac{\left(\frac{q_{a2}}{c_a} \right)^\beta}{1 - \left(\frac{q_{a2}}{c_a} \right)^\beta} \right\} \left(1 - \frac{q_{a1}}{q_{a2}} \right) \quad (3.7)$$

今回の修正の対象はリンク交通量が c_a 以下であり、 $\alpha > 0$ なので

$$A \left\{ \frac{\left(\frac{q_{a2}}{c_a} \right)^\beta}{1 - \left(\frac{q_{a2}}{c_a} \right)^\beta} \right\} > 0 \quad (3.8)$$

配分結果が過大推定のリンクでは $\sum_i \gamma_i X_i$ は負になり、リンクを過小推定している場合には、正の値を取

る。したがって、式(3.7)における $\sum_i \gamma_i X_i$ の符号は、 $q_{a1} > q_{a2}$ のとき負になり、修正リンクパフォーマンス

関数は修正前より図 3. 1 において上昇する。逆に、 $q_{a2} > q_{a1}$ のとき正になり、修正リンクパフォーマンス関数は修正前より図 3. 1 において下降する。

3. 4 ネットワーク認知について

修正量は以下のように表される。

$$\sum_i \gamma_i X_i = \gamma_0 + \gamma_1 X_1 + \gamma_2 X_2 + \dots + \gamma_n X_n \quad (3.9)$$

ここで、

γ_i : パラメータ

X_i : 説明変数

$\sum_i \gamma_i X_i$ の大小関係と符号からリンクの認知度を推定することができる。 $\sum_i \gamma_i X_i > 0$ の時には均衡状態

よりも多くの交通量が流れ、所要時間以外を行動規範に含めて行動する利用者が利用しようとするリンクであり、認知度が高いといえる。また逆に、 $\sum_i \gamma_i X_i < 0$ の時には均衡状態よりも少ない交通量が流れ、

所要時間以外を行動規範に含めて行動する利用者が利用しようとしなないリンクであり、認知度が低いといえることができる。これらの修正量から、ネットワーク認知について考察を行い、OD データを目的別に分類することで道路利用者の目的を知り、利用者の行動について分析する。

4. モデルの適用

4. 1 ネットワークデータ及びODデータの概要

本研究では平成3年度第3回中京都市圏パーソントリップ調査と同一の地域を対象地域とした。これは名古屋市を中心とするおよそ50km圏域に相当する。ゾーン区分はパーソントリップ調査の小ゾーンを基本とし、名古屋市内については108ゾーン、名古屋市外は171ゾーンに分割することによって、対象地域を全部で279ゾーンに分割した。

配分対象道路ネットワークにおいては、平成9年道路交通センサスデータの指定市の主要市道を含む一般都道府県道以上の道路をネットワークとして設定した。道路交通センサスでは道路を7種類に分類しているが、本研究では4.2で述べるように、5種類に分類しそれぞれの種類ごとにリンクパフォーマンス関数を設定した。都市間、都市高速道路に関しては、東名高速道路、名神高速道路、東名阪自動車道、名古屋高速道路、及び知多半島道路を設定した。道路ネットワークは全部でノード数1304、リンク数4303であり、対象地域の一般道路網及び高速道路網にほぼ対応している。

ODデータは名古屋高速道路公社によって第3回中京都市圏パーソントリップ調査の平成3年OD交通量と平成27年の予想OD交通量を用い、中間補完により作成された、平成8年OD交通量を基本とした。

本研究は対象時間帯をピーク時（7, 8, 9時）とオフピーク時（21, 22, 23時）としており、平成8年OD交通量を3時間交通量に換算した。

車の平均乗車人員については、パーソントリップ調査から得られる1.3人/台とし、ネットワーク上の指定最高速度については次のように設定した。

表4.1 ネットワーク上の指定最高速度

都市間高速道路	100
都市内高速道路	80
自動車専用道路	60
2車線一般道	40
4車線以上の一般道	50

4.2 リンクパフォーマンス関数の推定

本研究では、リンクパフォーマンス関数を都市間高速道路、都市内高速道路、2車線一般道路、4車線一般道路、6車線以上一般道路の5種類に分類した。まずリンクパフォーマンス関数を推定するにあたり、時間交通容量を平成9年道路交通センサスから算出した。今回使用した時間交通容量は、可能容

量に信号補正を加えたものである。リンクパフォーマンス関数の推定には、ピーク時重方向交通量と、混雑時平均旅行速度を使用した。交通容量の算出には配分対象地域の道路交通センサデータを用い、リンクパフォーマンス関数の推定には、データの不足を補うために、岐阜県、三重県、愛知県の平日と休日データ、さらに都市間高速道路の推定のために静岡県と長野県の高速度道路データを使用した。

道路交通センサのデータから算出した時間交通容量を、1車線に換算して以下の表4.2に示す。

表4.2 時間交通容量

	車線容量	サンプル数
都市間高速道路	2198.4	12
都市内高速道路	2182.7	45
2車線一般道	808.1	502
4車線一般道	847.6	200
6車線以上一般道	787.6	139

推定方法としては、次のようにリンクパフォーマンス関数を線形化した。

$$\ln\left(\frac{t}{t_0} - 1\right) = \ln\alpha + \beta \ln\left(\frac{q}{c}\right) \quad (4.1)$$

ここで、

$$\alpha = A/t_0$$

これから回帰分析を行うことにより、パラメータ α と β を推定した。

また今回は3時間について配分を行うため、時間容量を3時間に換算し直した。方法としては、日換算係数である、次の式を用いる。

$$\gamma_a = \left(\sum_{i=1}^{24} \eta_{ai}^{\beta+1} \right)^{-\frac{1}{\beta}} \quad (4.2)$$

ここで、

$$\eta_{ai} = \frac{q_{ai}}{Q_a} \text{ で表される時間係数}$$

Q_a : 24時間交通量

q_{ai} : 時間交通量

これを応用して次のように求める。

ピーク時の場合には

$$\gamma_a = \left(\sum_{i=7}^9 \eta_{ai}^{\beta+1} \right)^{-\frac{1}{\beta}} \quad (4.3)$$

オフピーク時の場合は

$$\gamma_a = \left(\sum_{i=21}^{23} \eta_{ai}^{\beta+1} \right)^{-\frac{1}{\beta}} \quad (4.4)$$

ここでは、

Q_a : 3 時間交通量

q_{ai} : 時間交通量

5. 結果と考察

5. 1 リンクパフォーマンス関数の推定結果

リンクパフォーマンス関数の推定結果を以下の表に示す。

表 5. 1 リンクパフォーマンス関数の推定結果

	α	β	修正 R^2	サンプル数
都市間高速道路	0.262	2.309	0.459	77
都市内高速道路	0.486	2.675	0.355	40
2 車線一般道	0.849	1.390	0.626	1400
4 車線一般道	1.235	1301	0.327	444
6 車線以上一般道	1.604	1.507	0.237	148

都市間高速道路と都市内高速道路では、 α と β が一般道とは大きく異なる値で推定されている。これは高速道路の方が一般道に比べて混雑時の平均旅行速度と、自由走行速度に差がなく、また、混雑度の低いデータを道路交通センサスから得ることができなかつたためであると考えられる。

5. 2 換算係数の計算結果

リンクパフォーマンス関数の推定結果のパラメータをもとに、ピーク時と、オフピーク時の 3 時間換算係数を算出した。結果を以下の表に示す。

表 5. 2 換算係数

道路種別	ピーク時 換算係数	サンプル数	オフピーク時 換算係数	サンプル数
都市間高速道路	2.97	18	2.98	18
都市内高速道路	2.97	70	2.83	55
2 車線一般道	2.90	886	2.74	88
4 車線一般道	2.93	386	2.80	62
6 車線以上一般道	2.93	268	2.83	40

ピーク時も、オフピーク時も換算係数は、ほぼ 3 に近い値を得た。このことから、本研究で設定した、ピーク時 (7 時, 8 時, 9 時) と、オフピーク時 (21 時, 22 時, 23 時) の 3 時間帯の交通量にはばらつきがなく、時間価値や、道路利用者の行動目的についても変動はないと考えられる。

5. 3 配分結果

5. 3. 1 ピーク時の配分結果

確定的均衡配分と確率的均衡配分のピーク時における配分結果を一般道と高速道路に分類し、以下の図5. 1、図5. 2に散布図として示し、相関係数を表5. 3に示す。

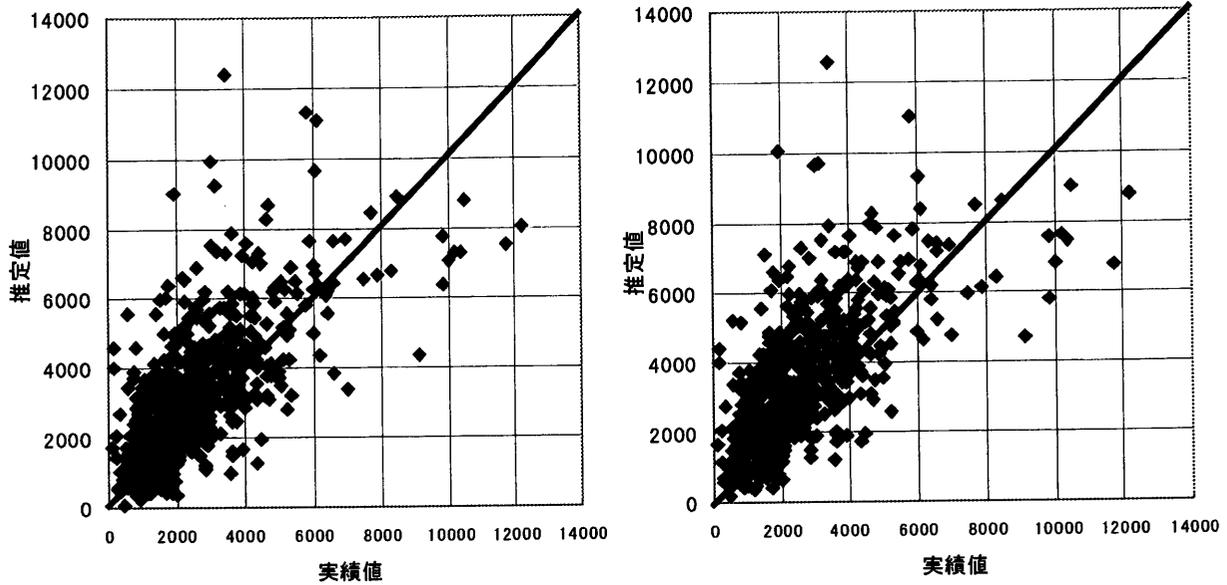


図5. 1 ピーク時の一般道路の相関図 左：確定的均衡配分法 右：確率的均衡配分法

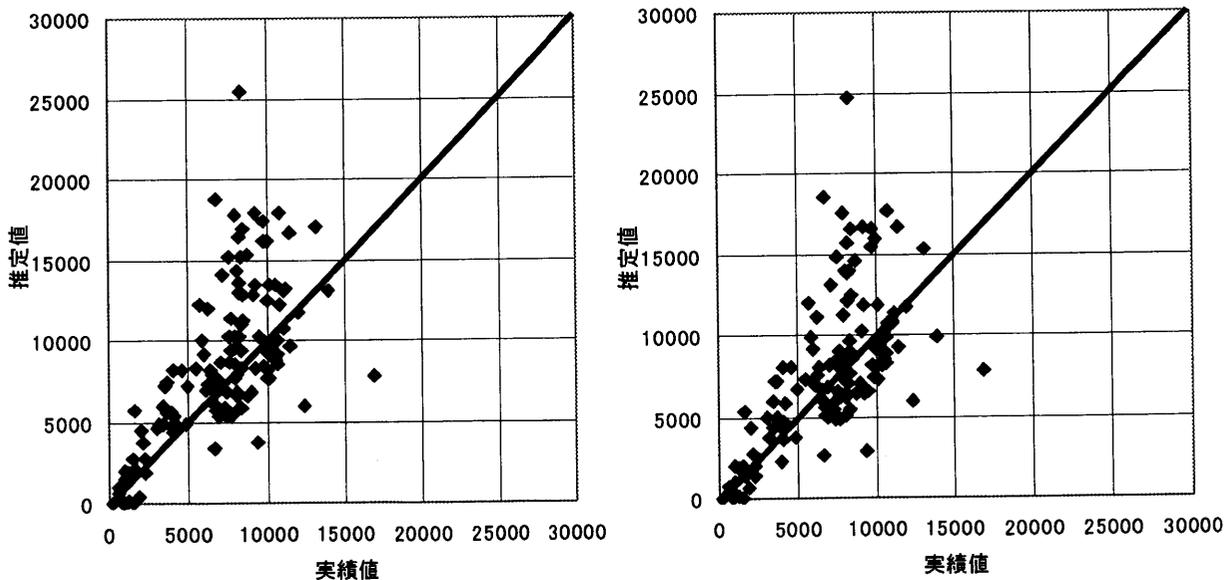


図5. 2 ピーク時の高速道路の相関図 左：確定的均衡配分法 右：確率的均衡配分法

表5. 3 ピーク時における配分結果の相関係数

	確定的均衡配分法	確率的均衡配分法
一般道	0.682	0.688
高速道路	0.658	0.632

ピーク時の配分結果では、確定的配分法と確率的配分法はほぼ同様の結果を得た。これらの結果は、配分の対象とする時間帯を朝のピーク3時間としており、この時間帯は他の時間帯や1日を平均化した場合と比べ非常に混雑した状況を再現していると考えられ、非常に均衡状態に近いと考えられる。したがって、このような時間帯では、経路選択を考慮する確率的均衡配分法の結果も、確定的均衡配分法による結果とそれほど違いが見られなくなる。具体的には、経路が2本のOD間を考えると、オフピーク時には経路Aでは1分、経路Bでは1.2分かかるものが、ピーク時には経路Aでは10分、経路Bでは12分かかるとすると、代替経路である経路Bを選択するそれぞれの確率は、以下のように計算される。

オフピーク時においては

$$\frac{\exp(-1 \times 1.2)}{\exp(-1 \times 1.0) + \exp(-1 \times 1.2)} = 0.450$$

ピーク時では

$$\frac{\exp(-1 \times 12)}{\exp(-1 \times 10) + \exp(-1 \times 12)} = 0.119$$

これから、ピーク時においては代替経路を選択する確率が小さくなり、確率的均衡配分法が確定的均衡配分法に近くなることがわかる。

また、今回確率的均衡配分法を適用するにあたり、 θ の値を1とした。これは、一般的に0.1から1の間であれば、配分に影響がないとされているためであるが、その範囲内でも、より確定的均衡配分法に近くなる1を選んだことも考えられる。

5. 3. 2 オフピーク時の配分結果

ピーク時と同様に、確定的均衡配分と確率的均衡配分のオフピーク時における配分結果を高速道路と一般道に分類し、以下の図5. 3、図5. 4に散布図として示し、表5. 4に相関係数を示す。

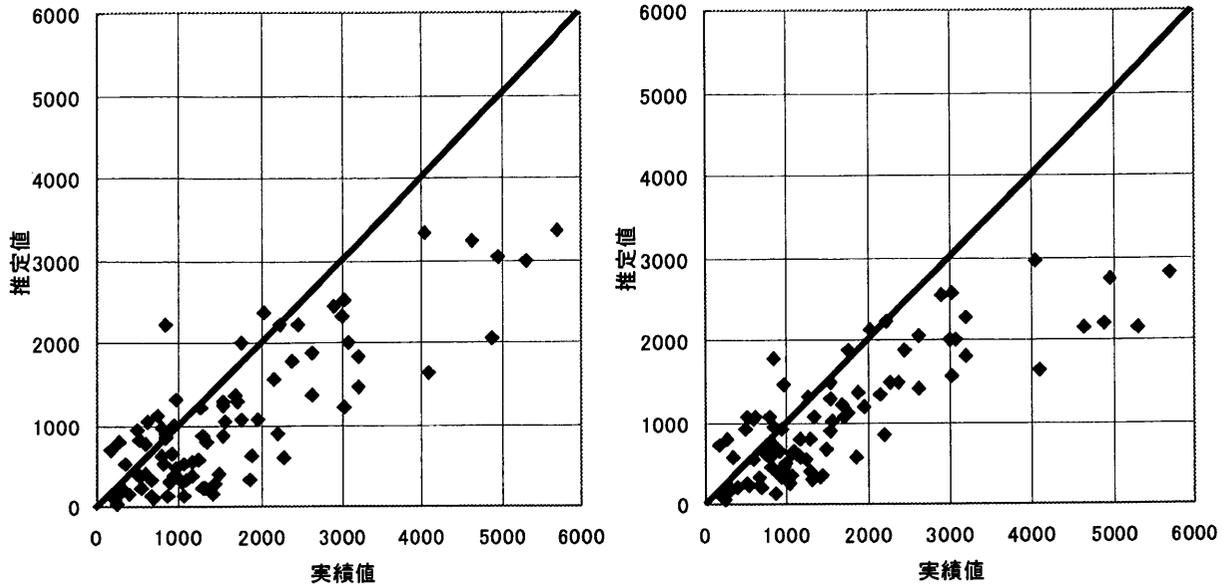


図5. 3 オフピーク時の一般道の相関図 左：確定的均衡配分法 右：確率的均衡配分法

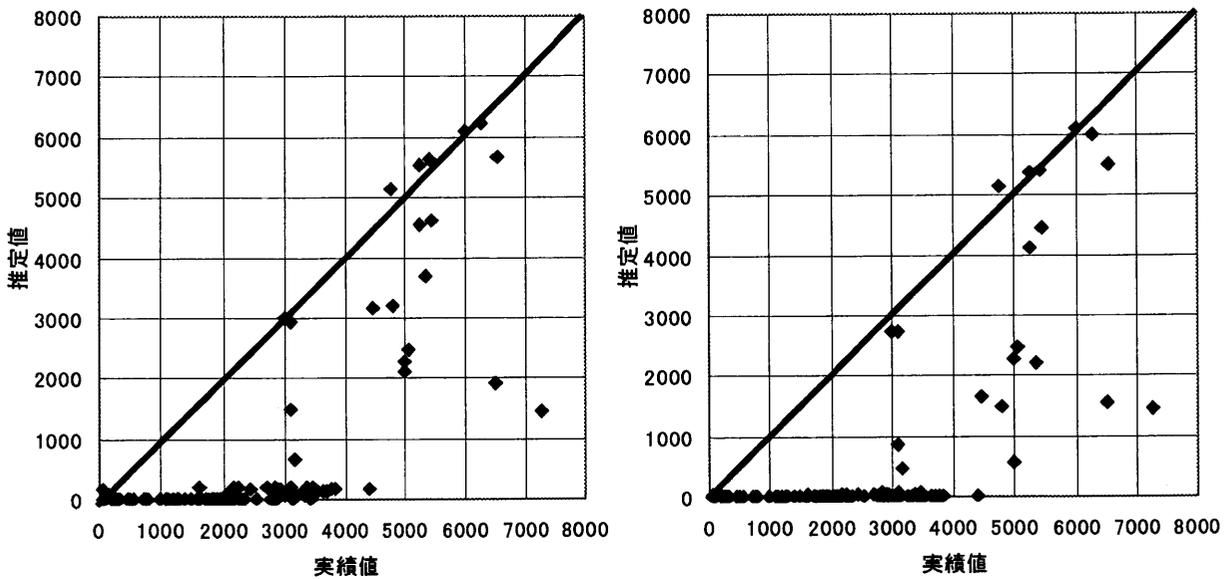


図5. 4 オフピーク時の高速道路の相関図 左：確定的均衡配分法 右：確率的均衡配分法

表5. 4 オフピーク時における配分結果の相関係数

	確定的均衡配分法	確率的均衡配分法
一般道	0.820	0.824
高速道路	0.718	0.675

オフピーク時については、図5. 4に示しているように、確定的均衡配分法と確率的均衡配分法とも、高速道路を利用されないという結果となった。これは、3. 2節でも述べているように、オフピーク時には全経路に対して等時間として配分されているわけではなく、利用者は他の何かによって説明される経路を選択しているためであると考えられ、このような時間帯においては均衡状態では表現されないことが分かる。

また、本研究ではリンクパフォーマンス関数をピーク時の交通量の混雑時平均旅行速度と混雑度をもとに推定したため、リンクパフォーマンス関数がピーク時には対応することができたが、オフピーク時には対応し切れなかったことも考えられる。

5. 4 リンクパフォーマンス関数の修正とネットワーク認知に関する考察

リンクパフォーマンス関数の修正は、次のように行った。

説明変数には、幹線道路（国道と路線番号が2桁の県道）の多車線、幹線道路の2車線、準幹線道路（3桁の県道と市道）の多車線、東名高速道路、名神高速道路、都市内高速道路の6種類と、認知ダミー（道路利用者にとって認知しやすい道路、高速道路沿い、海沿い、川沿い、鉄道沿い等）のあわせて7種類を用いた。これらをダミー変数とし、回帰分析を行うことで、パラメータの推定を行った。パラメータの修正には、オフピークの確率的均衡配分の配分結果をもとにした。ピークにおいても推定を行ったが、ピーク時は配分結果からも解るようにほぼ均衡状態に達していると考えられるため、良好な推定結果を得ることができなかつたためである。修正結果を以下の表に示す。

表5. 5 推定されたパラメータ

	パラメータ	t-値
幹線多車線道路	-0.169	-5.5
幹線2車線道路	-0.131	-3.8
準幹線多車線道路	-0.198	-2.8
東名高速道路	0.040	1.4
名神高速道路	0.050	1.6
都市内高速道路	0.057	2.1
認知ダミー	0.107	5.2
定数項	-0.057	-2.1

修正 $R^2=0.503$

効用の大きさが、ネットワークにおける認知度の大きさであると考えられるので、ネットワークにおける認知の度合いは認知ダミーがリンクについていない場合を考えると、都市内高速道路、名神高速道路、東名高速道路、幹線2車線道路、幹線多車線道路、準幹線多車線道路の順となった。

また、OD交通量を目的別に分類すると以下の表ような結果になった。

表5. 6 道路利用者の目的（市内⇔市内）

	出勤	登校	自由	業務	帰宅
ピーク時	55.4%	5.2%	11.2%	24.5%	3.7%
オフピーク時	0.7%	0.0%	13.8%	6.6%	78.9%

表5. 7 道路利用者の目的（市内⇔市外）

	出勤	登校	自由	業務	帰宅
ピーク時	63.2%	3.9%	7.2%	23.55%	2.2%
オフピーク時	1.0%	0.0%	8.2%	3.7%	87.2%

表 5. 8 道路利用者の目的 (市外⇄市外)

	出勤	登校	自由	業務	帰宅
ピーク時	58.9%	4.7%	13.3%	16.9%	6.2%
オフピーク時	2.6%	0.0%	12.1%	4.4%	80.9%

ピーク時は、出勤・業務が大半を占め、時間が利用者の重要な行動規範となっていることがわかる。またオフピーク時についてみると、自由目的の利用者は10%前後であるが、帰宅目的の利用者が80%を占めている。帰宅目的の利用者は、時間的制約が出勤や業務に比べるとないと考えられるので、オフピーク時はピーク時とは異なり、時間だけでなく、その他の要因を行動規範に含めていることが解る。そのため、今回の修正リンクパフォーマンス関数の仮定は、ピーク時とオフピーク時の配分結果からもわかるように妥当であると考えられる。

しかし、幹線2車線道路が、幹線多車線道路よりも利用者に認知される結果となりオフピークにおける現況を再現できているとは言いがたい。これはリンクパフォーマンス関数の推定の段階で、一般道を正しく推定できていない可能性や、説明変数の設定の方法に問題があった可能性が考えられる。

5. 5 修正リンクパフォーマンス関数を用いた配分結果

修正リンクパフォーマンス関数を用いて、確率的均衡配分法を適用する。その配分結果を以下の図5. 5、図5. 6に散布図として示し、表5. 9に相関係数を示す。

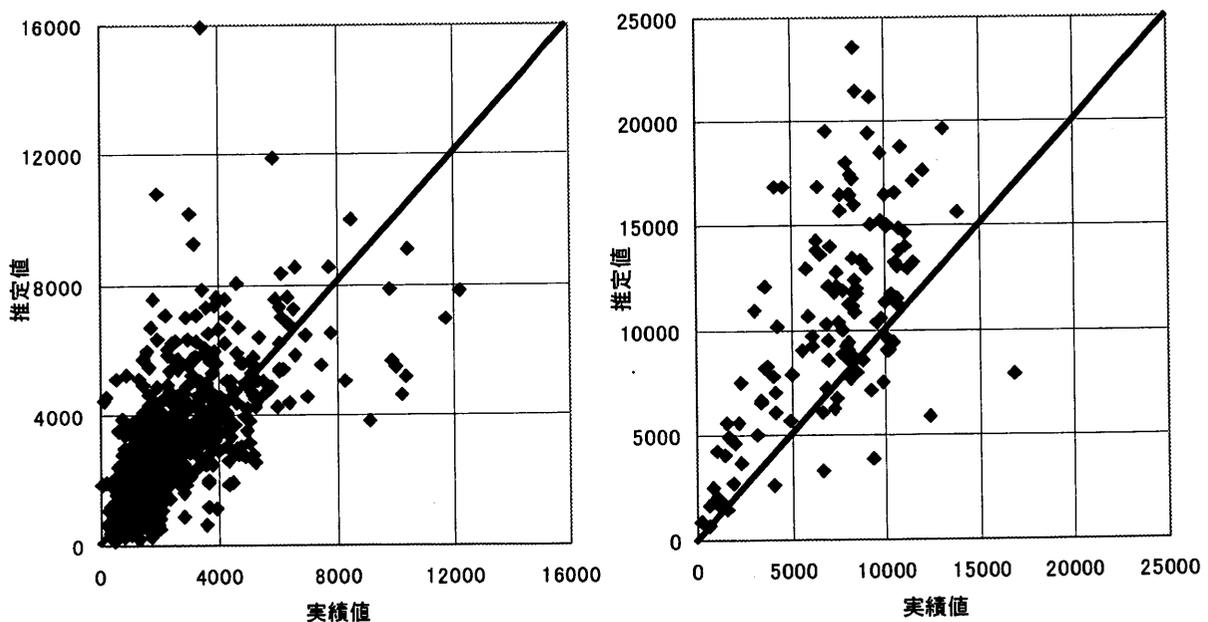


図 5. 5 ピーク修正結果 左：一般道 右：高速道路

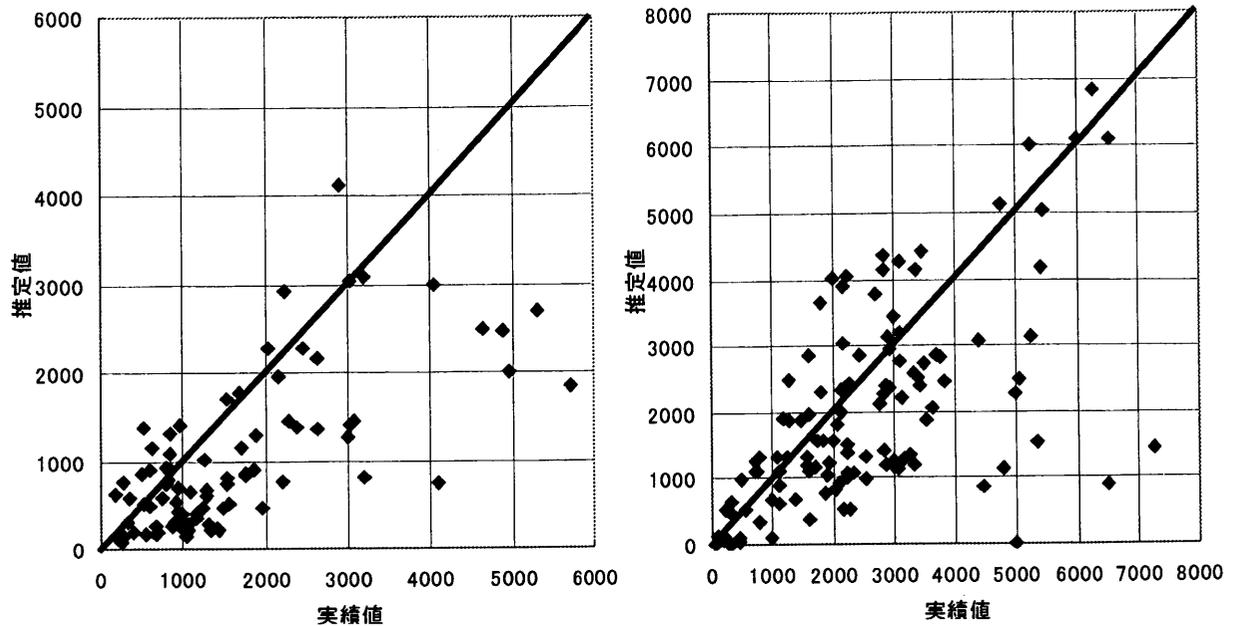


図5. 6 オフピーク修正結果 左：一般道 右：高速道路

表5. 9 修正後の相関係数

	一般道	高速道路
ピーク時	0.601	0.612
オフピーク時	0.690	0.610

修正リンクパフォーマンス関数を用いることによって、オフピーク時には、ほとんど利用されていなかった都市内高速道路が利用されるようになり、相関係数も比較的良好な値を得ることができた。しかし、ピーク時については、修正リンクパフォーマンス関数を用いることで効果を得ることができなかった。ピーク時は混雑度が非常に高く均衡状態にあり、ほぼ現実の道路状況を表現できていると考えられる。しかし、本来ピーク時もオフピーク時もリンク特性は同様であるため、ピーク時も修正を行うことは理論的に可能であると考えられる。このような結果を得た要因としては、修正に用いるパラメータの推定に、オフピーク時の配分結果を用いたことにあると考えられる。オフピークは、実績値を取得可能なリンクが少ないため、ピーク時を修正する際に必要名より細かいリンクの特性を表現することができなかったのである。

6. 結論

6. 1 本研究の成果

- ・ 利用者均衡配分法と確率的均衡配分法の比較を行うことができた
- ・ 当研究室独自のリンクパフォーマンス関数を推定することができ、ピーク時間帯において良好な結果を得ることができた
- ・ 修正リンクパフォーマンス関数のパラメータを推定することにより、利用者のネットワーク認知の度合いを知ることができた

- ・ 修正リンクパフォーマンス関数を用いて、オフピーク時間帯においても比較的良好な配分結果を得られることがわかった

6. 2 今後の課題

- ・ 修正を行うためには、データが豊富な12時間交通量調査の範囲内に時間帯を設定したほうが良い
- ・ 道路交通センサスと対応のよいネットワークを作成した方がよい
- ・ リンクパフォーマンス関数を修正する際の説明変数についての検討必要がある

参考文献

- 1) 溝上章志, 松井寛, 可児隆: 日交通量配分に用いるリンクコスト関数の開発, 土木学会論文集, No.401/IV-10, pp.99-107, 1989.
- 2) 西谷仁志, 朝倉康夫, 柏谷増男: 交通量配分に用いる走行時間関数のパラメータ推定と影響分析, 土木計画学研究・講演集, No.14(1), pp.315-322, 1991.
- 3) 松井寛, 山田周治: 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, 1998.
- 4) Beckmann, M., C.B. McGuire and C.B. Winsten: *Studies in the Economics of Transportation*, Yale University Press, New Haven, CT, 1956.
- 5) 赤松隆, 土屋雄二, 川上喜博: 確率的均衡配分の効率的計算法の開発, 交通工学, Vol.26, No.1, pp.51-58, 1990.
- 6) 金森亮: 高速道路を含む道路網における配分交通量予測法の比較, 名古屋大学卒業論文, 1999.
- 7) 河上省吾, 松井寛: 交通工学, 森北出版, 214p, 1994.
- 8) 建設省中部地方建設局: 平成9年度道路交通センサス報告書, 1998.
- 9) 中京都市圏総合都市交通計画協議会: 第3回中京都市圏パーソントリップ調査報告書, 1991.
- 10) 土木学会 土木計画学研究委員会: 交通ネットワークの均衡分析—最新の理論と解法—, 1998.
- 11) 名古屋高速道路公社: 名古屋高速道路の交通量配分手法に関する実証的調査研究委員会報告書, 1997.
- 12) 名古屋高速道路公社: 平成8年度第7回名古屋高速道路自動車起終点調査報告書, 1997.
- 13) 日本道路協会: 道路の交通容量, 日本道路協会, 1984.
- 14) 羽藤英二, 朝倉康夫: 限定合理性を考慮した経路選択モデルと均衡配分手法, 土木計画学研究・講演集, No.22(2), pp.191-194, 1999.
- 15) 三輪富生: 複数の高速道路経路選択を考慮した均衡配分モデルに関する研究, 名古屋大学卒業論文, 1998.

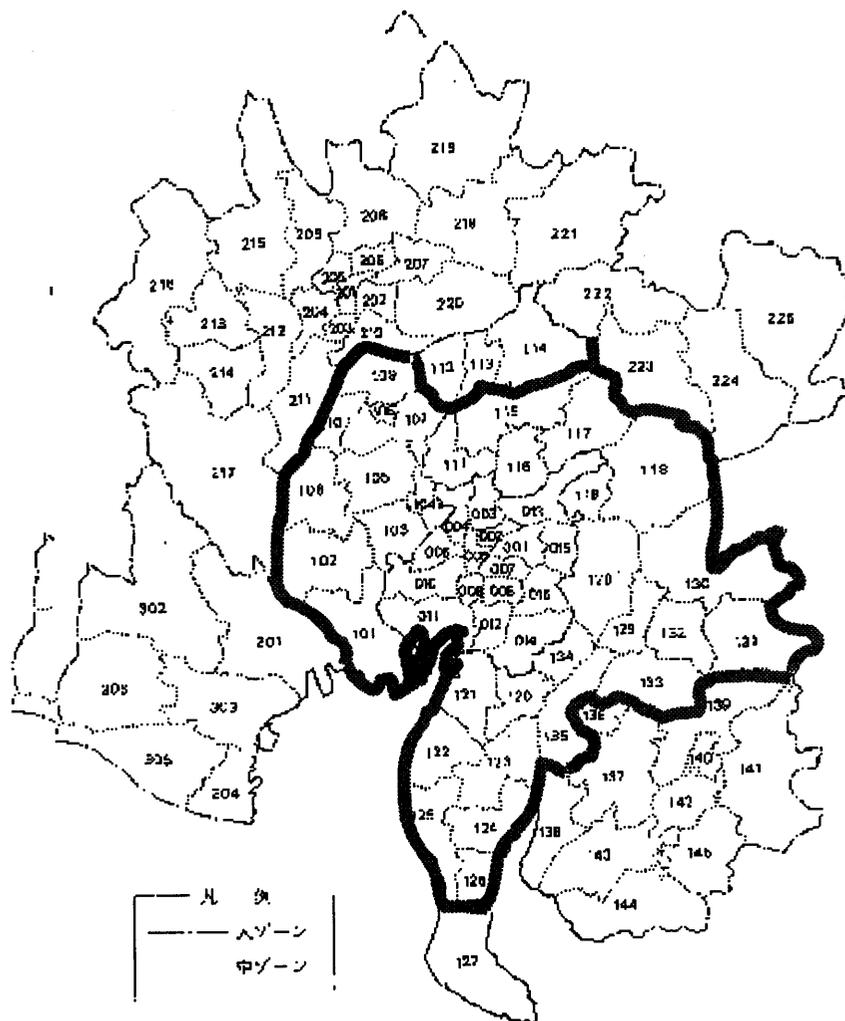


図 A. 1 配分対象地域範囲地図

情報の不完全性を考慮したネットワーク配分手法と 情報提供効果に関する研究

1. 序論

1. 1 本研究の背景

近年の交通量配分は交通網計画のみならず、交通運用計画、交通管理計画、交通情報提供等ソフト的対策にも利用されるようになってきた。それに伴って人間の交通行動に基づく、より理論性のある配分理論が当然要求されるようになってきた。そのため理論的拡張が難しく説明力に欠ける分割配分法にかわって均衡配分法が主流となりつつある。しかし均衡配分法は分析者による調整が容易な分割配分法に比べて配分精度が上がらないのが現状であり、均衡配分法の精度向上は実現されるべき大きな課題となっている。

従来の均衡配分モデルは Wardrop の「利用される経路の旅行時間はみな等しく、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」という等時間原則に基づいており、ドライバーが常に旅行時間を最短にするように経路選択を行うという仮説でモデル化されている。これによって「もはやどの利用人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」という交通均衡状態がもたらされることになる。

ところでドライバーが常に旅行時間を最短にするように経路選択を行うためにはすべての経路選択肢についての完全な情報を知っている必要があるが、均衡配分モデルではそれを仮定としておいている。しかし実際の交通流において全てのドライバーが完全情報をもっているとは考えにくい。ここにモデルと現実の間に相違があり、観測交通量と均衡配分モデルによる配分交通量の差を生む原因となっている可能性がある。したがってドライバーが得る経路情報の不完全性を考慮した、より現実に則したモデルを用いた均衡配分が必要とされていると考えられる。

一方、そうした不完全情報下の交通流では均衡状態が成立しておらず、効率的な交通流が実現していない。そこで ITS (Intelligent Transportation Systems ; 高度道路支援システム) の中核的システムの1つである VICS (Vehicle Information and Communication Systems) は、経路所要時間などの交通情報を走行中の自動車に逐次提供することで効率的な交通流の実現を目指している。しかし VICS の効果について十分検討される前に、システムの運用や機器の普及が先走っている感が否めない。VICS の情報提供を受けることで経路選択行動が変化するのは、現況で不完全情報をもとに経路選択を行っているドライバーであると思われるが、そのようなドライバーがどの程度存在しているのか明確ではなく、旅行時間短縮などの効果がどの程度得られるのかは未知数である。したがってより高度な VICS に公的資金を投入する前に、情報提供がドライバーの経路選択行動に与える影響を明らかにして VICS による情報提供効果を分析する必要がある。

1. 2 本研究の目的

上記の背景を踏まえて本研究は、不完全情報下での経路選択行動を考慮した均衡配分、情報提供によって得られる効果の分析、の2つを目的とする。

経路情報の不完全性に関して、経路所要時間についての情報が不完全な場合とネットワーク認知が不完全な場合を考え、現況でどれだけのドライバーがそれぞれの不完全情報下で経路選択を行っているのかを明らかにするとともに、不完全情報下のドライバーの存在を考慮した現実的なモデルを用いることで均衡配分法の精度向上を試みる。情報提供効果の分析については、不完全情報下で経路選択を行っているドライバーに対して経路情報を提供することですべてのドライバーが完全情報を得ることになり、提供された情報に従えば交通均衡状態が実現するが、それによって得られる旅行時間の短縮などの便益を分析する。

2. 本研究で用いる均衡配分モデル

2. 1 配分条件の概要

本研究での配分では確定的利用者均衡配分をベースとし、不完全情報下での経路選択行動を考慮できるように改良したモデルを用いる。確定的利用者均衡配分は全てのドライバーがネットワークの状況に応じて常に最短経路を選択するというものであり、これは現実の交通流における経路選択では考えにくい行動である。この問題に対して確率的利用者均衡配分ではドライバーの経路選択行動のばらつきを考慮しており、確定的利用者均衡配分に比べてより現実の交通流に近い結果が得られるといわれるものの、求解や未知パラメータの設定が困難であるという欠点ももつ。本研究では、本研究室の過去の研究では都市圏レベルの交通量配分において両配分法による結果に大きな差が認められないことと、確率的利用者均衡配分モデルで利用者の経路選択行動のばらつきを表すパラメータ θ の値（ロジットモデルのスケールパラメータに相当する値）を外生的に与えなければならないことを理由に、より解法が簡単な確定的利用者均衡配分をベースとすることとした。

配分対象時間は昼間12時間で、7時台から18時台までである。また配分対象地域は平成3年度第3回中京都市圏パーソントリップ調査の対象地域と同一の地域とする。これは名古屋市を中心とするおよそ50km圏域に相当する地域である。ゾーン分割はパーソントリップ調査の基本ゾーンを主なゾーン単位とし、名古屋市内については108ゾーン、名古屋市外は171ゾーン、合計279ゾーンに分割した。

高速道路は料金抵抗法を用い、時間価値57.5円/分として高速道路利用料金を所要時間に換算することで一般道と同等に取り扱う。本研究で用いる時間価値の値は、名古屋高速道路公社及び財団法人名古屋高速道路協会¹⁾による第7回名古屋高速道路自動車起終点調査から算出されたものである。

2. 2 ネットワークデータおよびOD交通量データ

配分対象道路ネットワークとして、平成9年道路交通センサデータの指定市の主要市道を含む一般都道府県道以上の道路を設定した。道路ネットワークは全ノード数1304、全リンク数4303であり、対象地域の一般道路網および高速道路網にほぼ対応している。

OD交通量データは、名古屋高速道路公社によって第3回中京都市圏パーソントリップ調査の平成3年OD交通量と平成27年の予想OD交通量を用いて中間補完により作成された平成8年OD交通量を基

本とした。

2. 3 リンクコスト関数

リンクコスト関数はリンク上の交通量と旅行時間の関係を与える関数であり、均衡配分における走行状況の予測に決定的な影響を与える。したがって我が国の道路交通状況に適合したリンクコスト関数を用いる必要があるが、本研究では松井・山田²⁾によって提案された以下のようなリンクコスト関数形を採用して、そのパラメータを推定することとした。

$$t = t_0 \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{q}{c} \right)^\beta \right\} \quad (2.1a)$$

$$t_0 = \gamma_0 + \gamma_1 X_1 + \gamma_2 X_2 \quad (2.1b)$$

t : リンク所要時間
t₀ : 自由走行時間
q : リンク交通量
c : リンク可能交通容量
X₁ : 信号交差点密度
X₂ : 指定最高速度の逆数
α, β, γ₀, γ₁, γ₂ : パラメータ

(2.1)式で表されるリンクコスト関数は、我が国で古くから知られている米国道路局(US Bureau of Public Roads)が開発した BPR 関数を改良したものである。従来の BPR 型リンクコスト関数では自由走行時間 t₀ (交通量が 0 のときの旅行時間) は指定最高速度のみから算出されることが多かったが、実際には指定最高速度以外にも自由走行時間に影響を与える要素が存在していると思われる。上記のリンクコスト関数では指定最高速度と信号交差点密度が自由走行時間に影響を与え、自由走行時間 t₀ は指定最高速度と信号交差点密度の関数としている。また定数項を関数に組み込むことで、リンクの観測されない特性による影響も反映される。

リンクの交通量と旅行時間の関係はリンクの特性によってそれぞれ異なるので、本研究では道路種別や車線数を基に全リンクを都市間高速道路、都市内高速道路、5 車線以上の道路、3 車線及び 4 車線の道路、2 車線の道路、1 車線の道路の 6 種類に分類し、それぞれについてリンクコスト関数を推定することとした。

2. 4 不完全情報下における経路選択行動の考慮

2. 4. 1 情報の不完全性に着目した既往の研究

前述のように従来の均衡配分モデルでは、全てのドライバーは常に利用可能な経路についての完全な情報を得た上で、旅行時間を最小とするように行動すると仮定されている。本研究ではこの「完全情報仮定」を従来の均衡配分モデルの問題点として捉える。完全情報仮定が満たされない場合、ドライバーが選択した経路が結果として最短経路とならない可能性があり、交通均衡状態が成り立たない。現実の

交通流では完全情報仮定が成り立っていない、すなわち不完全な経路情報を基に経路選択を行っているドライバーが存在していると考えられるため、ここにモデルと実際の交通流の間に差異が生じている。

近年、このような情報の不完全性を問題点として捉えた研究が行われるようになってきている。羽藤ら³⁾は意思決定の不確実性減少の観点から交通情報の価値を定義し、その価値に応じて情報を入手・参照する情報参照モデルを定式化している。また、情報参照の有無により経路選択行動の不確実性が変化し、ドライバーの経路選択にも影響を与えることを表現できるモデルを提案した。Yang⁴⁾は、交通情報の利用により完全な所要時間情報を得ているドライバーとそれ以外のドライバーが混在する場合の均衡配分問題の現実的な解法を示した。VICIS のような所要時間情報を提供するシステムの普及率に応じて、情報機器を購入したドライバーが受ける便益を旅行時間節約として測定している。

これら既往の研究では、主として所要時間情報の不完全性のみに着目し、完全な所要時間情報を提供したときの交通行動の変化をモデル化しようとするものが多い。また、現況で不完全情報下で経路選択を行っているドライバーがどの程度存在しているのか明らかにされておらず、情報提供によって全体でどれだけの便益が得られるのかははっきりしない。不完全情報を考慮したモデルを適用する対象となるべきドライバー、情報提供の対象となるドライバーについての研究が必要とされる。

本研究ではこの点に留意し、所要時間情報の他に道路の存在自体の情報であるネットワーク情報の不完全性も考慮した均衡配分を行うとともに、現況で不完全情報下で経路選択を行っているドライバーの存在を明らかにするものであるが、詳細な研究内容については後述するものとし、ここでは詳しい説明は避ける。

2. 4. 2 所要時間情報とネットワーク情報の不完全性

経路情報には所要時間情報とネットワーク情報の2種類が考えられる。所要時間情報とはそのリンクの正確な所要時間の情報であり、ネットワーク情報とはそのリンクの存在そのものの情報である。所要時間情報が不完全な場合はドライバーは最短経路を常に選択することができなくなり、最短経路ではない経路を選択してしまうことになる。ネットワーク情報が不完全な場合、ドライバーが存在自体を知らないリンクがあり、そのようなリンクが最短経路の一部だった場合は最短経路を選択できないことになる。

本研究では完全情報仮定によって生まれるモデルと実交通流の間の差異を解消するために、上記2種類の経路情報について、不完全情報下で経路選択を行っているドライバーの存在を仮定した均衡配分を行う。所要時間情報が不完全なドライバーはリンクの距離や沿道条件などからある程度所要時間を推測することはできてもリンクを流れる交通量が所要時間に与える影響については把握できないと考えられるため、モデル上ではゼロフロー時のリンク所要時間((2.1b)式により算出される t_0)のみに基づいて最短経路を選択させる。リンクを流れる交通量の変化とともにリンクコスト関数によって算出される真の所要時間が変化してもドライバーが認知する所要時間は変化しないため、リンクを流れる交通量がドライバーの経路選択行動に影響を与えないFlow Independentな経路選択行動となる。この場合ドライバーが最短経路だと判断して選択した経路でも、その経路上の交通量が増加すると真の所要時間が増加して最短経路とならない可能性がある(図2. 1参照)。

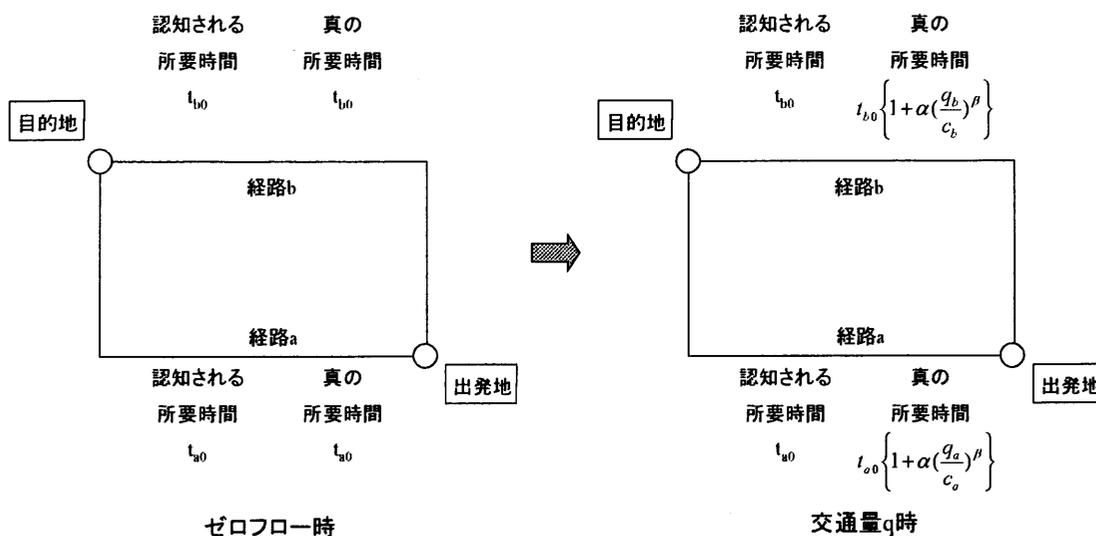


図2. 1 不完全な所要時間情報下の経路所要時間の認知

従来の均衡配分においては、確率的均衡配分を行うことでドライバーの認知所要時間の不確実性及び経路選択行動の不確実性を考慮するのが主流である。したがって本研究のように所要時間情報が完全なドライバーと不完全なドライバーが混在する場合は、所要時間情報が完全なドライバーについては確定的均衡配分を、所要時間情報が不完全なドライバーについては確率的均衡配分を行う方法も考えられる。しかし確率的均衡配分といえども道路上を流れる交通量に影響を受けた真の所要時間を基に経路選択を行う点は確定的均衡配分と変わりはなく、両者の配分結果には大きな差が認められなくなる。このことを考慮して本研究では所要時間情報が不完全なドライバーの配分について確率的均衡配分を用いることを避け、経路選択行動に上記のような仮定をおいた。

ネットワーク情報が不完全なドライバーは補助幹線道路のような認知度の低い道路の存在を知らず、高速道路や幹線道路などの認知度の高い道路のみを経路選択肢として、その中で最短経路選択を行うと考えられるため、モデル上では3車線以上の道路を優先して経路選択をさせる。2車線以下の道路については、出発地及び目的地周辺の道路、つまり出発地や目的地とその周辺に位置する幹線道路を結ぶ道路ならば存在を知っているものとする。この場合の最短経路は全リンクを経路選択肢としたときの最短経路とは一致しない可能性がある(図2.2参照)。

また、その道路の存在自体は知っていても、利用経験が少ない、道路幅員が狭く走りにくいなどといった理由による心理的抵抗によりその道路を意図的に経路選択肢から外して経路選択を行っているドライバーも存在していると思われるが、そのようなドライバーの経路選択行動はネットワーク情報が不完全なドライバーと同様であると考えられることから、本研究では両者とも「ネットワーク情報が不完全なドライバー」として扱うこととする。

なお、完全情報をもつドライバーについては従来のモデルと同様全ての経路を経路選択肢として、その中から最短経路を選択させる。

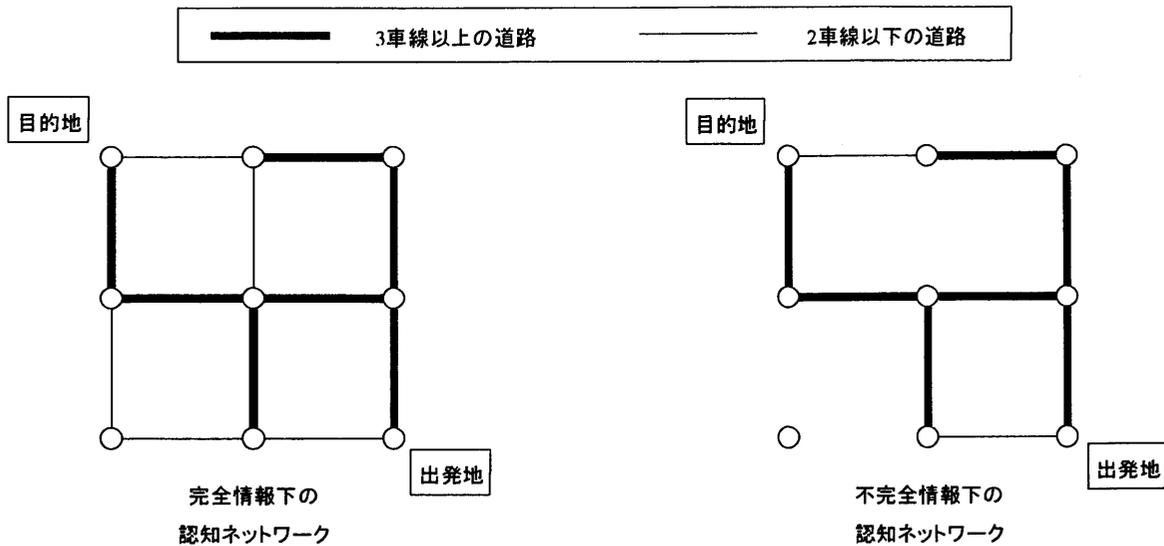


図 2. 2 不完全なネットワーク情報におけるネットワークの認知

2. 4. 3 ドライバーの分類とモデル上での取り扱い

本研究では、完全情報の有無や経路情報の種類による経路選択行動原理の違いからドライバーを表 2. 1 のように 4 クラスに分類した。

表 2. 1 ドライバーの分類

		経路情報の種類	
		所要時間情報	ネットワーク情報
完全情報の有無	完全情報 (詳しい知識がある)	<A クラス> 全ての経路の中から最短経路を選択	<B クラス> 全ての経路の中から最短経路を選択
	不完全情報 (詳しい知識がない)	<C クラス> ゼロフロー時の所要時間を基に最短経路を選択	<D クラス> 認知している経路の中から最短経路を選択

各クラスの経路選択行動原理を的確に反映させるため、モデル上ではそれぞれ以下のように取り扱うこととする。

- ・ A クラス及び B クラス

全ての経路を経路選択肢集合に含んだ確定的利用者均衡配分。経路選択行動は C クラス及び D クラスのドライバーによる交通量にも影響を受ける。

- ・ C クラス

ゼロフロー時のリンク所要時間のみを基にした最短経路に C クラスのドライバーによる交通量の全てを負荷する all-or-nothing 配分。リンク交通量に影響を受けない Flow Independent な経路選択行動となるので、一度配分された交通量はその後変化しない。つまり C クラスのドライバーの経路選択はキャプ

タイプであり、その交通量は固定値として扱う。

・Dクラス

経路選択肢集合を限定した確定的利用者均衡配分。高速道路及び3車線以上の道路と出発地及び目的地周辺の一部の2車線以下の道路が選択肢集合に含まれ、ドライバーはその中で最短経路を選択する。

現実の交通流では上記4クラスが混在しており、それぞれの交通行動原理に基づいて経路選択を行っていると思われるため、均衡配分モデルにこのような複数の交通行動原理を組み込まなければならない。本研究では通常の確定的均衡配分の代表的な解法である Frank-Wolfe 法を利用するが、前述した各クラスの交通行動原理を考慮して若干の修正を施す。修正後の Frank-Wolfe 法アルゴリズムは以下の通りである。

Step1 初期実行可能解の設定

収束回数 $n=1$ として、初期実行可能解となるリンク交通量 $\{x_a^{(n)}\}$ を与える。

Step1-1 Cクラスの交通量配分

自由走行時間を基に各 OD 間の最短経路を探索し、Cクラスの全交通量を負荷する。

Step1-2 Dクラスの交通量配分

自由走行時間を基に、限定された経路選択肢の範囲内で各 OD 間の最短経路を探索し、Dクラスの全交通量を負荷する。

Step3-2 AクラスとBクラスの交通量配分

自由走行時間を基に、全経路を選択肢として各 OD 間の最短経路を探索し、Aクラス及びBクラスの全交通量を負荷する。

Step2 リンクコストの更新

$\{x_a^{(n)}\}$ に対するリンク所要時間 $\{t_a(x_a^{(n)})\}$ を計算する。

Step3 試行解の算出

各 OD 間の最短経路を探索する。その最短経路に各 OD 間の全交通需要を負荷する。

Step3-1 Dクラスの交通量配分

限定された経路選択肢の範囲内で最短経路を探索し、Dクラスの全交通量を負荷する。

Step3-2 AクラスとBクラスの交通量配分

全経路を選択肢として最短経路を探索し、Aクラス及びBクラスの全交通量を負荷する。

Step3-3 配分交通量の算出

Step3-1 及び Step3-2 で配分された交通量を合計したものを $\{y_a\}$ とする。

Step4 降下方向の検索

$x_a^{(n+1)} = x_a^{(n)} + \alpha (y_a - x_a^{(n)})$ とおく。

目的関数にこの $x_a^{(n+1)}$ を代入し、目的関数を最小にする最適ステップサイズ α とそのときのリンク交通量 $\{x_a^{(n+1)}\}$ を求める。

Step5 収束判定

収束条件を満たしていれば配分計算終了。

満たしていない場合は $n=n+1$ として Step2 へ戻る。

上記の配分方法により通常の Frank-Wolfe 法と同様に均衡解を求めることができる。複数クラスを扱うために1回の繰り返し計算における最短経路探索アルゴリズムの回数が増えるため、計算時間は通常の Frank-Wolfe 法に比べて長時間必要である。配分計算に必要とされる計算時間はそのほとんどが最短経路探索に費やされるため、扱うクラスが2クラスならば計算時間はほぼ2倍となる。ただし本研究でのCクラスについては最短経路探索は1回のみで繰り返し計算に組み込まれないため、計算時間の増加の要因とはなっていない。

本研究の目的のひとつである VICS による情報提供効果の分析を行うためには、VICS による情報提供を受けることで経路選択行動が変化すると考えられるCクラス及びDクラスのドライバーの存在比率を明らかにしなければならないが、アンケートや観測といった方法で比率を直接調査することは困難であると思われる。そのため本研究では各クラスのドライバーの存在比率を少しずつ変化させながら均衡配分を行い、現況再現性が最も良くなる時の存在比率が現実の交通流での比率を表しているものと考えことにする。現況再現性の指標として、観測交通量とモデルによる配分交通量の相関係数と以下の(2.3)式で表される RMS 誤差を用いる。

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_a (x_a - \hat{x}_a)^2}{n}} \quad (2.3)$$

x_a : リンク a の観測交通量
 \hat{x}_a : リンク a の配分交通量
n : サンプル数

RMS 誤差は観測交通量と配分交通量の誤差の平均を表す値であるといえるため、RMS 誤差が小さいほどモデルの現況再現性が良いといえる。

3. リンクコスト関数の推定

3. 1 使用データ

可能交通容量の算出及びパラメータ推定には、平成9年道路交通センサスデータを用いた。道路交通センサスデータには単に道路区間の交通量や旅行速度にとどまらず、可能交通容量に影響を与えると思われる DID (人口集中地区) 率等の沿道条件、道路種別等の道路条件、自由走行時間の説明変数として用いられる指定最高速度や信号交差点数などの多くのデータが含まれており、必要なデータを取り出して使用することができる。

3. 2 パラメータ推定方法

リンクコスト関数に含まれるパラメータは最尤推定法により推定した。リンク a の旅行時間が平均 \bar{t}_a ,

分散 s_a^2 の正規確率変数であると仮定する。このとき \bar{t}_a はリンクコスト関数(2.1)式から求められ、 s_a^2 はパラメータとして推定される。いま、所要時間の確率密度関数がリンクについて独立であると仮定すると、観測所要時間 t_a の確率密度関数は、

$$f(t_a | \bar{t}_a, s_a^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi s_a^2}} \exp\left[-\frac{(t_a - \bar{t}_a)^2}{2s_a^2}\right] \quad (3.1)$$

となる。このとき尤度関数 $L(\theta)$ は次式で定義できる。

$$L(\theta) = \prod_a f(t_a | \bar{t}_a, s_a^2) \quad (3.2)$$

ここで θ は未知パラメータベクトル、つまりリンクコスト関数に含まれるパラメータ α 、 β 、 γ と旅行時間の分散 s_a^2 からなるベクトルである。これらの推定値は $\max L(\theta)$ を満足する最尤推定量として求められる。

結局、リンク所要時間が正規確率変数でその平均値はリンクコスト関数によって与えられると仮定すると、観測所要時間とリンクコスト関数によって与えられるリンク所要時間が一致するとき確率密度関数が最大値をとることになる。したがって確率密度関数(3.1)式の全リンクについてのべき乗である尤度関数(3.2)式を最大にするような θ の値がパラメータの推定値となる。

また、パラメータの推定に必要な可能交通容量については道路交通センサデータからリンクごとに算出した。算出方法は、我が国の交通容量算出マニュアルである「道路の交通容量」⁵⁾に記載されている道路区間の時間交通容量の算出式を用いた。

3. 3 パラメータ推定結果

リンクコスト関数のパラメータ推定結果を表3. 1に示す。

表3. 1 リンクコスト関数のパラメータ推定値

道路の種類	α	β	定数項 γ_0 (時間)	信号交差点密度 γ_1 (箇所/km)	指定最高速度の逆数 γ_2 (h/km)	分散 σ (分)	サンプル数
都市間高速	0.362 (3.32)	4.53 (5.34)	0.0097 (21.66)	-	0.143 (4.44)	0.0861 (29.22)	220
都市内高速	0.408 (7.27)	3.02 (6.18)	0.0138 (41.63)	-	-	0.199 (37.28)	342
5車線以上	1.57 (2.67)	1.95 (3.48)	0.0164 (3.37)	0.0037 (12.36)	0.290 (1.18)	1.03 (2.18)	1233
3車線、4車線	1.35 (1.84)	2.99 (7.97)	0.0124 (6.18)	0.0024 (17.11)	0.740 (7.36)	0.813 (19.22)	2858
2車線	0.351 (12.26)	1.32 (2.47)	0.0006 (0.42)	0.0037 (23.52)	1.05 (18.90)	1.09 (4.62)	8061
1車線	0.154 (8.27)	1.82 (2.10)	0.0231 (18.87)	-0.0002 (-0.34)	0.0539 (1.22)	0.276 (30.23)	308

※()内は t 値

パラメータの推定結果を見ると、全体として t 値は良好な値を示しており有意な推定結果であるといえる。各パラメータの値も妥当なものである。信号交差点密度と指定最高速度の逆数は旅行時間を増加させる方向に影響を与える変数であると考えられるため、そのパラメータ γ_1 と γ_2 が正の値に推定されたことも妥当な結果であるといえる。1車線の道路については γ_1 の値がほぼ0に推定されているが、これは一般に車線幅員の狭い1車線の道路については信号の設置と速度は無関係であるためではないかと考えられる。また、都市間高速道路と都市内高速道路では信号交差点が存在しないので信号交差点密度のパラメータ γ_1 は推定していない。都市内高速道路では全サンプルにおいて指定最高速度が60km/hだったため指定最高速度の逆数のパラメータ γ_2 は推定していない。

3. 4 時間交通容量換算係数の算出

本研究では昼間12時間について配分を行うため、時間交通容量を12時間あたりの可能交通容量に換算する必要がある。換算に用いる換算係数は溝上・松井ら⁶⁾によって提案された(3.3)式により算出する。なお、式中の β にはリンクコスト関数の推定で得られたパラメータ β を用いる。

$$\gamma_a = \left(\sum_{i=7}^{18} \eta_{ai}^{\beta+1} \right)^{-\frac{1}{\beta}} \quad (3.3a)$$

$$\eta_{ai} = \frac{q_{ai}}{Q_a} \quad (3.3b)$$

Q_a : リンク a の 12 時間交通量

q_{ai} : リンク a の i 時台の時間交通量

昼間12時間を対象とした均衡配分では、この換算係数と時間交通容量の積を12時間あたりの可能交通容量としてリンクコスト関数に用いる。12時間あたりの可能交通容量を単純に時間交通量の12倍としないのは、交通量が12時間にわたって一様ではなく時間帯によって交通量にばらつきがあり、ドライバーの経路選択行動に変動がある可能性が考えられるためである。

(3.3)式により求められた換算係数を表3.2に示す。

表 3. 2 12 時間換算係数

道路の種類	12時間換算係数	サンプル数
都市間高速	11.54	111
都市内高速	11.39	13
5車線以上	11.74	173
3車線、4車線	11.48	473
2車線	11.29	2698
1車線	10.42	627

1 車線の道路以外ではほぼ 12 に近い値となっていることから、これら 5 種類の道路では交通量が 12 時間にわたって一様でばらつきが少なく、ドライバーの行動にも大きな変動はないと考えられる。一方 1 車線の道路では 12 と若干離れた値となっていることから、時間帯ごと交通量に多少のばらつきがあるものと思われる。

ここで求めたリンクコスト関数及び 12 時間換算係数を用いて、以降均衡配分を行う。

4. 配分結果と考察

4. 1 完全情報下の確定的利用者均衡配分

まずは従来の均衡配分モデルと同様、完全情報を仮定した昼間 12 時間における確定的均衡配分を行った。一般道と高速道路それぞれについて、観測交通量と配分交通量の相関係数及び RMS 誤差を表 4. 1 に、また相関図を図 4. 1 に示す。

表 4. 1 完全情報下の均衡配分結果：相関係数と RMS 誤差

	相関係数	RMS誤差
高速道路	0.559	10472
一般道	0.546	6936
全道路	0.658	7127

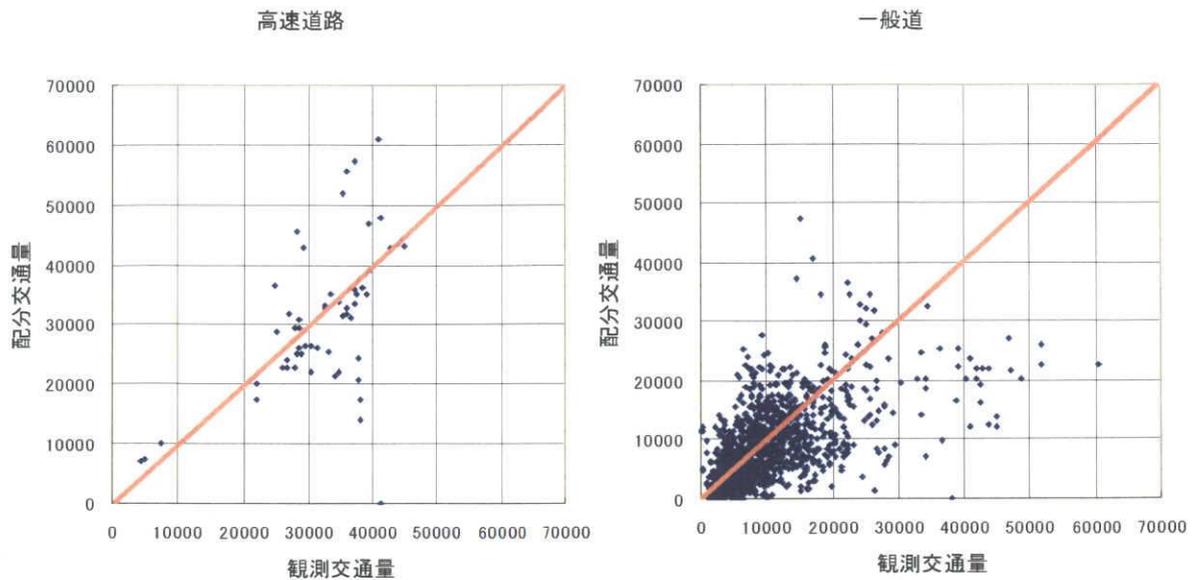


図 4. 1 完全情報下の均衡配分結果：相関図

高速道路と一般道を比較すると、相関係数では両者ともほとんど差がないものの、RMS 誤差で比較すると大きな差が現れている。この要因として高速道路のサンプル数が少ない (57 サンプル) ことが挙げられる。サンプル数が少ないことで 45 度線から大きく外れている数本の道路の誤差が際立ち、RMS 誤差に顕著に表れていると考えられる。一般道についても 45 度線から大きく外れている点が見受けられるが、サンプル数が多い (1252 サンプル) ためにその誤差が RMS 誤差に大きく影響していないものと思われる。また、現況再現性が特に悪い道路に共通するような道路特性は特に見受けられなかった。

ところで本研究のスタンスで考えれば、完全情報下の均衡配分は VICS による情報提供後の交通流を予測しているのであって、完全情報仮定が成り立たない現況の交通流を再現しているわけではない。したがって表 4. 1 に示す相関係数と RMS 誤差は後述する不完全情報下の均衡配分の結果と現況再現性を比較するための相対的な指標として捉えるのが適切であり、モデルの絶対的評価に用いることはできない。

4. 2 所要時間情報の不完全性を考慮した均衡配分

次に所要時間情報が不完全なドライバー (表 2. 1 の C クラス) の存在を考慮した均衡配分を行った。全てのドライバーの中で何%が不完全な所要時間情報下で経路選択を行っているのか、その比率を 0 から 1 まで 0.1 間隔で変化させたときの現況再現性の変化をみた。なお存在比率は全 OD ペアについて同一であるとし、簡単のためネットワーク情報が不完全なドライバー (表 2. 1 の D クラス) の存在比率は 0 としている。前述のように、C クラスのドライバーが認知できる所要時間はリンクを流れる交通量の変化に関わらず、(2.1b)式で表される自由走行時間 t_0 のみである。

C クラスのドライバーの存在比率と現況再現性の関係を図 4. 2 に示す。

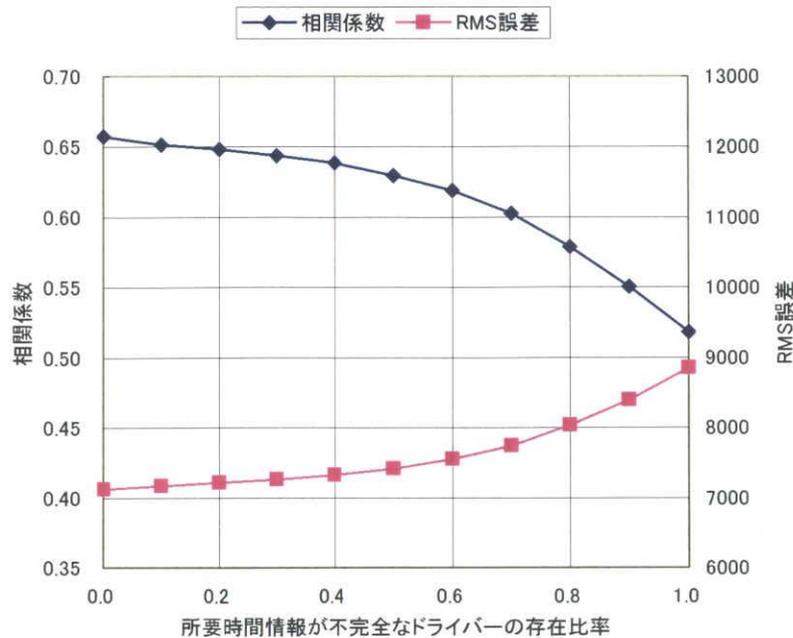


図4. 2 所要時間情報が不完全なドライバーの存在比率と現況再現性

Cクラスのドライバーの存在比率に対して相関係数は単調減少、RMS誤差は単調増加となった。つまりCクラスのドライバーの存在比率を0としたとき、最も現況再現性が良いことになる。この結果から直感的に考えれば、現況で不完全な所要時間情報を基に経路選択をしているドライバーは存在せず均衡状態に達していることになる。しかし現実の交通流において全てのドライバーが完全な経路情報をもっていると考えるのはやはり不自然であり、疑問を抱かざるを得ない。

そこで図4. 2のグラフの傾きに注目する。相関係数、RMS誤差ともCクラスのドライバーの存在比率が小さいときは傾きが小さいものの、存在比率の増加に伴い指数関数的に大きくなっていることに留意すれば、次のような解釈ができる。Cクラスのドライバーは確かに存在しているものの、完全情報を得ているドライバー（表2. 1のAクラスとBクラス）はCクラスのドライバーの経路選択行動の影響を受けながら経路選択行動をしているため、Cクラスのドライバーの存在比率が小さい場合ならば彼らの「誤った」経路選択行動を補うような形で経路選択を行うこととなり、結果として均衡に近い状態が実現しているのではないだろうか。一方Cクラスのドライバーの存在比率が大きい場合はAクラス及びBクラスのドライバーがCクラスのドライバーの経路選択行動を補うことができず、均衡状態になっていないと考えられる。

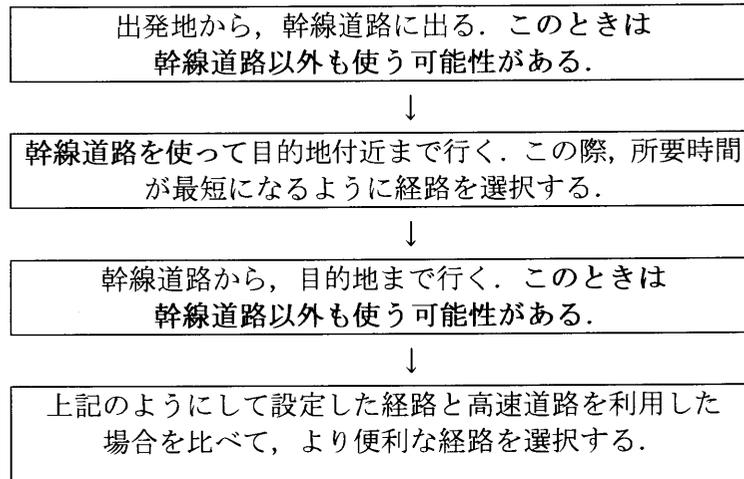
現在、ドライバーが入手する所要時間情報の不確実性を考慮した経路選択行動を表現できるモデルが多くの研究者によって提案されているが、上記の解釈が正しければ不完全情報下で経路選択を行うドライバーの比率が小さい場合はそのようなモデルを用いなくても従来の均衡配分モデルでも十分正確な現況再現が可能となる。一方、現況で所要時間情報が不完全なドライバーが多く存在するならば従来の均衡配分モデルでは不適切でありモデル改良が必要とされるが、図4. 2に示す結果から考えて、そのようなドライバーはそれほど多くないようである。

4. 3 ネットワーク情報の不完全性を考慮した均衡配分

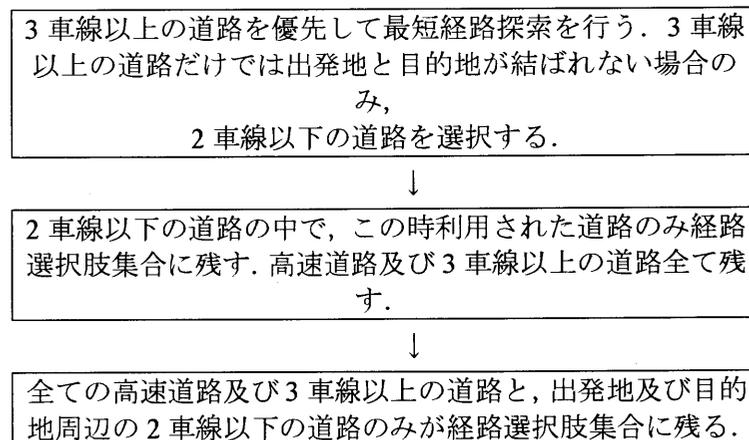
4. 3. 1 経路選択肢集合の限定方法

ネットワーク情報が不完全なドライバー（表2. 1のDクラス）が実際の交通流でどのように経路選択を行うかを考え、それに沿った方法で経路選択肢集合を限定する。

まず、実際の交通流におけるDクラスのドライバーの経路選択を考える。Dクラスのドライバーは以下のような順序で経路選択を行っていると考えられる。



上記の経路選択経緯を考慮して、次のように経路選択肢集合を限定した。



Dクラスのドライバーについてはこのようにして限定した経路選択肢集合を用いて最短経路を選択させることで、不完全なネットワーク情報下での経路選択行動を表現する。

4. 3. 2 全ODペア・全旅行目的で存在比率を同一とした場合

Dクラスのドライバーの存在比率と現況再現性の関係をみるために、まず全ODペア・全旅行目的について同一の存在比率を用いて配分を行った。全てのドライバーの中で何%が不確実なネットワーク情報下で経路選択を行っているのか、その比率を0から1まで0.1間隔で変化させたときの現況再現性の変化をみた。4. 2節で行った均衡配分の結果から、Cクラスのドライバーの存在比率は0とした。D

Dクラスのドライバーの存在比率と現況再現性の関係を図4. 3に示す。

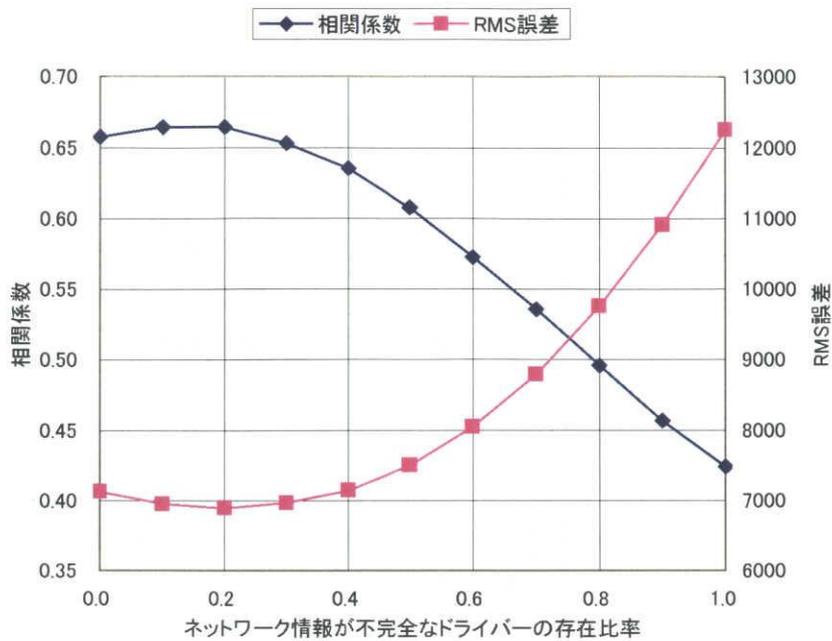


図4. 3 ネットワーク情報が不完全なドライバーの存在比率と現況再現性
その1: 全ドライバー中の存在比率

Dクラスのドライバーの存在比率が0.1のとき相関係数は最大となり、存在比率が0.2のときRMS誤差は最小となった。現況再現性を表す2種類の指標でそれぞれ異なる結果が出たが、相関係数は存在比率が0.1のとき0.6646、存在比率が0.2のとき0.6643でありほとんど変化がない。そのためRMS誤差による結果に従い、存在比率を0.2としたとき最も現況再現性が良いと考えられる。現況で不完全なネットワーク情報を基に、主として高速道路と幹線道路を経路選択肢として経路選択を行っているドライバーが20%程度存在していることになる。このときの観測交通量と配分交通量の相関係数及びRMS誤差を表4. 2に、また相関図を図4. 4に、高速道路と一般道それぞれについて示す。

表4. 2 ネットワーク情報の不完全性を考慮した均衡配分結果：相関係数とRMS誤差
(全ドライバー中の存在比率20%)

	相関係数	RMS誤差
高速道路	0.536	11438
一般道	0.590	6611
全道路	0.664	6892

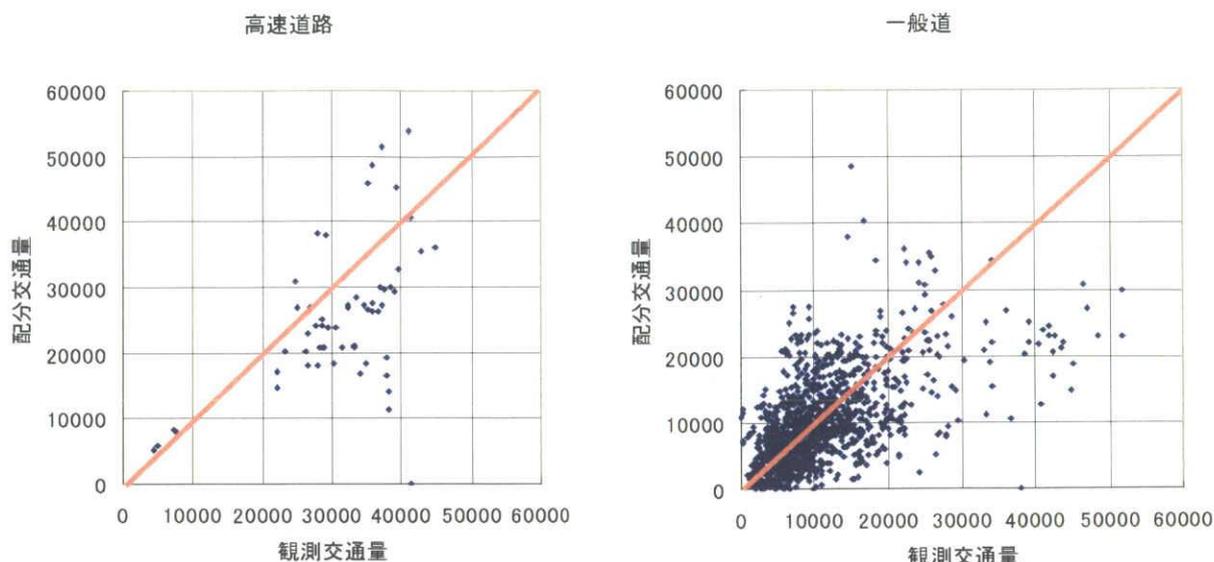


図4. 4 ネットワーク情報の不完全性を考慮した均衡配分結果：相関図
(全ドライバー中の存在比率 20%)

高速道路について相関係数と RMS 誤差をみると、完全情報下の均衡配分結果（表4. 1）と比べて現況再現性が低下している。高速道路について相関図をみると、図4. 1と比べて交通量が全体的に若干過小に配分されていることがわかるが、これによって高速道路における現況再現性が低下していると思われる。

高速道路の配分交通量が減少した原因として、ネットワーク情報の不完全性を考慮して行った経路選択肢集合の限定が考えられる。多くの2車線以下の道路が経路選択肢集合から削除されたために、高速道路のオンランプに到達するまでに完全情報下と比べて遠回りしなければならず、高速道路を利用した場合の所要時間が増加したことで最短経路として選択されにくくなったのではないだろうか。一方実際の交通流においては、出発前から高速道路を利用するつもりでいるドライバーは、ネットワーク情報が不完全であっても事前にオンランプまでの経路を調べてから出発している可能性がある。また、道路の混雑状況に応じて応急的に高速道路を選択する場合でも、一般にオンランプまでの順路が案内板などで道路沿いに表示されているため、2車線以下の道路も利用してオンランプまで到達することも十分考えられる。この点は今後の課題として、経路選択肢集合の限定方法を再検討する必要がある。

一般道について相関係数と RMS 誤差をみると完全情報下の均衡配分結果と比較して現況再現性が向上していることがわかるが、一般道についての相関図を図4. 1と比較しても大きな差は見受けられない。

4. 2節での結果と同様、ネットワーク情報が不完全なドライバーの存在比率が小さいときは図4. 3に示すグラフの傾きが小さくなっている。したがってネットワーク情報が不完全なドライバーの経路選択についても完全情報下で経路選択を行うドライバーがそれを補う形で経路を選択するために、ある程度均衡状態に近い状態が保たれていると考えられる。

4. 3. 3 OD ペア・旅行目的別に存在比率を与えた場合

一般に通勤・通学や業務などを目的としたドライバーはその地域を何度も走行するため詳しいネット

ワーク情報をもっており、自由目的のドライバーはその地域の走行経験が少なくネットワーク情報が不完全であると考えられる。そこで、自由目的以外のドライバーは完全情報を仮定し、自由目的のドライバーについてのみ D クラスのドライバーの存在を仮定する。自由目的のドライバーの中で何%が不確実なネットワーク情報下で経路選択を行っているのか、その比率を 0 から 1 まで 0.2 間隔で変化させたときの現況再現性の変化をみた。C クラスのドライバーの存在比率は 0 とした。なお、旅行目的が帰宅のドライバーについてはそれが自由活動からの帰宅なのか、通勤・通学や業務からの帰宅なのか判別することができない。そこで、目的が帰宅以外のドライバーの中での自由目的のドライバーがどれだけ存在するかを求め、帰宅目的のドライバーもその割合に従うものとした。

自由目的のドライバー中の D クラスのドライバーの存在比率と現況再現性の関係を図 4. 5 に示す。

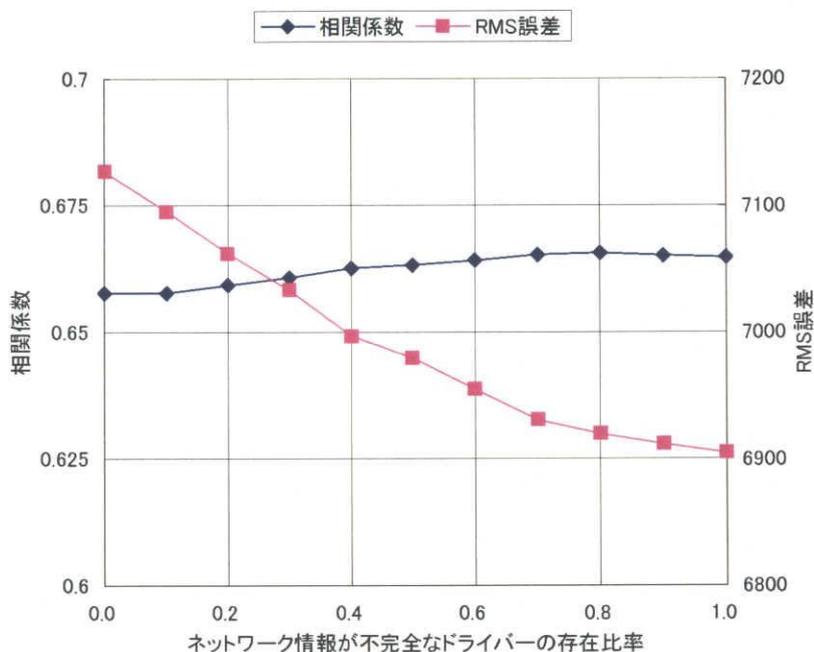


図 4. 5 ネットワーク情報が不完全なドライバーの存在比率と現況再現性
その 2 : 自由目的のドライバー中の存在比率

D クラスのドライバーの存在比率に対して相関係数は単調増加、RMS 誤差は単調減少となった。つまり旅行目的が自由活動であるドライバーの全てが不完全なネットワーク情報下で経路選択活動を行っているとしたとき、最も現況再現性が良いということになる。この結果は当初の予想と一致するものであり、容易に受け容れられる。

旅行目的が自由活動であるドライバーは全ドライバーの約 30% を占めるが、この点は興味深く、注目すべきである。4. 3. 2 では D クラスのドライバーの存在比率を全ドライバーの 20% としたときに現況再現性が最も良くなったが、ここでの結果では D クラスのドライバーの存在比率を自由目的のドライバーの 100%、つまり全ドライバーの 30% としたときが最も現況再現性が良く、相関係数、RMS 誤差とも 4.3.2 での結果とほぼ同等の値を得た。また 4. 3. 2 で存在比率 30% としたときと比べると、ここでの結果の方が現況再現性が良くなっている。どちらも D クラスの存在比率を全ドライバーの 30% としているにも関わらずこのような差が生まれていることから、やはり自由目的のドライバーはネッ

トワークについて詳しい知識がなく不完全情報下で経路選択を行っており、通勤・通学や業務が目的のドライバーはその日常性からネットワークの詳しい知識をもっているものと考えられる。

続いて、業務目的のドライバーについてもネットワーク情報の不完全性を考慮する。業務目的のドライバーは自由目的のドライバーに比べてネットワーク情報について詳しい知識をもっていると考えられるものの、その一部は不完全なネットワーク情報下で経路選択を行っている可能性も否定できないためである。自由目的のドライバー中の存在比率と業務目的のドライバー中の存在比率をそれぞれ 0.1 ずつ変化させたときの現況再現性の変化をみた。ただし存在比率の全ての組み合わせについて配分を行うと計算量が膨大となるため、ここでは現況再現性が最も良くなる時の存在比率の組み合わせを見極めるのに必要なものについてのみ配分を行った。Cクラスのドライバーの存在比率は 0 とした。

自由目的及び業務目的のドライバー中の D クラスのドライバーの存在比率と現況再現性の関係を図 4. 6 に示す。

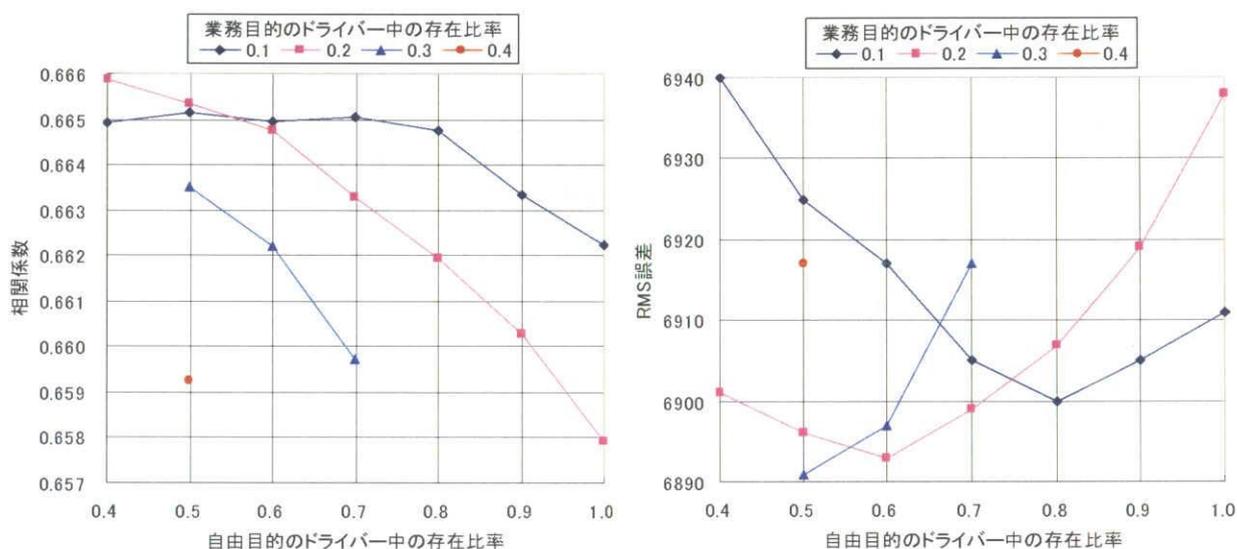


図 4. 6 ネットワーク情報が不完全なドライバーの存在比率と現況再現性
その 3：自由目的及び業務目的のドライバー中の存在比率

相関係数が最大となる時の存在比率と RMS 誤差が最小になるときの存在比率は一致しないが、総合的に考えて自由目的のドライバー中の存在比率 0.5, 業務目的のドライバー中の存在比率 0.2 としたときの現況再現性が最も良いといえる。

高速道路と一般道それぞれについて、自由目的のドライバーの 50%, 業務目的のドライバーの 20% が不完全なネットワーク情報下で経路選択を行っているとしたときの観測交通量と配分交通量の相関係数及び RMS 誤差を表 4. 3 に、また相関図を図 4. 7 に示す。

表 4. 3 ネットワーク情報の不完全性を考慮した均衡配分結果：相関係数と RMS 誤差
 (自由目的のドライバー中の存在比率 50%, 業務目的のドライバー中の存在比率 20%)

	相関係数	RMS誤差
高速道路	0.541	11167
一般道	0.586	6637
全道路	0.665	6896

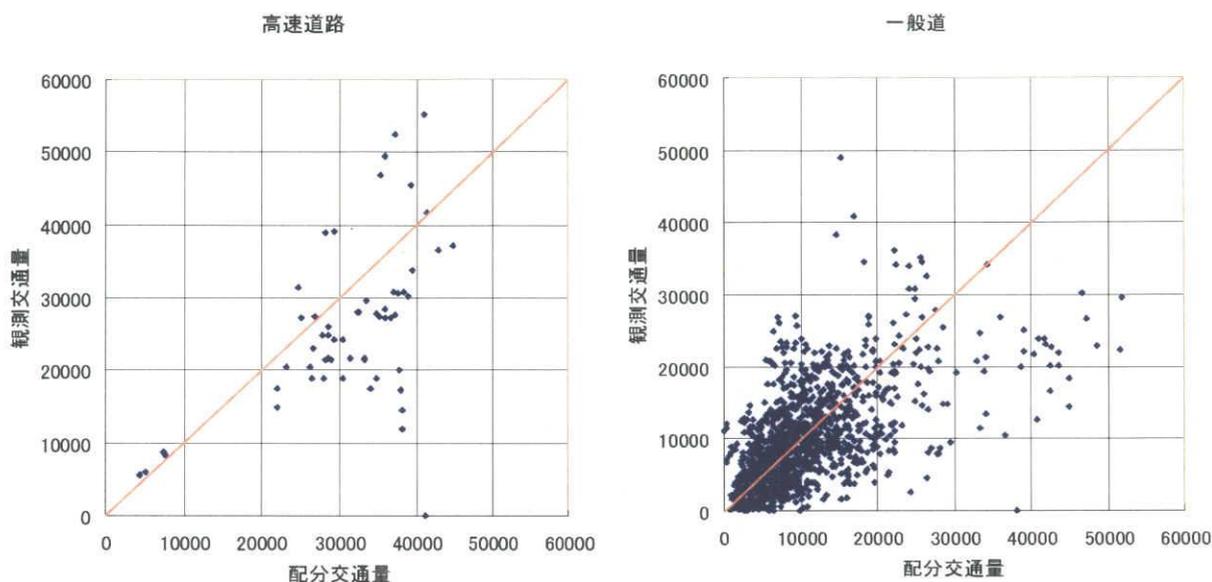


図 4. 7 ネットワーク情報の不完全性を考慮した均衡配分結果：相関図
 (自由目的のドライバー中の存在比率 50%, 業務目的のドライバー中の存在比率 20%)

相関図を見ると、図 4. 4 では高速道路において観測交通量に対して過小に配分される傾向があったが、ここではそれが若干改善されているように見受けられる。それに伴って高速道路についての相関係数や RMS 誤差も向上している。4. 3. 2 ではネットワーク情報が不完全なドライバーを考慮したことで高速道路利用が減少したが、ここでの配分では 4. 3. 2 での配分に比べてネットワーク情報が不完全なドライバーの総数は増加しているにもかかわらず高速道路利用が増加していることに注目すべきである。この結果から自由目的のドライバーに比べてそれ以外のドライバーの方が高速道路を利用する傾向が強いことが推測できるが、均衡配分で旅行目的によるネットワーク認知度の差を考慮することでこのような傾向がモデルに反映されるようになった。

4. 3. 4 OD 間距離に応じて存在比率を設定した場合

出発地から目的地までの距離が短いほどドライバーはネットワーク情報に詳しく、逆に距離が長いほどネットワーク情報の不完全性が増すと思われる。そこで、ネットワーク情報が不完全なドライバーの存在比率を OD 間距離に応じて設定する。

ネットワーク情報が不完全なドライバーの存在比率は OD 間距離に比例すると仮定すると、存在比率は(4.1)式で与えられる。

$$P_{rs} = \delta d_{rs} \quad (4.1)$$

P_{rs} : OD ペア rs 間の, ネットワーク情報が不完全なドライバーの存在比率

d_{rs} : OD ペア rs 間距離

δ : 比例定数

存在比率と OD 間距離の比例定数 δ を変化させたときの現況再現性の変化をみる. (4.1)式で $d_{rs} > 1/\delta$ のときは存在比率が 1 (100%) を超えてしまうが, そのときの存在比率は 1 として扱う. つまり(4.1)式を図示すると以下の図 4. 8 のようになる.

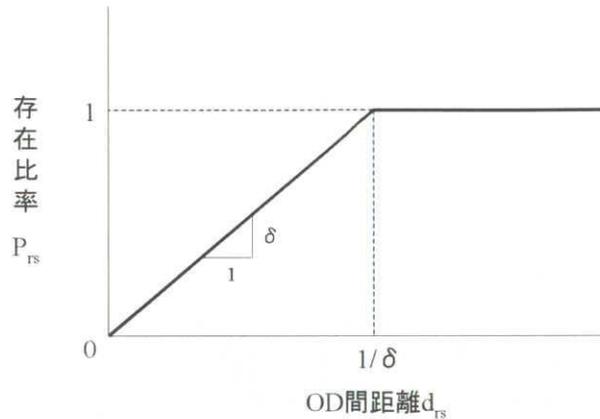


図 4. 8 存在比率と OD 間距離の関係

なおここでいう OD 間距離とは出発地と目的地の直線距離ではなく, 自由走行時間を基に探索した最短経路の距離である.

比例定数 δ と現況再現性の関係を図 4. 9 に示す.

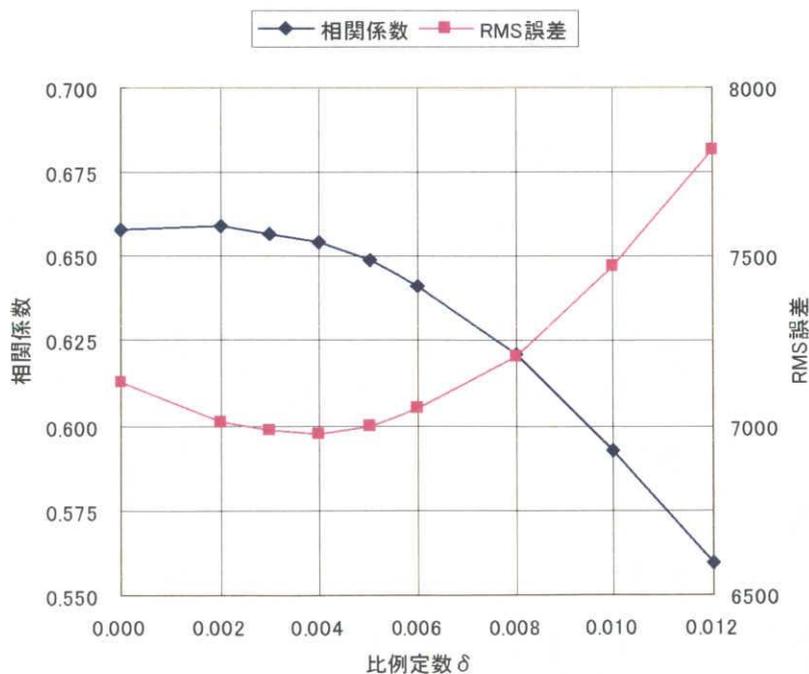


図 4. 9 比例定数 δ と現況再現性

$\delta=0.002$ において相関係数が最大となり、 $\delta=0.004$ においてRMS誤差が最小となった。 $\delta=0\sim 0.004$ 付近での相関係数の変化は非常に小さい。そのためRMS誤差による結果に従い、 $\delta=0.004$ のとき現況再現性が最も良くなると考えられる。このときの相関係数とRMS誤差を表4.4に示す。

表4.4 ネットワーク情報の不完全性を考慮した均衡配分結果：相関係数とRMS誤差
((4.1)式中の比例定数0.004)

	相関係数	RMS誤差
高速道路	0.514	11977
一般道	0.579	6660
全道路	0.654	6976

この結果は全ODペア・全旅行目的でDクラスのドライバーの存在比率を同一とした場合や、OD別・旅行目的別に存在比率を与えた場合のどちらよりも悪くなっているが、その差は非常にわずかなものである。

4.4 不完全情報を考慮した均衡配分モデルの評価

4.3節で、不完全情報下で経路選択を行うドライバーの存在を仮定することで現況再現性の向上を試みたが、所要時間情報が不完全なドライバーについてはその存在自体を表現することができず、ネットワーク情報が不完全なドライバーについては存在比率は明らかになったものの、現況再現性は若干の向上にとどまった。ただし、ネットワーク情報が不完全なドライバーについてはモデルの現況再現性が最も良くなる時の存在比率が図4.3、図4.5、図4.6にみられるように明確に現れていることから、均衡配分モデルにおいて不完全なネットワーク情報下で経路選択を行っているドライバーを考慮する必要があると思われる。少なくとも従来のモデルと同等あるいはそれ以上の現況再現性が得られるならば、ドライバーの経路選択行動をより正確に再現できるモデルを用いるべきではないだろうか。また、本研究では名古屋市を中心とする中京都市圏における通常の交通流に対する現況再現性を比較したため、結果として従来のモデルと比較して現況再現性に大きな差が生まれることはなかったが、例えば観光地での交通流や事故・災害発生時における道路封鎖などの突発的なネットワーク状態の変化した際の交通流では、ネットワーク情報が不完全なドライバーの存在比率は大きく増加するものと予想され、均衡状態とは大きく離れた状態になることが考えられる。そういった交通流を再現しようとする場合には従来の均衡配分モデルとの現況再現性の差がもっと大きくなる可能性があり、ネットワーク情報が不完全なドライバーを考慮することがより一層重要となる。

5. 情報提供効果の分析

5.1 所要時間の短縮

不完全情報下で経路選択を行っているドライバーに経路情報を提供することにより、ドライバーは最短経路を選択できるようになり、所要時間が減少すると期待される。ここでは4章で行った配分結果を比較することで所要時間短縮効果を分析する。

5. 1. 1 現況と情報提供後の定義

所要時間短縮効果を分析する際には現況と情報提供後を比較するため、それぞれの状態を次のように定義する。4. 2及び4. 3節での結果から、自由目的のドライバーの50%、業務目的のドライバーの20%が不完全なネットワーク情報下で経路選択を行っているときを現況とする。また、情報提供後は全てのドライバーが完全情報をもつと仮定し、完全情報下の確定的均衡配分による配分結果を情報提供後の状態とする。

5. 1. 2 総旅行時間の変化

現況での中京都市圏での1日の総旅行時間は1億2765万分、情報提供後は1億2349万分である。したがって情報提供によって総旅行時間が415万分減少したことになる。この総旅行時間の減少分を用いて、以下のような分析ができる。

①総旅行時間の減少分415万分は、配分対象地域である中京都市圏における情報提供による総便益であるといえる。時間価値57.5円を用いて貨幣換算すれば1日あたり2億3870万円/日である。1年間あたりで考えれば871億2509万円/年となる。

②この415万分の減少分を全OD交通量に均等に配分した場合0.72分/台・日となる。貨幣換算すれば42円/台・日である。1年間あたりの値に換算すると15,200円/台・年となる。

③この415万分の減少分のうち、371万分は現況で不完全なネットワーク情報下で経路選択を行っているDクラスのドライバーの旅行時間の減少によるものである。これは全体の89%を占めており、総旅行時間減少分のほとんどがDクラスのドライバーの交通行動が情報提供によって変更されたことに起因していると考えられることができる。この減少分をDクラスのドライバーに均等に配分すると3分/台・日、貨幣換算すれば174円/台・日となる。1年間あたりの値に換算すると63,300円/台・年である。情報受信機器を購入しようとするとき、この効用は大きな魅力である。現況でネットワーク情報が不確実なドライバーが15万円のVICS情報受信機器を購入する場合、その機器を3年程度使用し続ければ購入額に見合った効用が得られることになる。実際にはVICS情報の効用は所要時間減少以外にも様々あると思われるため、購入額が還元されるまでに必要な期間はさらに短くなる可能性がある。

④この415万分の減少分のうち44万分は現況でも完全情報下で経路選択を行っているドライバー（Aクラス及びBクラス）による減少である。これをAクラス及びBクラスのドライバーに均等に配分すると0.098分/台・日、5.6円/台・日である。1年間あたりの値に換算すれば2060円/台・年となる。Dクラスのドライバーが享受する効用に比べれば非常に小さい値であるが、DクラスのドライバーがVICS等により経路情報を入手することで、もともと完全情報を得ていたAクラス及びBクラスのドライバーも効用を得ることができ、情報提供は直接情報を受信しないドライバーも含む全てのドライバーに対して効用を与えることができるといえる。

5. 2 事故・災害時の迂回行動支援

走行中のドライバーに対して常に最新の経路情報を提供するVICSのようなシステムは、事故や災害などの突発的な事象によりネットワーク状態が変化したとき最もその効果を発揮するといわれる。日常的な混雑については日ごとの学習によってかなり正確な知識を得ることができるドライバーも存在す

る可能性があるが、事故などによる突発的な混雑について事前を知ることは情報提供システムがなければほとんど不可能だと考えられる。したがってドライバーはそのような混雑を回避することができずに巻き込まれ、さらなる混雑を生み出す悪循環となる。高度な情報提供システムが運用されれば事前に混雑情報をドライバーに知らせることができ、事故・災害発生地点に達する前に迂回行動をとることができる。ここではネットワークが突発的な事象により遮断された状態を再現し、情報提供によって迂回行動がどのように支援されるか、また所要時間はどの程度短縮されるかをみる。

5. 2. 1 迂回行動のモデル化

突発的にリンクが遮断された場合、ドライバーは事前に情報提供を受けなければ遮断された地点に到達するまでリンクが遮断されていることを知ることはできない。そこで初めて迂回行動を行うが、このような応急的な迂回行動では必然的に代替経路の選択肢は非常に限定されたものとなり、ほぼ選択の余地はないものと考えられる。この場合は迂回路の混雑状況にかかわらずその迂回路を選択せざるを得ず、部分的に Flow Independent な状態になる。このことを考慮して、現況における迂回行動を以下のようにモデル化する。

ドライバーが最短経路を選択しようとするとき、実際には途中のリンクが遮断されていてもドライバーはそれを認知していない。したがって最短経路探索は通常のネットワーク状態に基づいて行う。すると本来遮断されているリンクにも交通量が配分されることになるが、遮断されているリンクに配分された交通量を、あらかじめ指定した迂回路に交通量を配分し直すことで迂回行動を表現する。

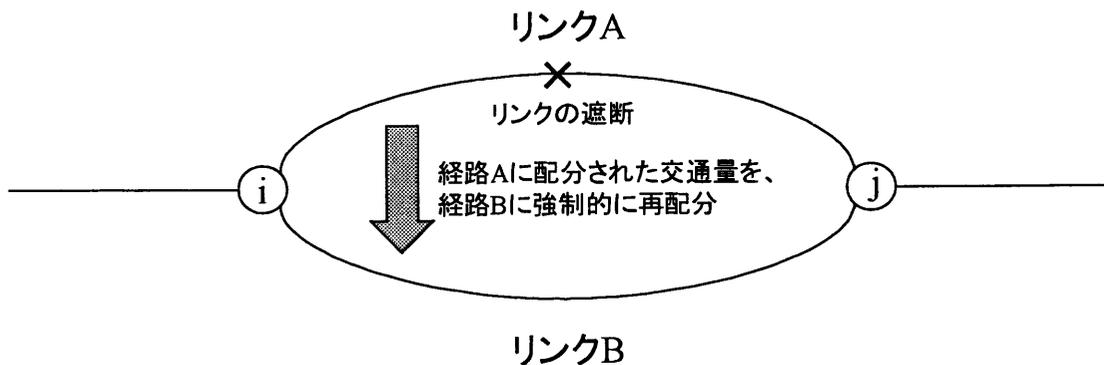


図5. 1 応急的な迂回行動のモデル化

図5. 1に示すネットワークにおいてリンクAが遮断されており、リンクBをその迂回路として設定する。最短経路探索はリンクAも利用可能であるとして行い、もしリンクAが最短経路の一部として選択され、交通量が配分された場合はその交通量をそのままリンクBに配分し直す。このような操作によって、当初リンクAを利用するつもりだったドライバーがノードiまで到達した時点で初めてリンクAが遮断されていることを知り、リンクBに迂回せざるを得なくなる状態を再現できる。

一方、情報が提供されている場合はドライバーは事前にリンクの遮断についての情報を得ることができ、より効率的な迂回行動をとることができる。情報提供を受けたドライバーは遮断されたリンクを初めから経路選択肢として認識せずに最短経路を選択することになる。したがって遮断されたリンクを削

除した状態で最短経路探索を行うことで情報提供下の迂回行動を表現できる。

5. 2. 2 リンク遮断箇所と迂回行動支援効果

情報提供による迂回行動支援を分析するために、交差点での事故による封鎖を仮定する。封鎖された交差点（ノード）につながるリンクは遮断され利用不可能とする。封鎖する交差点として名古屋市内の2ヶ所を想定し、それぞれについて分析を行った。

1) 名古屋市中区, 「太閤通3」交差点を封鎖した場合

交差点付近のネットワークを図5. 2に示す。

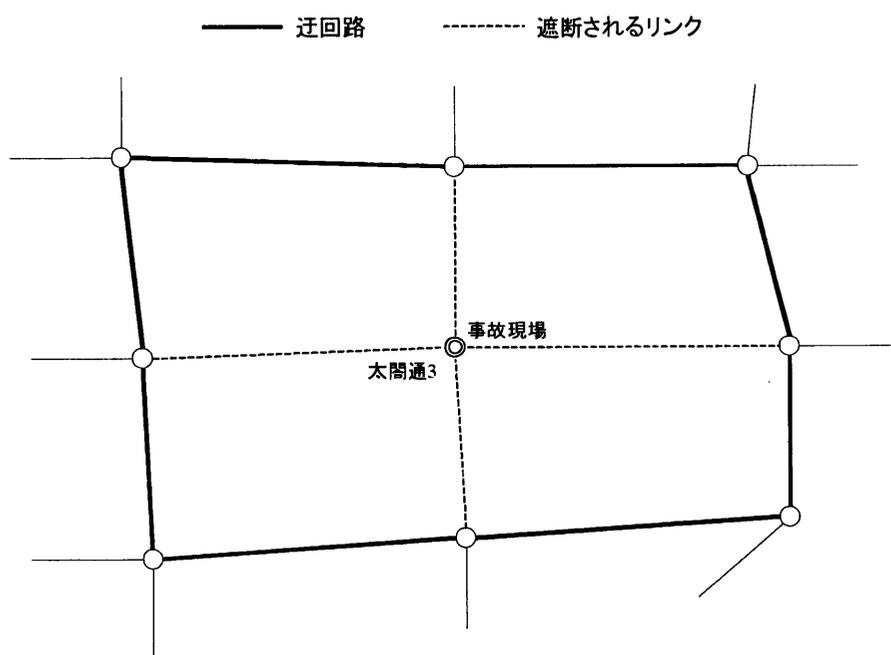


図5. 2 名古屋市中村区, 「太閤通3」交差点付近のネットワーク

この交差点は名古屋駅に近く都心に位置する比較的大きな交差点であり、現実においても事故多発地点である。迂回路として設定された周辺道路は主として2車線の道路である。この交差点での事故を想定し、5. 2. 1に示したモデルを用いて現況と情報提供後それぞれについて均衡配分を行った。

迂回路についてみると、情報提供前の総旅行時間39万分が情報提供後には19万分に、20万分減少した。情報提供前の交通量25万台が情報提供後には14万台に、11万台減少した。また、事故による交差点の封鎖がない場合（完全情報下）の総旅行時間は13万分、交通量は11万台である。これらの値は以下のように分析することができる。

①迂回路の交通量、総旅行時間も減少していることから、交差点が封鎖されているという情報を提供したことにより応急的な迂回行動が減少し、出発地から目的地までを総合的に捉えた最短経路選択が行われるようになり、その結果迂回路の交通量が減少したといえる。

②事故が発生したことにより旅行時間26万分、貨幣価値にして1514万円の損失があるが、リンク遮断の情報を提供することでその損失の約78%にあたる20万分、1179万円の損失が解消されることになり、事故による損失は58,000分、335万円に抑えられる。これは中京都市圏全体での、情報提供による便益といえる。

③この旅行時間減少による効用は情報提供後に迂回路を利用するドライバーが享受するものと考え、1台あたり1.4分/台となる。さらにこの値を1kmあたりに換算すれば3分/台・kmとなる。仮に情報提供後にリンクを時速50kmで走行できるとすると、情報提供前は混雑のため時速14km程度で走行しなければならなかったことになる。なお、時間価値を用いて貨幣換算すれば174円/台・kmとなる。

2) 名古屋市西区、「浅間町」交差点を封鎖した場合

交差点付近のネットワークを図5.3に示す。

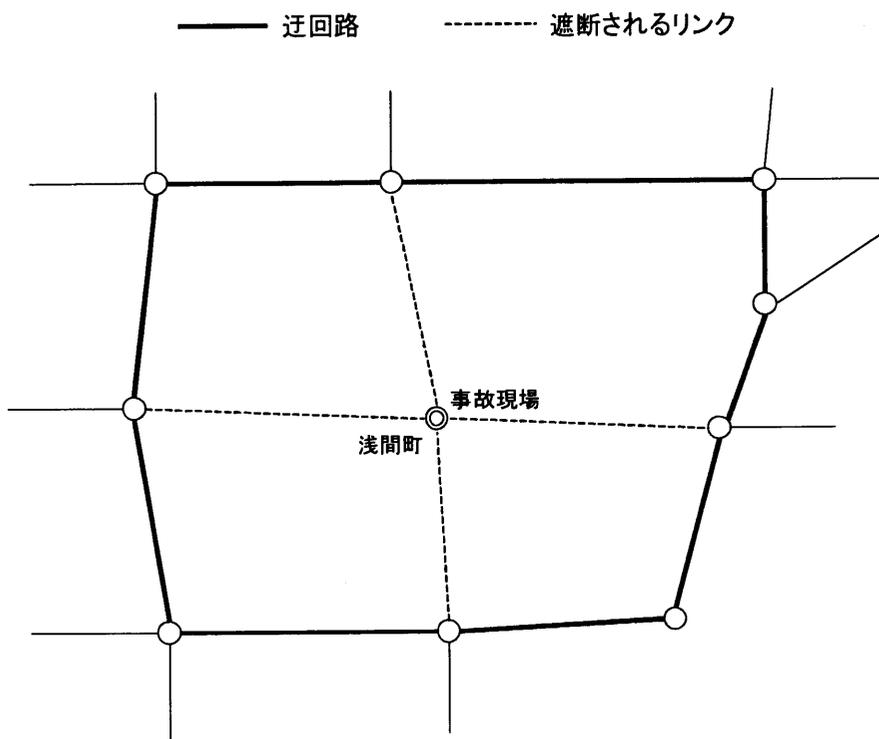


図5.3 名古屋市西区、「浅間町」交差点付近のネットワーク

この交差点は1)の「太閤通3」交差点に比べて小さい交差点であるが、迂回路として設定された周辺道路は主として4車線以上の道路である。この交差点での事故を想定し、5.2.1に示したモデルを用いて現況と情報提供後それぞれについて均衡配分を行った。

迂回路についてみると、情報提供前の総旅行時間40万分が情報提供後には30万分に、10万分減少した。情報提供前の交通量32万台が情報提供後には25万台に、7万台減少した。また、事故による交差点の封鎖がない場合（完全情報下）の総旅行時間は19万分、交通量は16万台である。この変化は以下のように分析することができる。

- ①「太閤通3」交差点での分析と同様に迂回路の交通量、総旅行時間も減少していることから、交差点が封鎖されているという情報を提供したことにより応急的な迂回行動が減少し、出発地から目的地までを総合的に捉えた最短経路選択が行われるようになり、その結果迂回路の交通量が減少したといえる。
- ②事故が発生したことにより旅行時間21万分、貨幣価値にして1231万円の損失があるが、リンク遮断の情報を提供することでその損失の約53%にあたる11万分、648万円の損失が解消されることになり、事故による損失は10万分、583万円に抑えられる。これは中京都市圏全体での、情報提供による便益といえる。

③この旅行時間減少による効用は情報提供後に迂回路を利用するドライバーが享受するものと考えられると、1台あたり0.41分/台となる。さらにこの値を1kmあたりに換算すれば0.75分/台・kmとなる。仮に情報提供後にリンクを時速50kmで走行できるとすると、情報提供前は混雑のため時速30km程度で走行しなければならなかったことになる。なお、時間価値を用いて貨幣換算すれば43円/台/kmとなる。これらの2交差点での分析結果を比較すると、総じて情報提供によって得られる便益は「太閤通3」交差点の方が大きい。これは主として、遮断されたリンクの迂回路として設定した周辺道路の規模・可能交通容量による差であると考えられる。両交差点とも交差する道路の現況観測交通量は昼間12時間あたりそれぞれ平均17,062台、16,830台と大きな差はない。通常のネットワーク状態での配分交通量も昼間12時間あたりそれぞれ平均10,688台、13,352台である。しかし迂回路として利用される周辺道路が「太閤通3」交差点の場合は主として2車線の道路であり可能交通容量が比較的小さい。そのため事故発生時の応急的な迂回交通によって混雑が発生した場合と情報提供により迂回行動が支援された場合の差が大きくなっているのではないかと考えられる。一方「浅間町」交差点では周辺道路が主として4車線以上の道路であるため可能交通容量が大きく、混雑による影響が比較的小さくなっていると考えられる。

5. 3 情報提供効果の総合的評価

5. 1及び5. 2節でみたように、ネットワークを走行中のドライバーに情報を提供することにより大きな便益が得られることがわかる。また、本研究では主として旅行時間の短縮を貨幣換算して便益として扱ったが、その他にも旅行時間の短縮により燃料消費の減少や自動車への負担減少、さらには排出ガスの減少による環境保護への寄与など、情報提供により導かれる2次的、3次的な便益も考えれば高度な情報提供システムの早期運用が強く望まれる。

6. 結論

6. 1 本研究の成果

本研究の成果を以下のまとめる。

- 1) 経路情報の不完全性を考慮した均衡配分を行い、現況再現性をみることで不完全なネットワーク情報下で経路選択を行っているドライバーの存在を明らかにした。旅行目的が自由活動であるドライバーの全てが不完全なネットワーク情報下で経路選択を行っているとしたときに現況の交通流に最も近い状態であると考えられ、その存在比率は全ドライバーの21%程度である。
- 2) 所要時間情報が不完全なドライバーも存在していると考えられるが、本研究での均衡配分ではその存在を表すことができないことがわかった。完全情報を得ているドライバーがそのようなドライバーの影響を受けながら経路選択を行うために、結果として均衡状態に近づいているためと思われる。
- 3) 不完全な経路情報の下で経路選択を行っているドライバーに情報を提供することで得られる便益を明らかにした。その便益は中京都市圏全体で1年間あたり871億2509万円であり、情報提供を受けたドライバーに均等に配分すると15,200円となる。
- 4) 事故・災害等の突発的な事象によりネットワークの一部が遮断されたとき、情報提供を行って迂回行

動を支援したときの便益を明らかにした。遮断されたリンクの迂回路として利用される道路の可能交通容量が小さいほど大きな便益が得られることがわかった。

6. 2 今後の課題

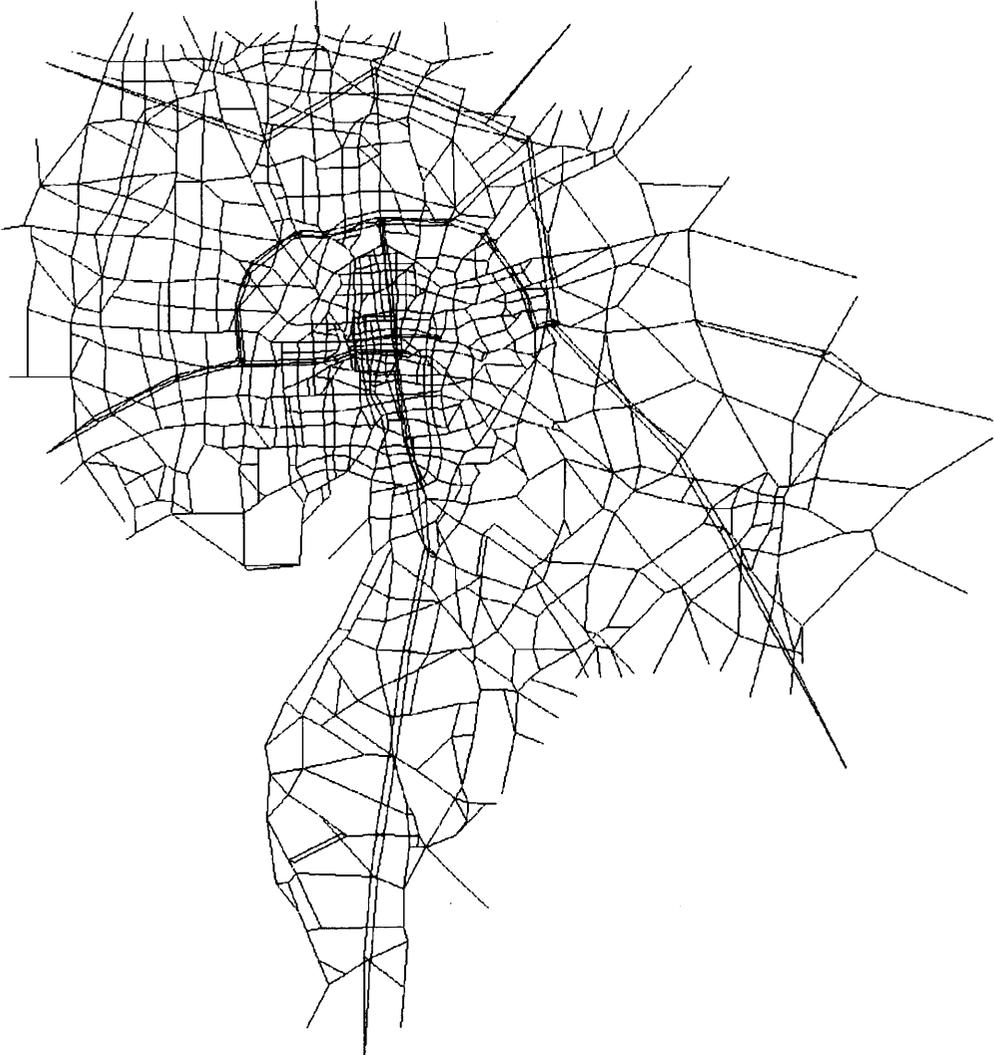
本研究を進めるにあたって想起された、今後検討すべき課題を以下に挙げる。

- 1) 経路情報が不完全なドライバーの存在比率を求める上で、本研究では存在比率が旅行目的及び OD 間距離に関係しているものと考えた。本研究により双方が関係していることが裏付けられる結果が得られたが、旅行目的と OD 間距離を別々に扱うのではなく双方の影響を反映した方法で存在比率を求めた方がよいと思われる。また、OD 間距離と存在比率が比例するものと仮定したが、比例関係以外の関係についても検証する価値はある。
- 2) ネットワーク情報が不完全なドライバーは利用できるリンクがかぎられているため、高速道路オンランプに到達するまでにコストがかかり高速道路に過小に配分される結果となった。しかし実際には高速道路のネットワーク認知度は非常に高く、オンランプまでの経路も地図や道路案内標識等により認知していると思われる。この点を考慮して、利用可能な経路選択肢集合の限定を行う必要がある。
- 3) 本研究ではドライバーが提供された情報に常に従うという仮定をおいたが、情報が示す最短経路を選択せずに他の経路を選択してしまうようなドライバーの存在は否定できない。本来ならばそのようなドライバーをも考慮した上で情報提供効果を分析することが望まれる。

参考文献

- 1) 名古屋高速道路公社，財団法人名古屋高速道路協会：名古屋高速道路の交通量配分手法に関する実証的調査研究委員会報告書，pp.47-49，1997.
- 2) 松井寛，山田周治：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.9-16，1998.
- 3) 羽藤英二，朝倉康夫，平井千智：不確実性下の意思決定を考慮した逐次的情報参照モデル，土木学会論文集，No.660/IV-49，pp.27-37，2000.
- 4) Yang, H.: Multiple Equilibrium Behaviors and Advanced Traveler Information Systems With Endogenous Market Penetration, Transportation Research B, Vol.32, No.3, pp.205-218, 1998.
- 5) 日本道路協会：道路の交通容量，1984.
- 6) 溝上章志・松井寛・可知隆：日交通量配分に用いるリンクコスト関数の開発，土木学会論文集，No.401/IV-10，pp.99-107，1989.
- 7) 越智大介・朝倉康夫・柏谷増男：交通ネットワーク信頼性評価のための経路選択モデルの改良，土木計画学研究・講演集，No.22(2)，pp.527-530，1999.
- 8) 土木学会：交通ネットワークの均衡分析，1998.
- 9) 本田秀太・溝上章志：多種流確率均衡モデルに基づいた VICS 情報の利用率予測と便益評価，土木計画学研究・講演集，No.23(2)，pp.759-762，2000.
- 10) 三村健太郎：道路交通量配分における均衡配分手法の適用性とネットワーク認知に関する研究，名

古屋大学卒業論文, 2000.



図A. 1 配分対象地域のネットワーク図

付 録

関 連 資 料

1. 高速道路を含む道路網における配分交通量予測
法の比較
2. ファジィ的ニューラルネットワークを用いた微
視的道路交通シミュレーションモデルの開発

高速道路を含む道路網における配分交通量予測法の比較

1 序論

今日、広く用いられている交通量配分モデルは、そのモデルの利用目的が主として道路網計画策定のための需要予測にあることから、通常一日交通量を対象としている。しかし、実際には同一の道路区間においてもその利用のされ方には時間的に大きな変動がある。例えば、朝夕のピーク現象に見られるように、特定の時間帯だけが混雑し、交通の円滑さが著しく損なわれる道路区間も存在する。道路網上の実際の交通流をできるだけ忠実に再現するという観点から言えば、今なお、多くの問題点を抱えており、今後、道路網の効率的な運用を図り、環境や経済面などから道路網の総合的評価を行うためには、時間を追ってできるだけ忠実に再現できるようなモデルの開発が期待されている。

交通量配分モデルの中で近年利用者均衡配分モデルが注目されている。従来から広く用いられてきた分割配分法に代表される非均衡型配分モデルに比べて、「起終点間に存在する可能な経路のうち、利用される経路については所要時間が等しく、利用されないどの経路のそれよりも小さい。」というWardrop(1952)の等時間原則に基づき、リンクパフォーマンス関数を介した道路ネットワーク上での需要と供給の均衡理論に基づいているから論理的であり、説得力がある。

また、高速道路など有料道路は一般道路に比べて数多くの特異な性質をもつ。例えば、走行速度が速い、道路容量が大きい、人や物の飛び出しや信号などがなく走りやすいなどあるが、一番大きいものは料金が必要であることである。これらは何らかの処理をしない限り、一般道路と対等に考えることはできない。ところで、利用者均衡配分モデルでは通常所要時間で均衡状態が表される。したがって、有料道路を含む道路ネットワークでは、リンクに時間の他にコストの要因が加わるため、適用できるように改良しなくてはならない。この処理方法として、本研究では料金抵抗法、高速転換率法をそれぞれ用いる。

本研究では、名古屋市とその周辺地域を対象とした高速道路を含むネットワークを用い、朝のピーク時間帯を対象とする。有料道路の処理方法として料金抵抗法、高速転換率法の2つの方法を用い、モデルの現況再現性などについて比較、検討することを目的とする。

2 利用者均衡配分モデルの概観

2.1 需要変動型利用者均衡モデルの考え方

需要予測に用いる交通量配分はWardropの等時間原則が基本となっている。この原則に基づいて、交通流が与えられると、最終的にある均衡状態に達すると考えられる。このような状態を「交通均衡」と呼び、この時の交通量を「均衡交通量」と呼ぶ。

交通均衡配分問題を数理計画問題に置換したものが、Beckmannの需要変動型利用者均衡モデル(1956)である。このモデルは、Wardropの等時間原則に理論的に基づいており、現在最も主流となっているモデルである。基本的モデルは、以下のようである。

$$\min Z = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega - \sum_{ij} \int_0^{T_{ij}} D_{ij}^{-1}(\eta) d\eta \quad (2.1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_k h_{kij} = T_{ij} \quad (2.1a)$$

$$\sum_{ij} \sum_k \delta_{akij} h_{kij} = x_a \quad (2.1b)$$

$$h_{kij} \geq 0, T_{ij} \geq 0 \quad (2.1c)$$

t_a : リンク a のリンクパフォーマンス関数

$D_{ij}^{-1}(\eta)$: OD ペア ij 間の交通量需要関数の逆関数

x_a : リンク a の交通量

T_{ij} : OD ペア ij 間の総交通量

h_{kij} : OD ペア ij 間の経路 k の交通量

δ_{akij} : OD ペア ij 間の経路 k にリンク a が含まれるとき, 1
そうでないとき, 0

この式は交通ネットワークが供給しうる交通サービスの水準（トリップの所要時間）と、それに見合う交通需要が平衡するように交通量を求め、最終的に均衡交通量を与えることを意味している。この式の中で需要関数が大きな役割を果たすことから推測できるように、利用者の交通行動を適切な形でモデル化し、交通需要予測と利用者便益評価が一体化となったシステムを提供することを意図している。問題点としては、実用レベルで考える場合、交通需要は社会的現象であるため需要関数の特定化が非常に難しいということがある。

2.2 有料道路の処理方法

2.2.1 料金抵抗法

この方法はリンクの所要時間と所要コストを統合した一般化交通費用を用いる方法である。つまり、時間価値を用いて所要時間を所要コストに、あるいはその逆に換算してやることにより料金と時間を統合する方法である。これにより各 OD 間のトリップを平面道路利用交通量と高速道路利用交通量に分離する必要がなく、より現実に即している。ところが、単一尺度に統合するときに必要となる時間価値には明らかに個人差があり、仮にこの影響を無視して平均値を用いることは非現実的な配分パターン結果をもたらす可能性がある。

2.2.2 高速転換率法

現在実務レベルで最も広く用いられている処理方法である。一般道路は高速道路と競合する最適路線が一本選ばれ、この二本の道路の所要時間、距離、コスト、あるいはこれらを組み合わせた指標を変数として、高速道路の利用率を示した転換率曲線から両路線の分担率が求められる。

転換率曲線を用いて各 OD 間のトリップを平面道路利用トリップと高速道路利用トリップにあらかじめ分離した後、それぞれに配分計算を行う方法である。一般的に高速転換率式は以下のようなものが用いられる。

$$P = \left[\frac{1}{1 + \alpha T^\gamma} - \beta \right] \delta \quad (2.2)$$

P : 高速道路への転換率

α, β, γ : パラメータ

δ : 短トリップ時の低減率

説明変数 T は各 OD 間の高速道路利用経路および平面道路利用経路の所要時間比 (OD 間所要時間比)、もしくは競合する区間の所要時間比 (競合時間比) が用いられる。

2.3 時間価値の考え方

前節で示した有料道路の処理方法であるが、いずれの手法においても時間価値が必要である。時間価値は所得接近法などから指標として得る場合もあるが、地域特性、利用目的などに大きく左右されるため、おもに観測された交通状態から推定されることが多い。しかし、どのような方法を用いる場合においても観測量より時間価値を求める方法からは正確な時間価値が得られないという問題が指摘されている。

例えば、ある人が 600 円を支払って高速道路を利用し、所要時間を 10 分短縮したとする。その場合、観測者から見た時間価値は 60 円/分であるのだが、仮にその人が 10 分短縮するのに 900 円支払ってもよいと考えていた場合その人にとっての時間価値は 90 円/分なのである。逆に 10 分しか短縮できなかったが、実は 15 分短縮するつもりで高速を使用した場合にはその人にとっての時間価値は実際には 40 円である。

これは、観測値から時間価値を推定する場合に必ず付随する問題点であり、モデルの移転、拡張の際には必ず考慮しなければならない問題である。

3 本研究で用いるモデルの概要

3.1 既存研究とその改善点

尾関(1998)は、名古屋市を対象としたネットワークを用いて、マストラ網、都市高速道路を含む自動車交通網からなる総合交通体系の挙動を分析している。ピーク時を対象時間帯とし、有料道路の処理方法は高速転換率法を用いている。モデルから得られる時間価値は推定している。しかし、名古屋市内々交通のみを対象としており流入、流出交通量を考慮していない。本研究では高速転換率法のモデルとして尾関のモデルを基本とし、流入、流出交通量を考慮した自動車交通の挙動を分析する。

杉野(1998)は、名古屋市とその周辺地域を対象としたネットワークを用いて、自動車を大型車と普通車

とに分け、時間帯幅を 60 分として OD 修正法 (3.2 参照) を用いて、7時から19時の12時間交通量を推定している。有料道路の処理方法は、料金抵抗法を用いている。流入、流出交通量は考慮されている。しかし、モデルから得られる時間価値は推定しておらず、平成8年度第7回名古屋高速道路自動車起終点調査報告書を参考に、アンケートから得られた時間価値を用いている。本研究では料金抵抗法のモデルとして杉野のモデルを基本とし、ピーク時の交通量とともにモデルから得られる時間価値を推定する。

また、既存研究のゾーン分割では名古屋高速道路の都心環状線が1つのゾーン内に含まれていたり、名古屋市郊外が簡潔されすぎているため、良い結果が得られていない。そこでゾーン分割、ネットワークについても改善する。

3.2 料金抵抗法のモデル

本研究の料金抵抗法のモデルは次のようである。

時間価値を用いて所要コスト(料金)を所要時間に換算し、換算された所要時間を高速道路のリンクパフォーマンス関数に加える。

また単位時間を短く設定し、状態方程式によって交通流の保存条件を満足させながら等時間原則に従う時時刻刻の交通量を求める動的交通量配分手法が開発されている。1つの方法として交通流の保存条件のための修正をOD交通量レベルで行うモデル(以下、OD修正法と呼ぶ)がある。このOD修正法はBeckmann型最適化問題として定式化することによって修正後の等時間原則および解の一意性が証明されている。このモデルは以下の仮定を前提としている。

仮定1：時間帯の幅(U) > 最長トリップ時間を満足する。

仮定2：各OD交通量はセントロイドから同一時間帯中で一様に発生し、また経路上に一様に分布する。

仮定3：内々交通量はゾーン内道路網に一様に分布する。

互いに隣り合う時間帯での交通流の保存条件を満足するための修正法について説明する。今、通常の静的配分によってn時間帯におけるODペアij間経路kの経路交通量を与えられているものとする。しかし、そのn時間帯の終端時刻においては、仮定2よりその時間帯中に出発ノードから出発した車の一部はまだ経路上に存在しており、経路交通量の一部はまだ経路上の全てのリンクを通過しているわけではない。この通過していない交通量を次の(n+1)時間帯にOD交通量レベルで修正を行う。例えば、n時間帯ではOD交通量 $q_{ij}^{(n)}$ に前時間帯の修正交通量 $\overline{q_{ij}^{(n-1)}}$ を加え、現時間帯の修正交通量 $\overline{q_{ij}^{(n)}}$ を除いて配分すればよいことになる。OD修正法における修正後のOD交通量を $g_{ij}^{(n)}$ とすると、 $g_{ij}^{(n)}$ は次式のようなになる。ただし $\mu_{ij}^{(n)}$ はOD間の最短経路所要時間を示す。

$$\begin{aligned} g_{ij}^{(n)} &= \overline{q_{ij}^{(n-1)}} + q_{ij}^{(n)} - \overline{q_{ij}^{(n)}} \\ &= \overline{q_{ij}^{(n-1)}} + q_{ij}^{(n)} - q_{ij}^{(n)} \mu_{ij}^{(n)} / 2U \end{aligned} \quad (3.1)$$

等時間原則を配分規範とするOD修正法は藤田(1993)によって以下に示すBeckmann型最適化問題の解として定式化された。

$$\min Z^{(n)} = \sum_a \int_0^{x_a^{(n)}} t_a(\omega) d\omega - \sum_{ij} \int_0^{g_{ij}^{(n)}} \frac{2U}{q_{ij}^{(n)}} \left(\overline{q_{ij}^{(n-1)}} + q_{ij}^{(n)} - \varphi \right) d\varphi \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned}
& \sum_k h_k^{(n)} = g_{ij}^{(n)} \\
\text{s.t.} \quad & h_{kij}^{(n)} \geq 0 \\
& x_a^{(n)} = \sum_{ij} \sum_k \delta_{akij}^{(n)} h_{kij}^{(n)}
\end{aligned} \tag{3.2a}$$

$x_a^{(n)}$: n 時間帯におけるリンク a のリンク交通量

t_a : リンク a のリンクパフォーマンス関数

$q_{ij}^{(n)}$: n 時間帯における OD ペア ij 間の OD 交通量

$g_{ij}^{(n)}$: n 時間帯における OD ペア ij 間の交通流の保存条件のための修正後の OD 交通量

$h_{kij}^{(n)}$: n 時間帯における OD ペア ij 間経路 k の経路交通量

$\overline{q_{ij}^{(n-1)}}$: (n-1) 時間帯における OD ペア ij 間の修正交通量で, n 時間帯では定数

$\delta_{akij}^{(n)}$: リンク a が OD ペア ij 間 n 時間帯の経路 k に含まれるとき, 1
そうでないとき, 0

本研究では, 朝のピーク時間帯 (7~9 時) において時間帯の幅を 60 分とした。

3.3 高速転換率法のモデル

本研究の高速転換率のモデルは次のようである。

自動車利用トリップを高速道路経路利用と平面道路経路利用に分離する高速転換率であるが, これを内生化した利用者均衡配分モデルは以下のような Beckmann 型最適化問題の解として松井, 上田 (1997) によって, 定式化された。

$$\min Z = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \sum_{ij} \int_0^{T_{ij}^e} \frac{1}{\alpha_e} \left\{ \ln \frac{\eta}{T_{ij}^C - \eta} + \beta_e \right\} d\eta \tag{3.3}$$

$$\text{s.t.} \quad x_a = \sum_{ij} \sum_k \delta_{akij} h_{kij}^g + \sum_{ij} \sum_m \delta_{amij} h_{mij}^e \tag{3.3a}$$

$$T_{ij}^e = \sum_k h_{kij}^e \tag{3.3b}$$

$$T_{ij}^g = \sum_k h_{kij}^g \tag{3.3c}$$

$$T_{ij}^C = T_{ij}^e + T_{ij}^g \tag{3.3d}$$

$$h_{kij}^g \geq 0, h_{mij}^e \geq 0, T_{ij}^C \geq 0 \tag{3.3e}$$

t_a : リンク a のリンクパフォーマンス関数

x_a : リンク a の交通量

h_{kij}^g : OD ペア ij 間の平面道路利用経路 k の交通量

h_{mij}^e : OD ペア ij 間の高速道路利用経路 m の交通量

$\delta_{akij}, \delta_{amij}$: OD ペア ij 間の経路 k (m) にリンク a が含まれるとき, 1
 そうでないとき, 0

$T_{ij}^C, T_{ij}^e, T_{ij}^g$: OD ペア ij 間の自動車利用交通量, 高速道路利用交通量, 平面道路
 利用交通量

α_e, β_e : パラメータ

自動車における平面道路利用及び高速道路利用トリップの分離は、手段分担の際に一般的に用いられる Beckmann モデル型の分担-配分統合モデルと基本的に同型である。通常モデルと異なる点は平面道路利用経路と高速道路利用経路においてその経路が完全に分離しているわけではなく、一部リンクを共有している点にある。すなわち、高速道路利用トリップはその高速道路までのアクセス区間において、平面道路利用トリップと同一のリンクを使用することにより相互に干渉する。

かつて Fisk and Nguyen が考察したように、異なるモードがその経路上において一部リンクを共有する場合、ヤコビ行列の対称性、すなわち

$$\frac{\partial t_a^g}{\partial x_a^g} = \frac{\partial t_a^e}{\partial x_a^e} \quad (3.4)$$

が成立しない限り Beckmann モデルの数理最適化問題として解くことは不可能である。しかし今回においては、高速道路利用トリップ、および平面道路利用トリップともに共有リンクにおいては同一のリンクパフォーマンス関数を使用しており、

$$x_a = \sum_{ij} \sum_k \delta_{akij} h_{kij}^g + \sum_{ij} \sum_m \delta_{amij} h_{mij}^e \quad (3.4a)$$

$$x_a^g = \sum_{ij} \sum_k \delta_{akij} h_{kij}^g \quad (3.4b)$$

$$x_a^e = \sum_{ij} \sum_m \delta_{amij} h_{mij}^e \quad (3.4c)$$

であるため、式(3.4)のヤコビ行列の対称性は保証され、通常の数値最適化問題として解決することができる。

なお、リンクパフォーマンス関数が単調増加関数であり、逆需要関数が単調減少関数であるならば、解の唯一性についても通常的手段分担・配分統合モデルと同様、簡単に証明することができる。

また高速転換率であるが、実用化されている転換率は 2.2.2 で示した通り、通常 OD 時間比もしくは競合時間比が用いられる。本研究においてはロジットモデルを用いるため、そのまま実用化されている高速転換率を使用することはできないが、実用されている OD 時間比転換率に近い効用（本研究では最短利用経路所要時間）の比を考慮できる転換率として次のような式を用意した。（以下の式の導出方法については付録 A.1 に示す）

$$T_{ij}^e = T_{ij}^C \theta_{ij}^e \quad (3.5)$$

$$\text{転換率} : \theta_{ij}^e = \frac{1}{1 + \exp\{\alpha_e (\ln \lambda_{ij}^e - \ln \lambda_{ij}^g) + \beta_e\}} \quad (3.5a)$$

λ_{ij}^e : ODペア ij間の高速道路利用時の最短経路所要時間

λ_{ij}^g : ODペア ij間の平面道路利用時の最短経路所要時間

α_e, β_e : パラメータ

高速転換率法において、時間価値、高速転換率のパラメータの同定には、現況が利用者均衡状態にあると仮定して、交通需要予測モデルから得られた各OD交通量が実測値に近づくように、パラメータを同定するといった方法を用いた。

4 モデルの適用

4.1 ネットワークデータ、ODデータの概要

平成3年度に第3回中京都市圏パーソントリップ調査が実施された。本研究ではこの調査圏域と同一の地域を対象地域とした。これは名古屋市を中心とするおよそ50km圏域に相当する。ゾーン区分はパーソントリップ調査の小ゾーンを基本とし、名古屋市内については108ゾーン、名古屋市外は171ゾーンに分割することによって、対象地域を全部で279ゾーンに分割した。これにより、名古屋高速道路の都心環状線が1つのゾーン内に包含されるという問題は改善された。

配分対象道路ネットワークにおいては、平成6年道路交通センサスデータの指定市の主要市道を含む一般都道府県道以上の道路をネットワークとして設定した。道路交通センサスでは道路を7種類に分類しているが、本研究では4.2で述べるように、6種類に分類しそれぞれの種類ごとにリンクパフォーマンス関数を設定した。都市間、都市高速道路に関しては、東名高速道路、名神高速道路、東名阪自動車道、名古屋高速道路、及び知多半島道路を設定した。道路ネットワークは全部でノード数1304、リンク数4303であり、対象地域の一般道路網及び高速道路網にほぼ対応している。

ODデータは名古屋高速道路公社によって第3回中京都市圏パーソントリップ調査の平成3年OD交通量と平成27年の予想OD交通量を用い、中間補完により作成された、平成8年OD交通量を基本とした。

本研究は対象時間帯をピーク時としており、平成8年OD交通量をピーク時間帯別OD交通量に換算する必要がある。その方法は

「ODペア毎に時間帯別交通量の日交通量に対する比率は平成3年度と変わらない。」

と仮定して、日交通量に比率を乗ずることにより求める。(表-4.1参照)

表-4.1 ピーク時間帯の交通量

	H3交通量(台)	比率(H3)	H8交通量(台)
6時	119255	2.12%	139339
7時	630213	11.18%	734818
8時	548973	9.74%	640172
一日	5635079		6572611

また、本研究では道路ネットワークリンクについては上下方向で分離したリンクを設定しており、ピーク時には上下方向の混雑が平均化されることなく、最混雑時を考慮している。

車の平均乗車人員についても、パーソントリップ調査から得られる 1.3 人/台とした。

4.2 リンクパフォーマンス関数の設定

4.1 で述べたように、松井、山田の論文(1998)を参考にし、道路ネットワークのリンクを6種類に分類しそれぞれの種類ごとにリンクパフォーマンス関数を設定した。分類の規準は表-4.2 に示す。

表-4.2 道路の分類

道路種別	対応道路
都市間高速道路	国土開発幹線自動車道等
都市高速道路	都市高速道路
幹線多車線道路	4車線以上の一般国道と主要地方道（都道府県道，指定市市道）
幹線2車線道路	2車線一般国道と主要地方道（都道府県道，指定市市道）
準幹線多車線道路	4車線以上の一般都道府県道と指定市の一般市道
準幹線2車線道路	2車線一般都道府県道と指定市の一般市道

また、各道路のリンクパフォーマンス関数は次のようである。

都市間高速道路

$$t_a = 0.72 \left\{ 1 + 0.54 \left(\frac{q_a}{c_a} \right)^{3.3} \right\} \quad (\text{自由走行時間 } 83.3\text{km/h に相当}) (4.1)$$

都市高速道路

$$t_a = 0.86 \left\{ 1 + 0.40 \left(\frac{q_a}{c_a} \right)^{2.8} \right\} \quad (\text{自由走行時間 } 69.8\text{km/h に相当}) (4.2)$$

幹線多車線道路

$$t_a = 1.84 \left\{ 1 + 0.54 \left(\frac{q_a}{c_a} \right)^{2.4} \right\} \quad (\text{自由走行時間 } 32.6\text{km/h に相当}) (4.3)$$

幹線2車線道路

$$t_a = 1.58 \left\{ 1 + 0.44 \left(\frac{q_a}{c_a} \right)^{3.1} \right\} \quad (\text{自由走行時間 } 38.0\text{km/h に相当}) (4.4)$$

準幹線多車線道路

$$t_a = 2.13 \left\{ 1 + 0.41 \left(\frac{q_a}{c_a} \right)^{2.2} \right\} \quad (\text{自由走行時間 } 28.2\text{km/h に相当}) (4.5)$$

準幹線2車線道路

$$t_a = 1.72 \left\{ 1 + 0.49 \left(\frac{q_a}{c_a} \right)^{2.4} \right\} \quad (\text{自由走行時間 } 34.9\text{km/h に相当}) (4.6)$$

- t_a : 単位走行時間 (min/km)
- q_a : 時間交通量 (pcu/h)
- c_a : 時間交通容量 (pcu /h)

ここで時間交通容量であるが、道路交通センサスのデータを基に、「道路の交通容量」(1984)に記載されている道路区間の交通容量の算定式を採用し、計算した。計算結果を1車線に換算したものを表-4.3にした。結果を見ると、名古屋市内と市外とでは明らかに差があったため、時間交通容量を道路種別のほかに市内、市外で分類した。

表 - 4.3 時間交通容量

道路種別	時間交通容量(pcu /h)	
	市内	市外
都市間高速道路	2200.0	
都市高速道路	1948.0	
幹線多車線道路	782.4	1060.8
幹線2車線道路	729.4	908.2
準幹線多車線道路	781.5	958.1
準幹線2車線道路	741.2	900.8

このように、各リンクの単位走行時間に距離を乗ずることにより、リンクパフォーマンス関数を得ることができる。

4.3 有料道路の仮想リンクの設定

有料道路には料金が必要であるため、ネットワーク作成においても何らかの処理をする。その方法として仮想リンク（ランプウェイ等）を設定し、距離を0(km)とし所要コスト(料金)をかけた。

都市高速道路は全区間料金一定であるため、初乗り時のみに所要コスト(料金)をかけた。都市間高速道路は全区間一定ではなく、距離によって料金が増加する。日本道路公団によると、原則として普通車の料金は次の式により算定されている。

$$\text{料金水準} = 24.6 \text{ 円/km} + 150 \text{ 円}$$

(料金水準に消費税を乗じ、50円単位となるように24捨25入する)

上のように料金を計算すると、ほとんどの区間において実際の料金と一致しなかった。しかし、±30円程度の差であり、そのままの料金を所要コストとした。

5 推定結果とその考察

5.1 料金抵抗法の結果とその考察

料金抵抗法の結果について述べる。配分結果は午前8時のものである。これは、交通量の修正を考えているため、午前6、7時を仮配分の時間帯としたためである。名古屋高速道路については平成8年名古屋高速道路自動車起終点調査、その他は平成6年道路交通センサデータの実測値と配分結果を比較し、モデルの現況再現性を検討する。

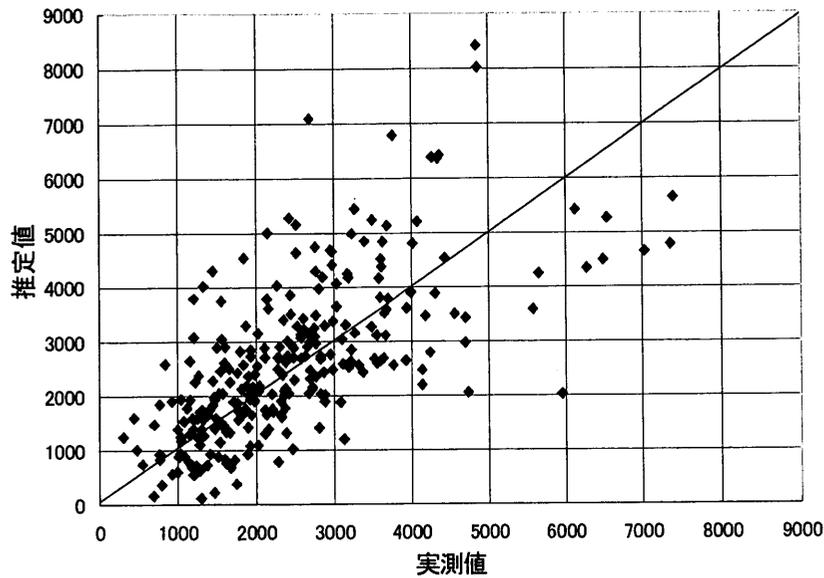


図-5.1 一般道路の配分交通量の推定値と実測値の相関図

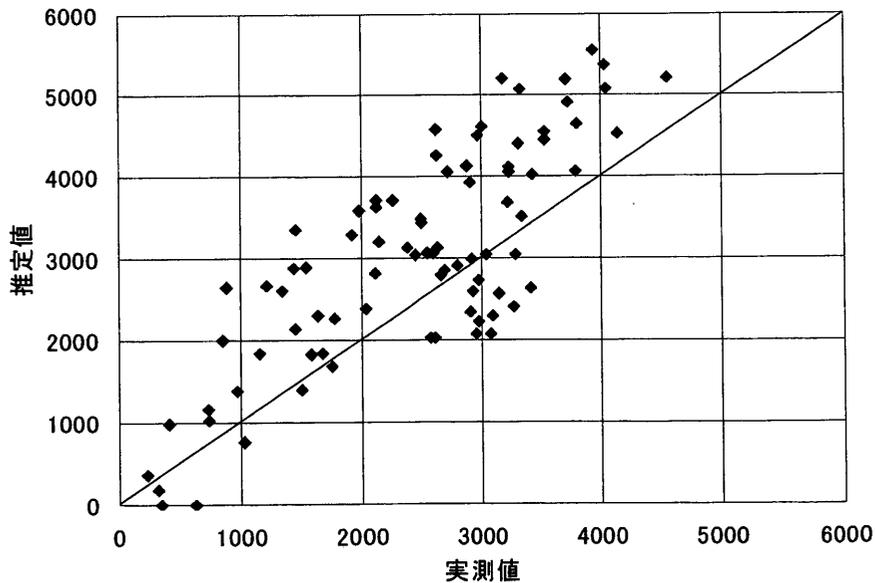


図-5.2 都市高速道路の配分交通量の推定値と実測値の相関図

一般道路の各リンクにおける配分交通量の推定値と実測値の相関係数は、0.654であり、その散布図を図-5.1に示す。また、都市高速道路の各リンクにおける配分交通量の推定値と実測値の相関係数は、0.835

であり、その散布図を図-5.2に示す。料金抵抗法を用いたとき、感度分析によりモデルから得られる都市高速道路利用者の時間価値は、60.5円/(分・人)となった。

一般道路の結果をみると、ある程度の現況再現性をもっているといえる。詳しくみると都心の幹線多車線道路である中区の国道19号線、北区の国道41号線は特に過大推定されていた。また、特に過小推定しているリンクも幹線多車線道路である中区の国道19号線であった。原因としては、1つとして、ゾーン内々交通量の分布は距離が長く、車線が多いほど多く分布させていること。また都市高速道路のランプが多く、高速道路の交通量に影響されやすいことが考えられる。

都市高速道路の結果を見ると、相関係数が良くなるように感度分析をしたが、東名阪自動車道名古屋西～本郷間があまり良い結果が得られなかった。名古屋高速道路のみの場合、同じ時間価値での相関係数は0.932と良くなる。東名阪自動車道では500円、名古屋高速道路では650円と料金の違いもあり、東名阪自動車道のほうが過大推定されがちであった。また朝のピーク時での東名阪自動車道名古屋西～本郷間では、名古屋市内から郊外、郊外から市内という流入流出交通量が多くなるため、時間価値におおきな個人差が生じていた可能性も考えられる。

5.2 高速転換率法の結果とその考察

高速転換率法の結果について述べる。配分結果は午前8時のものである。名古屋高速道路については平成8年名古屋高速道路自動車起終点調査、その他は平成6年道路交通センサスデータの実測値と配分結果を比較し、モデルの現況再現性を検討する。

一般道の各リンクにおける配分交通量の推定値と実測値の相関係数は、0.703であり、その散布図を図-5.3に示す。また、都市高速道路の各リンクにおける配分交通量の推定値と実測値の相関係数は、0.531であり、その散布図を図-5.4に示す。また、各パラメータの推定値は以下の表5.1のようになった。

表5.1 推定した高速転換率のパラメータ及び時間価値

パラメータ α_e	パラメータ β_e	時間価値 (円/(分・人))
6.25	0.10	40.0

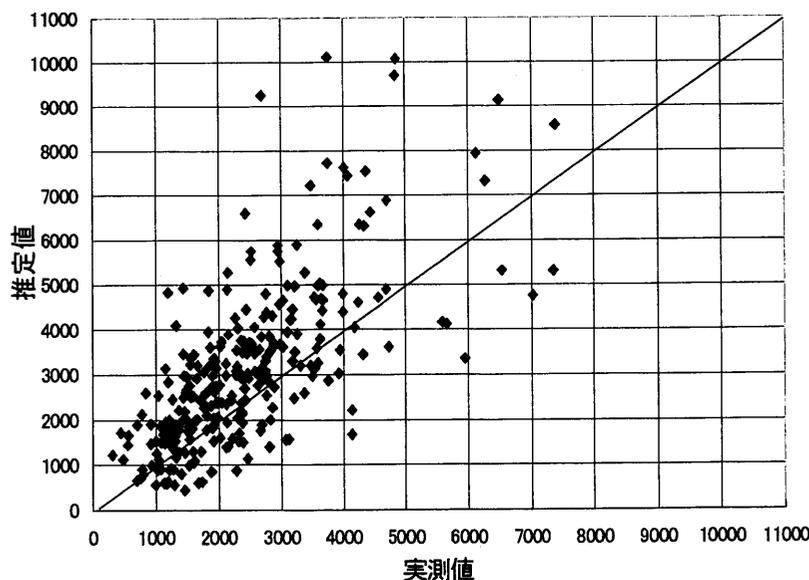


図-5.3 一般道路の配分交通量の推定値と実測値の相関図

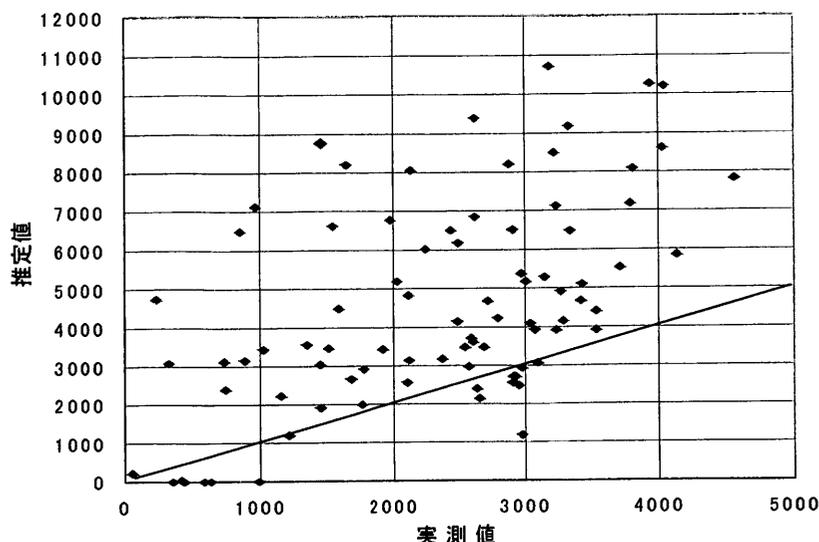


図-5.4 都市高速道路の配分交通量の推定値と実測値の相関図

一般道路の結果をみると、ある程度の現況再現性をもっているといえる。料金抵抗法により得られた一般道路の配分交通量とほぼ同じであり、過大、過小推定しているリンクも同じであった。

都市高速道路の結果を見ると、全体に過大推定をしている。各 OD 高速利用交通量が実測値に近づくようにパラメータを同定したが、リンク交通量ではかなりの誤差がでてしまった。およそ2倍程度の過大推定となっている。

しかし利用交通量が0台のリンクは少なく、過大推定されたとは言え OD 間に高速道路と競合する一般道路がどの地域にも存在したと考えられる。これは、ネットワークを新しく作成した改善点である。

しかし高速道路と競合する一般道路がどの地域にも存在するため、過大推定されたとも考えられる。本研究では1つの区において少なくとも5、6ゾーンに分割している。そのため、区内々交通でも高速道路を必ず利用させている。吹上出入口を見ると5~6倍に推定されており、名古屋高速道路の環状線は特に過大推定されている。

高速転換率の推定結果であるが、まず推定されたパラメータの値について現在実用されている経験則と比較する事から考察する。

例えば、首都高速道路公団で使用されている経験則を下に示す。

$$P = \left(\frac{1}{1+T^6} - 0.05 \right) \cdot \delta \quad (5.1)$$

記号の説明 P : 高速転換率

δ : 短トリップ減率係数

$$T : \text{走行時間比} = \frac{\text{高速道路走行時間} + \text{料金抵抗}}{\text{平面道路走行時間}}$$

この経験則と本研究で用いたロジット型の高速転換率との関係については付録A.1に示してある。

走行時間比の指数である6という数値は本研究で推定したパラメータ α_e に相当し、推定結果は6.25であるので、近い値であると言えよう。また経験則中の0.05という数値は走行時間比で説明できない平面道路

選好要因を示す定数項であり、この値が正であるということは走行時間比が1の場合に平面道路経路の方が高速道路経路より選択確率が高くなる事を意味する。推定結果は0.10となり、高く推定されより平面道路経路の方が高速道路経路より選択確率が高くなる事を意味する。

5.3 料金抵抗法と高速転換率の比較

今回得られた時間価値について述べる。料金抵抗法で得られた時間価値は 60.5 円/(分・人)、高速転換率法で得られたものは、40.0 円/(分・人)となり、大きな差がある。名古屋高速道路公社がアンケート収集により得た目的別時間価値の結果の中で出勤、登校の値は 62.5 円/(分・人)であり、料金抵抗法による結果はこれにほぼ近い値を得ることができた。高速転換率法による結果は名古屋高速道路公社によるアンケート結果より低い値となったが、転換率を用いる方法では配分する前に高速利用者を比率で決定するためあまり個人性が反映されていないのではないかと考えられる。

今まで料金抵抗法を用いて配分しても、結果としてあまり高速道路に配分されない場合が多かった。そのため配分する前に予め高速道路利用トリップと平面道路利用トリップの比率を決める高速転換率法が発展してきた。しかし本研究を通じて、ネットワークを詳細にすることによって、料金抵抗法を用いても高速道路に配分されたため、この問題は解決できたと思われる。また料金抵抗法を用いた方がより実際に近い状況を再現しているとも思われる。区内々交通を目的として高速道路を利用するという推定も少ないと考えられる。

しかし均衡状態に至るまでの時間が、高速転換率法を用いる場合と料金抵抗法を用いた場合では前者の方法を用いた方が後者のその1/6程度であった。そのため、しっかりとした高速転換率を開発することは大変有意義である。そのためには、今回考慮しなかった短トリップ率を考えると、特に名古屋高速道路の場合、精度が上がると考えられる。また本研究では最短利用経路所要時間の比を考慮できる転換率を用いた。今後の発展として、高速道路走行時の快適性なども考慮した転換率が開発されるとさらに高速道路利用者の推定がよりよくなると考えられる。

さらに都市間高速道路利用者についてであるが、どちらの方法においても過大推定されていた。都市間高速道路利用者とは時間価値もかなり違うと考えられ、区別した方がより良いと思われる。

6 結論

6.1 本研究の成果

- ・実際の道路状況により近いネットワークを作成することにより、名古屋市への流入・流出交通量を考慮したより精度の高い配分結果を得ることができた。
- ・料金抵抗法、高速転換率法により高速道路利用を考慮したモデルから時間価値を推定した。
- ・料金抵抗法、高速転換率法のそれぞれの良さ、違いについて比較できた。

6.2 今後の課題

- ・リンクパフォーマンス関数の設定について、時間交通容量は対象地域のデータから計算したが、自由走行時間は、全国のデータから計算されたものを使用した。しかし、信号交差点密度、DID 率の影響が大きく、交通量配分に用いるリンクパフォーマンス関数として、モデルの精度を考えると対象地域独自の値を使用した方が良い。
- ・都市間高速道路の料金のより良いかけ方、時間価値を考える必要がある。

- ・高速転換率について、短トリップ率を考える等より精度を高くする.

参考文献

- 赤松 隆 (1997) : 交通ネットワーク・フロー理論の概要, 交通工学, Vol. 32, No. 5, pp. 11-23
- 尾関洋一 (1998) : 都市高速道路を含む多手段交通網における均衡交通量予測法に関する研究, 名古屋大学大学院修士学位論文
- 河上省吾, 松井 寛 (1987) : 交通工学, 森北出版
- 建設省中部地方建設局 (1996) : 平成 6 年度道路交通センサス報告書
- 杉野学 (1998) : 都市高速道路を含む道路網における車種別時間帯別交通量配分に関する研究, 名古屋大学卒業論文
- 中京都市圏総合都市交通計画協議会 (1991) : 第 3 回中京都市圏パーソントリップ調査報告書
- 土木学会土木計画学研究委員会 (1998) : 交通ネットワークの均衡分析—最新の理論と解法—
- 名古屋高速道路公社 (1997) : 名古屋高速道路の交通量配分手法に関する実証的調査研究委員会報告書
- 名古屋高速道路公社 (1997) : 平成 8 年度第 7 回名古屋高速道路自動車起終点調査報告書
- 日本道路協会 (1984) : 道路の交通容量, 日本道路協会
- 松井寛, 上田聡 (1997) : 有料道路を含む道路ネットワークにおける利用者均衡配分問題, 京大土木 100 周年記念ワークショップ論文集, pp. 17-22
- 松井寛, 藤田素弘 (1993) : 時間変動を考慮した四段階交通需要予測手法の実用化に関する研究, pp. 92-117
- 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
- 三輪富生 (1998) : 複数の高速道路経路選択を考慮した均衡配分モデルに関する研究, 名古屋大学卒業論文

付録 A. 1 最短利用経路所要時間の比を考慮したロジット型選択確率の導出

式(2.2)より高速転換率 P は

$$P = \left[\frac{1}{1 + \alpha T^\gamma} - \beta \right] \delta$$

短トリップ時の低減率 δ は無視する。また通常 $\alpha = 1$ である。

また β は定数項であり、平面道路利用の選考要因を表わすのでとりあえず外す。すると、

$$P = \frac{1}{1 + T^\gamma}$$

となる。そこでロジットタイプの選択確率を考慮し、次の等式を考える。

$$P = \frac{1}{1 + T^\gamma} = \frac{1}{1 + \exp(x)}$$

よって、

$$T^\gamma = \exp(x)$$

となる。本研究では最短利用経路所要時間の比を考慮しているため

$$T = \frac{\lambda_{ij}^e}{\lambda_{ij}^g}$$

であるから、

$$\ln \left(\frac{\lambda_{ij}^e}{\lambda_{ij}^g} \right)^\gamma = x$$

したがって、

$$x = \gamma (\ln \lambda_{ij}^e - \ln \lambda_{ij}^g)$$

となり、

$$P = \frac{1}{1 + \exp \{ \gamma (\ln \lambda_{ij}^e - \ln \lambda_{ij}^g) \}}$$

となる。

最後に平面道路利用の選考要因 β をこの式に組み込むと、高速転換率は

$$P = \frac{1}{1 + \exp \{ \gamma (\ln \lambda_{ij}^e - \ln \lambda_{ij}^g) + \beta \}}$$

で表わせる。

ファジイ的ニューラルネットを用いた 微視的道路交通シミュレーションモデルの開発

1 序論

1.1 研究の背景

都市内道路においては、慢性的な交通渋滞が発生しており、道路機能の低下が見受けられる。これらは、時間のロスや精神的なストレスを通して人々の日常生活および産業活動に大きな影響を与えている。そこで、道路の新設・拡幅等のハードウェア的対策や、公共交通への転換・時差出勤の奨励等による交通需要マネジメント(Transportation Demand Management)、信号制御サイクル・スプリットの調整等の方策が考えられるが、社会基盤である道路は作り替えが困難であることや、交通事故の危険がある、社会的に大きな影響を与える等の理由により、各方策について事前にその効果を十分に予測し、検討する必要がある。

交通需要予測に関する研究は従来より広く行われ、交通量配分理論に関する研究は特に注目されている。現在では、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が主流となっている¹⁾。しかしながら、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、交通量配分問題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、個々の車両に注目して、その動きを記述する微視的モデルと、車両の集合を単位として、その動きを記述する流体モデルとに大きく分けることが出来る。流体モデルとしては、SATURN²⁾、AVENUE³⁾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。微視的モデルとしては NETSIM⁴⁾、TRANSYT⁵⁾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、ある程度の大きさのネットワークの微視的な効果予測に適している。また、流体モデルと微視的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⁶⁾も行われている。

微視的交通流モデルの重要な要素として追従走行状態の挙動を表す追従理論の研究が従来より行われている。これには、運動方程式を用いて、加速度は、 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と仮定した線形モデル⁷⁾、線形モデルをより一般化した非線形モデル⁸⁾が提案されている。しかしながら、近年の高齢化の伸展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いると考えられるが、既存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、ほとんどないのが現状である。そこで、個人の運転特性を考慮した追従モデルの開発が

必要となってきた。

1.2 研究の目的

本研究の第 1 番目の目的は、個人の運転特性を考慮した追従走行モデルを開発することである。まず、追従走行状態の走行挙動を分析するために走行調査を実施し、ファジイ的ニューラルネットワークによる学習を行い、モデルを構築していく。第 2 番目の目的は、追従走行モデルを組み込んだ微視的交通流シミュレーションモデルを開発することである。車両 1 台 1 台の動きを再現し、走行速度などの様々な指標を出力することが出来るシミュレーションモデルを開発する。最後に、第 3 番目の目的は、シミュレーションモデルを豊田市中心市街地に適用して交通政策の効果予測を行うこと、また高齢運転者の増加が道路容量にどのような影響を与えるかを予測し、考察することである。

1.3 本論文の構成

本論文は 6 章で構成される。まず、第 1 章では運転特性を考慮した微視的道路交通シミュレーションモデルの開発の必要性を述べた。第 2 章においては、追従走行モデルを開発するための、追従走行状態の速度データを得る走行調査について述べる。続いて第 3 章では得られた調査データを用いた追従走行モデルの構築について述べていく。第 4 章では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について述べ、第 5 章においてはこのシミュレーションモデルの適用結果について考察する。最後の第 6 章では本研究の成果について述べる。

2 走行調査の概要

2.1 調査の目的と概要

車両走行挙動のモデル化を行うために、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ではその定義は異なる。道路交通法施行規則第 2 条では、「大型特殊自動車、自動二輪車及び小型特殊自動車以外の自動車で、車両総重量が 8,000kg 以上のもの、最大積載量が 5,000kg 以上のもの又は乗車定員が 11 人以上のもの。」を大型自動車、「車体の大きさ等が、大型自動車、大型特殊自動車、自動二輪車又は小型特殊自動車について定められた車体の大きさ等のいずれにも該当しない自動車。」は普通自動車と定義されており、道路運送車両法施行規則の別表第 1 では、「四輪以上の自動車及び被けん引自動車で自動車の大きさが下欄に該当するもののうち軽自動車、大型特殊自動車及び小型特殊自動車以外のもの(内燃機関(ジーゼル機関を除く。))を原動機とする自動車にあつては、その総排気量が 2.00 リットル以下のものに限る。)自動車の大きさ 長さ 4.70m 以下、幅 1.70m 以下、高さ 2.00m 以下」のものが小型自動車、「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」は普通自動車とされている。ここでは、道路運送車両法に示される普通自動車を大型車、小型自動車を普通車と定義する。調査は、普段から運転している 7 名の被験者を対象とした。また、調査に使用する車両は大型車については最大積載量が 4,250kg のトラック(レンタル車両)、普通車

については被験者の所有する車両を用いて行った。

測定には表 2.1 に示す仕様の測量用 GPS(Global Positioning System : 汎地球測位システム) 受信機(SOKKIA GSS-1A)を用いた。GPS 衛星は米国国防省により 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。測量用 GPS 受信機による計測は、一般的に用いられているレーザー距離計による方法と比較して、機材が高価であり、扱いは煩雑であるが、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、3次元の座標値が得られるため、勾配も求められるという利点を持つ。測定は干渉計測位の1つであるキネマティック測量手法を応用した手法を用いた。キネマティック測量は常に衛星から電波を受信しながら、各測点を移動して測点の相対座標値を計測する方法であるが、本手法では、これを移動中の座標値も求めるように拡張して、移動体の座標値を1秒ごとに得ることにした。本計測法の精度試験を行ったところ、受信衛星数が6でかつ、時速80km/hで走行した場合、誤差は1cm以内に収まった。このため、速度は0.01km/hのオーダーで非常に精度良く求められ、十分実用的であることが実証された。

表 2.1 GPS 受信機 GSS-1A の仕様

受信帯域	L1 帯(1575.42MHz)
受信チャンネル数	8
精度(基線精度) スタティック測量 キネマティック測量	D : 測定距離 ±(5+2ppm×D)mm ±(20+2ppm×D)mm

本手法による計測は、周りに電波を遮る障害物がない、既知点から出発しないとけないということが前提条件となり、大きな障害となっているが、

現在カーナビゲーションで用いられている単独計測位(誤差 50m 程度)あるいは 1997 年 5 月から FM 多重放送によるサービスが開始された Differential-GPS(誤差 5m 程度)と比べると格段に測定精度が高く、ITS(Intelligent Transportation Systems)への応用、例えば走行位置を検出して制御することなど、利用可能性は高く、障害を克服するための様々な研究が期待される分野である。

2.2 調査方法

調査は、次に示す方法で行った。まず、図 2.1 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 アンテナはマグネットを用いて車両の屋根に取り付けた。表 2.2 に示す、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 10km/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障害になる建造物のない場所として、図 2.2 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た。また、測定距離は周回・折り返しも含めた約 12.5km とした。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い、点を設置した。

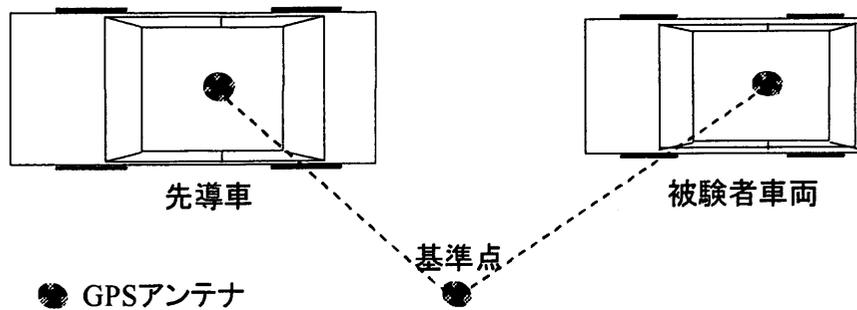


図 2.1 走行調査方法

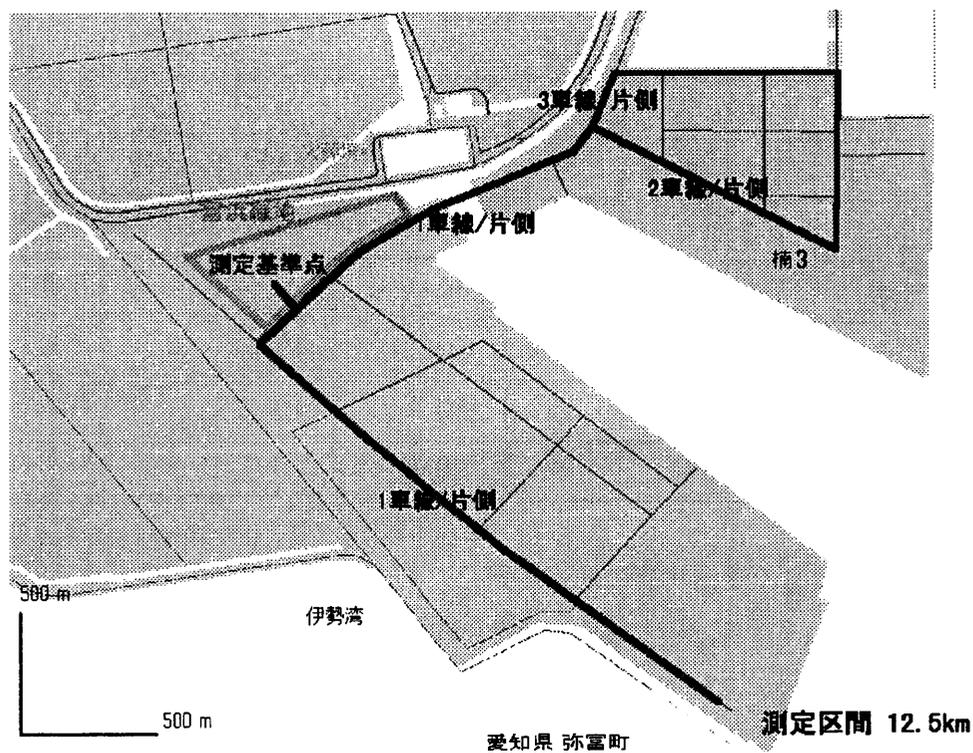


図 2.2 走行調査実施経路

表 2.2 測定基準点の座標値

点名	WGS84 緯度	WGS84 経度	楕円体高
基準点	35° 2' 1.20836"N	136° 46' 34.36935"E	23.354 m
先導車出発点	35° 2' 0.81231"N	136° 46' 34.93356"E	23.358 m
被験者車両出発点	35° 2' 0.62520"N	136° 46' 35.18463"E	23.353 m

WGS(World Geodetic System)84 :

地球の重心と、楕円中心の一致した楕円体を基準にした座標系

表 2.3 被験者一覧

No.	車種	性別	年齢層	調査日
1	大型車	男	20 歳代	1997 年 8 月 23 日
2	大型車	男	20 歳代	1997 年 8 月 23 日
3	普通車	男	60 歳代	1997 年 10 月 5 日
4	普通車	女	60 歳代	1997 年 8 月 25 日
5	普通車	女	50 歳代	1997 年 10 月 5 日
6	普通車	男	50 歳代	1997 年 10 月 5 日
7	普通車	男	20 歳代	1997 年 8 月 29 日

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、受信可能衛星数が 7 以上でかつ、衛星の位置関係が測定に適しているかを示す GDOP(Geometrical Dilution Of Precision)の値が 5 以下(測量に支障がない範囲)の時間帯を選んで測定を行った。

2.3 調査結果

走行調査より、表 2.3 に示す被験者 7 名の追従走行データを得ることが出来た。20 分程度の走行を行い、1 秒毎にサンプリングするため、1 被験者の有効データ数は約 1,000~1,300 であり、また、先導車の速度もばらつきをもっており、追従挙動を分析するのに十分なデータであると言える。

3 追従走行モデル

3.1 追従走行モデルの概要

ここで述べる追従走行モデルは、前車の影響を受ける場合の後続車の加速度を決定するためのモデルである。運転者は通常、前に走行している車両 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が、ここでは簡単化のため、前に走行している車両 1 台のみの影響を考え、加速度を決定する。なお、次章で述べる道路走行シミュレーション

ュレーションモデルでは、車線変更の際に左右の車両の状況も考慮するようになっている。

ここでは、2章で行った走行調査を基にして、運転者の属性別に追従走行モデルを構築していく。

3.2 ファジイ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/s²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イ理論を使用してモデル化を行う。しかしながら、ファジイ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、ファジイ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。

近年、ファジイ理論とニューラルネットワークとを融合したファジイ・ニューラルネットワークに関する研究が注目され、数多くの手法が提案されている⁹⁾。林らによる分類法では、表 3.1 に示す 9 種類に分類されているが、本モデル化においては、この中のファジイ的ニューラルネットワークを用いる。これは、ファジイ推論の構造を持つニューラルネットワークであり、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、学習結果をファジイ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。

表 3.1 ファジイニューラルネットワークの分類

ニューロ&ファジイ	ファジイと NN を同一システム内で独立に配置したモデル
ニューロ/ファジイ	ファジイと NN を並列に結合したモデル
ニューロ→ファジイ	システムの入力がまず NN に加えられ、その出力をファジイに入力するモデル
ファジイ→ニューロ	システムの入力がまずファジイに加えられ、その出力を NN に入力するモデル
ニューロ的ファジイ	ファジイを基本として NN 的な学習機能を持たせたモデル
ファジイ入出力ニューロ	入出力値をファジイ値とした NN
ファジイ的ニューロ	ファジイ推論の構造を持つ NN
ニューロ化ファジイ	NN を用いてファジイ推論における計算過程の一部を実現したモデル
ファジイ化ニューロ	結合荷重をファジイ値とした NN

ニューラルネットワークの学習には最も典型的な教師あり学習アルゴリズムである誤差逆伝播学習アルゴリズム(back propagation)を用いることとする。これは、パターン $\mathbf{x}^{(p)}$ が与えられた時の出力値と真値をそれぞれ $z_k^{(p)}$, $t_k^{(p)}$ とすると、誤差

$$E = \sum_p E^{(p)} = \sum_p \left\{ \sum_k \left(t_k^{(p)} - z_k^{(p)} \right)^2 / 2 \right\} \rightarrow \min \quad (3.1)$$

を最小とするアルゴリズムである¹⁰⁾。アルゴリズムの導出はA.1に示し、ここでは結果のみを示すと、まず出力層においては結合荷重の修正量 $\Delta w_{kj}^{(h)}$ は、

$$u_k = \sum_j w_{kj}^{(h)} y_j^{(p)} \quad (3.2a)$$

$$\Delta w_{kj}^{(h)} = \varepsilon \left(t_k^{(p)} - z_k^{(p)} \right) f'(u_k) y_j^{(p)} \quad (3.2b)$$

である。また、中間層の結合荷重の修正量 $\Delta w_{kj}^{(l)}$ は、

$$\delta_j^{(l)} = \left(\sum_k \delta_k^{(h)} w_{kj}^{(h)} \right) f'(u_j) \quad (3.3a)$$

$$\Delta w_{kj}^{(l)} = \varepsilon \left(\sum_k \delta_k^{(h)} w_{kj}^{(h)} \right) f'(u_j) x_i^{(p)} \quad (3.3b)$$

となる。以上のアルゴリズムを各データに対して繰り返し適用し、追従走行モデルのパラメータ推定を行う。

3.3 追従走行モデル構造

追従走行を行う際は、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っていると考えられる。微視的道路交通シミュレーションへの適用性を含めた様々な検討の結果、加速度を決定する主要な要因として1秒前の自車速度と車間距離とを用いて、追従走行モデルの構築を行うこととした。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¹¹⁾である。

モデル化に際して、まずファジイ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、ファジイルールは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、

ルール1 : if(X is low) and (Y is short) then (Z is middle).

表 3.2 ファジイルール一覧

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

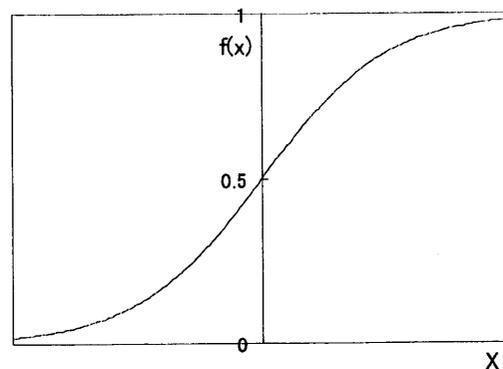


図 3.1 シグモイド関数

とする。その他のルールは表 3.2 に示す。

一般にファジイ推論の計算手順は次の通りである。

- 1) 前件部メンバーシップ関数値を求める
- 2) 各ファジイルールの前件部適合度を求める
- 3) 各ファジイルールの後件部出力推定値を求める

そこで、このファジイ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うように構築する。

ニューラルネットワークの構築を行う前に、まず各ニューロンからの出力関数であるしきい値関数について考える。学習段階での制約として、このしきい値関数は微分可能であるという条件が加わる。この制約を満たす関数として、式(3.4)、図 3.1 で表されるシグモイド関数について考えると、

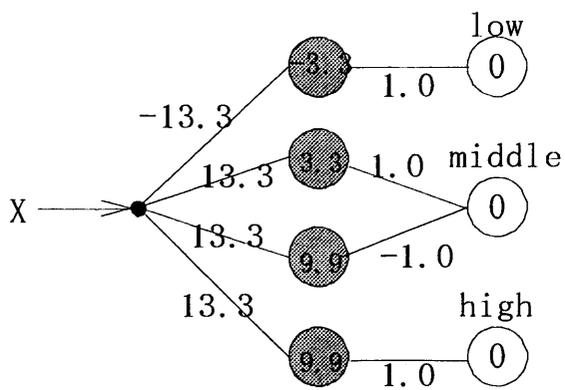
$$f(x) = 1 / (1 + e^{-x}) \quad (3.4)$$

このシグモイド関数の微分は式(3.5)で示される。

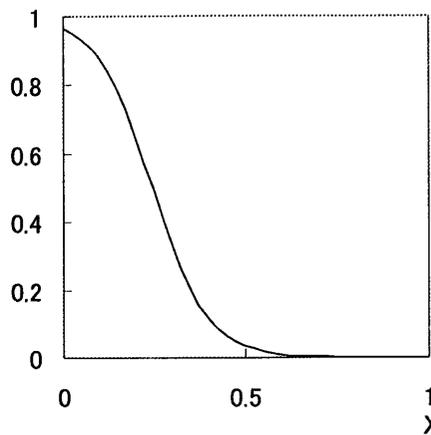
$$f'(x) = f(x)[1 - f(x)] \quad (3.5)$$

このシグモイド関数は活性値 x 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ことから、このニューラルネットワークにおいて最適であると考えられ、式(3.4)に示す関数をしきい値関数として用いることとする。

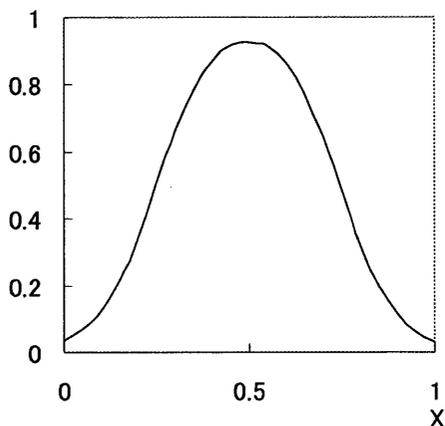
ニューラルネットワークの構築についての話に戻すと、ファジイ推論の計算手順 1) である前件部メンバーシップ関数は 2 層のニューラルネットワークで表現する。low, short の各メンバーシップ関数は単調減少のため、1 つのシグモイド関数をもつニューロンで近似する。high, large の単調増加の各メンバーシップ関数についても 1 つのニューロンで近似する。middle の三角型メンバーシップ関数は 2 つのニューロンを使用して、単調増加のメンバーシップ関数と単調減少のメンバーシップ関数を足し合わせて近似する。これらは、シナプス結合荷重、しきい値の初期値で関数形の初期値を定める。これらを図 3.2 に示す。



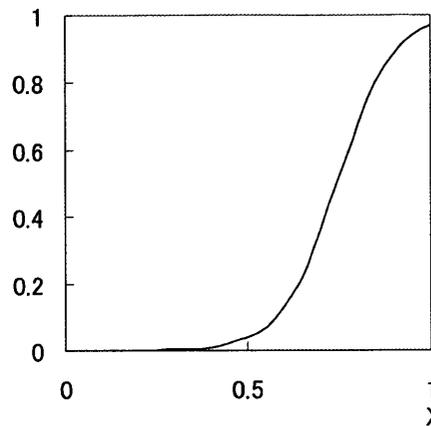
前件部メンバーシップ関数の構造



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 3.2 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

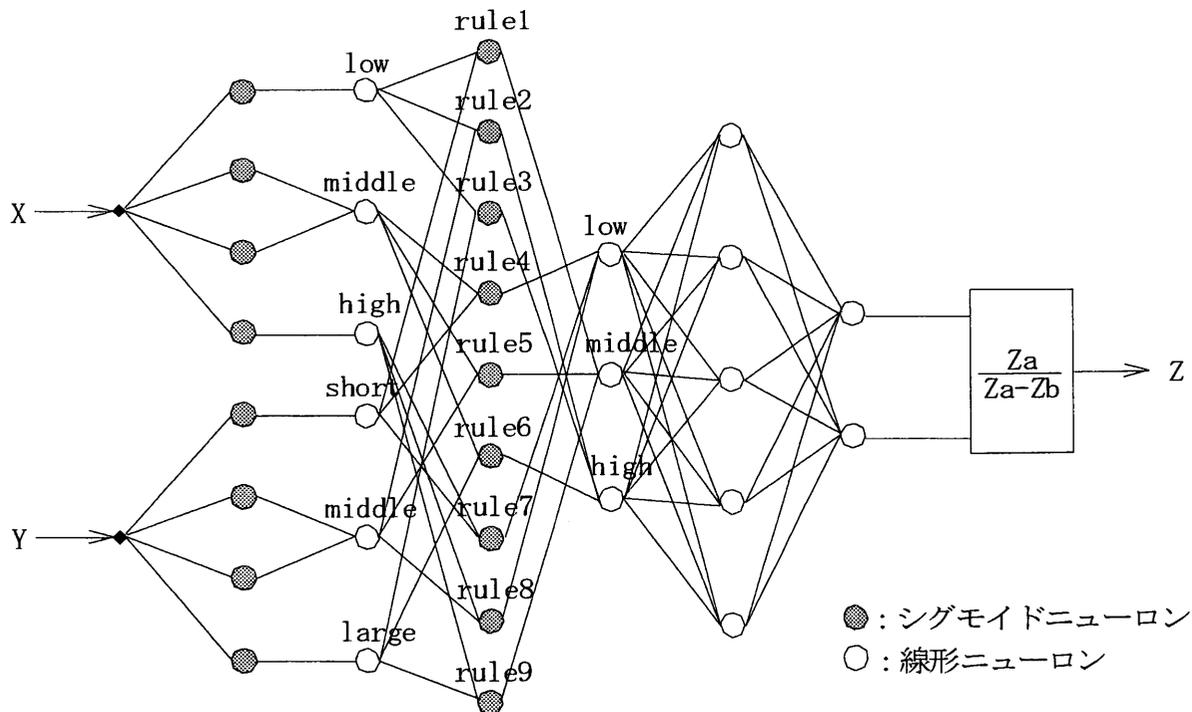


図 3.3 追従走行モデルのニューラルネットワーク構造

求められた前件部メンバーシップ関数値をファジイルールに従い、第3層に入力する。この出力値が計算手順2)の各ファジイ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イルールの重要度を示す。

前件部適合度をファジイルールに従い、線形積和演算および重心計算を行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、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lowのメンバーシップ関数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。

以上の計算を行うニューラルネットワークを図3.3に示す。なお、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。

3.4 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い、推定を行った。図A2.1に各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のために線形追従理論による観測値と推定値との関係も示した。R²値は0.35~0.60となり、線形追従理論による推定結果と比較しても良好な推定を行っていることがわかった。次に、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A2.2に示す。本モデルで走行速度が0km/hの場合の予測も行ったが、これは観測データが発進時を除いており、ほぼ10km/h以上の値を使って行っているため、信頼性に欠けている。事実、本モデルを発進時に適用すると、車間距離が10~20mにならないと発進しなく、現実の発進挙動と比較すると、車間距離を大きくとる傾向が見られる。従って、本モデルの適用範囲は、調査データの豊富な走行速度が10~60km/hに限定される。

各被験者について図3.4に示す分類を行い、属性別にデータをプールしてモデル化を行った。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A2.3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¹²⁾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。

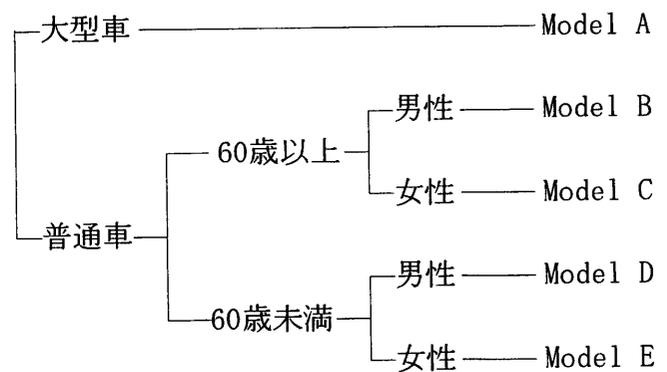


図 3.4 追従走行モデル属性別分類

4 微視的道路交通シミュレーションモデル

4.1 微視的道路交通シミュレーションモデルの概要

本章では、道路走行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の構築を行う。シミュレーションモデル技術には、システムの変化の状態を記述するイベントスキニング法と、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法があり、それぞれ一長一短がある。本モデルでは、タイムスキニング法が適していると考えられ、タイムスキニング法を採用する。道路走行モデルでは、都心部での複雑な交通挙動を再現する必要があるため、交通流を流体としてシミュレートする巨視的モデルではなく、車1台1台の動きをシミュレートする微視的モデルとする。

ここでは、 Δt に対する様々な検討の結果、計算誤差と演算時間との関係を考え、0.5秒とした。これは、60km/hで走行する車両は1ステップあたり約8m進むことになる。しかしながら、4.3.3で述べる経路選択モデルの中での最短経路の計算は、10秒毎に行うこととした。これは、最短経路の計算に要する時間が長い、交通量の大幅な変動がない限り、最短経路はあまり変化しないためである。

4.2 道路網モデル

道路網モデルは図4.1に示すように、ブロック、レーン、車両で構成される。図4.2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、

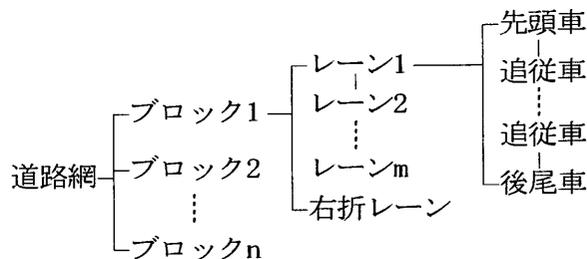


図4.1 道路網データ構造

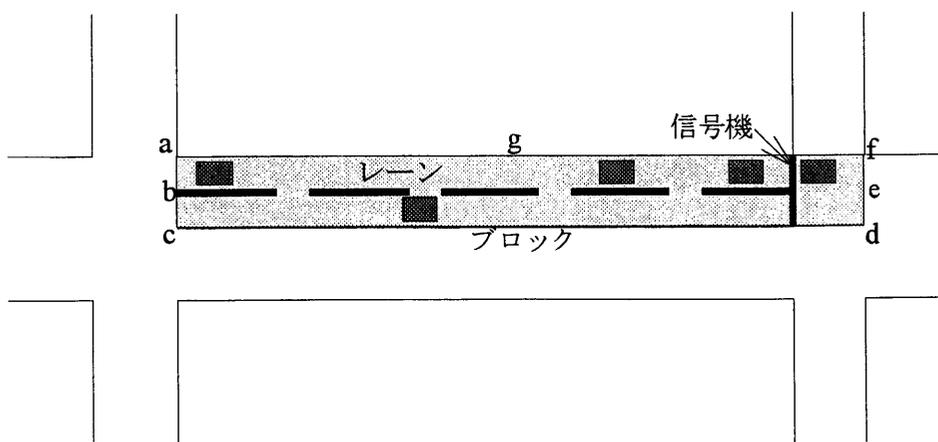


図4.2 道路網モデル

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。個々の車両には先頭車・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うことが出来る。

道路網への流入は始端(ab または bc)から行うこととする。走行終了時の流出は、ブロック内の駐車場を目的地とするという観点から、ブロック長の 1/2 の地点(g)より行うこととした。

4.3 道路走行モデル

4.3.1 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、次のようにする

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

矢印：右左折状況により青信号または赤信号処理とする

- ・交差点内の場合

左折・直進・右折(センターラインを超えている場合)時：次のブロックの最後尾車

右折(センターライン手前)時：対向車との距離による判定を行い、進んだ場合に対向車が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、および制限速度を考慮して修正を行い、走行速度とする。ここでは、加速・減速とも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。

2) 追従車に対するモデル

追従車については、3章で構築した追従走行モデルを適用する。しかしながら、発進時においては追従モデルの適用範囲外であるため、先頭車に対するモデルを適用する。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う。また、前車が交差点内にいる場合は、先頭車に対するモデルも適用し、信号停止処理を行う。

3章で構築した追従走行モデルは属性別となっているため、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¹³⁾の中

表 4.1 車種および運転者属性の構成比率

普通車	59歳まで	男性	43%
		女性	31%
	60歳以上	男性	8%
		女性	2%
大型車			16%

の「用途別及び車種別自動車保有台数」，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 4.1 の比率とした。

4.3.2 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ではその性格が異なり，車線変更の判断基準も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，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(前車の影響を受けない場合の走行速度)と前車の速度とに大きな差があり，かつ前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う。流入先車線の状況を見て安全に割り込みが出来る場合は，その場で車線変更を行う。

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い，流入先車線の後車に減速を生じなければ車線変更を行う。

4.3.3 経路選択モデル

本モデルでは主に通勤交通の評価に適用するという観点から，運転者は道路状況を完全に把握しているものと仮定し，各車両について各リンクに流入した時点での目的地までの所要時間が最短の経路を選択して走行する。経路選択を行うには各リンクのリンク所要時間が必要であるが，この算出には過去に流出した車両の平均所要時間を用いる。流出車両がまだ存在しない場合は，制限速度で走行した場合の所要時間を用いて計算を行う。

4.3.4 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すると， k 台目の流入時刻 T_k は，

$$T_k = T_{k-1} + t_0 - (\bar{t} - t_0) \ln(1 - R_k) \quad (4.1)$$

ここに 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 $0 \sim 1$ までの一様乱数

で示される¹⁴⁾。

ここで，流入台数を n ，演算時間を TM とすると， n 台目の車両の流入時刻は演算終了時刻よりも早く，また， $(n+1)$ 台目に流入するであろう時刻は演算終了時刻よりも遅くなければならないため，

$$T_n < TM < T_{n+1} \quad (4.2)$$

が成立しなくてはならない。ところが、各時点で乱数 R_k を使用すると、一般的に式(4.2)の制約は満たされなく、流入台数に誤差を生じるため、ここでは演算開始時に n 台すべての流入時刻をあらかじめ計算し、制約が満たされなければ、満たされるように各流入時刻を補正し、流入台数が n 台になるようにした。

4.4 評価指標

本シミュレーションモデルは個々の車両に注目して演算を行うため、以下に示す各種情報を出力することが出来る。

- 1) 各車両についての走行距離
- 2) 各車両についての走行時間
- 3) 各リンクについての時間帯別交通量
- 4) 各リンクについての時間帯別平均走行時間

これらの情報を集計処理することにより、さらに平均走行速度などの指標を求めることが出来る。但し、各車両の走行終了リンクでは、リンク末端までは走行せず、リンクの途中で流出するようにしているため、交通量・走行時間の集計からは除外している。

交通政策などの評価指標として、いろいろなものが考えられるが、ここでは現行の交通状況と政策実施時の交通状況とを比較するのに適当な指標である、各リンクについての平均速度を主に使用して評価を行っていく。

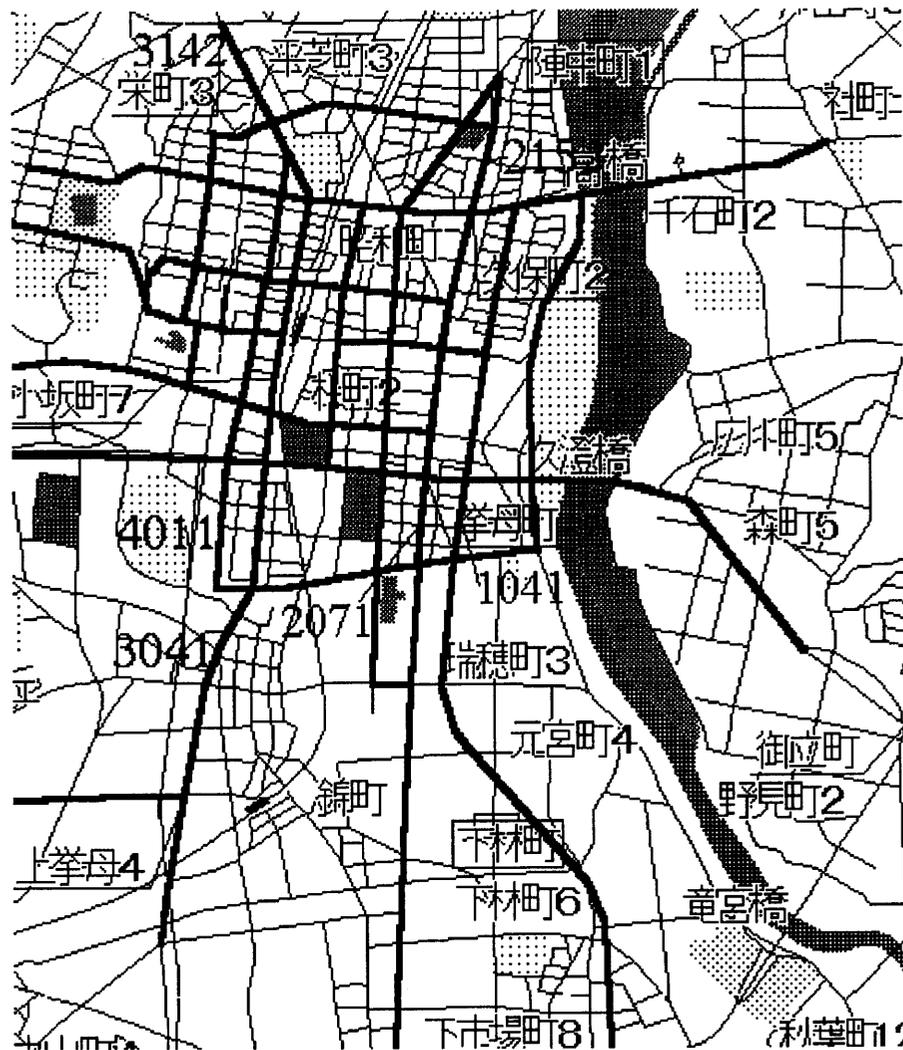
5 豊田市都心部への適用

5.1 データ・ネットワークの概要

本章では、微視的道路交通シミュレーションモデルを豊田市中心市街地の道路網に適用し、モデルの現況再現性の検討を行い、さらにこの地域で実現可能なTDM政策についての効果予測を行う。また、単路部を設定し、高齢運転者が増加した場合の交通特性について考察を行っていく。

対象地域は図 5.1 に示す豊田市役所を中心とする約 9km^2 とした。リンクは幹線道路を中心に設定した。リンク数は228(片側)、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)に対象地域に流出入する車両についての交通量調査を行い、ODデータを修正した。以下にその方法を示す。

- 1)平成3年度中京都市圏パーソントリップ調査より、午前6時から午前10時までの豊田市内を起点あるいは終点とする交通量を時間帯別に集計する。



太線：対象リンク 数字：主要リンク番号
 図 5.1 対象地域

- 2) 分割配分手法を用いて、三好町を一部含む豊田市全域を対象とした配分(ゾーン数 74, リンク数 452)を行い、配分の際の最短経路を用いてシミュレーション対象地域に流出入するリンク間 OD データを作成する。なお、配分の際は 1 ゾーンに 1 つのセントロイドを設けて計算を行っているが、リンク間 OD を作成する場合は対象地域内ではゾーン内の全てのノードに分散させ、セントロイドに過度の交通が集中することを防いだ。また、OD の分割数は 10 分割とした。
- 3) シミュレーション対象地域に流出入するリンクで、交通量調査を行った箇所については調査結果を発生量または集中量とする。また、調査を行っていないリンクについては、調査を行ったリンクについての平均的な比をかけたものを発生量または集中量とする。
- 4) 分布交通量の予測モデルである平均成長率法を用いて交通量調査を行った時点でのリンク間 OD 交通量を予測する。

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。

5.2 現況再現結果

午前6時から9時までのリンク間OD交通量、豊田市中心市街地道路網のデータを用いてシミュレーションモデルを適用した。表5.1に主要リンクの交通量および平均速度を示す。なお、午前6時台はシステムを安定させるために実行させており、この時間帯の結果には多少の誤差があるため、集計からは除外している。平成9年に行った交通量調査時の他のリンクの交通量等のデータはなく、再現性についての検討は困難であるが、現在の交通状況と比較すると、若干渋滞が顕著に現れており、交通量が減少しているものの、ほぼ合致しているのではないかと考えられる。

表 5.1 主要リンクの現況再現結果

リンク No.	路線名	7時台		8時台	
		交通量 (台)	平均速度 (km/h)	交通量 (台)	平均速度 (km/h)
7051	国道 153 号線東行	850	9.4	441	0.9
7052	国道 153 号線西行	660	37.0	524	35.2
2121	国道 248 号線北行	262	38.0	146	37.5
2122	国道 248 号線南行	490	6.3	449	7.5
4041	けやき通北行	431	38.8	529	35.1
4042	けやき通南行	714	33.8	336	3.0

5.3 TDM 政策に関する分析

平成7年11月に豊田市都心部へのマイカー通勤者を対象として行った交通渋滞を緩和するためのモデル実験の中で、アンケート調査で通勤方法の変更が可能であると回答した通勤者の交通量をODを考慮して減少させてモデルの適用を行った。表5.2にその削減量を示す。

表 5.2 TDM 政策の削減交通量

総削減量	1,114 台	
構成比	7時台	19.3%
	8時台	80.7%

削減率が大きい8時台の中心市街地へ向かう主要リンクの平均速度を

表5.3に示す。中心市街地の通り抜けが容易になったことにより、郊外方向へのリンクを中心として若干、平均速度が低下したリンクもあったが、中心市街地へ向かうリンクでは大幅な速度向上が見られた。これにより、このTDM政策は非常に有用であると考えられ、実施が期待される。但し、本分析では平均速度向上による誘発交通は考慮していない。この誘発交通を予測することは難しく、どこまでこの誘発交通を押さえることが出来るかが本政策の鍵となるであろう。

5.4 運転者特性の変化が道路容量に及ぼす影響の分析

日本においては今後、ますます高齢化が進展すると予測されているが、豊田市のような中小都市では公共交通の整備が遅れており、高齢者自身が運転する機会が増加するであろう。道路

表 5.3 8時台の主要リンクの平均速度

リンク No.	路線名	現行の平均速度 (km/h)	TDM 削減時の 平均速度 (km/h)
1041	市体育館前北行	17.1	34.7
2071	国道 248 号線北行	6.1	33.6
3142	県道 155 号線南行	30.9	32.9
2152	国道 248 号線南行	36.2	41.9
4011	けやき通北行	3.1	28.8
3041	国道 155 号線北行	2.1	26.3

の交通容量に関する研究は、HCM(Highway Capacity Manual)¹⁵⁾において交通容量の概念が明確化され、これが現在の国際的に認められた指針となっている。しかしながら、例えば多車線道路の交通容量を求める場合、運転者層の特性による補正係数は存在するが、これは日常的運転者か非日常的運転者かによる区分であり、年齢・性別の構成等は考慮されていない。そこで本節では、高齢運転者の増加が道路容量にどのような影響を及ぼすかを考察する。

現行の運転者属性の構成比率は表 4.1 に示した通りであるが、ここでは基本交通容量を求めるという観点から、大型車は考慮せず、60 歳以上の男性・女性の比率を 2 倍に拡大して表 5.5 に示す構成比率で計算を行った。計算に用いる道路条件は、図 5.2 に示す単路部を設定した。

60 歳以上の運転者の比率を 2 倍にした場合、表 5.5 に示す通り、現行の交通量の約 3% 減少した値となった。

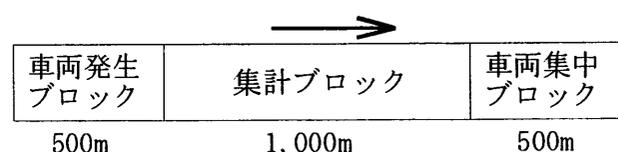
さらに詳しい分析を行うため、各属性の運転者のみの場合についての分析も行った。

これらの結果を見ると、59 歳以下男性のみの場合が一番交通量が多く、60 歳以上女性のみの場合の交通量が他と比べて極端に少なくなっている。現行の構成比率の場合についても比較的小さな値となっており、これは 60 歳以上女性の運転者の影響を受けているのが原因ではないかと考えられる。

本分析の結果、運転者による影響が大きいと考えられるため、道路計画の際は大型車混入率と同様に運転者の構成率も考慮する必要があると言える。

表 5.5 車種および運転者属性の構成比率

普通車	59 歳以下	男性	42%
		女性	34%
	60 歳以上	男性	19%
		女性	5%



車線数は 1 車線とし、信号機は設置しない

図 5.2 計算に用いた道路条件

表 5. 5 運転者属性を変更した場合の交通量

ケース	交通量	現行との比率
現行の属性構成比率	323	—
60 歳以上の男性・女性運転者を 2 倍に拡大した場合	314	97%
59 歳以下男性のみの運転者の場合	430	133%
59 歳以下女性のみの運転者の場合	366	113%
60 歳以上男性のみの運転者の場合	358	110%
60 歳以上女性のみの運転者の場合	216	67%
大型車のみの場合	387	120%

6 結論

6.1 本研究の成果

本研究の成果をまとめると次のようになる。

- 1) 追従走行挙動を解析するための走行調査を GPS を用いて行う方法を示し、非常に精度の高いデータを得ることが出来た。
- 2) ファジイ的ニューラルネットワークを用いて追従走行モデルを構築した結果、従来のモデルより適合度が高くなり、また各運転者属性間に違いが見られた。
- 3) 道路上での車両 1 台 1 台の挙動を再現する微視的道路交通シミュレーションモデルの構築を行った。
- 4) 豊田市において自動車交通削減政策の評価を行った結果、大幅な速度向上が期待できることが分かった。
- 5) 高齢運転者が増加した場合の道路交通容量の変化について予測を行ったところ、交通容量は若干減少し、また 60 歳以上女性運転者の影響を大きく受けることが分かった。

6.2 今後の課題

走行調査では、運転者属性を考慮して行ったが、被験者数がやや乏しいため、定量的な把握が不十分である。今後、より多くの調査を実施し、追従走行モデルを改良していく必要がある。

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、これ以外に例えば相対速度等が考えられる。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、ファジイルールが増加し、ニューラルネットワーク構造が複雑になってしまう。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う必要がある。

謝 辞

本論文を作成するにあたり、(財)豊田都市交通研究所からは交通量の実査データの提供を、(株)サンデリカ名古屋事業所の方々には走行調査において多大なるご協力を頂きました。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 赤松隆：交通流の予測・誘導・制御と動的なネットワーク配分理論，土木計画学研究・講演集 18(2)，1995.12，pp.23-48.
- 2) Hall, M.D., Van.Vliet, D., and Willumsen, L.G. : A simulation assignment model for the evaluation of traffic management schemes, Traffic Engineering & Control, Vol.21, No.4, 1980, pp.168-176.
- 3) 堀口良太, 片倉正彦, 桑原雅夫：都市街路網の交通流シミュレータ-AVENUE-の開発，第13回交通工学研究発表会論文集，1993，pp.33-36.
- 4) Mahmassani, Hani S., Jayakrishnan R., Herman, Robert : Network traffic flow theory: Microscopic simulation experiments on supercomputers, Transportation research, Part A, Vol.24A, No.2, 1990, pp.149-162.
- 5) D.I. Robertson : 'TRANSYT' Method for area traffic control, Traffic Engineering & Control, Vol.11, No.6, 1969, pp.276-281.
- 6) 飯田恭敬, 藤井聡, 内田敬：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，No.536/IV-31，1996.4，pp.37-47.
- 7) R.E.Chandler, R.Herman, E.W.Montroll : Traffic Dynamics: Studies in Car Following, Operations research, Vol.6, 1958, pp.165-184.
- 8) Denos C.Gazis, Rebert Herman and Richard W.Rothery : Nonlinear Follow-the Leader Models of Traffic Flow, Operations research, Vol.9 No.4, 1961, pp.545-567.
- 9) 堀川慎一：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，名古屋大学博士論文，1994.3.
- 10) 甘利俊一, 向殿政男：アドバンスト・エレクトロニクス・シリーズ II-1 ニューロとファジィ，培風館，1994.
- 11) 坂東昌子, 長谷部勝也, 中西健一, 中山章宏：交通流における車の運動の時間的遅れについて，第3回交通流のシミュレーションシンポジウム講演概要集，1996，pp.38-43.
- 12) 井ノ口弘昭：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，1996.3，pp.617-618.
- 13) 総務庁：交通安全白書 平成7年度版，大蔵省印刷局
- 14) 荻野弘：街路網交通信号制御手法に関する基礎的研究，名古屋大学博士論文，1985.6.
- 15) (社)交通工学研究会：道路の交通容量，コロナ社，1985.

Appendix1 逆誤差伝播アルゴリズムの導出

逆誤差伝播アルゴリズムは

$$E = \sum_p E^{(p)} = \sum_p \left\{ \sum_k \left(t_k^{(p)} - z_k^{(p)} \right)^2 / 2 \right\} \rightarrow \min$$

とするアルゴリズムである。

パターン $\mathbf{x}^{(p)}$ が与えられた時の出力誤差は

$$E^{(p)} = \sum_k \left(t_k^{(p)} - z_k^{(p)} \right)^2 / 2$$

であるため、これを減少させるように出力層の結合荷重 $w_{kj}^{(h)}$ と、中間層の結合荷重 $w_{ji}^{(h)}$ を調整すれば良い。調整に最急降下法を用いると、まず出力層においては、結合荷重の修正量 $\Delta w_{kj}^{(h)}$ は次式で与えられる。

$$\Delta w_{kj}^{(h)} = -\varepsilon \frac{\partial E^{(p)}}{\partial w_{kj}^{(h)}} = -\varepsilon \frac{\partial E^{(p)}}{\partial a_k} \frac{\partial a_k}{\partial w_{kj}^{(h)}}$$

ここで、

$$u_k = \sum_j w_{kj}^{(h)} y_j^{(p)}$$

であり、出力は

$$z_k^{(p)} = f(u_k)$$

であるので、

$$\begin{aligned} -\frac{\partial E^{(p)}}{\partial a_k} &= -\frac{\partial E^{(p)}}{\partial z_k^{(p)}} \frac{\partial z_k^{(p)}}{\partial a_k} \\ &= \left(t_k^{(p)} - z_k^{(p)} \right) f'(u_k) \equiv \delta_k \end{aligned}$$

$$\frac{\partial a_k}{\partial w_{kj}^{(h)}} = y_j^{(p)}$$

となる。従って、出力層の結合荷重の修正量は、

$$\Delta w_{kj}^{(h)} = \varepsilon \left(t_k^{(p)} - z_k^{(p)} \right) f'(u_k) y_j^{(p)}$$

である。

また、中間層の結合荷重の修正量 $\Delta w_{ji}^{(l)}$ は次式で与えられる。

$$\Delta w_{ji}^{(l)} = -\varepsilon \frac{\partial \mathcal{E}^{(p)}}{\partial w_{ji}^{(l)}} = -\varepsilon \frac{\partial \mathcal{E}^{(p)}}{\partial v_j} \frac{\partial v_j}{\partial w_{ji}^{(l)}}$$

ここで、

$$v_j = \sum_i w_{ji}^{(l)} x_i^{(p)}$$

であり、

$$y_j^{(p)} = f(v_j)$$

であるので、

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \mathcal{E}^{(p)}}{\partial v_j} &= -\frac{\partial \mathcal{E}^{(p)}}{\partial y_j^{(p)}} \frac{\partial y_j^{(p)}}{\partial v_j} \\ &= -\sum_k \left(\frac{\partial \mathcal{E}^{(p)}}{\partial u_k} \frac{\partial u_k}{\partial y_j^{(p)}} \right) f'(u_k) \\ &= \sum_k (\delta_k^{(h)} w_{kj}^{(h)}) f'(u_k) \end{aligned}$$

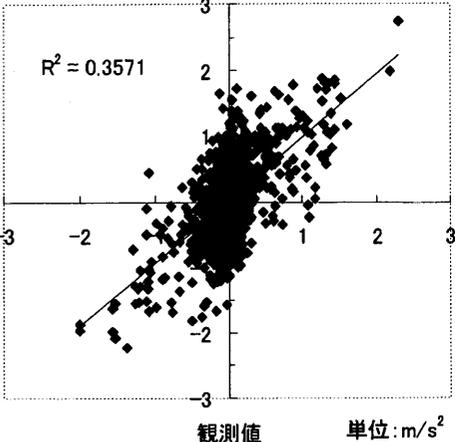
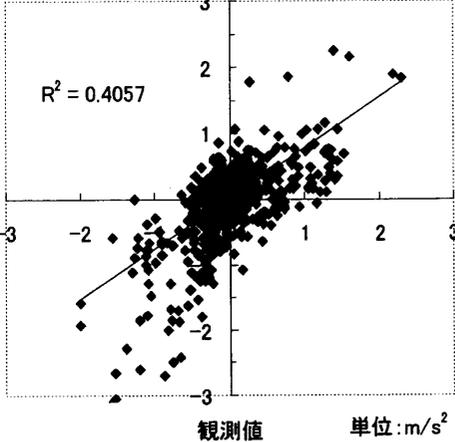
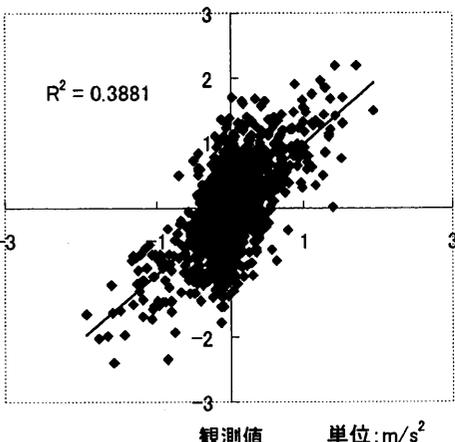
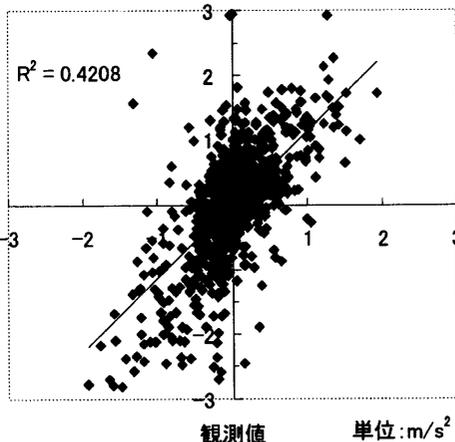
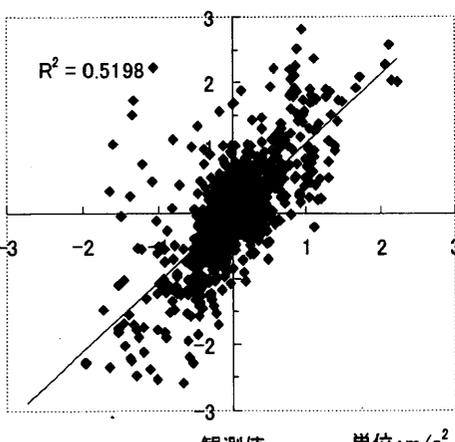
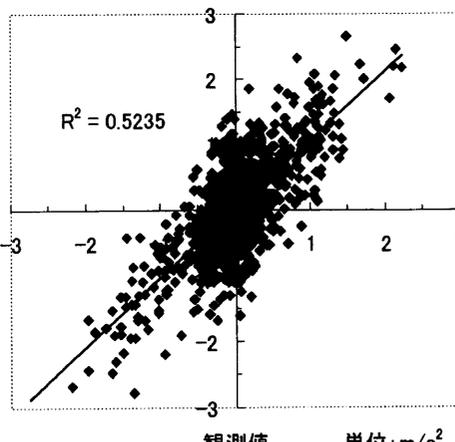
$$\frac{\partial v_j}{\partial w_{ji}^{(l)}} = x_i^{(p)}$$

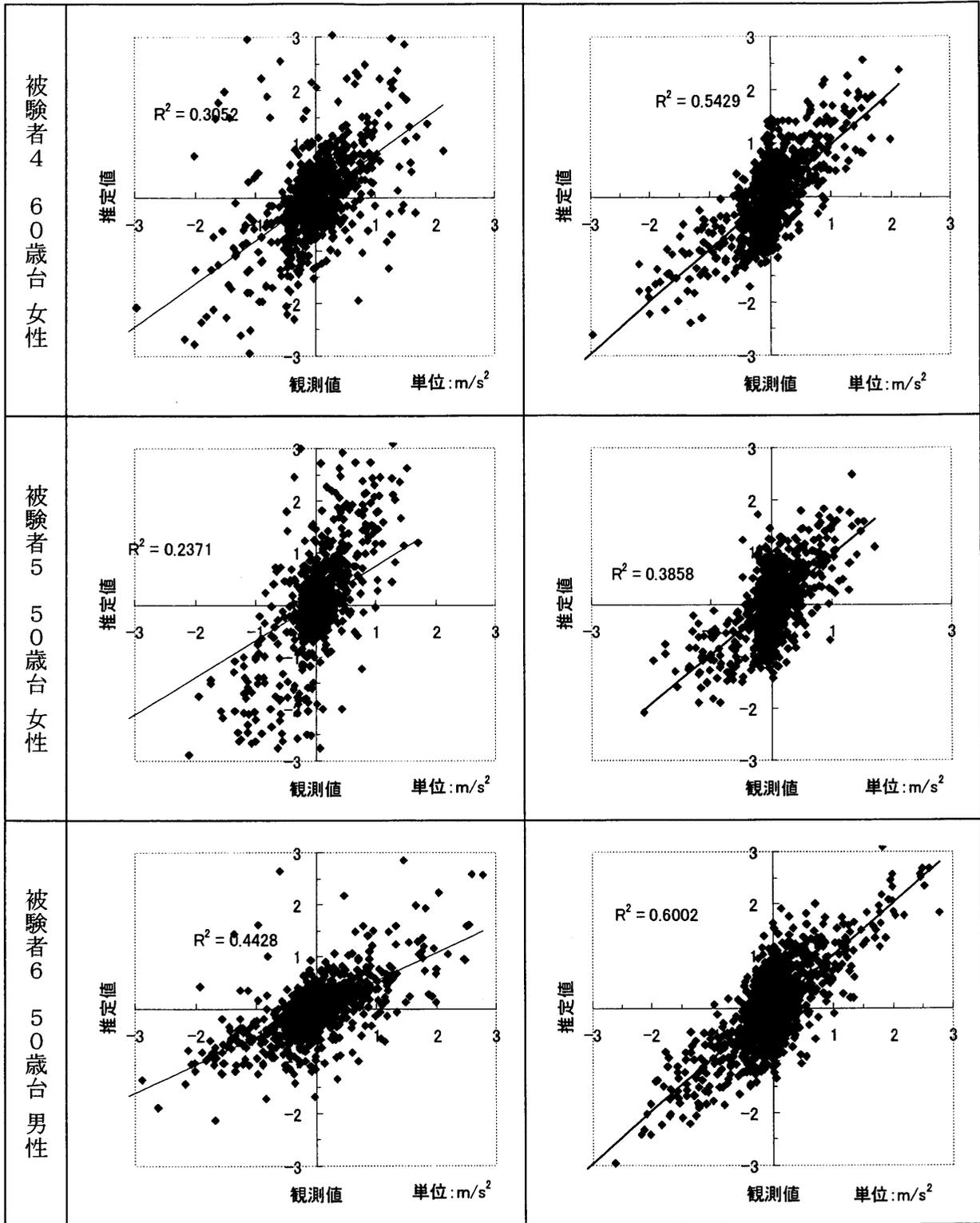
となる。従って、中間層の結合荷重の修正量は

$$\Delta w_{ji}^{(l)} = \varepsilon \left(\sum_k \delta_k^{(h)} w_{kj}^{(h)} \right) f'(u_k) x_i^{(p)}$$

である。

Appendix2 追従走行モデルの推定結果

被験者	線形追従理論を用いた推定誤差	ファジィ的ニューラルネットワークを用いた推定誤差
被験者1 大型車運転者	 <p>$R^2 = 0.3571$</p> <p>観測値 単位: m/s^2</p>	 <p>$R^2 = 0.4057$</p> <p>観測値 単位: m/s^2</p>
被験者2 大型車運転者	 <p>$R^2 = 0.3881$</p> <p>観測値 単位: m/s^2</p>	 <p>$R^2 = 0.4208$</p> <p>観測値 単位: m/s^2</p>
被験者3 60歳台男性	 <p>$R^2 = 0.5198$</p> <p>観測値 単位: m/s^2</p>	 <p>$R^2 = 0.5235$</p> <p>観測値 単位: m/s^2</p>



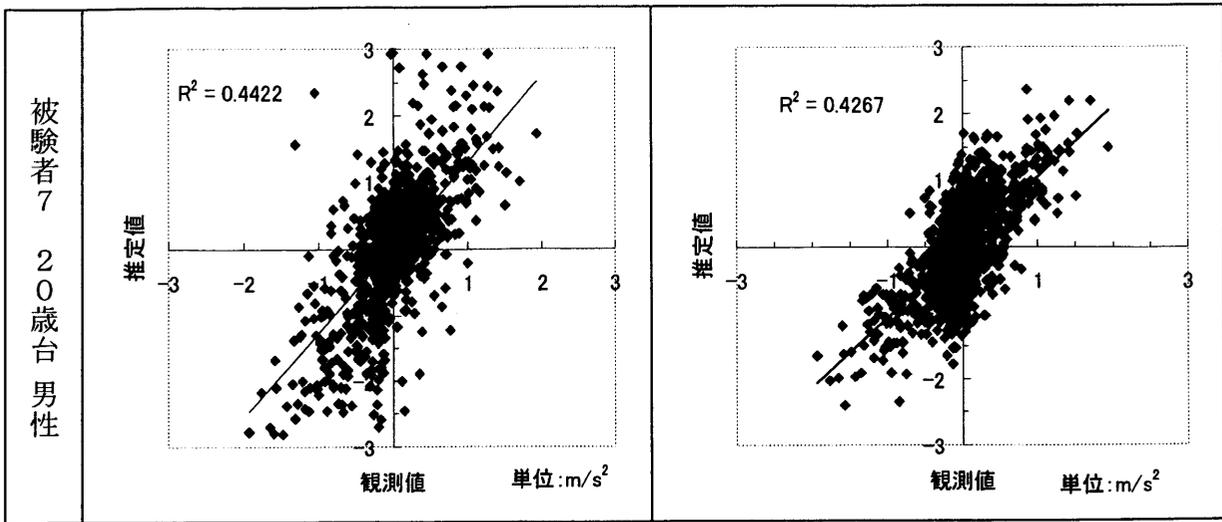
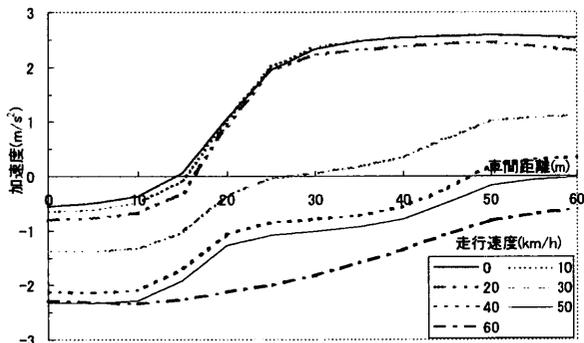
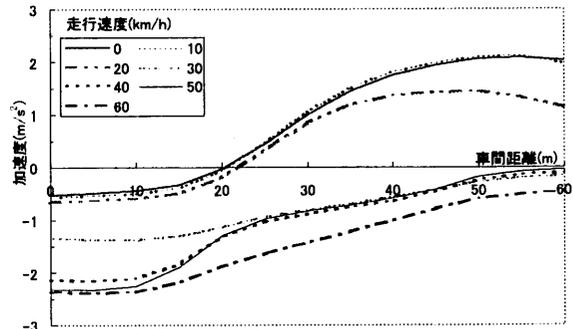


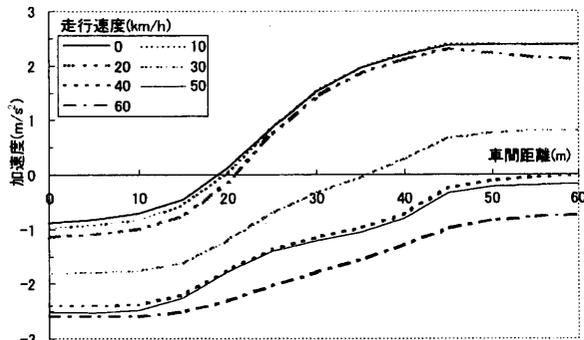
図 A2.1 各被験者についての追従走行モデルの相関



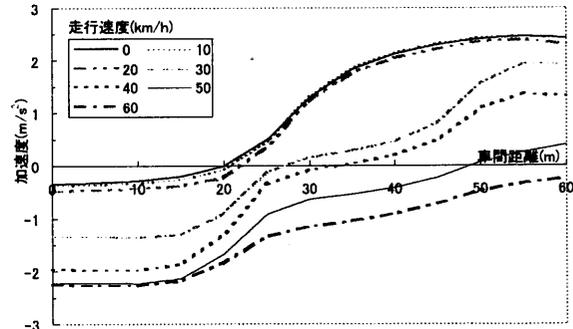
被験者1 大型車運転者



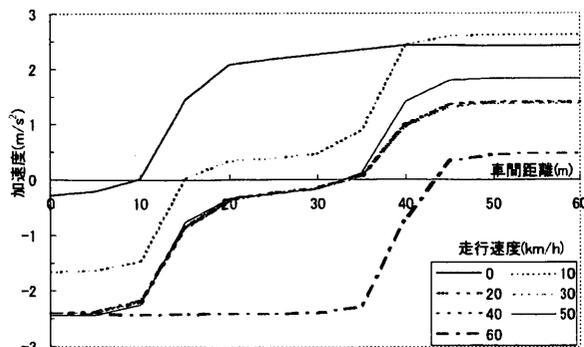
被験者2 大型車運転者



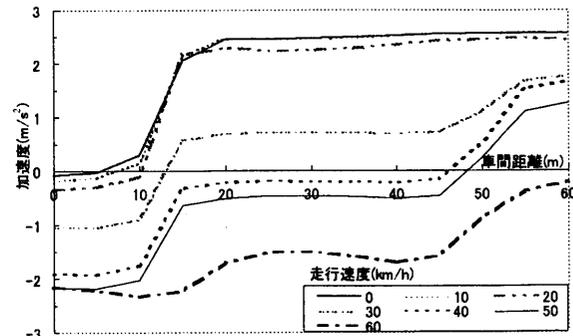
被験者3 60歳台 男性



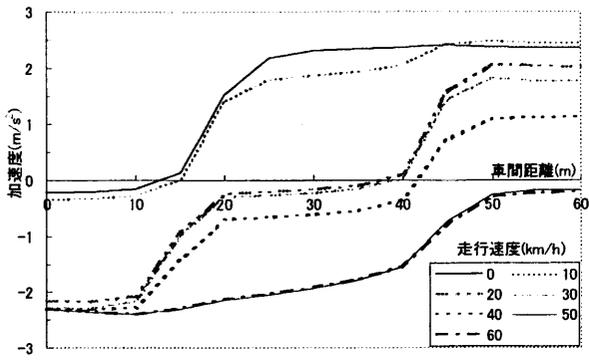
被験者4 60歳台 女性



被験者5 50歳台 女性

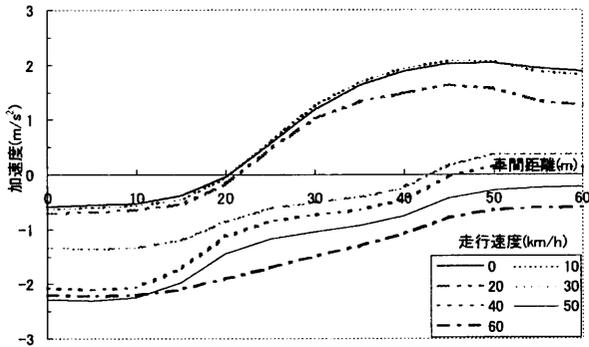


被験者6 50歳台 男性

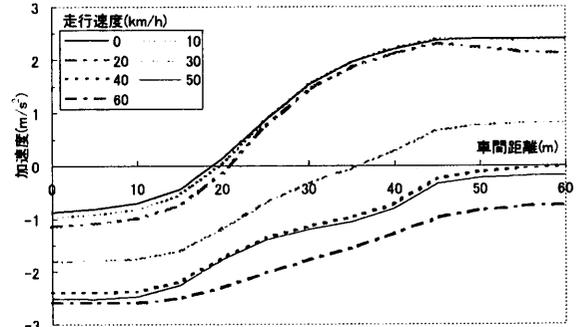


被験者 7 20歳台 男性

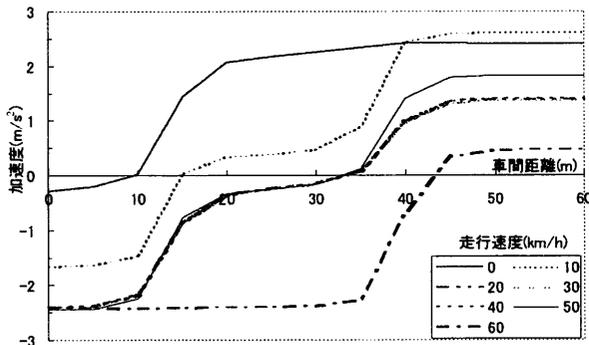
図 A2.2 各被験者についての加速度の推定値



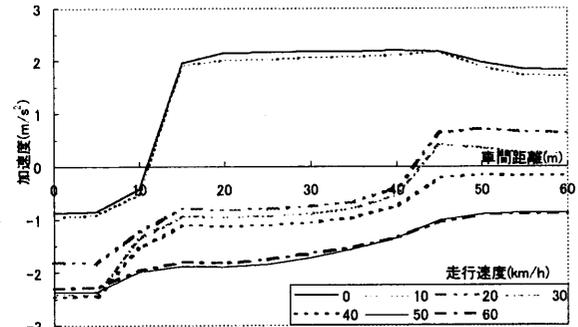
Model A 大型車運転者



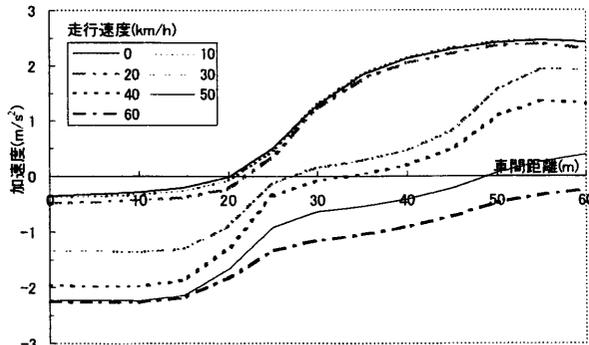
Model B 60歳以上男性



Model C 60歳以上女性



Model D 60歳未満男性



Model E 60歳未満女性

図 A2.3 各モデルにおける加速度の推定値