

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

修士論文

ミクロ交通流シミュレータを用いた
交通行動要因分析

Factor Analysis of Traffic Behavior
with Microscopic Traffic Simulator

2013 年 3 月 5 日提出

指導教員 吉村 忍 教授

学籍番号 37-116347

宮崎 保明

目次

図目次	iv
表目次	v
第 1 章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 公共交通機関の利用状況	1
1.1.2 公共交通機関利用促進策	5
1.1.3 施策のあるべき方向性	6
1.2 本論文の構成	6
第 2 章 交通行動のモデル化	8
2.1 交通調査手法の発展経緯	8
2.2 四段階推定法	12
2.2.1 大規模交通政策の分析	12
2.2.2 四段階推定法の適用	12
2.3 非集計行動モデル	16
2.3.1 個人の行動に着目する意義	16
2.3.2 ロジットモデルの導出	18
2.3.3 ロジットモデルの数理的性質	19
2.3.4 ネスティッドロジットモデル	21
2.4 Activity-based モデル	21
2.5 エージェントモデル	22

2.5.1	交通流シミュレーションの果たす役割	22
2.5.2	既往のシミュレータ	23
2.6	研究目的	24
第 3 章	知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES	27
3.1	MATES の概要	27
3.1.1	複雑系としての交通現象	27
3.1.2	MATES の基本設計	29
3.1.3	知的マルチエージェント	29
3.2	MATES の仕様	31
3.2.1	MATES における知的エージェントシステム	31
3.2.2	階層型道路ネットワーク	32
3.2.3	道路内の微視的構造上での挙動	35
第 4 章	交通行動要因分析モデル	40
4.1	交通行動要因分析モデルの構築	40
4.1.1	モデル概要	40
4.1.2	交通行動要因の選別	42
4.1.3	交通手段の設定	43
4.1.4	シミュレーション対象の設定	47
4.1.5	代表点の設定	47
4.1.6	交通手段分担率の導出	49
4.1.7	初期値の更新	51
第 5 章	性能評価	52
5.1	シミュレーション設定	52
5.1.1	金沢バストリガー方式	52
5.1.2	シミュレーションにおける評価事項	55
5.2	MATES による交通流シミュレーション	56
5.2.1	道路ネットワークの作成	56
5.2.2	交通状態の再現	56

5.3	施策対象者の交通行動要因分析	59
5.4	考察	63
5.4.1	時間価値	63
5.4.2	モデルの誤差原因	65
第 6 章	結論	67
	謝辞	68
	参考文献	70

図目次

1.1	年齢別一人一日当たりの平均トリップ数 (東京都市圏)	2
1.2	鉄道の輸送人員数の推移	3
1.3	バスの輸送人員数の推移	3
2.1	リンクトリップ・アンリンクトリップの例	10
2.2	Q-V 曲線	15
2.3	ロジットモデルの感度パラメータ	20
3.1	MATES における環境とエージェントの定義	31
3.2	仮想走行レーン	33
3.3	階層型道路ネットワーク	35
4.1	提案モデルのフロー	41
4.2	代表点のイメージ	48
5.1	金沢市周辺地図	53
5.2	金沢バストリガー方式施策結果	54
5.3	道路ネットワークと観測器設置箇所	57
5.4	観測交通量とシミュレーション交通量の関係	58
5.5	λ と分担率の関係	61

表目次

3.1	仮想走行レーンに付帯する情報の例	32
3.2	追従モデルパラメータ	36
4.1	自動車の走行経費減少便益	43
5.1	施策実施前の利用交通手段についてのアンケート結果	55
5.2	施策実施後のバス利用希望の有無についてのアンケート結果	56
5.3	施策実施前の結果比較	62
5.4	施策実施後の結果比較	63

第 1 章

序論

1.1 研究背景

1.1.1 公共交通機関の利用状況

現代では対処すべき交通課題が多岐にわたっており，公共交通機関の利用活性化もその一つである．その理由は，地域住民のモビリティ確保を満たす必要があるからである．モビリティが確保されていることは地域の活性化に大きな影響を与える．総務省の国勢調査によると，全国人口は 2007 年以降死亡数が出生数を上回る状況，つまり自然減少を続けており，同時に少子高齢化も進行している．これらの傾向は一部の地域を除いて各地域で同様である．このような状況において，地域の活力を維持，向上させるためにはその地域のアクティビティ（活動量）を拡大することが必要だと考えられる．国土交通省では，「地域の自立的発展のためのモビリティ確保に向けた検討の手引き」[26] と題して，2008 年にモビリティを確保するための方策に関する資料を公開している．そこでは，アクティビティの拡大を人と人，地域間の相互連携の拡大と捉えている．そして，それを実現する手段として，人々が地域活動に参加する機会を拡大することで生きがいや心の豊かさを得られるようにすること，人々が集まる適切な都市・地域の形成を誘導すること，そして行動の選択肢を拡大すること，この 3 つを提案している．各方面から様々な施策が実施されているが，ここでは 3 点目の行動の選択肢を拡大することに焦点を当てる．

まず，人々の交通手段の利用状況，つまり利用交通手段として何をどの程度使っているかを表す輸送分担率について述べると，1975 年頃から全国的に自動車の分担率が増

加傾向にある．特に三大都市圏以外での増加幅が大きく，2004年には全体の88%を占めている．都市規模が小さいほど交通手段としての自動車依存度が大きい，その原因は生活圏の郊外化やモーダリゼーションの進展である．地方中心部の衰退もあり，郊外の開発が進むことで日常的に自動車を利用する頻度が増え，ますます行動が広域化している．例として，東京都市圏パーソントリップ調査[32]の一人一日当たりのトリップ数を図1.1に示す．横軸は交通行動を行う人の年齢，縦軸は平均トリップ数のグロス原単位である．凡例の「S63」は昭和63年，「H10」と「H20」はそれぞれ平成10年と平成20年を意味する．図1.1はこの3回分の公開データを利用して作成した．これを見ると，20～39歳までの比較的若い年代の人のトリップ数が減少傾向であるのに対し，50歳以上，特に60歳以上のトリップ数が大きく増加していることが分かる．このことから，少なくとも東京都市圏においては高齢者が積極的に交通行動を行う傾向にあることが示唆される．

しかし，人口減少が進んでいる地方でのモーダリゼーションの進展は，公共交通機関の利用低迷を意味する．代表的な公共交通機関として鉄道・地下鉄とバスがあるが，いずれも事業環境は厳しい．図1.2と図1.3はそれぞれ鉄道とバスの年間輸送人員数の推移である．

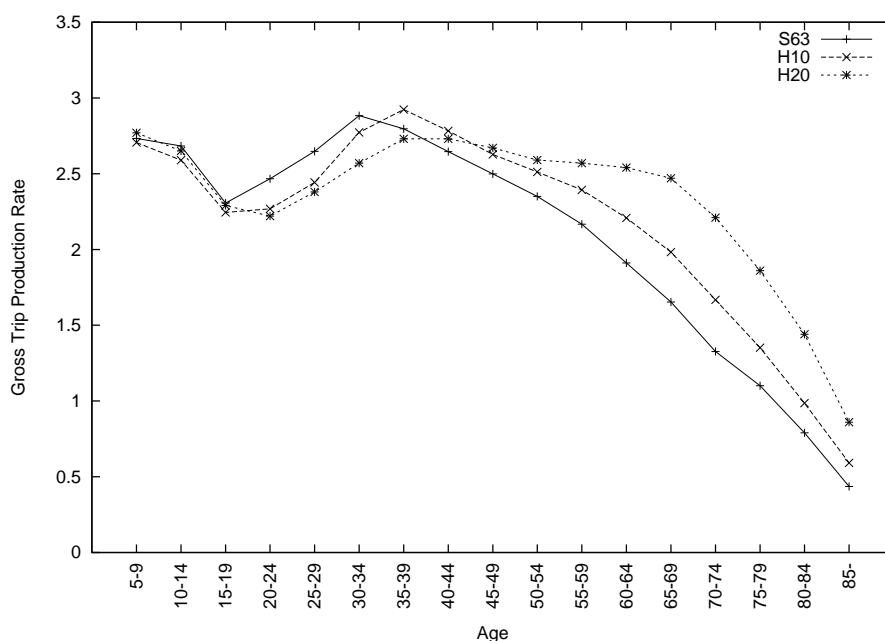


図 1.1 年齢別一人一日当たりの平均トリップ数 (東京都市圏)

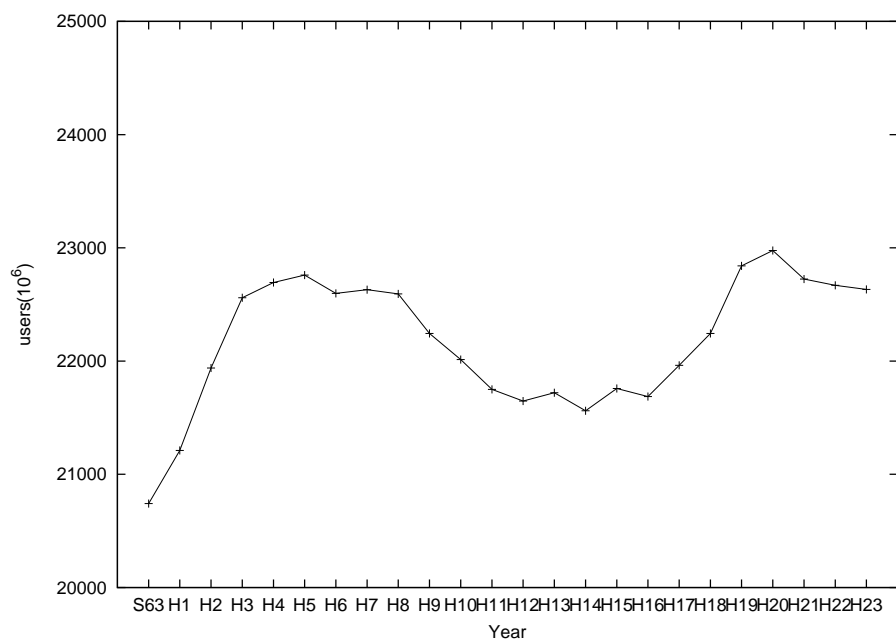


図 1.2 鉄道の輸送人員数の推移

([27] より作成)

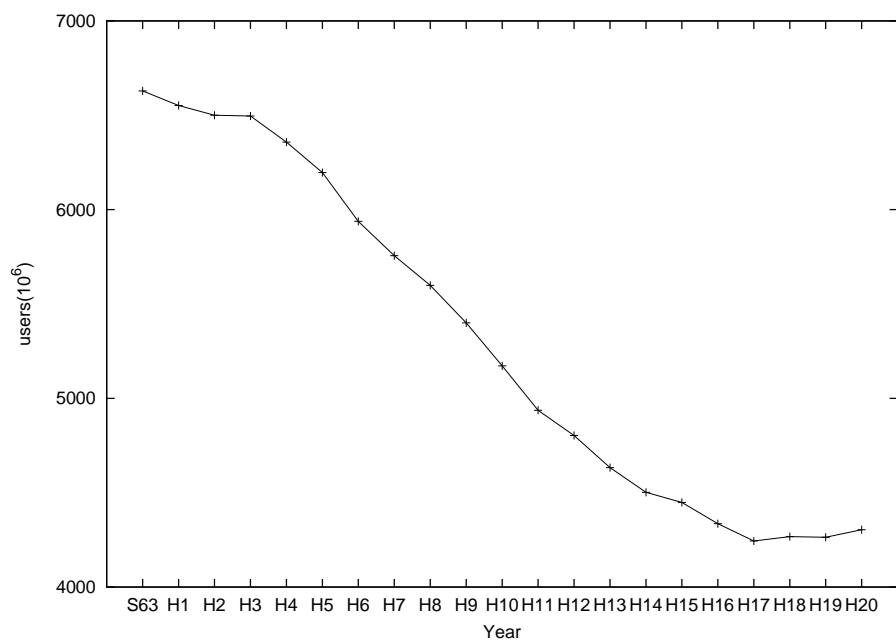


図 1.3 バスの輸送人員数の推移

([28] より作成)

図 1.2 は国土交通省の鉄道輸送統計調査年報 [27] から、図 1.3 は同じく国土交通省の自動車関係情報 [28] に記載されている数値をグラフ化したものである。図の横軸は年であり、年号で表記している。S が昭和、H が平成を表す。縦軸は輸送人員数であり、単位はともに百万人である。鉄道に関しては 2009 年までは上昇基調にあったが、その後再び停滞している。バスについては一層深刻であり、2005 年から 2008 年頃は安定しているが、一貫して減少傾向が続いている。

また、国土交通省の公開資料 [25] によると、全国的に地方鉄軌道は路線廃止が続いており、2000 年度から 2009 年度の間に、33 路線、634.6km が廃止されている。事業者に着目すると、中小民間鉄道会社 50 社、第三セクター鉄道 42 社を合わせた計 92 社の中で、約 83% に当たる 76 社が赤字を計上している。一方、バス交通も毎年 2000km 程度路線が廃止され、乗合バスの民間事業者の約 7 割、公営事業者の約 9 割が赤字である。収支率が一定以下になると、公的支援なしでは運行を維持するのが困難になるが、近年は自治体の財務状況が良くないこともあり、抜本的な対策は取れないのが現状である。結果、サービスの縮小に伴って、周辺数百メートル内に利用できる公共交通機関が存在しない公共交通空白地域が拡大している。

もし、あらゆる人が公共交通機関を必要としていないのであれば、このような状況も許容できるかもしれない。しかし、輸送可能人員に対する二酸化炭素の排出量を考えれば、環境負荷の観点でも公共交通を重視すべきだという意見ある上、現実問題としても公共交通を必要としている人は存在する。一般に加齢に伴って身体能力、判断力は衰えるため、高齢者ほど運転に不自由を感じるようになる。自力で運転することができない人が長距離移動する場合は、誰かに送迎してもらるかタクシーや公共交通機関を利用することになる。様々な理由で高齢者の単身世帯が増えている中、常に送迎を頼める人がいる環境を期待するのは難しく、日常的にタクシーを利用するのも金銭的に容易ではない。

そのような人にとっては公共交通機関は生活の足として欠かせないものであるが、その利便性が低下しているのが近年の状況である。既に、地域住民が生活用品などの購入に困難をきたす「買い物難民」[38] などの形で弊害は明らかになっており、前述したように少子高齢化が進んでいることからその傾向は今後も強まるものと思われる。また高齢者に限らず、通学目的の生徒・学生も同様の不利益を被り得る。この状況を改善するためには、財政的に制約のある中で有効な利用促進策を打ち出すことが必要

である．次節では，その取り組みの一部紹介するとともに解決すべき課題について触れる．

1.1.2 公共交通機関利用促進策

国土交通省は，2007 年 10 月 1 日に地域公共交通の活性化及び再生に関する法律を施行した．それに伴い，2008 年度から 2010 年度の 3 年間にかけで行う政策として，地域公共交通活性化・再生事業計画を策定し，地域公共交通維持のための施策に対し一定の補助を行った．施策例として，鉄道・バス・乗合タクシー・旅客船などの実証運行や，乗り継ぎ円滑化，公共交通の利用促進活動などが挙げられ，2010 年度は 436 件が認定された．その中でも，取り組み対象となる交通モードで最も高い割合を占めたのがコミュニティバスである．

コミュニティバスとは，交通空白地域の解消・道路混雑の緩和，地域活性化などを目的として，自治体などが運行するバスのことである．路線バス，デマンドバス・タクシーによる施策がそれに続いており，全体にバス関連の施策が目立つ．これは，既存の道路を利用できる点で，鉄道網を設置する必要がある鉄道に比べて車両以外の初期投資を抑えることができるためであると考えられる．2008 年度までに 1000 以上の市町村が導入し，4314 系統が運行されている．東京都武蔵野市で導入されたコミュニティバスである「ムーバス」など，一定の成果を出している事例もある一方で，数年で廃止される施策も多いのが現状である．以下にコミュニティバスの課題を示す．

事業の継続性：

施策は補助金によって成り立っているものが多く，事業によって収益性が改善しても，収支では赤字のままのものが大半である．また運転士を雇っている場合は高齢化による人件費の増加も起こっており，長期的にはサービスの見直しが必要になるものと思われる．

対象地域のニーズの把握：

コミュニティバスは，その目的から継続的なサービス改善が要求される．新規路線を打ち出す場合には，利用者のニーズを満たすために停留所の新設や運行経路変更な

どが発生しやすい。これは顧客志向の実践であると同時に、一定以上の利用実績が事業継続の条件に付与されている場合があることも関係していると思われる [36]。サービス改善そのものは利用者にとっては望ましいものであるが、頻繁なサービス変更は利用者にとってサービス内容を把握しづらくなる原因となり得る上、対象地域の住民のニーズを組み入れるための継続的なマーケティングが欠かせない。

1.1.3 施策のあるべき方向性

前節を踏まえると、継続性があり、客観的なサービス設計がなされた事業が望ましいと考えられる。現状では、その運行ルートや運賃、頻度、対象利用者を決定するためにマーケティングを行い、定性的な評価から策定がなされている。このような事業を立案するためには、当然そのような手法も不可欠である。しかし、施策による交通需要の変化を事前に推定することで施策効果を定量的に評価することも必要だと考える。現在までの事例を見ると、従来の交通計画で実施されるような交通行動分析まで事前に実施している例はまだないと思われる。

交通空白地域の解消が唯一の目的であるのなら、このような議論は不要かもしれない。しかし、上記のような課題を解決するために、それでも限られた選択肢から収益性を向上させる取り組みが求められる。また、日本では私企業が公共交通を担っている事例も多いことが、公共交通事業の収益性を一層重視する要因にもなっている。したがって、本研究では小規模領域に対するバス施策を対象に、その施策効果の定量的な評価方法を考案することを目的とする。つまり、バス需要を事前に評価できる、交通行動分析手法の確立を目指す。

1.2 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第 2 章において主に領域上の交通需要を予測するために利用されているモデルを紹介する。具体的には、それらの中でも代表的な四段階推定法、非集計行動モデル、そして本論文で提案するモデルの土台となるエージェントモデルを取り上げる。

第 3 章では提案モデルの土台として用いる交通流シミュレータに関する説明を行う。交通シミュレーションの特徴と意義を述べ、本研究で利用する知的マルチエー

ジェント交通流シミュレータ MATES(Multi-Agent based Traffic and Environment Simulator)[7][15][34][39] の機能と仕様を説明する．

第 4 章で，本論文で提案する交通行動要因分析の詳細を説明する．そのモデルの概要と適用手順を示し，既往の類似モデルとの比較を行う．

第 5 章ではシミュレーションにより提案モデルの性能を検証する．本論文では石川県金沢市周辺を対象領域とし，同領域で行われたバス交通施策による施策効果を評価する．

最後の第 6 章で本論文の結論を述べる．

第 2 章

交通行動のモデル化

2.1 交通調査手法の発展経緯

交通計画の立案，評価において交通需要の予測はその妥当性を保証するために行われている．交通計画の実施には巨額の費用と時間が必要なため，交通需要予測の精度を向上させるために様々な調査法やモデルが考案されている．特に最近では交通需要を引き起こすもとである，人々の交通行動に対する意思決定構造が注目されている．本来は，その具体的なメカニズムは個人差があり，一様に論じることが難しいが，心理学の要素を取り入れたり，情報技術の発達を利用したりすることで，それに対応する動きも起こっている．本節では，交通状況を把握し，交通需要予測の精度を向上させるために考案された代表的な交通調査手法を紹介する．そして，次節以降でそれらを利用した需要予測モデルを説明する．

1．道路交通センサス

正式には，全国道路・街路道路情勢調査という．道路交通センサスは国土交通省を中心として 1928 年から実施されている交通量調査である．現在は OD 調査と一般交通量調査という 2 種類の調査が概ね 5 年おきに実施されている．一般交通量調査はさらに，道路状況調査，交通量調査，旅行速度調査に分類される．それぞれの調査内容について簡単に説明する．

- OD 調査...高速道路の利用者に対して出発地 (Origin) と目的地 (Destination) をインタビューまたはアンケートにより調べる．

- 道路状況調査...車線数，車道幅員，交差点数等の道路の状況を調べる．
- 交通量調査...道路上の調査地点を通過する自動車の台数を調べる．
- 旅行速度調査...道路を走行する自動車の平均速度を調査する．

これらの調査結果とデータは，国土交通省のウェブサイト [26] で公開されている．

2. パーソントリップ調査

日本における代表的な交通調査としてパーソントリップ調査 (PT 調査) が挙げられる．PT 調査は 1967 年に広島都市圏で大規模に実施されて以来，日本各地で実績を重ねている．PT 調査は，主に都市圏において，人の動きを総合的に調べることで交通機関の利用実態を把握することを目的としている．基本的には都道府県や市単位で実施されているが，関東や関西の大都市圏では周辺都市と連携・協力して行っている場合もある．

パーソントリップの概念を簡単にまとめる．以下は「東京都市圏パーソントリップ調査の利用手引き」から引用する [31]．

“「トリップ (Trip)」とは，人または車両がある目的（例えば、出勤とか買物など）を持って起点から終点へ移動する場合に，その一方向の移動を表す概念であり，同時にその移動を定量的に表現する際の単位である．すなわち、パーソントリップは空間的な人の移動を表す概念であり，またその計測単位である．”

また，パーソントリップには 2 種類のトリップがあり，ある地点から目的とする地点までの一連の行動を目的トリップ (リンクトリップ) という．一方，図 2.1 の最初の目的トリップのように，2 つの停留所の前後で徒歩，バス，徒歩とさらに 3 つのトリップに分解することができる．このように利用交通手段によって分けたトリップを手段トリップ (アンリンクトリップ) という．PT トリップはリンクトリップ，アンリンクトリップ両方を調査対象にしている．従来から行われている自動車 OD 調査や道路交通センサスではアンリンクトリップしか把握できない．

PT 調査の調査項目は，実施者によって細部に多少差異があるが，概ね共通している．ここでは，2008 年に実施された第 5 回東京都市圏 PT 調査の例を記す．

世帯属性・個人属性：

住所，性別・年齢，職業，勤務先所在地，運転免許有無，自動車の保有台数，一日の走行距離など

トリップ特性：

発地場所（発生地ゾーン），発施設，発時刻，着地場所（目的地ゾーン），着施設，着時刻，目的，交通手段，手段別所要時間など

これらの調査を，ゾーンと呼ばれる一定の領域単位で行っている．ゾーンはレベル別に数種類あることが普通であり，都県市レベル，市区町村レベル等に分かれている．調査結果は実施主体ごとに集計された形で公開されている場合が多い．場合によっては，詳細なデータが公開されている．

3. SP 調査

SP 調査の SP とは Stated Preferences の略であり，表明選好法，仮想意識調査，選好意識調査などと呼ばれることもある．設定された仮想的な状況において選択肢の中から交通行動の優先順位を答えさせるアンケート形式を取る [2]．マーケティング分析などでもよく用いられる調査手法でもあり，交通計画にあたって実施されるようになったのは 1970 年代末である [9]．SP 調査は，現実に行われた選択行動を調査する

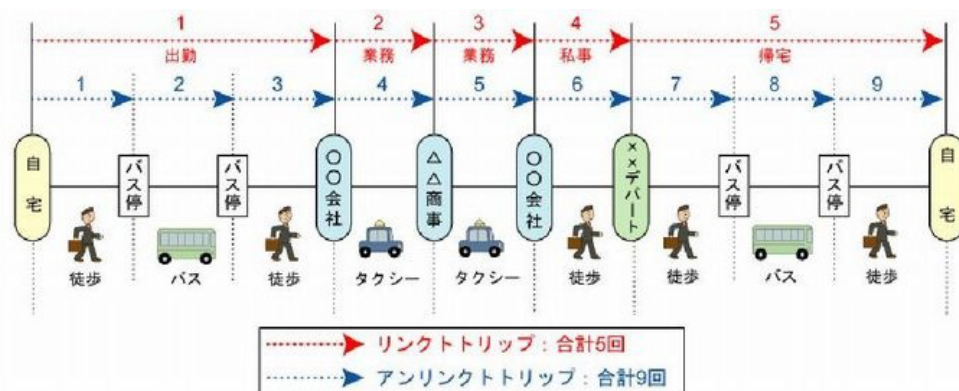


図 2.1 リンクトトリップ・アンリンクトトリップの例

([31] 中の図-1 より引用)

RP(Revealed Preference) 調査と対比する形で用いられる。

SP 調査では、実験者が各選択肢の特性値を設定して選択主体に示し、それに対する被験者の反応を聴取する形態をとっている。方式としては、2 つの選択肢の間の優劣を問うものと複数の選択肢の間の選好順位を問うものがある。また選択肢の示し方を抽象的にするか具体的にすることで分類することもできる。

SP 調査と RP 調査の長所、短所を比較する。まず、RP 調査の長所を挙げると、それが実際に行われた選択であるということである。しかし、記憶が薄らぐと正確な調査ができなくなる他、選択肢の数が多い場合には個人によって解釈の仕方が異なる可能性もある。さらに、現実起こった現象に対する反応を調べているため、未知の状況などを前もって調べることはできない。

一方で、SP 調査では選択肢を実験者が自由に設定できるため、調査の自由度は高い。しかし、SP 調査でも、選択肢の数が多くなると被験者は優先度の高くない選択肢を比較するのが難しくなるため、回答の精度が下がる可能性がある。また、自由に状況を設定できるとは言っても、適切に想定している状況を表現できるかどうかには調査の意義がかかっている。仮に適切に表現できても、被験者はあくまで想像しているだけなので、現実世界での挙動とは異なる可能性は常に存在する。

4. プローブパーソン調査

上記で説明した道路交通センサスやパーソントリップ調査は交通環境の量的把握に主眼が置かれている。また、紙ベースのアンケート調査が中心で、観測機などを利用している場合も観測地点の数は限られる。さらに、近年では個人情報保護の意識が高まっており、調査の回収率低下や調査コストの増大などが課題となっている。

このような課題を解決する手法として、GPS などの移動体通信機器を用いた交通行動調査手法が考案された。その原型となるのが 1996 年に Lexington で実施された GPS 車載機によるカートリップ調査 [6] であり、プローブパーソン調査はそれを交通行動調査一般に拡張したものである。背景には情報技術の発達があり、調査コストと取得データの精度、この 2 つの面からその利点を説明することができる。

調査コスト:

プローブパーソン調査では、データ収集の際にデータを電子化して取得する。その

ため、調査結果を分析するために用いられるマスターデータの作成が容易になる。

取得データ精度:

紙アンケート調査は、回答を被験者の記憶に頼るため、記憶から漏れてしまったために把握されないトリップが存在し得る。プローブパーソン調査では GPS を用いることで随時記録を取るのが容易になり、トリップの把握が向上すると考えられる。また、トリップ時の通行経路のような、従来の調査法では回答するのに負担が大きい情報を取得することもできるようになっている。その点で収集できるデータの幅が広がることが期待できる。

日本においても、交通計画にプローブパーソン調査を利用した事例はあり、一定の効果をもたらしたとされる報告もなされている。しかし、プローブパーソン調査も万能ではないため、既存の手法と上手く組み合わせる必要がある。

2.2 四段階推定法

2.2.1 大規模交通政策の分析

交通需要予測に用いられるモデルとして、最も代表的なものが四段階推定法である [18]。これはパーソントリップ調査を基にしており、1970 年頃に実務的にも確立された。

四段階推定法では、交通量を発生・集中交通量、分布交通量、分担交通量、配分交通量という 4 つの段階に分類し、それぞれを別々のモデルを使って交通需要を予測する。このモデルが実務的に広く利用されるのは、論理が明快であり、また分析方法として簡便であるためである。実際、現在でも自治体などを中心に交通計画の際に四段階推定法を用いて将来の交通需要を説明している事例は多い。

以下では、四段階推定法による需要推定の一般的な手順を説明する [35]。

2.2.2 四段階推定法の適用

Step 1. ゾーニング

ゾーニングとは、対象領域をいくつかの領域（ゾーン）に分割することをいう。調査項目に応じて大ゾーン、中ゾーン、基本ゾーン、計画ゾーンの4つが適用される。

- 大ゾーン...大きな交通流動を把握するためのゾーン
- 中ゾーン...集計・解析を行う場合に基本となるゾーン
- 基本ゾーン...予測・解析、骨格的な施設計画を行う基本ゾーン
- 計画ゾーン...施設計画・地区レベル計画を行う場合に基本となるゾーン

Step 2. 生成交通量の推計

生成交通量とは、需要予測をする対象領域全体としてみたときの交通発生量を指す。例えば東京都市圏の需要予測をすることを考えると、東京都や神奈川県など都県単位の交通量ではなく、それらを合計した東京都市圏（東京都、神奈川県、埼玉県、千葉県など）の総交通量が生成交通量となる。

生成交通量を推定する際には、国勢調査の将来人口推計などを基にして、トリップ発生法または生成原単位法が利用される。トリップ発生法とは、対象領域内のゾーン単位に発生トリップを推計し、それらを加算することで求める方法である。それに対して生成原単位法とは、対象領域内の居住者数に一人当たりトリップ数（生成原単位）を掛け合わせることで求める方法である。この場合は年齢や性別、トリップ目的など個人属性別に生成原単位を設定する必要がある。

Step 3. 発生・集中交通量の推計

この段階では、各ゾーンについて、そこから発生する交通量とそこへ到着する交通量を推定する。発生する交通量が発生交通量、到着する交通量が集中交通量である。

発生・集中交通量を推定する際には、原単位法、または回帰モデル法が用いられることが多い。原単位法とは、人口一人当たりや建物床面積当たりのトリップ数をデータから算出して、ゾーン別将来人口や将来建物床面積を乗じて交通量を推計する方法である。回帰モデル法とは、発生交通量、集中交通量を被説明変数とする需要関数を作成する方法である。

Step 4. 分布交通量の推計

分布交通量はあるゾーンから別のゾーンへの交通量、つまりゾーン単位の出発地と

目的地の OD ペア毎の交通量を指す．そのため OD 交通量とも呼ばれる．分布交通量の予測に当たっては，異なるゾーン間の移動量を推計する内外モデルと同一のゾーン内の移動量を推計する内々モデルがある．

Step 5. 分担交通量の推計

分担交通量とは，各 OD ペアにおける交通手段毎の交通量を指す．分担交通量を推計するためのモデルには，トリップエンドモデルとトリップインターチェンジモデルがある．

トリップエンドモデルとは，地域やゾーンの特性により分担率を決定するモデルである．一方，トリップインターチェンジモデルは，ゾーン間の各交通機関のサービス水準により分担率を決定する．

Step 6. 配分交通量の推計

自動車によるトリップの場合には，同一の OD ペアであっても目的地に到着するまでに取り得る経路が複数存在するのが普通である．その経路毎の交通量を配分交通量という．配分交通量を推計するのに当たっては，自動車の OD 表を道路ネットワークに割り当てることが必要になる．道路ネットワークは，交差点（ノード），交差点間の単路（リンク）から成り，場合によってはリンクの車線数も考慮する．

配分交通量の推計モデルは配分手法に関して，需要配分と実際配分の 2 種類に分類することができる．

1. 需要配分

分布交通量の全量をリンク評価値の最小な経路に一度に配分する手法である．リンク評価値とは，そのリンクを通過するための所要時間に従って決まる値である．これにより，各リンクに対する潜在的な需要量を得ることができる．All or Nothing 法とも呼ばれる．

2. 実際配分

実際配分とは，より現実に即した交通量の配分を再現するための手法である．その中で実務においても利用されることが多いのが，分割配分法と利用者均衡配分法で

ある。

分割配分法は OD 表を分割した分割 OD 表を作成し，それを各リンクの容量制限を考慮しつつ最短経路に配分する手法である．OD を分割するのは，リンク交通量が増加するにしたがって，そのリンク内での速度（リンク旅行速度）が減少する，という関係が再現するためである．リンク旅行速度を算出する際には，リンク交通量とリンク旅行速度の関係を表した $Q-V$ 曲線を利用することが多い．実際の道路環境では，ある臨界速度を基準にして，自由走行相と渋滞相に分けることができる場合が多い．自由走行相では速度の低下に伴って交通量は増加するが，渋滞相では速度の低下とともに交通量も減少する．このイメージを図 2.2 で表した．図の横軸は交通量，縦軸は速度を表す．

一方，利用者均衡配分法は，それぞれの運転者が合理的に行動していれば，最終的に交通状況はある定常状態に収束するはずである，という仮説を前提にしている．提唱された仮説である Wardrop の第一原理 [8] に従って厳密な均衡解を推計する方法である．Wardrop の第一原理とは，

“ 各運転者は，自分にとって最も旅行時間の短い経路を選択する．その結果，OD 間に存在する経路のうち，利用される経路の旅行時間は全て等しく，利用されない経路の旅行時間よりも小さいか，せいぜい等しい状態となる ”

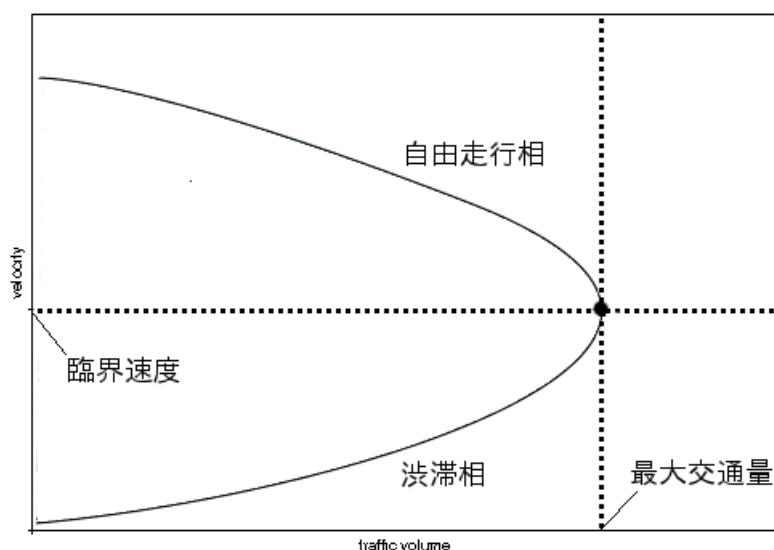


図 2.2 $Q-V$ 曲線

という原則である．これを数式で表すと以下のようになる．

$$c_k^{rs} = u^{rs} \quad (\text{if } f_k^{rs} > 0) \quad (2.1)$$

$$c_k^{rs} \geq u^{rs} \quad (\text{if } f_k^{rs} = 0) \quad (2.2)$$

ただし， c_k^{rs} は発生地 r ，目的地 s を OD ペアとして持つときの k 番目の経路コスト， u^{rs} は発生地 r ，目的地 s を OD ペアとして持つときの最小コスト， f_k^{rs} は発生地 r ，目的地 s を OD ペアとして持つときの k 番目の経路交通量である．

利用者均衡配分法では，旅行時間の推計にリンクパフォーマンス関数を定義する必要がある．これはあるリンクを通過するのに必要な時間を表す関数である．その代表的な関数として，(2.3) 式で表される BPR 関数を用いられることが多い．

$$t_a(x_a) = t_a(0) \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{x_a}{c_a} \right)^\beta \right\} \quad (2.3)$$

これは，交通量が 0 のときのリンク a の旅行時間 $t_a(0)$ とそのリンクの交通量 x_a ，交通容量 c_a ，そして係数 α と β に従って，交通量が x_a のときのリンク a の旅行時間 $t_a(x_a)$ を求める．

利用者均衡配分法は，Wardrop の第一原則に厳密に従っているため再現性が高く，入力が同じであれば一様な結果が得られるという利点がある．また，導出過程に恣意性がなく，理論的に説明ができる．その特徴を生かし，また選択に確率的な要素を加えることで一体的に交通需要予測を行う研究もある [22]．ただし，モデルの適用に当たっては，リンクパフォーマンス関数を適切に設定する必要があり，それが交通量や旅行時間の精度に大きな影響を与えることには注意しなければならない．

2.3 非集計行動モデル

2.3.1 個人の行動に着目する意義

非集計行動モデルは，四段階推定法とは別に，主にアメリカを中心に研究，開発が進んできた交通需要予測モデルである．しかし，非集計行動モデルの中でも代表的なロジットモデルの研究は，交通需要予測の分野ではなく計量生物学の分野を端に発し

ている．そして，経済学など，これら以外の分野にも広く適用されているモデルである．交通需要予測の分野に非集計行動モデルが導入されたのは 1970 年代になってからである．そのきっかけとなるのが，McFadden らの交通需要を経済学の消費者行動と同じ理論上に位置づけた研究である [4]．その後，ロジットモデルを改良する形で，ネスティッドロジット (Nested Logit, NL) モデルなどの派生モデルが研究・考案されるに至っている．いずれのモデルにおいても，個々の原データをそのまま扱うと同時に，行動を確率事象として取り扱う．

非集計行動モデルの基本的な理論について説明する [33]．非集計行動モデルの基本的な前提は「個人が交通行動の基本的な意思決定単位であり，個人はある選択状況の中から最も望ましい選択肢を選択する」というものである．選択肢の望ましさは，その選択肢の効用の値によって決定される．料金などの交通手段のサービス特性，個人のもつ職業・年齢・所得などの社会経済特性，トリップ目的・時間帯などのトリップ特性，これらが効用に影響を与える要因になると考えられている．

その理論的な裏付けにランダム効用理論がある．これは効用が確率的に変動すると考えるものである．交通行動に関しては，確定的な行動を仮定するよりも妥当だと考えられており，その主な理由を 3 つ挙げる．

1. 選択行動の非合理性

個人の行動は常に合理的に選択されるとは限らず，同じ情報を得ても認知の仕方によって異なった振る舞いをする可能性がある．

2. 情報の不完全性

利用可能な選択肢の範囲やその特性について，十分な情報がない場合がある．

3. 選択要因の複雑性

具体的に理論を適用する場面では，効用に関係する選択肢の持つ特性，個人の社会経済属性その他の要因の中には測定が困難なものや，複雑過ぎて関数の中に取り入れにくいものなどが存在する．

次項で，ランダム効用理論を取り入れたロジットモデルの説明を行う．

2.3.2 ロジットモデルの導出

ロジットモデルでは、効用関数の確率項にはガンベル分布に従う確率変数 ϵ が利用される。 κ と η をパラメータとして、ガンベル分布の確率分布関数 $F(\epsilon)$ 、確率密度関数 $f(\epsilon)$ はそれぞれ (2.4) 式、(2.5) 式で表される。

$$F(\epsilon; \kappa, \eta) = \exp(-\exp(-\kappa(\epsilon - \eta))) \quad (2.4)$$

$$f(\epsilon; \kappa, \eta) = \kappa \exp(-\kappa(\epsilon - \eta)) \cdot \exp(-\exp(-\kappa(\epsilon - \eta))) \quad (2.5)$$

ここで、個人 n が持つ選択肢の数が I_n だけあると仮定すると、選択肢 $i (= 1, 2, \dots, I_n)$ の効用 U_{in} は、効用の確定項 V_{in} と確率項 ϵ_{in} の和、

$$U_{in} = V_{in} + \epsilon_{in} \quad (2.6)$$

で表せる。今、 ϵ_{in} が独立で同一のガンベル分布に従う場合、このガンベル分布のパラメータ $(\eta, \kappa) = (0, 1)$ を仮定する。このとき、 U_{in} はパラメータ $(V_{in}, 1)$ のガンベル分布に従うことが分かっている。選択肢 1 を選ぶ確率を考えると次のようになる。

$$\begin{aligned} P_{1n} &= \Pr(U_{1n} \geq U_{in} \quad (i = 2, 3, \dots, I_n)) \\ &= \Pr(V_{1n} + \epsilon_{1n} \geq V_{in} + \epsilon_{in} \quad (i = 2, 3, \dots, I_n)) \\ &= \Pr \left\{ V_{1n} + \epsilon_{1n} \geq \max_{i \neq 1} (V_{in} + \epsilon_{in}) \right\} \end{aligned} \quad (2.7)$$

ここで、 U_n^* を

$$U_n^* = \max_{i \neq 1} (V_{in} + \epsilon_{in}) \quad (2.8)$$

と定義すると、 U_n^* は $(\ln \sum_{i=2}^{I_n} \exp(V_{in}), 1)$ のガンベル分布となる。さらに $U_{in}^* = V_{in}^* + \epsilon_{in}^*$, $V_n^* = \ln \sum_{i=2}^{I_n} \exp(V_{in})$ とおくと、 ϵ_n^* はパラメータ $(0, 1)$ のガンベル分布となる。

したがって、

$$\begin{aligned} P_{in} &= \Pr(V_{1n} + \epsilon_{1n} \geq V_{in}^* + \epsilon_{in}^*) \\ &= \Pr \{ (V_{in}^* + \epsilon_{in}^*) - (V_{1n} + \epsilon_{1n}) \leq 0 \} \end{aligned} \quad (2.9)$$

となる．2 つの独立したガンベル分布の確率変数の差がロジスティック分布となるという性質を利用すると，

$$\begin{aligned} P_{1n} &= \frac{1}{1 + \exp(V_n^* - V_{1n})} = \frac{\exp(V_{1n})}{\exp(V_{1n}) + \exp(V_n^*)} \\ &= \frac{\exp(V_{1n})}{\exp(V_{1n}) + \exp(\ln \sum_{i=2}^{I_n} \exp(V_{in}))} = \frac{\exp(V_{1n})}{\sum_{i=1}^{I_n} \exp(V_{in})} \end{aligned} \quad (2.10)$$

と表すことができ，これがロジットモデルによる選択確率になる．

ロジットモデルによって導出される選択確率は各選択肢の効用関数を変数とし，それらにはパラメータが存在する．これらは，選択肢の効用となり得る要因，つまり効用関数における各確率変数の重み付けに利用される．これらのパラメータは，モデルを実行する前に何らかの方法で推計する必要があり，最尤法やベイズ推定法などが用いられることが多い．そのパラメータの性質について次節で説明する．

2.3.3 ロジットモデルの数理的性質

選択肢が 2 つだけの場合を 2 項ロジット (Binary Logit, BL) モデル，3 つ以上ある場合を多項ロジット (Multinomial Logit, MNL) モデルと呼ぶ場合もある．ここで，2 項選択の場合について考える．先立って，感度パラメータ θ を用い，効用が $V'_{in} = \theta V_{in}$ ($i = 1, 2$) であるとする．個人 n がその選択肢を選択する確率をそれぞれ P_{1n}, P_{2n} とおく．この BL モデルによる選択挙動は図 2.3 のようになる．図の横軸は選択肢 1 と 2 の効用差 $V'_{1n} - V'_{2n}$ ，縦軸は P_{1n} である． $\theta = 0.1, 1, 10$ の場合の結果を示している．選択挙動は効用差の影響が大きいことが分かる．

ロジットモデルの利点は，確率的効用理論をモデルの背景としており，得られた結果を理論的に説明しやすいことにある．しかし，ロジットモデルにも欠点があり．中でも特に広く知られているのが IIA (Independence from Irrelevant Alternatives) 特性である．IIA 特性とは，ある個人にとって，2 つの選択肢についての選択確率の比率が他のいかなる選択肢についての効用の確定項からも影響されない，という性質を指

す．これを数式で表現したものが次の (2.11) 式である．

$$\frac{P_{in}}{P_{jn}} = \frac{\exp(V_{in}) / \sum_{k \in \mathcal{A}_n} \exp(V_{kn})}{\exp(V_{jn}) / \sum_{k \in \mathcal{A}_n} \exp(V_{kn})} = \frac{\exp(V_{in})}{\exp(V_{jn})} = \exp(V_{in} - V_{jn}) \quad (2.11)$$

IIA 特性は，利用する交通手段や，運行する経路などの類似性の高い選択肢の選択確率を過大に評価する傾向がある．IIA 特性を考慮すると，選択肢の属性が類似した選択肢とそうでない選択肢の両方が含まれるような場合は，ロジットモデルをそのまま利用するのは問題がある．このような場合には，プロビットモデルや次項で説明するネスティッドロジットモデルなどを利用することが望まれる．プロビットモデルは，誤差項として一般的に使われる正規分布に従う確率変数を用いたモデルである．数理的な扱いの容易さから，実務，研究ともにロジットモデルを用いることが一般的であるが，プロビットモデルを用いることで数理的な厳密性は高くなる．ただし，ロジットモデルには派生モデルが多く，現在でも様々な改良が施されたモデルが考案されている [19] ．

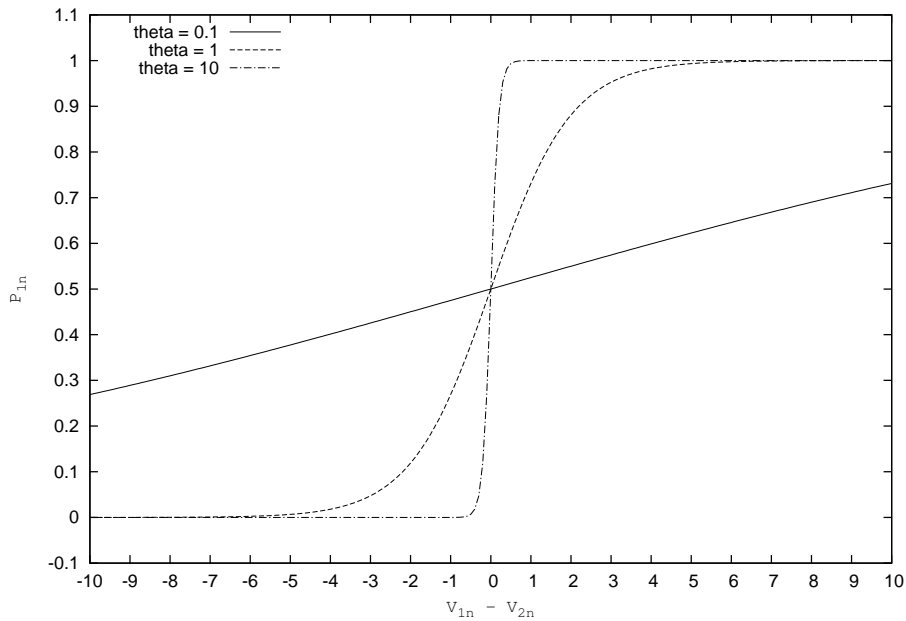


図 2.3 ロジットモデルの感度パラメータ

2.3.4 ネスティッドロジットモデル

ネスティッドロジットモデルは、ロジットモデルに木構造の概念を取り入れたものである。選択肢の類似性に応じて選択肢をいくつかのグループに分類する。そして、類似性の大きいと考えられるグループほど木構造の葉に近い部分に設定する。なお、分析の際は木構造の葉から順にグループ単位でロジットモデルを適用する。このとき、結合関係のある上位のグループの選択肢を条件に持つ条件付き確率の形で計算される。

木構造の階層が多くなるほど計算量が増大するという難点はあるが、選択肢を分類できることで、交通行動の目的や利用交通手段などを一体的に求めることもできる。このような統合型のシミュレータも既に研究されており、都市圏などのシミュレーションに適用例がある [24]。

2.4 Activity-based モデル

Activity-based モデルの基盤となる Activity-based approach は、交通行動を個々の移動としてではなく、時間的・空間的な関係をもってなされる一連の活動として捉える。交通は、ある場所である活動を行うという需要を満たすために行われる派生需要であるという考え方が背景にある。ただし、散歩やドライブなど、移動そのものが目的の場合には当てはまらない。

この考え方が提唱された起源には、1970 年代の Hägerstrand, Chapin, Fried らの研究成果がある。Hägerstrand は時間地理学のなどの研究で知られるスウェーデン人の地理学者で、時空間パスの研究を行った [17]。その研究で、行動軌跡を時空間座標上に表現することで、それぞれの関連性を議論した。その後、1979 年の Adler らの研究 [16] で Activity-based approach の考え方が交通需要予測に応用されるようになった。この研究では、トリップ間の関係性 (トリップチェーン) をロジットモデルに組み込んだモデルを開発している。世帯単位のアナケート調査により一日の行動記録を取得し、そのトリップ数、滞在箇所数、活動時間、各トリップ後の残存費用を変数とした効用関数を作成している。

その後様々な改良が施される中で、アメリカでは都市計画において Activity-based モデルを採用する機運が高まっている。PT 調査に代表される日本の交通調査がその

継続性を重視しているのに対し，アメリカでは Activity-based モデルを適用しやすい形式に調査内容を適宜しており，その実用性を検証する報告書も提出されている [11]．その他にも，イベント会場での交通行動など，個々のトリップの関連性が強い状況を分析した研究もある [12]．

2.5 エージェントモデル

2.5.1 交通流シミュレーションの果たす役割

交通問題へのシミュレーション技法が米国で論じられ始めたのは 1950 年頃である．当時，シミュレーションの実行方法についての多くの研究がなされ，1960 年頃までには交通流シミュレーションの可能性と有用性が一般に認められ，大規模なシミュレーションプログラムの開発と実証に努力が払われた．その後，非常に多くの交通流シミュレーションが開発され，実行されてきた [30]．

日本における交通流シミュレーションの開発は 1960 年代に盛んになった．1973 年にシミュレーション技術研究会で当時のシミュレータについて特集されている．その後，交通渋滞の激化とともに，動的な交通配分やボトルネック交通現象研究が主要課題となるにつれ，最近では交通流シミュレーションの開発が再び盛んになっている．これは，問題が変化したことによってシミュレーションに求められるものも変化しているということである．一般に，シミュレーションを行う目的は，以下の 3 つに分けることができる．

- 問題の解を求める
- システムについての仮説を検定する
- 要因による変動を調べる

問題の解を求めるためのシミュレーションは，定式化したモデルを解析的に解くことが困難なため，数値実験を試行錯誤的に行うことにより解を見出そうとするものであり，交通流シミュレーションと特に関連しない．交通問題におけるシミュレーションの利用は，実際の交通システムについて作成した理論モデルの検証のために用いることでもあるが，それ以上にシステム要素の変動によってシステム全体の挙動がどのように変化するかを評価分析することがより主要なものになっている．

これは、現実の交通システムが一般的に複雑で大規模であること、さらに交通システムの構成要素には、確率的に変動する不確定なものが多く含まれていることを考えれば自然なことである。

2.5.2 既往のシミュレータ

交通流シミュレーションモデルを交通流のモデル化の方法について分類すると、マクロモデルとミクロモデルに分けることができる。

1. マクロモデル

マクロモデルは交通の流れを連続的な流体として取り扱う。対象領域上を自動車の動きを流体近似して表現することにより、比較的簡便にシミュレーションを行うことができる。そのため、広域の交通流シミュレーションに適している。また、数理的な扱いに優れており、均衡解での挙動分析など解析的な議論を行うのが容易であるという特長がある。マクロモデルの取り入れたシミュレーションは交通渋滞などの再現を目的とする場合が多い。

2. ミクロモデル

ミクロモデルは個別に車両の挙動を取り扱う。交通環境の多様性を扱うのに適したモデルであり、走行特性の異なる車両が混在している場合や歩行者が存在している場合の交通流を再現することができる。具体的には交通流の合流や車線変更、追い越しなどの単路部や交差点構造の局所的な変化が引き起こす挙動なども再現可能である。その分、マクロモデルに比べて計算量が大きく、マクロモデルに比べると適用領域は狭い。ミクロモデルを取り入れたシミュレーションは道路環境の局所的な変化などを分析対象としていることが多い。

交通の分野に限らず、計算機シミュレーションがその力を発揮するのは、まず施策運用のための試算である。一般的な理論式による試算は、汎用的に用いることができるが制限も多い。静的であり問題依存性の強い理論式に対し、それでは汲み取れない部分を補完するツールが交通流シミュレータである。

また、動的なシミュレーションが持っている大きな利点として、分かりやすさが挙げられる。交通の専門家が用いるマクロな指標を用いるためには、その正確な意味を汲み取ることが必要であるし、またその成り立ちや本質を理解するのは簡単なことではない。したがって、専門家以外の意見を反映させるにはシミュレーションが効果的な手段となる。

2.6 研究目的

1.2 節で述べたように、本研究は公共交通機関を選択肢に含む交通行動を分析することを目的とする。従来のような対象地域の交通状態を再現するモデルの構築を目標にしているわけではないことを強調するために、交通行動分析ではなく「交通行動要因分析」という言葉を用いている。したがって、交通行動要因分析という言葉は一般的な用語ではないことに注意されたい。交通行動要因分析は、交通行動を決定する要因について考察が中心となる。

新たにこのような言葉を利用したのは、既往研究の分析にはいくつか評価が十分ではない点があると感じたためである。順に説明する。

1. パラメータの評価

1 点目は、交通状況の再現精度の良さだけでモデルの良し悪しを評価しており、利用しているパラメータについては t 検定の際に算出する t 値や尤度比検定において算出される p 値などによって統計的な有意差を示す以外に言及されることがほとんどないことである。もちろん精度が満たされているからこそモデルとしての意義があるのであって、その目的を達成している限りはモデル内部で用いられているパラメータの値そのものは重要ではない。しかし、交通流シミュレーションに限らず、多くのシミュレーションではそれぞれの実験においてパラメータを調整する必要がある。経験的に適切な値の範囲などが分かっている場合はあるが、絶対的な指標ではない。また、感度分析にみられるように、少しずつ値を変えて変化を見るなどの方法もあるが、煩雑な作業であることには変わらない。加えて、上記のように統計的に有意であることが示されたとしてもそれが本当に正しいものであるという保証は無く、多面的に値の妥当性を検討する必要性があると考える。

実際、これまで実施する交通計画の妥当性を保証するために行われた交通需要予測が、実際の交通需要とかけ離れてしまっている事例は多くある。実際の現場において問題となるのはその過大推計であり、日本では高速道路事業や東京湾アクアライン、本四架橋などの建設などを典型例に挙げることができる。特に、1970年代に愛知県で計画された桃花台線ピーチライナーは1991年時点で約15倍もの過大推計が発生し、事後評価による原因分析も行われた[37]。しかし、当時はまだ日本で非集計行動モデルは利用されておらず、交通需要予測の技術そのものが不十分であった。また、予測自体の困難さに加え、交通政策が政治的な影響を受けることも問題を複雑にしているため、技術の進歩だけで解決できる問題でもない。どれほど優れたモデルを考案しても、あらゆる状況を完全に再現することはできない。だからこそ、そのモデルや得られた結果に対して検証を充実させることが重要であると考える。

2. ミクロスケールでの分析の必要性

近年は交通環境の変化に伴って交通政策の目的が量的な拡充から質的な充実に変化している。それに伴って、計画の実行に先立って検証すべき内容も複雑になってくる。特に顕著なのが、分析対象の広がりである。社会インフラとしての道路網が絶対的に不足していた頃は自動車のみを分析対象としても問題はなかった。しかし、例えば公共交通機関の利用促進を目的とする場合には、自動車以外にもバス、鉄道、徒歩など、他の交通手段も考慮することが不可欠になる。2.2節で説明した四段階推定法は交通行動の目的別、交通手段別にトリップデータを集計しているが、集計単位であるゾーンが大き過ぎるために小規模な政策には活用しにくい。

複雑な交通行動分析に際しては、個人の行動を詳細に記録したデータが必要となるが、分析を実行するのに十分なデータを入手することは容易ではない。2.1節のプロパーソン調査を紹介した際に説明したが、一般に公開されている情報は精度や詳細さが十分でないが多く、また都市圏などを除いては公開されている情報量そのものが少ない。交通状況は地域の特性が大きく、また同じ地域でも環境の変化などの影響で時間の経過とともに傾向が変化することは珍しくない。さらに交通データも個人情報であるため、個人情報保護が重要視されている現状では、国や自治体など公的な機関を除いては現地での実地調査も従来ほど効果を挙げることができない可能性もある。

本研究では、これらの問題に対処するために、仮想的な環境で実験を行えるシミュレーションを活用する。その中でも交通現象の特性を踏まえて、2.5 節で説明したエージェントモデルを中心にする。なお、利用する交通流シミュレータには運転者の行動特性を表現できることが求められ、これを満たすものとして第 3 章で説明する知的マルチエージェントシミュレータ MATES を使用する。

第 3 章

知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES

3.1 MATES の概要

3.1.1 複雑系としての交通現象

従来の交通シミュレータはそのモデル自体には違いはあるものの、交通現象に法則を見出して、決定論的または確率論的に扱おうとしている点では共通している。交通現象をいわゆる交通工学の立場から捉える方法は重要であるが、社会的な側面も考慮されるべきだと考える。交通に伴う行動は社会的な現象であり、単純な論理や法則では説明できない部分が交通現象の複雑性を生み出している。一方で、我々が交通行動を起こす際には必ずしも複雑な思考をしてはいない。このことは、一人ひとりの行動は単純な理由を基に決定されるが、それが個人によって異なり、また多数の人が存在することで全体として複雑になっていることを意味する。

これは複雑系の考え方と一致する。そこで、MATES では複雑系現象として交通流を扱うことにしている。複雑系には三つの特徴がある。

1. 複雑な因果関係

現象を解析する際には、通常は局所的に因果関係を切り出し、方程式を構成してモデル化することが多い。しかし、この方法ではうまく再現できない現象も多い。その例として、生物システムや経済活動が挙げられる。これらの現象では、一見関係ない

と思われる要因が全体に影響を及ぼすことがあり、一般にバタフライ効果と呼ばれる。このような現象においては、安易に因果関係がないと判断したり、単純に関係を結びつけたりすることは避けるべきである。

2. 内部観察と外部観察

現象を全体として捉える際は、基本的に外部からの観察を行うことになる。しかし、複雑系現象を外部からの全体観察によって捉えることは難しいことが多いと言われている。複雑系現象を考える際には、その内部に観察者を置くことが、つまり視点を内部から見る形にすることが必要になる。

株式市場を例にすると、外部からの観察とは、平均株価指数のような指標としての意味合いを持つ数字や時事ニュースなどを参考にして全体を捉えるイメージである。しかし、ある株式を保有している投資家から見れば、その後の投資行動を決定するための情報として最も重要なのはその保有銘柄の株価に関するものであろう。これが内部観察者の存在する意義である。

3. 創発

創発とは、内部の要素同士がやりとりを行っている様子を外部から観察した際に、想定していなかった新たな現象が発生したように見えることである。内部の要素自身は外部から観察される現象を起こす意図はなく、結果として生じた現象に対して外部観察者が名前を与えているに過ぎない。創発という言葉は、複雑系の考え方を理解する上で重要な概念である。

交通現象を複雑系として捉える理由は、それが上記の特徴によく当てはまるからである。交通現象の因果関係は複雑である。また、内部構成者は部分的な情報を個々に保持する。交通を例にすると、人はそれぞれに目的地を持ち、それぞれに運転の基準を持っている。安全運転を第一優先とする人がいれば、予定のために急いでいる人もいる。それらの行動の結果、現実には渋滞を発生させる意図がないとしても外部観察者から見ると渋滞という新しい現象が起こっているように映る。このとき、渋滞に巻き込まれている自動車は被害者であると同時に加害者にもなっている。

このように考えてみると、交通システムは複雑系として捉えるのが自然であるとも

言える．ただし，複雑系を考える際は，安易に創発を促す仕組みを組み込むことは厳禁である．意図された創発は，もはや創発としての意味を持たない．

以上のような考え方のもと，MATES では交通現象を「互いに異なるルールを持つ交通主体が多数集まることによって創発される現象」と捉えている．

3.1.2 MATES の基本設計

一般に，広域ネットワークを対象とする交通流シミュレーションでは，車両挙動を表現するためにマクロモデルが用いられ，比較的狭い範囲での微細なシミュレーションにおいてはミクロモデルが用いられる．一方 MATES では交通システムを複雑系とみなし，1 つ 1 つの構成要素の相互作用によって全体の秩序が形成されるという複雑系の特徴を最大限に考慮するため，現象を過度に簡略化せず，広域ネットワークにおいてもミクロモデルを適用したシミュレーションを行う．過去の知見より，特定の交差点周辺といった小規模な問題から，数 km 四方の地域内を延べ数万台の自動車が走行するような大規模な問題まで，多様な交通環境に適用可能である．

また，MATES は開発当初より交通主体の多様性，様々な交通情報の取り組み，経路選択などの動的な判断，機能や交通主体の変化や追加に柔軟に対応するための拡張性が考慮されている．

3.1.3 知的マルチエージェント

交通現象の根本に人間の意思決定を据えた上で現象をモデル化することの利点は過去の研究で述べられている通りである．

本研究で知的マルチエージェントと呼んでいるのは言葉の定義を明確にするためであり，一般には単にマルチエージェントという言葉が用いられる．マルチエージェントやエージェントという言葉は，様々な分野で様々な意味を伴って用いられるため，MATES の中で用いられるマルチエージェントという意味で用いる場合は特に知的マルチエージェントという表現を用いる．知的マルチエージェントという言葉は，構築した MATES のシステム全体の構造はマルチエージェントのフレームワークに基づき，また車両の表現やその運転者に関しては知的エージェントの考え方をを用いていることからくる造語である．エージェントとは自律した個々の主体のことを指し，エー

エージェントが知的である、とは適応的に行動することができるものであることを意味する。なお、適応的であるとは、以下の3つの条件を満たすことをいう [21]。

- 即応性...エージェントは環境の変化に対して即座に反応した行動をとることができる。
- 目的指向性...エージェントが持つ目的に向かって、積極的な行動をとることができる。
- 社交性...エージェントは他のエージェントと通信を行うことができる。

これらは人工知能分野で用いられているもの [14] とほぼ同一のものであり、「行動主体 (エージェント) がそれぞれ自律した判断を行い、それらのある環境に存在させた場合に協調作業を行い、全体の現象として創発が起こることがある」ようなシステムのことを、知的マルチエージェントシステムと呼ぶことにしている。

MATES 上に最も多く、広範囲に存在するのが自動車エージェントである。ここでは、自動車エージェントに必要な自律性を以下に挙げる。これらの行為を自律的に行うことができれば、道路交通を適切に再現できると考えられる。

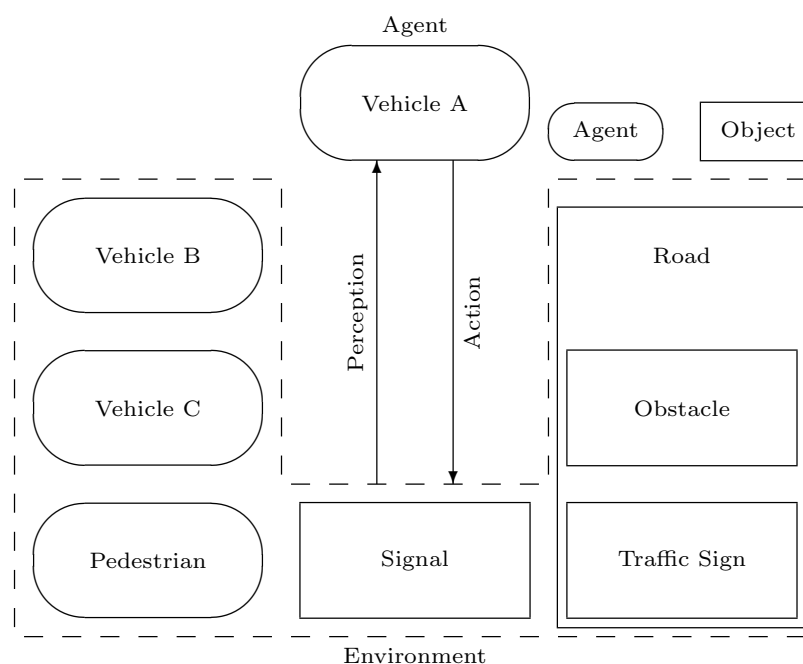
- 道路ネットワーク上での自律性
 - － プランニング
 - － 経路探索
 - － 経路選択
- 道路上を運転する能力
 - － 交通規則に関する知識とその反映
 - － 速度決定
 - － 車線変更・合流・分岐
 - － 交差点での他エージェントを意識した右左折
 - － ある道路内での経路決定

3.2 MATES の仕様

3.2.1 MATES における知的エージェントシステム

マルチエージェントのフレームワークでは、現象を記述するために、エージェントと環境を規定することが必要である。MATES では自動車、歩行者などの交通主体をエージェント、交通主体の活動する場所、つまり道路空間を環境、と定義している。ただし、環境には道路そのものだけではなく、信号や標識、路上の障害物、周囲の建築物あるいは法律上の制限まで含まれる。さらに、「自分以外のエージェント」も環境に含まれることが重要である。エージェントは環境から情報を取得し、状況を判断して行動を決定し、実際に行動することで環境に対して働きかける。あるエージェントの行動は、別のエージェントにとっての環境の変化を意味する。このとき、エージェント間に相互作用が発生し、その総和として複雑な現象が創発される。この様子を図 3.1 に示す。

現実に自動車を運転するという行為は、認知、判断・予測、操作・行動という 3 つ



Object とは、Agent と区別した「意思決定を行わない“モノ”」を表す。

図 3.1 MATES における環境とエージェントの定義

の段階に分けて考えることができる。認知とは、周囲の交通状況における異常や危険、安全に運転する上で把握しておくべき対象を認識することであり、判断・予測とは、認知した結果として対象の動静を予測し、次にどのような行動をとればよいのかを決定することである。また、操作・行動とは、判断結果に従って実際の運転操作を行うことである。この3つに分割された運転行動は、上記の知的マルチエージェントシステムとの親和性が非常に高い。また、本研究では扱わないが、認知、判断・予測、操作・行動の各段階において何らかのエラーを発生させることで、現実世界で発生する交通事故をモデル化することも可能である。

3.2.2 階層型道路ネットワーク

仮想走行レーン：

MATES では、自動車は基本的に車線（レーン）に沿って1次元的に走行することを仮定し、仮想走行レーンをベースとして道路モデルを構築している。仮想走行レーンはその上を走行する車両の進行方向を保持するため、それらを繋いだ道路ネットワークは有向グラフとなる。単路における仮想走行レーンとは、車両の進行方向を明示した車線概念に等しい。一方、現実には優先道路の表示を除けば交差点内に明示的に車線が設置されることはないが、MATES では交差点の内部にも必ず仮想走行レーンが設置される。この仮想走行レーンを表現したのが図 3.2 であり、レーンの持つ情報は表 3.1 のように定義できる。

表 3.1 仮想走行レーンに付帯する情報の例

仮想走行レーン	
形状 レーン情報	始点座標 (ベクトル)
	終点座標 (ベクトル)
	道路長
	道路勾配
	識別番号
	レーン上に存在するエージェントの集合
	制限速度

通常，運転操作は，

- 操舵とその結果の車線幅内の左右振れ及び，隣接車線への移動
- 加減速操作とその結果としての速度変化
- 灯火器及び音響による情報伝達

と分類できるが，その上で車線幅内の左右振れを簡略化し，操舵は道路のレーンに従って行われるものと仮定する．仮想走行レーンを作成することにより，自動車の操舵の計算を省くと同時に，本来は 2 次元の連続値である車両の位置を，離散的な構造と 1 次元の連続値へと変換できる（厳密には，車線変更を行う際に一時的に仮想走行レーンと直交する方向に速度が生じる）．

レーン束オブジェクト：

仮想走行レーンモデルは，人間の直感的な道路の概念とは多少離れたものになっている．交通主体は人間であるから，自動車エージェントからの視点を考えるときには，人間が認識できる情報を過不足なく提供することが必要となる．そこで，MATES では仮想走行レーンを接続して全ての道路構造を表すのではなく，中間の概念を置くことにしている．これがレーン束オブジェクト (lane bundle object) である．レーン束オブジェクトとは，具体的には単路 (section) と交差点 (intersection) の 2 つを指す．

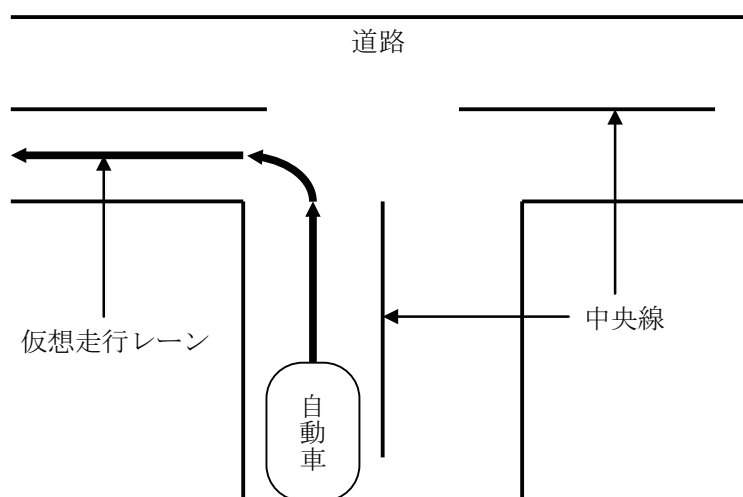


図 3.2 仮想走行レーン

レーン束オブジェクトは、仮想走行レーンとそれを接続するコネクタという最小構成要素から成り、レーンとコネクタはリンク—ノードの関係にある。コネクタは仮想走行レーンの始点または終点であり、流入と流出の2つの方向を保持している。また、レーン束オブジェクトはそれ自身が一つ上位のリンク、ノード関係を形成しており、入れ子のデータ構造を持っている。そして地図全体で一意的な番号を持ち、マクロ的に見たネットワークの構成単位に相当する。レーン束オブジェクトを導入する利点は以下の通りである。

- エージェントは基本的に近傍の情報を利用する場合が多い。つまり、最も回数の多い問い合わせに対する探索空間を限定することができる。
- 運転者が経路選択をする際に、論理的な接続情報として利用する最小単位は単路と交差点であるから、それより詳細な情報を用いて探索を行うことで、余計な計算量が発生するのを防ぐことができる。

なお、交差点は自身に設置された信号機への参照も保持している。

階層型ネットワーク：

道路の接続情報と位置の情報を階層化することによって、道路構造を離散化することが可能になる。しかし、複数の単路や交差点の情報を取り扱うためには、これらをまとめて保持するより上位の接続情報が必要となる。道路環境の最上位に存在し、単路や交差点の情報をまとめて保持するのが地図オブジェクトである。なお、MATESの道路環境の構成要素である信号や歩行者などの情報もレーン束オブジェクトに含まれている。

このような地図オブジェクト—レーン束オブジェクト（交差点・単路）—仮想走行レーンという構造を階層型道路ネットワーク (hierarchical road network) と呼ぶ。この概念を図 3.3 で表した。仮想走行レーンに属する自動車エージェントは、必要なだけ上位のオブジェクトに問い合わせることによって情報を取得することができる。

3.2.3 道路内の微視的構造上での挙動

MATES ではネットワーク構造上での経路が決定する際に、旅行時間や旅行距離の他、直進右左折の回数や単路の車線数を考慮することができる。その後には、それを実行するための微視的な自律性が必要となる。エージェントの自律性の程度によって創発される現象にも影響が出ることもあり、本項ではその詳細について説明する。

1. 交通規則に関する知識

我々は、交通規則に関する知識を持っていなければ自動車を安全に運転させることができない。そのため、信号現示や対向車の存在などといった条件に対応して、行うべき行動ルールを規定する。なお、自動車は左側を通行することや一方通行などの道路環境に関する規程に関しては、自動車（運転者）の知識としてではなく、環境の属性として規定し、エージェントはそれに従うこととする。

2. 速度決定の自律性

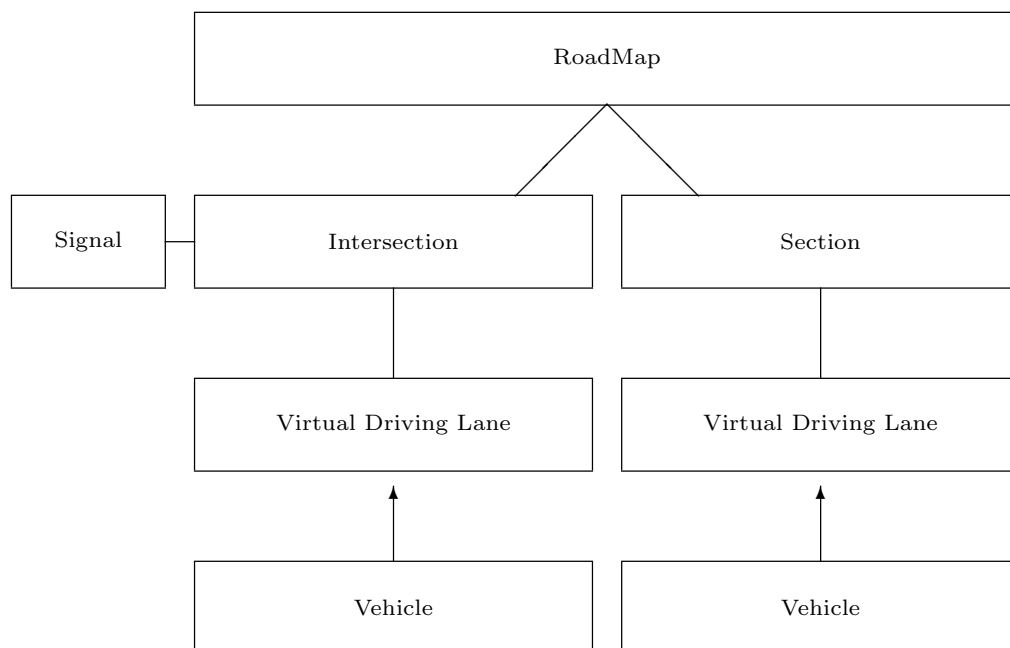


図 3.3 階層型道路ネットワーク

自動車の速度候補の一つは，追従理論によって作成される．追従理論は交通工学の分野で広く用いられている式であり，一般に (3.1) 式で表される．

$$\dot{x}_{n+1}(t+T) = f[x_n(t) - x_{n+1}(t)] \quad (3.1)$$

ここで，添字 n は車群の先頭から数えたある自動車の順番であり，その自動車の時刻 $t+T$ における位置が $x_n(t+T)$ である．また， T は運転者の反応遅れ時間であり，右辺の時間の引数を t とすることで，時間的効果を考慮することができる．

MATES においては，走行中の加速度を決定する関数として Helbing によって提唱された Generalized Force Model を採用している [3]．これは以下の (3.2)–(3.4) 式で示される．

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{n+1}(t+T) = & \frac{V_{n+1}(x_n(t) - x_{n+1}(t)) - \dot{x}_{n+1}(t)}{T_{n+1}} \\ & + \beta \frac{(\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t))\Theta(-[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)])}{T_2} \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\beta = \exp([x_n(t) - x_{n+1}(t) - T_3\dot{x}_{n+1}(t) - \alpha_1]/\alpha_2) \quad (3.3)$$

$$\Theta(x) = \begin{cases} 0 & (\text{if } x < 0) \\ 1 & (\text{if } x \geq 0) \end{cases} \quad (3.4)$$

なお，上式で用いられているパラメータも [3] に基づいており，その値を表 3.2 にまとめた．

表 3.2 追従モデルパラメータ

パラメータ	値
V_{n+1}	16.98 (m/s)
T_1	2.45 (s)
T_2	0.77 (s)
T_3	0.74 (s)
α_1	5.59 (m)
α_2	98.78 (m)

([3] より)

追従理論は速度制御の基本式であるが、様々な状況において例外が発生する。例えば、追従すべき前の自動車がいない場合や隣の車が自分のレーンに車線変更する場合などが挙げられる。このような場合に対応するために、その状況を羅列しそこにルールを逐次定義していった。

しかし、自動車エージェントに考え得る状況全てのアルゴリズムを持たせるのは現実的ではない。そこで、個々のルールをモジュール化して速度候補を決定し、その中で適切なものを選択するようにした。具体的には、まず基本となる追従式からの速度を算出する関数をデフォルトとして用意する。その後、この追従式では破綻をきたす状況を羅列し、これらが適用される場合に速度を算出する関数をオブジェクト(クラス)として実装する。このクラスには、速度を決定する機能の他に、それに付随する様々な処理を同時に行い、かつその挙動を受けた場合の挙動も同時に定義される。これらのクラスのことを挙動定義オブジェクトと呼ぶことにする。

例えば、車線変更の際には、通常の追従走行とは違った速度決定が期待される。しかし、車線変更では割り込む側と割り込まれる側の二つの立場があり、車線変更の挙動定義オブジェクトは、この両者の立場におかれた時の速度決定アルゴリズムを内包する。このようにすることで、複雑な状況の羅列を統一的に管理し、様々な状況を破綻なく管理することが可能になる。

挙動定義オブジェクトは自分自身の重要度を保持しており、同時に複数の挙動定義オブジェクトが適用される場合には、より重要度の高いものが優先的に選ばれる。車線変更が可能である状況であっても、前の自動車が急に減速した場合には、より優先度の高い減速のアルゴリズムが選択される。

3. ある道路内での経路決定

MATES では、レーン束オブジェクトである単路は複数の仮想走行レーンを保持する。この中で、例えば次の交差点で右折する予定であるにもかかわらず、現在走行しているレーンの先には左折レーンしかない場合、車線変更が必要になる。このような、車線変更をいつ行うかを決定する、というような限られた小さな領域内で予定軌道を決定することを道路内での経路決定と呼んでいる。この自律性が満たされない限り、大局的なネットワークで決定した自分が選好する経路は実現されない。ここでは、対象が小規模な単路であることを考慮して、複雑なアルゴリズムを導入せず、シンプル

な線形探索を用いている。

4. 車線変更定義オブジェクト

挙動定義オブジェクトのうち、現段階で最も複雑なものが車線変更の挙動を実現するものである。一般に、車線変更を行う際には周囲への配慮が必要である。少なくとも割り込む側、割り込まれる側が双方を認識していなければならない。このような能動・受動の要素が存在するような行為を一括りに定義できるのが挙動定義オブジェクトを用いる利点である。具体的には次のような手順を踏む。

Step 1. 変更を行う方向のレーン状況を確認する。

Step 2. その方向のウィンカーを示し、周囲の自動車に意思を通知する。

(変更先のレーンの状況が、車線変更の条件をそろえていない場合...次のタイムステップに車線変更を継続すると通知する。)

(変更先のレーンの状況が、車線変更に適している場合...車線変更中であることを通知する。)

Step 3. 車線変更中であれば、元の車線と変更先の車線の自動車に注意しながら速度を決定する。

Step 4. ずれ幅 (横方向の変化量) の値が隣のレーンに入るだけずれたら、環境への通知を行って変更先レーンに移動する。

Step 5. 変更先のレーンに入った後、ずれ幅の値が閾値以下になったところでウィンカーを戻し、車線変更モードを終了して通常走行に戻る。

車線変更を行うとき、元のレーンと変更先のレーンの双方に注意しながら速度を決定するために、仮想的な自動車のコピーを発生させ、両方のレーンにおいて速度を算出し合成する方法をとっている。このようにすることで、車線変更定義オブジェクトは割り込まれる側の速度も同時に決定することができる。

また、実装においては環境側で自動車のリストを管理する必要が生じる。この点については、車線変更中の自動車を登録する記憶列を別に用意することにより、特に注目を浴び、また他の自動車との情報のやり取りが多い自動車を少ない計算量で見つけやすく工夫を施している。

以上により，自動車エージェントに最低限必要な自律性を組み込むことができた．今後新たな機能を追加する必要がある場合にも，いくつかの関数を加えることで対処できるものとする．

第 4 章

交通行動要因分析モデル

4.1 交通行動要因分析モデルの構築

4.1.1 モデル概要

本研究で提案する交通行動要因分析モデルに含まれる要素について説明する．提案モデルは，大きく 2 つの部分に分けられる．前半は MATES による交通流シミュレーションである．この部分は，与えられた OD 情報により実行されたシミュレーションから，リンク別速度を得るのが目的である．リンク別速度とは，道路ネットワーク上のあるリンク（単路）上を走行する自動車の速度である．リンク別速度が求まることで，そのリンクを通過するのに必要な時間を特定でき，エージェントの旅行時間を算出することができる．後半はロジットモデルによる交通行動要因分析である．ここでは，設定した道路環境における利用交通手段データを作成し，交通行動を決定付ける効用関数を特定する．そして，その効用関数に基づいて算出される交通手段分担率——選択肢となる交通手段毎の選択確率——が，実際の利用状況を再現できるものであるか否かを判定する．

モデルでの分析フローを図 4.1 で示す．

提案モデルの前半部分，交通流シミュレーションの仕様については第 3 章で説明しているため，次節以降では後半部分，交通行動要因分析の流れを中心に説明する．

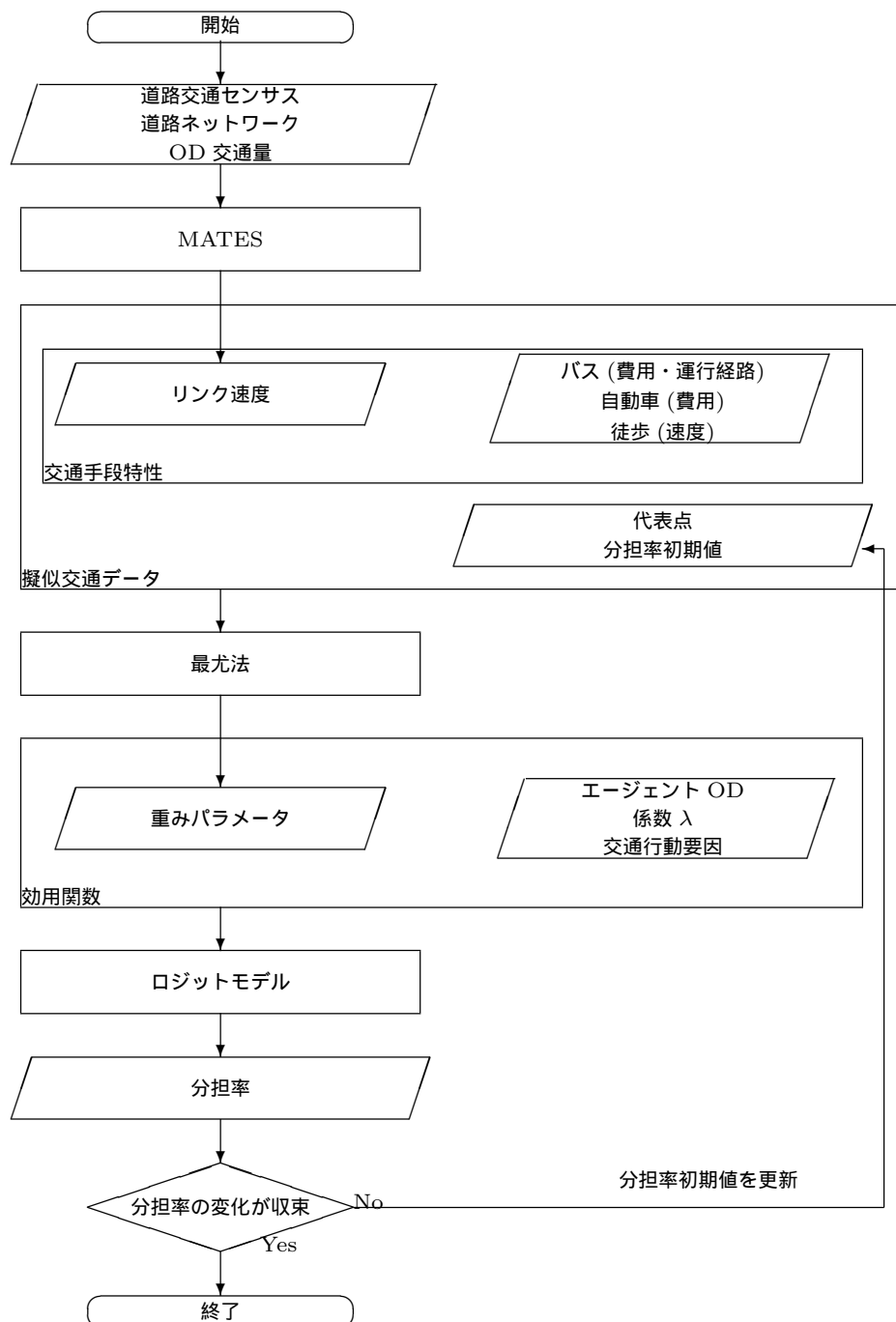


図 4.1 提案モデルのフロー

4.1.2 交通行動要因の選別

個人が交通行動に利用交通手段を選択するための判断基準となる要因を交通行動要因と呼ぶことにする．そして，その交通行動要因で構成される効用に基づいて実際の行動を選択する．本研究では，出発地から目的地まで移動する旅行時間とそのために必要な費用の2つを交通行動要因として採用した．交通手段の分担率の決定には2.3節で説明したロジットモデルを利用するため，本来はより多くの変数を扱うことも可能である．他の要素には，性別や年齢といった個人属性や利用交通手段の心地よさなどが考えられる．しかし，それらの要素は直接的な利益と結びつかないため個人差の影響が大きく，要因間の関係を分析する本研究においては検証段階で大きな制約になる．変数が少ないことによる精度の低下は考えられるが，今回はモデルの汎用性を優先した．

ここで，シミュレーションにおいて入力する費用と旅行時間を定義する．まず，費用は利用した交通手段に消費した時間に由来するもの以外の金銭価値を指す．例えば，公共交通機関の利用者はその運賃を負担しさえすれば良いため，運賃がそのまま費用となる．一方，自動車の費用は単純に求めることはできない．自身が所有している自動車であれば当然運賃は必要ないが，燃料費やタイヤの摩耗などの間接的な負担が発生する．直接その値を求めることは困難であるため，本研究では独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構がまとめている，走行経費減少便益を自動車の経費として使用する．走行経費減少便益は，道路の整備・改良が行われない場合の走行経費から，道路の整備・改良が行われる場合の走行経費を減じた差として算定される [29]．これは走行条件が改善されることによる費用の低下のうち，走行時間に含まれない項目—燃料費，オイル費，タイヤ・チューブ費，車両整備費，車両償却費等—について，走行距離単位当たりで計測した原単位を用いて算定している．

本研究では市街地における自動車の走行経費減少便益を用いており，これを表4.1に示す．

4.1.3 交通手段の設定

選択肢に含める交通手段は自動車，バス，徒歩の３種類である．交通手段の選択肢に鉄道や地下鉄が含まれていないのは，前項の交通行動要因の選別と関係がある．要因として採用したのは旅行時間と費用だけであった．したがって，公共交通機関の運行間隔やダイヤの乱れなどを直接評価することはできない．旅行時間が同じであってもその間をどのように過ごしたのかによって，人々の効用には違いが生じると考えるのが自然である．そのような違いを表現できないモデルでは，鉄道や地下鉄とバスの区別を正確に表現することができない．

同様の理由で，交通行動の途中での交通機関の乗り換えも本研究では扱っていない．乗り換えをする場合も途中で待ち時間が発生するのが普通であり，その状況を適切に考慮できない以上，極力そのような交通行動が含まれないことが，この分析モデルでは望ましい．

表 4.1 自動車の走行経費減少便益

速度 (km/h)	乗用車 (円)
5	44.82
10	32.54
15	28.26
20	26.02
25	24.60
30	23.62
35	22.90
40	22.63
45	22.46
50	22.37
55	22.37
60	22.44

([29] 表-2 より引用)

これらをまとめると、提案モデルの分析対象は、事実上 2.1 節の PT 調査の説明で触れたアンリンクトリップに限られている。このモデルでは、複数の交通手段を組み合わせた移動が多く見られる都市部の交通行動を対象とすることはできず、交通行動が比較的単純な地方に分析対象に限られる。ただし、モデルを改良し、変数である旅行時間を内容毎に切り分けることで、これらの問題を解決することはできる。この考え方自体は従来の四段階推定法や非集計行動モデルでも広く用いられているため、実現可能性は十分にある。

以上の制約はあるが、本研究で選択肢とした各交通手段の性質をまとめておく。

自動車：

車両の挙動は MATES の仕様に基づくため、走行経路はシミュレータで定義された道路ネットワーク上に限定される。走行中の加速度は 3.2.3 項で述べた追従理論に従って決められる。

注意すべき点として、本研究では基本的に道路ネットワーク上に信号を設置していない。そのため、現実の道路状況に比べて自動車の走行速度が速くなることが予想される。このようにしたのは、対象地域の信号のサイクル長を特定できていないためである。

通常、シミュレーションする地域には複数の信号が存在する。そして、それらの信号の一部は、そのときの交通状況と同期を取りながら動作する。信号まで含めて正確なシミュレーションを実行するならば、まず同期型、非同期型の信号の分布状況を把握し、それぞれの信号のサイクル長や動作のアルゴリズムを知る必要がある。このような信号に関する情報はその地域の警察などが所有しているが、入手することができていない。

そのため、信号がないことにより渋滞が解消しなくなるなど、シミュレーションの実行に支障が出る場合を除いて交差点に信号を設置しないことにした。信号の設置に定量的な基準があるわけではないが、目安として、全く自動車エージェントが存在しない初期状態から開始して、シミュレーション時間で 15 分経過した段階で既に渋滞が発生している交差点に対してのみ、仮想的な制御パラメータを持つ信号を設置した。

バス：

バスの特性はやや特殊な設定になっている．まず重要なことは，MATES 上でバスそのもののシミュレーションは行っていない．技術的な観点から理由を説明すると，エージェントの設計を考えたとき，バスは自動車よりも複雑であり，現実的なエージェントを作成するのが難しいという問題がある．バスエージェントを定義して MATES で再現するためには，少なくとも 3 つの機能を追加することが要求される．

- 決められた経路を走行すること
- 原則として運行ダイヤを守ること
- バスの乗車定員を設定すること

1 点目の機能に関しては，現在の MATES にはエージェントの走行経路を交差点単位で規定する機能は既に備わっている．しかし，規定した交差点を規定した順番で通過しさえすれば良く，途中に規定していない経路を通る可能性がある．一方で，そのような例外を排除すると，渋滞が発生して車線変更ができないなど，交通状況次第ではそのような経路選択が実行できない場合が発生しうる．問題を解決する一つの案としては，バスエージェントが受信する環境の範囲を狭め，発信する情報を自動車エージェントのそれよりも優先的に処理することが考えられる．例えば，バスエージェントが車線変更する必要があるときには隣の車線の渋滞状況を見捨てる，などの条件付けをすれば上記の問題は解決できると思われる．しかし，渋滞の度合いが酷くない場合にまでそのような挙動をとるのは不自然であり，融通の効くルールを策定するのは難しい．

2 点目，3 点目の機能は，現在の MATES では考慮されていないものである．バスの具体的な行動を想定してみると，運行ダイヤより早くバス停に到着した場合はしばらく停車する，次のバス停に乗降する人がいない時，または乗車待ちの人がいても既にバスが満員になっている時にはバス停に停車せずに通過する，などの状況に対応する必要がある．さらに，3 点目の機能はバスに乗降する乗客もエージェントとして別々に扱う必要があることが示唆される．このような状況に臨機応変に対応できるエージェントを設計するためには，考えられる状況に対してそれぞれルールを規定することが必要だが，かなり煩雑なルールになってしまう．そのようなルールが問題であるとは限らないが，3.1.1 項で述べた「創発」の概念との親和性は良くないと考える．

これらの理由から，MATES 上でバスエージェントを設計するには十分な議論が不

可欠だと判断し、その設計は本研究の対象とはしなかった。そこで、本研究では自動車エージェントの走行データをバス特性に代用している。バスの運行経路は道路ネットワークのデータを用いることで、通過するリンク単位に分解することができる。ここで、各時点における自動車のリンク別速度を利用して、バスの旅行時間を推測することができる。ただし、この速度はバスそのものの速度ではないため、速度の決定方法を工夫する必要がある。MATES の経路探索に使われる旅行時間の計算では、各リンクについて同一進行方向の全ての自動車の速度の平均を求め、その総和をとることで旅行時間としている。本研究におけるバスの旅行時間も同様に計算することにした。これらはエージェントが発生した時点での交通状況を用いている。したがって、そのエージェントが実際に各リンクを通過したときには交通状況が変化している可能性があり、実際の旅行時間とは基本的に一致しないことに注意しなければならない。

なお、バスを選択する場合は、バス停までの徒歩移動も考慮しており、旅行時間はバスの乗車時間と歩行時間の和としている。ただし、エージェントはバスの運行ダイヤに合わせて行動するものと仮定し、バス停での待ち時間は一律の時間 (5 分) を仮定している。

徒歩:

徒歩による挙動もシミュレーション上では再現せず、かなり単純化している。交通流シミュレーションで用いる道路ネットワークは、国道や主要県道などのような一定の交通量がある道路を対象としており、細街路などは基本的に含まれていない。地域住民と観光客では行動特性が大きく異なることが考えられるが、自由に行動できる歩行者が主要道だけを利用して移動すると仮定するのは無理がある。これを一般化するのは容易ではないため、OD の両端を結んだ直線距離をトリップ長とし、一定の速さで歩くと仮定する。距離と速度が決まれば、それらから旅行時間を計算することができる。走行速度は、 $80(\text{m}/\text{min})$ と設定した。

他は全く同一の条件で、走行速度のみ $160(\text{m}/\text{min})$ に変更することで、自転車も徒歩の一種として交通手段の選択肢に含めている。ただし、自転車に関する交通規則の曖昧性を考えてみても、自転車の挙動をこのように単純化することは本来適切であるとは考えられないため、第5章のシミュレーションの関係で便宜上扱うが、独立した選択肢には含めない。

4.1.4 シミュレーション対象の設定

一般的な交通需要予測では、対象地域全体の交通行動を対象とするのに対し、本研究ではその中の一部に焦点を当てるモデルを作成している。提案モデルと類似した先行研究 [20] と比較することで、このモデル設計の利点を説明する。

先行研究はミクロ交通流シミュレータと生活行動シミュレータを組み合わせたものである。そして、市全体を単位として交通需要予測を行っている。大規模領域の分析はモデルの精微さ、増大する計算量の処理という観点で、小規模領域の分析より技術的には高度である。しかし、入力として用いる交通データの観点でみると、パーソントリップ調査など扱えるデータ量は大きいものの、集計単位の領域が大きくデータの粗さが課題となる。実際、再現性の確認には対象領域全体の交通量など、マクロ量を用いていた。対象領域が広がるほどその中の交通主体の多様性は増していくため、領域の一部分だけに着目すると誤差が大きくなっている可能性もある。

本研究では、始めから対象領域を小さくとることによって、その一部分の再現性を明示的に評価できる点に優位性を持つ。また、対象領域を切り取りやすくする工夫として、OD が限定的である場合 (全てのエージェントが一様に同じ目的地を目指すなど) にはクラスタリングの要領で発生地・目的地を集約することが可能であると考え、それを本研究においては、次項の代表点という概念で利用している。

4.1.5 代表点の設定

本研究で提案する交通行動要因分析も、その手順は基本的に従来の交通行動分析と同様であり、交通行動に関する分析データを作成することが必要である。特に、ロジットモデルでは個人の交通行動をアンケートなどによって調査するのが普通である。ただ、現実にはそのような情報を収集するのはコストがかかるため、データ作成を補完する手法を用いる。それがエージェントの OD に関する代表点 (Representative) の利用である。

前項でも説明したように、本研究では共通の目的地を持つエージェントを対象に分析を行うため、それらのエージェントは基本的に近い性質を持つことが期待される。古典物理学で物体を質点として扱うように、エージェントの集団もある一つのエー

ジェントに代表させることを考えた．このとき，代表として扱うものは発生地であり，これを「代表点」と呼ぶことにする．代表点の決め方は，重心の概念を参考にしており，対象とするエージェントの存在範囲中の発生地の座標の重心を求め，それと2-ノルムで計算した距離が最も短いノードを代表点とした．図4.2に代表点のイメージを示す．

代表点から発生するエージェントは，初期値として与えられた交通手段分担率に基づいて交通手段を選択する．共通のODでありながら異なる交通手段を選択する．これが対象とするエージェントの多様性を擬似的に表現すると解釈する．

この代表点の考え方には理論的な背景があるわけではなく，またマルチエージェントを利用して複雑系を扱う，という観点から考えると矛盾している面があるのは否めない．このような手法をとるのはあくまでデータ作成を補完するためのものだということは理解しておく必要がある．ただし，4.1.2項で交通行動要因は客観性の高い要素だけを扱っているため，異なるエージェントであっても，認知や判断の差異は小さく済むと思われる．

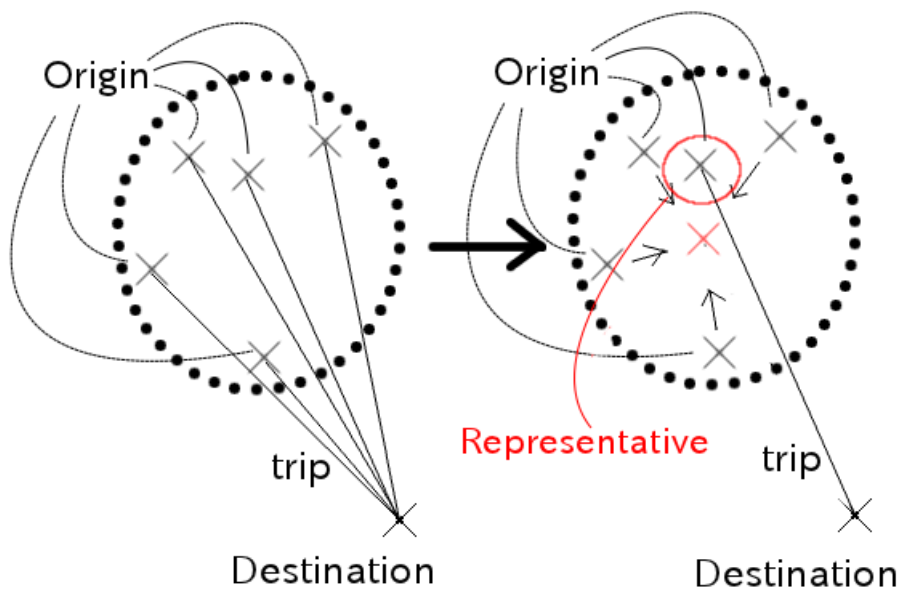


図4.2 代表点のイメージ

4.1.6 交通手段分担率の導出

前項で作成した個人毎のデータを基に効用関数を作成する．効用関数は 2.3 節のロジットモデルに従った形であり，(4.1) 式で表すことができる．

$$U_{in} = V_{in} + \epsilon_n = \sum_{j=1}^J \omega_j x_{ijn} + \epsilon_n \quad (4.1)$$

ここで，上式に表れる変数は次のような意味を持つ．

- J : 交通行動要因の総数 (=2)
- U_{in} : エージェント n の交通手段 i による効用
- V_{in} : エージェント n の交通手段 i による効用の確定項
- ϵ_{in} : エージェント n の交通手段 i による効用の確率項 (ガンベル分布に従う)
- ω_j : 交通行動要因 j に対する重みパラメータ
- x_{ijn} : エージェント n の交通手段 i の交通行動要因 j についてのコスト

ここで，交通手段 1 をバス，2 を自動車，3 を徒歩とし，交通行動要因 1 を時間，2 を費用とする．また， x_{ijn} の単位は x_{i1n} (10 min)， x_{i2n} (100 円) としている．効用 U_{in} は単位なしであるから， ω_j の単位は ω_1 (1/10 min)， ω_2 (1/100 円) となる．また，通常は同じ交通行動要因であっても交通手段毎に区別しているモデルが多い．つまり，重みパラメータは交通行動 i の交通行動要因 j についてのコスト ω_{ij} と定義するのが普通である．しかし，本研究では重みパラメータは交通手段に関係なく同一の値を取るようにしている．つまり，同じ時間，同じ費用であれば，どのような手段で移動しても交通主体は違いを感じない，というモデルとなっている．これは，交通行動における個人差の影響を抑えるための工夫である．

なお， ω_j は何らかの方法によって推計することが必要がある． ω_j として望ましいのは，それによってそれぞれのエージェントの選択した交通手段がもっともらしいと言えることである．対象となる全てのエージェントの行動を表す同時確率 L は，

$$L = \prod_{n=1}^N \prod_{i=1}^I P_{in}^{\delta_{in}} \quad (4.2)$$

と表せる．ここで， N はエージェントの総数， I は交通手段の総数 ($=3$)， δ_{in} はエージェント n が交通手段 i を選択したときは 1，それ以外の場合は 0 を表す変数である．

もっともらしい結果とは，重みパラメータを変数に持つ同時確率が最大となる状態であると考えることができるため， L の最大値を求めれば良い．そのための手法として一般的には最尤法やベイズ推定が用いられることが多く，本研究では最尤法を用いる．最尤法は，求める尤度関数に対数を取って得られる対数尤度関数を最適化する手法である．なお，(4.2) 式は凸ではない非線形関数であるため，解が一意には定まらない．そのため， ω_j に関する条件を設けることで特定の解を得ることにする．

これらを踏まえ，解くべき問題は，(4.3) 式で表される関数 M を最小化する最適化問題に帰着することができる．

$$\min M = -\log L + \lambda N \sum_{j=1}^J \omega_j \quad (\lambda \geq 0) \quad (4.3)$$

(4.3) 式の第 1 項は，エージェントの行動を表す対数尤度であり，第 2 項が ω_j に関する制約である．この式を最小化する意味合いについて説明する．それに先立って，重みパラメータ ω_j について，その値が負であるという仮定をおく．なぜなら，旅行時間，費用ともにエージェントにとってはコストであり，なるべく旅行時間は短く，費用は安く済む行動を選択すると考えるのは自然である．したがって，これらの値が大きくなる程，(4.1) 式で表される効用は小さくなる．これを満たすには全ての重みパラメータ ω_j は負であることが必要条件となる．

この仮定を踏まえて (4.3) 式の第 2 項に着目する． ω_j の総和で表されるこの式は，各要因の値が負の方向に大きくなることを期待している．効用関数が線形結合で表されるロジットモデルに対して最尤法を適用する場合，全ての重みパラメータが 0 という組み合わせを自明な解に持つ．したがって，数値計算の際に自明な解に収束するのを防ぐため，解の探索方向を ω_j を小さくする方向にさせる要素が必要であった．

なお，本研究では交通行動要因 ω_j はエージェント n や交通手段 i によらない．したがって，単純に ω_j の総和をとり，エージェント数 N を掛け合わせることで，全てのエージェントに同様の制約を付与することができる．

ω_i がエージェントや交通手段によって異なることを想定する場合，つまり重みパラ

メータが ω_{ijn} と表せる場合には,

$$\min M = -\log L + \lambda \sum_{n=1}^N \prod_{i=1}^I \left[\sum_{j=1}^J \omega_{ijn} \right]^{\delta_{in}} \quad (4.4)$$

と最適化問題を定式化できる．交通手段 i に関する総積 \prod はエージェントが実際に選択した選択肢のみを計算に加えること，エージェント n に関する総和 \sum は全てのエージェントについて同様の計算をし，足し合わせることを意味する．これにより，(4.4) 式第 2 項は全てのエージェントの重みパラメータ ω_j について期待する条件を適用したことを表すことができた．

4.1.7 初期値の更新

システムの概要は前項までで述べた通りであるが，提案システムの重要な要素にシミュレーションの反復がある．本項では，その内容と必要性について詳細に説明する．交通行動要因分析の後半で行う交通手段分担率の特定には，交通行動データを作成するために分担率の初期値 $Q_i^0 (i = 1, 2, \dots, I)$ を与える必要がある．したがって，その初期値次第では作成した効用関数から得られる分担率が大きく変動する可能性がある．当然得られる結果は初期値の影響を受けるため，得られる分担率を更新値として扱い，初期値と更新値との差が十分小さくなるまで反復してシミュレーションを実行することが必要である．これを整理すると，(4.5) 式を満たすとき， k 回目の計算でシミュレーションは終了する．

$$|Q_i^k - Q_i^{k-1}| < \epsilon \quad \text{for } \forall i \quad (4.5)$$

ただし， Q_i^k は k 回目のシミュレーションで得た交通行動 i の分担率を表し， ϵ には 0.01 を設定した．最終的に得られる交通手段 i の分担率 Q_i は $Q_i = Q_i^k$ である．

第 5 章

性能評価

5.1 シミュレーション設定

5.1.1 金沢バストリガー方式

本研究では，石川県金沢市で金沢バストリガー方式に基づいて実施された「旭川周辺—金沢大学角間キャンパス間 100 円運賃実験」を利用して提案システムの性能評価を行う．バストリガー方式とは，市などの行政の仲介のもと，バス事業者と利用者がバストリガー協定の締結の上で運賃や運行ルートの新設や延長，運行頻度の向上などを決定するもので，事前に設定した採算ラインを下回った場合は，その施策を中止できるという方式である．施策の中止をトリガーを引くことになぞらえている．これは，利用者増加を目的としたサービス向上策を実施しても，利用者は慣れのために増加効果がすぐになくなってしまふことが背景にあり，効果を継続的に維持するための案として用いられている．以後，この方式によって実行された施策をバストリガー施策と呼ぶことにする．

交通授業者にとって，この方式の利点は，施策によって期待した効果が得られなかったときはその施策を中止することで，生じた損害を軽減できることである．一方，利用者は積極的かつ継続的にバスを利用するという一定の責任を担う代わりに利便性の向上を享受できる．他の施策のほとんどが自治体や交通授業者などのサービス提供者の負担によってなされていることを考えると，形式上双方に利益のあるこの方式は運用次第では有用な策になり得る．

金沢の場合は，北陸鉄道と金沢大学の間で協定が結ばれている．これは金沢大学の

学生の要望が発端となっている。金沢大学で実施された事前アンケート調査 [23] では、大学(角間キャンパス)周辺地域におけるバスの運行料金を 100 円に値下げすることによりバス利用者が大幅に増大することが示唆された。これを受けて金沢市から金沢大学と北陸鉄道との間に協議が持ちかけられ、施策が実現するに至った。施策の対象地域周辺の地理的状况を図 5.1 に示す。図の左上に JR 金沢駅、右下に金沢大学角間キャンパスが位置している。

施策は、2006 年 4 月 1 日から 2011 年 3 月 31 日までの 5 年間の実証実験として実施された。バストリガー施策において特に重要な採算ラインについては、基準となる 2005 年度の運賃収入を超えれば次年度も施策を続行するという条件になった。従来の運行では 170 円から 200 円に相当する区間を 100 円に値下げするため、利用者数ベースで考えると 89% 以上の増加が必要になると予測している。

施策結果について述べると、毎年採算ラインを超え、5 年間の実証実験を終了している。実績に関する詳細を資料 [23] に基づいて作成し、図 5.2 に示した。横軸は計測した月、縦軸はバスの月間利用者数である。利用者数に関しては実測ではなく、施策対

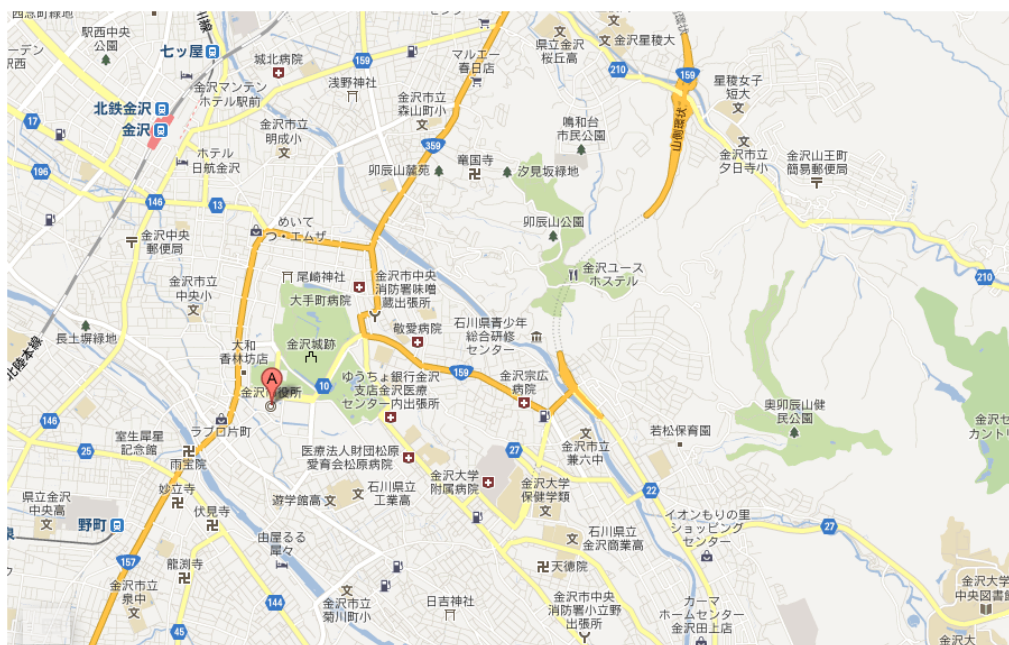


図 5.1 金沢市周辺地図

(Google Map より引用)

象区間の利用者に、定期券利用者や乗り継ぎ割引等を加えた推計値となっている。また、各月の左から施策実施前の 2005 年度から施策最終年度の 2010 年度までの 6 年間の利用状況を年度毎に棒グラフで示している。さらに、図 5.2 中の折れ線グラフは施策の継続条件を満たすための目標利用者数を表している。図を見る限りは、事前に設定した目標は大幅に超えて達成されたが、実は経済性の観点ではこの施策は失敗している。本研究とは直接関係しないが、補足しておく。

最大の原因は、バスの利用者が大幅に増加することによって、バスの運行便数を増加させたためである。結局、追加されたバスの運行費用が利用者増加による利益を上回り、運営主体である北陸鉄道は赤字となってしまった。交通計画を立てる際には、潜在的に存在するコストを的確に把握することがその成否につながる、ということをよく表している。2011 年度以降は施策は廃止されたものの、完全に実施前の状態に戻すのではなく、同区域に対して条件や内容を修正した施策を新たに実施している。金沢バストリガー方式そのものに対する詳しい議論は他になされている [36] ため、本研究では割愛する。

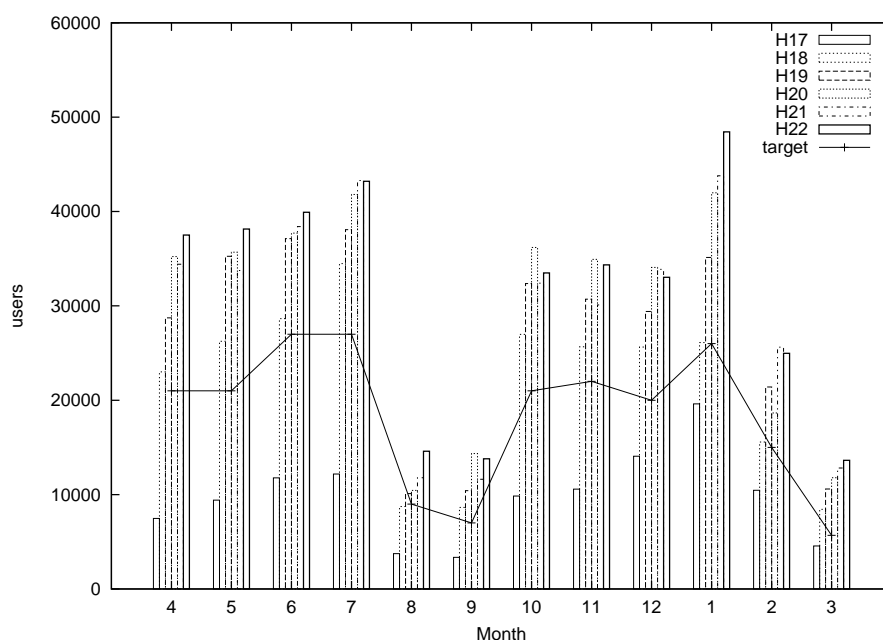


図 5.2 金沢バストリガー方式施策結果

(平成 22 年度利用実績等 [23] より作成)

5.1.2 シミュレーションにおける評価事項

シミュレーション実験で上記の施策を対象とするのに当たって、考慮すべきことをまとめる。まず、最終的な目的は、金沢大学角間キャンパスに在学する学生が通学の際にどのような要素を主要な決定要因にしているかを分析することである。それに先立って、学生の交通手段分担率の再現も必要となる。選択肢となる交通手段や実験結果と比較検討する分担率データは、前項にも挙げた金沢大学で行われたアンケート調査に基づく。このアンケートは金沢大学角間キャンパスに在学する学生 5000 名を対象に実施され、1182 名 (回収率 23.6%) からの回答を得ている。そのうち、バストリガー施策の対象地域付近に居住している学生の回答を集計している (約 750 名)。その結果を表 5.1、表 5.2 で示す。

アンケートは天候別に調査されており、天候が崩れるとバスの利用が増加し、自動二輪や自転車の利用が減少するという一般的な傾向もはっきり表れている。可能ならば天候別に交通行動要因分析を行うべきだが、道路交通センサスの交通データが計測されたときの天候が統一されていないため、本研究では天候が晴れの場合についてのみ分析を行う。なお、悪天候時に複数の交通手段がどのように挙動するかを均衡理論を用いてモデル化した研究 [1] があり、今後モデルを拡張するときに参考になると思わ

表 5.1 施策実施前の利用交通手段についてのアンケート結果

交通手段	晴れ	雨	雪
バス	16%	45%	60%
自家用車	19%	20%	16%
原付・自動二輪	19%	7%	1%
自転車	36%	11%	1%
徒歩	9%	16%	20%
その他	1%	1%	2%
回答なし	0%	0%	0%
計	100%	100%	100%

([23] 中の「アンケート結果概要」より作成)

れる。

5.2 MATES による交通流シミュレーション

5.2.1 道路ネットワークの作成

MATES を利用してシミュレーションを実行するために必要な道路ネットワークの設定について説明する。シミュレーション領域は、バストリガー施策の対象区域と道路交通センサスによる観測箇所を勘案して、金沢駅と金沢大学角間キャンパスを結ぶ領域とその周辺約 4km 四方とした。実際に MATES で利用する道路ネットワークを図 5.3 に示す。シミュレーション上での信号機の設置地点を○点、観測器の設置地点を×点で示している。なお、青線がバストリガー施策の対象区間である。

本研究では道路ネットワークを単純化しているため、主要県道路を中心にネットワーク化している。また、実際の道路環境における信号の場所にはノードを置くことにしており、道路ネットワーク上で直線に見える道路でも二叉路として複数のノードが存在する場合がある。それらも含めて、道路ネットワークのノード数は 194、リンク数は 442 となっている。

5.2.2 交通状態の再現

ミクロ交通流シミュレーションによるリンク別車両通過速度の信頼性を保証するため、シミュレーション領域内の交通量を適切に設定する必要がある。本研究では、2005 年度の道路交通センサスから観測データを得る。領域内で交通量が観測されてい

表 5.2 施策実施後のバス利用希望の有無についてのアンケート結果

	晴れ	雨	雪
はい	42%	73%	84%
いいえ	56%	25%	14%
回答なし	2%	2%	2%
計	100%	100%	100%

([23] 中の「アンケート結果概要」より作成)

る 17 地点 34 箇所について，シミュレーションによって得られた交通量と比べることで，設定が適切か否かを判断できる．なお，前提条件としてシミュレーション時間は 1 時間に設定し，学生の通学時間帯に含まれる午前 10 時から午前 11 時までの交通状態をシミュレーションする．

一般に，交通環境において直接観測できるのはリンク交通量であるが，交通流シミュレータでは OD 交通量を入力として与える必要がある．したがって，シミュレーションを実行するには，リンク交通量から OD 交通量を逆推定することが要求される．これは，2.2 節で説明したところでの，各発生地点における分布交通量または発生交通量を特定することに等しい．これを数理的に解くための計算アルゴリズムも研究されている [5][10][13] が，特に複雑な道路ネットワークに対して十分な精度を保証するものは未だ知られていない．シミュレーションの実務においては，最終的に手作業での試行錯誤により調整が行われるのが通常である．本研究においても，特定のアルゴリズムは用いず，手作業で調整した．

この試行錯誤によって得られた全 34 箇所のシミュレーション交通量と観測交通量

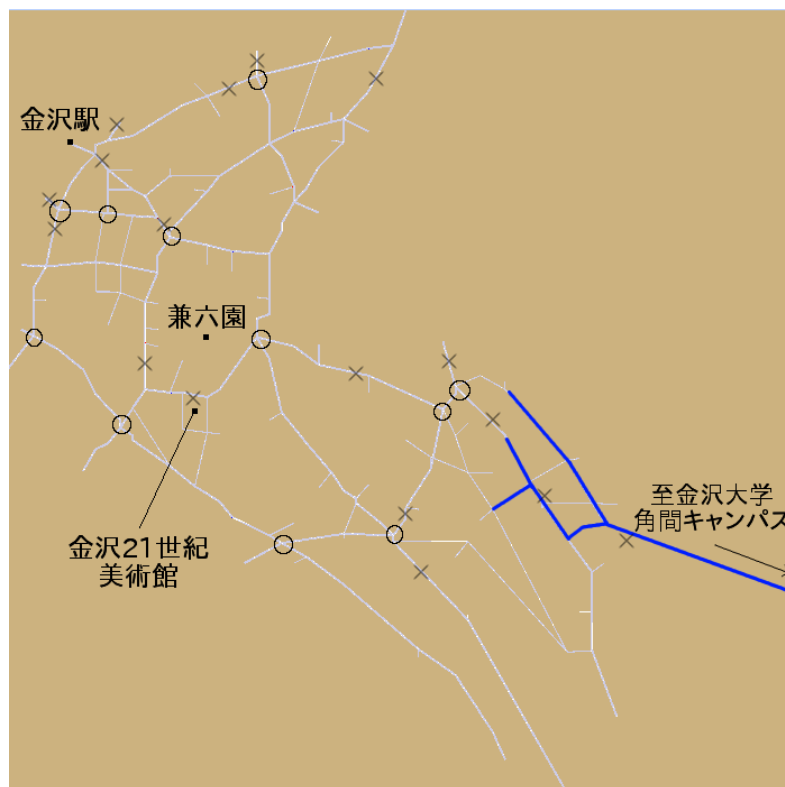


図 5.3 道路ネットワークと観測器設置箇所

の関係を表したものが図 5.4 である。図の横軸が観測交通量，縦軸がシミュレーション交通量である。なお，シミュレーション交通量はシミュレーション 10 回の平均で表している。シミュレーション精度が良い程，その観測地の交通量は 45° 線に近いところにプロットされる。ただし，シミュレーション開始時はエージェントが全く存在しない状態から始まるため，道路がおおよそ定常状態になっている状態（シミュレーション時間で 15 分後）からシミュレーション時間で 1 時間計測している。一部の観測地点においては誤差が 50% 以上になっているものの，観測交通量とシミュレーション交通量の相関係数を求めた結果，約 0.83 となった。相関係数がどの程度あれば有意であるとみなせるかは分野によって異なるため，一般化するのは難しい。しかし，交通需要予測モデルに関する研究を調べたところ，相関係数が 0.8 以上であれば問題ないと判断し，本研究ではこの設定で行った交通流シミュレーションを交通行動要因分析に用いることにする。

また，シミュレーション中に発生した自動車エージェントの総数は約 10000 である。計算機環境は，

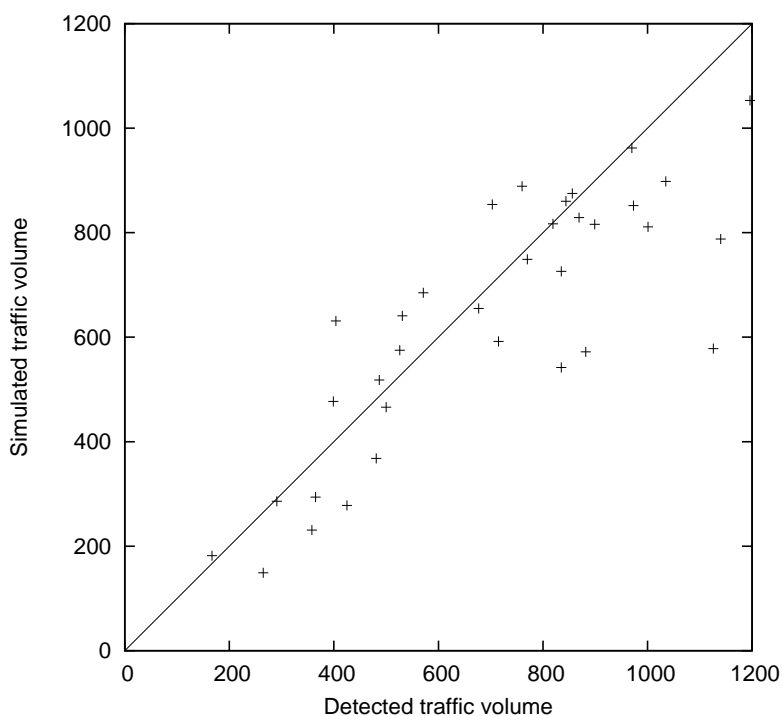


図 5.4 観測交通量とシミュレーション交通量の関係

- CPU...Intel Core i3(2.53GHz)
- メモリ...4GB

であり，60 分のシミュレーションに 100–120 分程度かかった．

5.3 施策対象者の交通行動要因分析

対象となる金沢大学角間キャンパスに在学する学生の交通行動を分析するための手順を順に説明する．

Step 1. 該当する学生の交通行動データの作成

データを作成するために，MATES 出力結果から取得する情報，作成するデータ数，4.1.5 項で定義した代表点を決定する必要がある．

まず，MATES の出力結果の中で用いるのは，各単路毎に設定した架空の車両観測器から得られる車両データである．この架空の観測器には，車両がその設置地点を通過する度に情報が書き込まれ，その車両の「通過時刻」，「通過レーンの識別番号」，「車両の ID」，「車両の発生地」，「車両の目的地」，「通過時の速度 (m/msec)」を取得する．これらの情報から，道路ネットワーク上の任意の単路について，シミュレーションする任意の時間の速度データを構成することができる．ただし，交通行動要因分析には交通量の計測開始から 5 分毎に平均化した速度データを利用する．つまり，単路数 (=442) × 速度データの更新数 (=12) のデータを用いることになる．一般に，観測の間隔が 15 分以内であれば道路の渋滞などの影響を反映できると言われており，分析上の問題はないと思われる．

作成データ数 N は，前節でも触れたアンケートの回収数と速度データの更新間隔を考慮して 720 とする．720 のエージェントの仮想的な発生地点である代表点は，4.1.5 項で定義した方法により決定している．

Step 2. 交通手段の設定

本研究で仮定している交通手段と，表 5.1，表 5.2 のアンケートで分類されている交通手段が完全には対応していないため，分析を可能にするための調整を行う．

まず，施策実施前の利用交通手段を表した表 5.1 アンケート中の「自家用車」と「原

付・自動二輪」はエンジンを用いているという共通性から、本研究における「自動車」として扱う。天候が悪い場合にはこれらの交通手段を区別せずに扱うのは無理があるが、本研究では晴れの場合を考えるということで許容できるものと思われる。

次に「自転車」と「徒歩」は本研究での「徒歩」として扱う。これらの交通手段の相違点が多いことは 4.1.3 項でも既に述べたが、それぞれの交通手段が選択される割合に基づいて、各エージェントの移動速度を選択する形をとることで対処する。つまり、表 5.1 では徒歩が 9%、自転車が 36% となっているため、エージェントの移動速度は、20% の確率で速度 80(m/min)、80% の確率で速度 160(m/min) となる。

「その他」や「回答なし」についてはどの交通手段にも割り当てず、バスと自動車、徒歩の 3 種類の交通手段の選択確率の合計で正規化する。

一方、表 5.2 はバスの利用を希望するか否かという問いになっており、表 5.1 に比べて情報量が少ない。アンケートでは希望していたとしても実際に利用する保証はないが、本研究では利用を希望した人は皆実際に利用したと仮定する。また、自動車と徒歩の分担率を直接知ることができないため、後の分析においてもバスの分担率のみで検証することにする。

Step 3. 係数パラメータ λ の決定

Step 1 で作成したデータを基に、4.1.6 項で定義した効用関数の重みパラメータを決定する。そのためには、(4.3) 式で用いられている係数 λ の値を決定し、表 5.1 で示されている施策実施前の交通分担率を再現する必要がある。 λ の値を $\lambda = 0.0$ から 0.05 刻みで分担率を計測した結果が図 5.5 となる。横軸が λ の値、縦軸が各交通手段の分担率を表す。なお、 $\lambda \geq 0.7$ のときは、Newton-Raphson 法による計算が発散したため、分担率を求めることができなかった。

図 5.5 を見ると、 λ が大きくなるにつれて自動車の分担率が増加する一方、バスや徒歩の分担率は減少している。いずれの場合においても、バスの分担率が過大評価、徒歩の分担率が過小評価されており、 λ の値を調整するだけでは表 5.1 の結果を実現することはできない。その原因に関する考察は 5.4 節で行うが、対策として直接重みパラメータを入力する。図 5.5 で最もアンケート結果との誤差が小さい自動車の分担率に着目し、その再現度が最も高い $\lambda = 0.15$ のとき結果を基準にする。

Step 4. 施策前の重みパラメータの決定

まず，施策前について，次の場合について重みパラメータと分担率の関係を調べる．

- A0...アンケート結果
- A1...最尤法による最適解
- A2...試行錯誤的に ω_j を調整したとき

これらの場合における ω_j 及び尤度比 ρ ，自由度補正をした修正済尤度比 $\bar{\rho}$ ，そして交通手段分担率は表 5.3 のようになる． ω_j の () 内の数値はそれぞれの t 値を示す．尤度比は，初期尤度と計算が収束したときの尤度を比べて，どれだけ尤度が減少したかを表す．つまり，初期尤度を $L0$ ，収束時の尤度を $L1$ ，自由度補正をした修正済尤度を $L2$ とすると， ρ と $\bar{\rho}$ はそれぞれ，

$$\rho = \frac{L0 - L1}{L0} \quad (5.1)$$

$$\bar{\rho} = \frac{L0 - (L2 - 2)}{L0} \quad (5.2)$$

と定まる．(5.2) 式における数字 2 はパラメータ数 $j(=2)$ を表す．なお，初期尤度

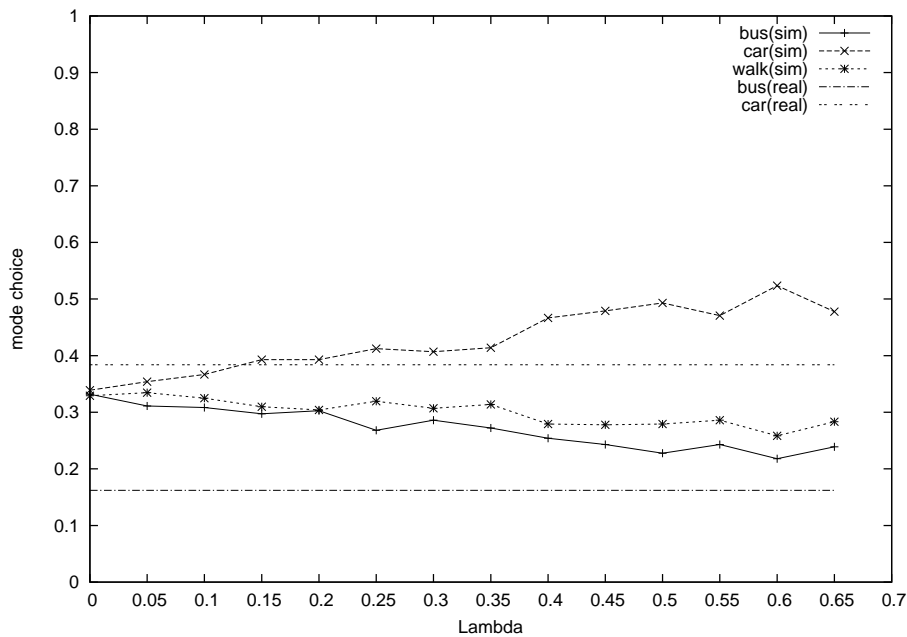


図 5.5 λ と分担率の関係

を計算する上で、 ω_j の初期値は全て -0.5 としている。

バス、自動車、徒歩の分担率はそれぞれ Q_{bus} , Q_{car} , Q_{walk} と表記し、アンケート結果を示す A0 の分担率は Step 2 で正規化した値を用いる。

提案モデルの再現性が十分高ければ、A1 で得られる分担率が A0 と一致するはずであるが、本研究ではそれを満たしていない。A0 と近い結果が得られた A2 と比較すると、費用に関する重み ω_2 の影響が過小に評価されていることが分かる。

Step 5. 施策後の重みパラメータの決定

施策後についても Step 4 と同様に、次の場合について重みパラメータと分担率の関係を調べる。

- B0...アンケート結果による値
- B1...最尤法による最適解
- B2...A2 で得られた ω_j を用いたときの値

なお、B2 は施策の前後で利用者の行動特性が変化していないと仮定した場合の交通行動を表す。もし、行動特性が変化していなければ B0 と一致するはずである。

実験結果を表 5.4 に示した。B0 の Q_{car} と Q_{walk} はそれぞれの値が不明なため、それらの和を示している。そのため、アンケートとの比較はバスの分担率のみで行うと、施策後に関してもモデルの最適解を満たす重みパラメータはアンケート結果 B0 を再

表 5.3 施策実施前の結果比較

	A0	A1	A2
ω_1	-	-0.28(-5.8)	-0.35(-7.1)
ω_2	-	-0.080(-3.0)	-0.57(-17)
ρ	-	0.58	0.59
$\bar{\rho}$	-	0.58	0.59
Q_{bus}	0.162	0.279	0.159
Q_{car}	0.384	0.397	0.401
Q_{walk}	0.455	0.323	0.439

現することはできていないことが分かる．行動特性が施策前後で変化しないという設定を取り入れた B2 ではバスの分担率が増加しているという傾向は表現できているものの，依然乖離は大きい．したがって，本研究で提案した 2 つの変数を持つ効用関数は，状況の変化が反映されにくいことが示唆される．

これらの結果に対する考察を次節で述べる．

5.4 考察

5.4.1 時間価値

本来であれば，提案モデルを利用した A1 と B1 を用いて考察をすべきであるが，得られた解の精度が低いため，提案モデルに比べて状況再現性が高かった A2，B2 を中心に考察する．モデルの再現性に関する原因分析は後述する．ここで，A2，B2 の一分当たりの時間価値を算出する．人々の時間価値が高いほど，その人は旅行時間を短くするような交通行動をとることが考えられる．具体的な交通手段で表現すると，徒歩に比べて自動車やバスの利用を選好するようになることを意味する．注意したい点として，時間価値の定義だけでは自動車とバスの選択については議論することはできない．ただし，本研究においては施策前後で条件が変わっているのはバスのみであるため，徒歩と自動車の間で利用する交通手段が変わることは考えづらい．

表 5.4 施策実施後の結果比較

	B0	B1	B2
ω_1	-	-0.44(-8.1)	-0.35(-6.3)
ω_2	-	-0.50(-8.0)	-0.57(-9.2)
ρ	-	0.58	0.58
$\bar{\rho}$	-	0.58	0.58
Q_{bus}	0.42	0.236	0.249
Q_{car}	(0.58)	0.404	0.383
Q_{walk}		0.360	0.368

ここで，4.1.6 項で定義した重みパラメータ ω_j の単位を考慮すると，

$$(\text{一分当たりの時間価値}) = 10 \cdot \omega_1 / \omega_2 (\text{円}/\text{min})$$

と求めることができる．これに基づいて計算すると，エージェントの一分当たりの時間価値は約 6.1(円/min) となる．一方，A1 と B1 の場合について一分当たりの時間価値を算出すると，それぞれ約 35(円/min)，8.8(円/min) であった．

両方の場合に関して共通していることは，アンケート結果に比べて分担率の変化幅が小さいことである．したがって，本研究で提案したモデルは交通環境の変化に対する感度が鈍いことが考えられる．特に，自動的に重みパラメータを算出した A1 や B1 では，僅かではあるものの施策実施後の方がバスの分担率が減少するという結果になっており，現在のモデルをそのまま適用することには問題がある．

一方，施策実施前についてアンケートと結果が一致するように重みパラメータを調整した A2 と B2 では，施策の実施によってバスの分担率が増加するという傾向は再現させることができている，さらなるモデルの改良は不可欠であるが，改良によって精度を向上させられると期待できる．ただし，施策の前後で重みパラメータが変化しないという仮定が，実際に妥当なものであるか否かを検討することは必要である．そのためには，実際の交通データと比較することが最も効果的である．本研究においては，施策実施後の自動車と歩行者の分担率を得ることができれば，より詳しい分析ができるものと思われる．

しかし，そのような詳細な交通データを入手することが常に可能であるとは限らない．本研究の場合，結果の妥当性を判断する基準として，時間価値の値が参考になると考えられる．上述したように A1 の時間価値は約 35(円/min) であり，これを一時間当たりの時間価値に変換すると，約 2100(円/h) となる．客観的な判断は難しいが，学生が通学時間の短縮にこれだけの価値を見出しているとは考えにくい．この場合は時間価値はより低い値になることが自然だと思われる．そのため，シミュレーション結果の検証方法の一つとして時間価値の値を確認することが有用であると考えられる．

5.4.2 モデルの誤差原因

5.3 節のシミュレーションで、提案モデルによる施策結果の再現性が低くなった原因を考察する。

1. 最適化問題のパラメータ制約項

まず、(4.3) 式の第 2 項に問題があることが予想できる。4.1.7 項で説明したようにこれは重みパラメータ ω_j についての制約項であった。上式はそれぞれの絶対値の総和をとることを意味する。しかし、これらは初期値次第では、この項が無限に小さくなる可能性は排除できない。極端に小さくなることはなくとも、本来最小化したい第 1 項の対数尤度 $-\log L$ に対して支配的になっている恐れがある。そのため、 ω_j に対するより適切な制約項を分析し、適用することが望まれる。

2. 交通行動要因の個数

評価する交通行動要因そのものが少なすぎる可能性がある。本研究ではパラメータが少ない方が最適化問題の収束性が向上すること、また結果の比較検討なども簡便であることを理由に最小限必要だと考えられる時間と費用の 2 つを選択した。しかし、バス運賃の値下げのような、定量的に評価できる施策なら問題ないが、「低公害車の導入」などの直接的な利益として考えられない施策効果を分析する場合は、それに合わせた指標を適宜作成することが要求されるかもしれない。

3. 代表点の定義方法

本研究では、交通データの補完を行うために異なる発生地を持つエージェントに対して、全体の発生地を代表する点を代表点とした。この研究では候補となる発生地の重心に最も近い点を代表点としたが、精密な分析をするには、その地域を表す何らかの指標を用いてクラスタリングなどを適用するべきだろう。また、代表点は必ずしも 1 つで十分とは限らないはずで、代表点の個数と位置の両方を決定する場合には、今回のような直感的な方法は利用できないだろう。

4. 交通手段のモデル化の程度

本研究で選択肢として用いる交通手段は、バス・自動車・徒歩の 3 種類であり、原則として交通手段間の乗り換えもないものとしている（「徒歩 バス」のみ考慮）。また、バスと自動車の走行速度以外については単純化したものを用いているため、交通流シミュレータ単体が高精度であっても、その後の分析に活かすことができないおそれがある。

以上のような原因があると推測できる。このうち、1 点目のパラメータ制約項と 3 点目の代表点の定義方法に関する問題は、モデル全体に対する影響が小さいため比較的取り組みやすい。本研究では問題の原因特定と解決までは至っていないが、将来的に施策効果を評価するモデルが研究される機会は多くなると考え、提案モデルの課題を記した。

第 6 章

結論

本研究では、バスの利用促進策の実効性を定量的に評価する方法を考案することを目標としてきた。そのためには対象となる交通主体の行動特性を分析することが必要だと考え、交通に関する詳細な挙動を再現できるミクロ交通流シミュレータに交通手段選択機能を組み込んだモデルを作成した。

一般に交通行動分析を実施するには対象地域の交通データが必要とされるが、地方、かつ一定の広がりを持つ空間に対して十分な情報を入手するのは難しい。そこで、対象者の発生地・目的地がそれぞれ限られた範囲内存在するという条件の下で、不足している交通データを内的に作成する手法を組み込んでいる。そして、提案したモデルにおいても、統計的に有意な指標を交通行動要因に持つ効用関数を構築できることが示された。

この効用関数のパラメータの相対的な関係を考慮することで、利用者の時間価値を算出することができる。金沢市で実施された施策の分析によって、施策の効果を評価する際には時間価値の値が施策の有効性を示すことが示唆された。

ただし、現状ではモデルの再現性が低いため、得られた効用関数をそのまま適用しても十分な精度は得られていない。したがって、モデルの再現性向上が今後の課題に挙げられる。対策としては、効用関数を決定するための最適化問題の制約条件について考察をすること、またモデルの中で取り扱う交通手段のモデルの精微化などが考えられる。さらに、より大規模な施策を取り扱う場合には、交通手段選択による道路環境への影響を交通流シミュレータにフィードバックすることも求められるだろう。

謝辞

本論文を執筆するにあたり，多くの方々からご指導，ご協力を頂きました．この場を借りて御礼を申し上げます．

指導教員である吉村先生には，研究者として，また教育者として，大学院で研究を行うために必要な姿勢についてご指導を頂きました．かなりの多忙であるにも関わらず，研究に行き詰まった時には打ち合わせを開いてもらったことは本当に感謝しています．時には厳しく，時には優しく，しかし常に研究の方向性を気にかけて下さりました．准教授の和泉先生には，ゼミでの議論の他，学会などのいくつかのイベントでお世話になりました．和泉先生の意見やアドバイスは研究と実務の両面からなされることが多く，特にプレゼンテーションに関するコメントは参考になりました．同じく准教授の山田先生には，プレゼンテーションの仕方についてゼミでの議論でよく指摘して頂きました．特に論理の整合性についての意見は的確で，他の人の発表に対する意見を聞いていても参考になることが多かったです．1月に講師になられた藤井さんには，研究で疑問があったときには真っ先に相談させて頂きました．特に去年は体調などの面で苦労されることが多かったと思いますが，そんな状態でも研究の動向を気にかけて下さりました．秘書の井上さんには，研究室関連の事務手続きを処理して頂きました．昨年夏に井上さんのお手伝いをした際に，普段何気なくやってもらってることが意外と大変なのだと知りました．

技術職員の川手さんには，研究室の安全面などの確保でお世話になりました．物の細かい配置にも意味があることを知りました．杉本さんには，研究生活という観点で研究室でどのように過ごすべきかを教わりました．毎回は行けなかったのですが，いつも昼食に誘ってくださりありがとうございました．PC クラスタの設定のお手伝いできたのは良い思い出です．淀さんには，研究に関して鋭い指摘を数多く頂きまし

た．納得できるまで徹底的に取り組む「職人」としての姿勢が少しですが掴めたと思っています．室谷さんには，研究の数学的な部分に対する指摘が的確で勉強になることが多かったです．昨年から所属こそ変わったもののその後もゼミの議論などでお世話になりました．南さんは週に一度しかお会いする機会がないものの，計算量の怖さを思い知らされる話を聞きシミュレーションの難しさを実感しました．河合さんは昨年諏訪に異動になった関係で，夏のゼミ合宿でお世話になりました．今でも時々研究室に訪れるため，技術的な話からおいしい料理屋の話まで奥深い話をして下さるのがありがたいです．

博士課程 2 年の水田さんとは会う機会が少なかったのですが，現職の実務家ということで他の人にはない知識などが目新しかったです．1 月のオープンゼミではお世話になりました．博士課程 1 年の遊佐さんには，大学院に入学した時からずっとお世話になってきました．代わる代わる色々なプログラミング言語，アプリケーションを薦めて頂きました．こうして今 emacs を使っているのは遊佐さんのおかげです．同じく博士課程 1 年の川久保さんは研究と子育ての両立をなさっているということで，学生として自由に時間を使って研究ができることの重要さを感じることができました．1 月のオープンゼミに誘って頂きありがとうございました．

同期の修士 2 年の 4 人，王君，迫村君，柴田君，皆川君には色々刺激を受けました．研究で切磋琢磨する以外にも，それぞれ全然違った性格をしているので，話をするだけでも有意義でした．半年遅れて入学した友部君にはある意味で一番影響を受けました．修士 1 年の 4 人，王君，鈴木君，三目君，葉さんは性格こそ違うものの研究に関しては皆真面目で，だからこそ良い意味でのプレッシャーを感じながら研究をすることができました．卒論生の 4 人，浅井君，塚原君，宮崎君，渡辺さんは短い研究期間であるにも関わらず成果を出していて考えはなるべく早く行動に移す，という鉄則を改めて実感できました．

最後に，こうして大学院まで学生生活を送るのを支えてくれた両親に感謝します．

参考文献

- [1] A. Sumalee, K. Uchida and W. H. K. Lam :Stochastic Multi-modal Transport Network under Demand Uncertainties and Adverse Weather Condition, *Transportation Research Part C*, Vol. 19, No. 2, pp. 338–350, 2011.
- [2] D. A. Hensher :Stated Preference Analysis of Travel Choices :the State of Practice. *Transportation*, Vol. 21, No. 2, pp. 107–133, 1994.
- [3] D. Helbing, B. Tilch :Generalized Force Model of Traffic Dynamics, *the American Physical Society*, Vol. 58, No. 1, pp. 133–138, 1998.
- [4] D. McFadden :Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior, in P Zarembka(ed), *Frontiers in Econometrics*, Academic Press, 1974.
- [5] E. S. Park, L. R. Rilett and C. H. Spiegelman :A Markov Chain Monte Carlo-Based Origin Destination Matrix Estimator That is Robust to Imperfect Intelligent Transportation Systems Data, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 12, No. 3, pp. 139–155, 2008.
- [6] Global Positioning Systems for Personal Travel Surveys :Lexington Area Travel Data Collection Test FINAL REPORT, Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation, 1997.
- [7] H. Fujii, T. Sakurai and S. Yoshimura :Virtual Social Experiment of Tram Railway Extension Using Multi-Agent-Based Traffic Simulator, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol. 15, No. 2, pp. 226–232, 2011.
- [8] J. G. Wardrop, and J. I. Whitehead :Correspondence Some Theoretical Aspect of Road Traffic Research, *ICE Proceedings: Engineering Divisions*, Vol. 1, No.

- 5, pp. 767–768, 1952.
- [9] J. J. Louviere :Conjoint Analysis Modelling of Stated Preferences: a Review of Theory, Methods, Recent Developments and External Validity, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 22, No. 1, pp. 93–119, 1988.
- [10] K. Ashok :Alternative Approach for Real-Time Estimation and Prediction of Time-Dependent Origin-Destination Flows, *Transportation Science*, Vol. 34, No. 1, pp. 21–36, 2000.
- [11] K. G. Goulias :Activity Based Travel Demand Model Feasibility Study Final Report, Travel Model Improvement Program, 2007.
- [12] L. Yan, S. Yang and G. Fu :Travel Demand Model for Beijing 2008 Olympic Games, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 136, No. 6, pp. 537–544, 2010.
- [13] S. Lee, B. Heydecker, Y. H. Kim and E-Y. Shon :Dynamic OD Estimation Using Three Phase Traffic Flow Theory, *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 45, No. 2, pp. 143–158, 2011.
- [14] S. Russell, P. Norvig 著, 古川靖一監訳 :「エージェントアプローチ 人工知能」, 共立出版, 1997.
- [15] S. Yoshimura :MATES: Multi-Agent Based Traffic and Environment Simulator-Theory, Implementation and Practical Application, *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, Vol. 11, No. 1, pp. 17–25, 2006.
- [16] T. Adler and M. Ben-Akiva :A Theoretical and Empirical Model of Trip Chaining Behavior, *Transportation Research B*, Vol. 13, No. 3, pp. 243–257, 1979.
- [17] T. Hägerstrand :What about people in regional science?, Papers of the Regional Science Association, 24, pp. 7–21, 1970.
- [18] T. J. Frater :Forecasting Distribution of Interzonal Vehicular Trip by Successive Approximations, *Highway Research Board Proceedings*, Vol. 33, pp. 376–385, 1954.
- [19] Z. Zhou, A. Chen and S. Bekhor :C-logit Stochastic User Equilibrium Model: Formulations and Solution Algorithm, *Transportmetrica*, Vol. 8, No. 1, pp.

- 17–41, 2012.
- [20] 飯田祐三, 岩辺路由, 菊池輝, 北村隆一, 佐々木邦明, 白水靖郎, 中川大, 波床正敏, 藤井聡, 森川高行, 山本俊行 : マイクロシミュレーションアプローチによる都市交通計画のための交通需要予測システムの提案, 土木計画学研究・論文集, Vol. 17, pp. 841–848, 2000.
- [21] 大内東, 山本雅人, 川村秀憲共著 : 「マルチエージェントシステムの基礎と応用—複雑系工学の計算パラダイム—」, コロナ社, 2002.
- [22] 岡田良之, 三輪富生, 森川高行 : 確率的利用者均衡配分モデルにおける分散パラメータに関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 22, No. 3, pp. 523–530, 2005.
- [23] 金沢市ホームページ, 公共交通利用促進協定,
<http://www4.city.kanazawa.lg.jp/11031/taisaku/trigger/100en.html>
- [24] 金森亮, 森川高行, 山本俊行, 三輪富生 : 総合交通戦略の策定に向けた総合型交通需要予測モデルの開発, 土木学会論文集 D, Vol. 65, No. 4, pp. 503–518, 2009.
- [25] 国土交通省 : 第 1 回交通の諸問題に関する検討会について 資料 1-3-2 交通の概況, <http://www.mlit.go.jp/common/000166169.pdf>, 2011.
- [26] 国土交通省 : 地域の自立的発展のためのモビリティ確保に向けた検討の手引き, http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha08/15/150327_.html, 2008.
- [27] 国土交通省 : 鉄道輸送統計調査 鉄道輸送統計調査 年報,
<http://www.mlit.go.jp/k-toukei/tetsuyu/tetsuyu.html>
- [28] 国土交通省 : 統計情報自動車関係情報・データ No. 2 バス事業者数,
http://www.mlit.go.jp/statistics/details/jidosha_list.html
- [29] 国土交通省道路局都市地域整備局 : 費用便益分析マニュアル,
http://www.mlit.go.jp/road/ir/hyouka/plcy/kijun/bin-ekiH20_11.pdf
- [30] 社団法人交通工学研究会 : 「やさしい交通シミュレーション」, 丸善, 2000.
- [31] 東京都市圏交通計画協議会 : 東京都市圏パーソントリップ調査 PT データ利用の手引き, 2012.
- [32] 東京都市圏交通計画協議会 : データの提供,
<http://www.tokyo-pt.jp/data/index.html>
- [33] 土木学会 : 「非集計行動モデルの理論と実際」, 丸善, 1995.

- [34] 藤井秀樹, 仲間豊, 吉村忍 :知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES の開発: 第二報:歩行者エージェントの実装と歩車相互作用の理論・実測値との比較, シミュレーション, Vol. 25, No. 4, pp. 274–280, 2006.
- [35] 巻上安爾, 井上矩之, 三星昭宏 :「交通工学」, 理工図書, 1990.
- [36] 溝上彰志, 梶原康至, 円山琢也 :バストリガー制導入のための需要予測モデルと契約成立条件, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol. 68, No. 5, pp. 589–597, 2012.
- [37] 森川高行, 永松良崇, 三古展弘 :新交通システム需要予測の事後評価—ピーチライナーを例として—, 運輸政策研究, Vol. 7, No. 2, pp. 20–29, 2004.
- [38] 読売新聞, YOMIURI ONLINE,
<http://www.yomiuri.co.jp/national/kaimono/kaimono090627.htm>
- [39] 吉村忍, 西川紘史, 守安智 :知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES の開発, シミュレーション, Vol. 23, No. 3, pp. 228–237, 2004.