



交通需要の変動を考慮した観測交通量に基づく
OD交通量の推定手法に関する研究

1998年1月

松本 幸正

論文要旨

交通計画の対象地域を幾つかのゾーンに分割した際の起点から終点までのトリップの量を表すものがOD(Origin-Destination)交通量であり、通常縦方向に起点を、横方向に終点を配置した表の形で表される。このOD交通量は、長期交通計画はもとより短期的な交通計画および交通制御や交通管制といった交通運用計画にとって最も重要かつ基本的な情報である。

従来より長期交通計画に必要となるOD交通量は、通勤・通学トリップを主体とした日常的な交通を対象とし、交通需要の定常性を仮定した1日単位での扱いの中、4段階推定法を用いて予測されてきており、主にパーソントリップ調査によって得られた交通資料をもとにしてOD交通量の予測が行われている。したがってこれらOD交通量は、長期間の調査サイクルやサンプリング率の面、費用および時間消費の面から見ても、大都市圏における将来交通網策定のための利用に適したものであると言える。

一方、道路交通ネットワークの現状を鑑みると、交通渋滞、交通事故、そして交通公害といった様々な問題が顕在化してきている。さらに交通情報の提供や経路誘導などを用いて、より快適に道路を利用したいといった要望も聞かれるようになってきている。このような道路交通ネットワークを取り巻く様々な環境に対応するためには、長期交通計画で対象としていた交通現象の定常性を仮定した交通需要に基づいた交通運用では十分であるとは言えず、交通需要の日変動や時間変動などに対応した交通運用が不可欠であり、そのためには交通需要の変動を直接的に反映したOD交通量の把握が最も重要となってくる。そのような中、道路ネットワーク上において交通流動を直接観測するための車両感知器やAVI装置などの設置拡充がはかられ、道路ネットワーク上の交通状況に関する情報の収集が容易になってきており、これら交通観測資料を用いた交通運用の実施が望まれている。

そこで本研究では、道路ネットワーク上で観測されるスクリーンラインの断面交通量、リンク交通量および所要時間などの交通観測値を用いて、定常的な日常交通状況下以外の交通状況下における、交通需要の変動を考慮したOD交通量の推定手法の開発を主眼に研究を進める。以下、本研究で対象とするOD交通量の必要性と推定手法の概略について順に述べる。

観光・リゾート地域など平日よりも休日における交通需要の方が重要となる地域においては、休日OD交通量の把握は欠かすことができない。第2章においては、従来より整備の進んでいる平日OD交通量のデータを有効に活用し、休日交通に関する最小限の情報を用いて休日OD交通量を推定するための手法を開発する。休日交通に関する情報としては、入手しやすい休日におけるスクリーンライン断面交通量の値を用い、休日OD交通量の推定手法を残差平方和最小化手法および同時生起確率最大化手法によって定式化し、これら両手法を京阪神都市圏地域において実際に適用し、提案する手法の妥当性を検証する。

日単位の変動からさらに短い時間単位への変動へと視点を移した場合、1日内の朝・夕のピーク時間帯に交通渋滞といった問題が引き起こされていることがわかる。この短い時間間隔における交通需要の変動は、これまでの交通需要の定常性を仮定した1日単位での交通需要推定手法では

捉えることができない。そこで第3章において、時間帯別のOD交通量を推定するための手法を提案する。この手法の主眼は、これまでに整備されている日単位のOD交通量や日単位のOD間旅行時間の情報を有効に活用し、交通量の時間変動に関する最小限の情報をもとに時間帯別OD交通量を精度良く推定することである。OD交通量の時間変動に関する情報は時間帯別スクリーンライン断面交通量のデータとし、残差平方和最小化および同時生起確率最大化手法を用いて時間帯別OD交通量を推定するための手法をそれぞれ展開する。これら両手法を、豊田市周辺地域において実際に適用計算を行い、妥当な推定値が得られることを示す。

ところで、所要時間情報、渋滞情報といった道路交通情報の提供や経路誘導といったきめの細かな交通運用には、交通需要を時間軸上で捉え、かつ交通現象を動的な枠組みで扱う必要がある。そこで第4章においては、より短い時間間隔における交通需要の時間変動に着目したOD交通量の推定手法を提案する。この手法においては、これまでとは異なり交通現象を動的に扱う。対象とするネットワークは、単独の信号交差点、高速道路のジャンクション、高速道路部分区間および信号交差点が直列に配置された一般街路部分ネットワークなどの各OD間に存在する経路が一つに限定されるようなネットワークとし、ネットワークの流入交通量および流出交通量の観測値を用いて動的OD交通量を推定する。推定問題は各OD間の旅行時間が同一で一定の場合と、各OD間で旅行時間が異なりかつ時間変動する場合のそれぞれの場合において定式化し、それら両手法をシミュレーションデータを用いて検証する。

第5章においては、各OD間に複数の経路が存在するようなネットワークを対象とした、動的OD交通量の推定手法について述べる。この場合には第4章における推定手法とは異なり、リンク交通量の観測値が必要となる。リンク交通量観測値にはドライバーの経路選択行動が反映されており、この情報と仮定するドライバーの経路選択行動から各OD間の交通量を推定することになる。本章ではドライバーの経路選択行動に確率配分原理を仮定した場合と、利用者均衡原理を仮定した場合の2つの場合についてそれぞれ考え、これら両モデルをシミュレーションデータを用いて検証する。

これまでに提案される動的なOD交通量を用いた具体的な交通運用例として、第6章において、都市高速道路の動的ランプ制御手法について述べる。この動的ランプ制御手法はLP問題として定式化される。LP問題としての制約条件の中で最も重要となる本線上の区間交通量が交通容量以下であるという制約に関しては、交通流の時間的な分布および空間的な分布を考慮するために、動的OD交通量の推定値から得られるOD間推移確率を用いた制約条件を構築する。その他にオンランプ部における流入待ち車両の上限値に関する制約や最大可能流入交通量、非制御時流入交通量などの制約条件を設ける。続いて交通現象のあいまいさを考慮可能なように、本線上交通容量および流入待ち台数の上限値に関する制約条件値をファジィ数として与えたファジィLP問題として動的ランプ制御手法を定式化し、これら両制御手法を阪神高速道路に応用し、本線区間上の渋滞の発生を効果的に防ぐことができることを明らかにする。

目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景と目的	1
1.2	交通計画におけるOD交通量の位置付けとOD交通量推定研究の概要	2
1.3	本研究の概要	5
	参考文献	8
第2章	断面交通量に基づく休日OD交通量の推定	11
2.1	概説	11
2.2	休日OD交通量と平日OD交通量の関係	12
2.3	休日OD交通量の推定モデルの定式化	14
2.3.1	残差平方和最小化手法によるモデルの定式化	14
2.3.2	同時生起確率最大化手法によるモデルの定式化	16
2.4	適用事例	19
2.4.1	残差平方和最小化モデルの適用結果	22
2.4.2	同時生起確率最大化モデルの適用結果	28
2.4.3	両モデルによる適用結果の比較	32
2.5	まとめ	34
	参考文献	38
第3章	断面交通量に基づく時間帯別OD交通量の推定	39
3.1	概説	39
3.2	スクリーンライン断面交通量の時間比率の算出	40
3.3	残差平方和最小化手法によるモデルの定式化	41
3.3.1	基本モデルの定式化	41
3.3.2	横断方向を考慮したモデルの定式化	43
3.4	同時生起確率最大化手法によるモデルの定式化	44
3.4.1	モデルの定式化	44
3.4.2	計算手順	47
3.5	適用事例	48
3.5.1	残差平方和最小化モデルの適用結果	50
3.5.2	同時生起確率最大化モデルの適用結果	57
3.5.3	残差平方和最小化モデルと同時生起確率最大化モデルの推定結果の比較	58
3.6	まとめ	61
	参考文献	63

第4章	流出入交通量観測値に基づく単一経路ネットワーク上における動的OD交通量の推定	65
4.1	概説	65
4.2	単一経路ネットワーク上における動的OD交通量の推定問題の定式化	66
4.2.1	流入交通量と流出交通量間の動的関係	66
4.2.2	動的OD交通量の推定問題の定式化	69
4.3	問題の解法	70
4.3.1	旅行時間が同一で一定の場合の解法	70
4.3.2	旅行時間が異なる場合の解法	73
4.3.3	不等式制約条件に対するラグランジェ乗数の求め方	75
4.3.4	推定アルゴリズム	77
4.4	適用事例	79
4.4.1	旅行時間が一定値の場合の適用結果	79
4.4.2	旅行時間が時間変動する場合の適用結果	80
4.5	まとめ	86
	参考文献	89
第5章	リンク交通量観測値に基づく多経路ネットワーク上における動的OD交通量の推定	91
5.1	概説	91
5.2	多経路ネットワーク上における交通量観測値間の動的関係	92
5.2.1	流入交通量とリンク交通量の動的関係の定式化	92
5.2.2	流入交通量と流出交通量の動的関係の定式化	95
5.3	動的OD交通量の推定問題の定式化	96
5.3.1	確率配分原理に基づく動的OD交通量の推定問題の定式化	97
5.3.2	利用者均衡原理に基づくOD交通量の推定問題の定式化	98
5.4	問題の解法	101
5.4.1	上位問題の解法	102
5.4.2	ラグランジェ乗数の更新	104
5.4.3	動的OD交通量の推定アルゴリズム	105
5.5	適用事例	107
5.5.1	シミュレーションによるデータの作成	108
5.5.2	確率配分原理に基づくモデルの適用結果	111
5.5.3	利用者均衡原理に基づくモデルの適用結果	113
5.6	まとめ	119
	参考文献	122
第6章	OD交通量の時間変動を考慮した都市高速道路の動的ランプ制御	125
6.1	概説	125

6.2	ランプ制御の基本モデルの定式化	126
6.2.1	目的関数	127
6.2.2	制約条件	128
6.2.3	LP問題	130
6.3	ファジィ線形計画法を用いたランプ制御手法の定式化	130
6.3.1	ファジィLP問題	131
6.3.2	メンバーシップ関数と問題の変換	131
6.4	応用事例	133
6.4.1	基本LPモデルの応用例	134
6.4.2	ファジィLPモデルの応用例	137
6.4.3	基本LPモデルとファジィLPモデルの応用例の比較	140
6.5	まとめ	141
	参考文献	143
第7章	結論	145
	謝辞	149

第1章 序論

1.1 本研究の背景と目的

道路交通ネットワークは、直接的、間接的に人々の生活および社会経済活動を支えており、より一層の進歩・発展を目指して整備・拡充が進められてきた。同時に、戦後我が国の経済力の向上はめざましく、本格的な車社会の到来とともに、自家用車の保有台数が一世帯に2台の時代へと突入しつつある。このような車社会では直接的には人々の行動圏が拡大し、交通行動の誘発を促し、また間接的には自動車産業およびそれに付随する産業の発展により、経済力の向上をもたらしてきたが、その反面、現在様々な問題が引き起こされてきている。これら問題を本研究で対象とする道路交通に限って見てみると、年間交通死者数一万人を越す交通事故、幹線道路周辺地域における交通騒音や交通振動、近年特に大きな社会問題となってきた自動車排気ガスによる大気汚染、さらに慢性的な渋滞による人々の精神的負荷、エネルギーの浪費および経済的損失などが挙げられる。これら諸問題の発生と同時に、経済的発展を遂げた我が国においては人々の価値観は物質的豊かさから精神的豊かさへと移行し、長期休暇や学校週休二日制に見られるような休日制度の変化により余暇活動を重視するといったライフスタイルの変化も進行中である。一方で、先進諸国有数の本格的な高齢社会の進行とともに高齢ドライバーも急増し、新たな社会問題を提起している。このような社会情勢が変化していく中、道路交通ネットワークに対する要望も、これまでの量的な拡充を望む声から質的な向上を望む声へと変化してきていると言える。

現在の道路交通ネットワークの抱える問題を解決するため、あるいは人々の様々な要望に応えるためには、今後ともに道路交通ネットワークの整備・拡充は我が国における重要な国土政策の一つであろう。しかしながら国土に限られ、また財政再建が進められている我が国の現状においては、より一層の道路交通ネットワークの整備・拡充は困難であると考えられる。したがって、これまで築き上げてきた道路交通ネットワークを有効に活用し、合理的に運用していくための方策の検討が欠かせない。特に近年の情報化社会に即して、ITS(我が国では高度道路交通システム)¹⁾の早期実現が望まれている。

ところで道路交通ネットワークの高度有効利用を促進し、円滑な交通流を確保するための交通運用には道路交通ネットワーク上における車両の動きを的確に捉える能力が必要となる。OD(Origin-Destination)交通量は、対象地域をゾーニングした際の発生ゾーンから集中ゾーンまでのトリップの量を表すもので、道路交通ネットワーク上における交通流動を表す基本的かつ最も重要な情報である。このOD交通量は、信号交差点や都市高速道路などにおいては流入地点と流出地点間のトリップの量を表すことになり、交通制御を遂行するために欠かすことのできない情報でもある。したがって交通需要の変動を反映したOD交通量の把握が、道路交通ネットワーク上における諸問題を解決するための様々な方策にとって不可欠であると言える。

都市圏における人々の交通流動を捉えることを目的に、従来よりパーソントリップ調査が行わ

れてきており、この調査結果から OD 交通量が得られ、これを基に総合都市交通計画が行われている。このパーソントリップ調査は、将来の交通網の計画や評価を行うことを目的としたアンケートを主体としたサンプリング調査であり、現在の道路ネットワーク上で発生している諸問題を解決するための基礎データを得るためには、そのサンプリング率から精度面で問題となる。一方近年その設置拡充がはかられてきた車両感知器は、道路ネットワーク上のリンクにおける交通現況を観測し、交通量、速度およびオキュパンシーなどの値を提供している。この車両感知器は道路ネットワーク上の交通需要の変動を直接的に捉えており、これら情報を有効に活用して、交通需要の変動を反映した OD 交通量を把握するための手法の開発が期待されている。

交通渋滞、交通事故および大気汚染などの道路ネットワークが抱えている問題を解決するためには、交通需要の変動を反映した合理的な交通計画、交通運用計画が不可欠であり、そのためには基礎となる交通需要の変動を考慮した OD 交通量を捉える必要があることをこれまでに述べてきた。また ITS をはじめとする道路ネットワークの高度有効利用を推進するためにも OD 交通量の把握は欠かせない。このような背景のもと、本研究では交通需要の変動を直接的に捉える車両感知器などから得られる交通観測値のデータを用いて、交通需要の変動を考慮した OD 交通量を推定するための手法の開発を目指す。

1.2 交通計画における OD 交通量の位置付けと OD 交通量推定研究の概要

交通計画を行う際に交通需要の把握は不可欠であるが、この交通需要の取り扱いはその利用目的から大きく二つに分類できる。一つは交通網策定をその主な目的とした長期交通計画に必要である将来の交通需要であり、通常1日を単位とした静的な枠組みの中で取り扱われる。もう一つは交通制御、交通管理を主な目的とした交通運用計画に必要である現状の交通需要であり、交通需要の日変動や時間変動などを反映した動的な枠組みの中で取り扱われる。以下、この静的な枠組みおよび動的な枠組みにおける視点から見た OD 交通量の交通計画における位置付けおよび観測交通量を用いた OD 交通量推定研究の概要について述べる。

静的な1日単位の交通需要の予測は、従来より主に4段階推定法^{2),3)}を用いて行われている。この4段階推定法は、第1段階で生成交通量および発生集中交通量、第2段階で OD(分布)交通量、第3段階で機関別分担交通量、第4段階で配分交通量を順を追って段階的に予測していく方法である。この4段階推定法の各段階における予測交通量のうちで最も重要な位置を占めるものが発生ゾーンから集中ゾーンまでのトリップの量を表す OD 交通量である。通常 OD 交通量は行方向で発生ゾーンを、列方向で集中ゾーンを表した表形式で与えられることが多く、これを OD 表と呼ぶ。この OD 表が正確に把握できれば、その集中ゾーンでの和が発生交通量となり、逆に発生ゾーンでの和が集中交通量となり、全 OD 交通量の総計が生成交通量となる。また自動車 OD 調査のように OD 交通量を交通機関別に捉えることが可能であれば、全交通機関の集計されたトリップを交通機関別に割り振る必要も無くなり、4段階推定法における第1段階、第3段階の省略が可能となる。

交通需要の予測を本研究の対象である道路ネットワーク上における自動車交通に限定して見てみると、自動車交通需要を予測するために基礎となる調査データは、自動車 OD 調査、パーソントリップ調査、物資流動調査の3つが挙げられる。これら3つの調査はアンケート形式のサンプリング

リング調査を主体とした大規模な調査であり、自動車OD調査は5年ごと、その他2つの調査は10年ごとに行われており、自動車交通需要の予測には欠かすことのできない資料となっている。これら調査データをもとに現状の自動車OD交通量を分析し、その分析結果から将来の自動車OD交通量を予測し、最終的にはこの予測されたOD交通量をある経路選択規範のもとに道路交通ネットワーク上へ割り振ることにより、将来の道路交通網の計画や評価に用いるための基礎データを得ることになる。しかしながらこれら調査は非常に大規模であり、調査費用も莫大でかつデータを処理するための時間の浪費も著しい。さらにこれら調査から得られる交通需要は、平日の定常的なある1日の交通需要に基づいたものであり、1日のうちの交通需要の時間変動やあるいは曜日の異なる交通需要の日変動などを捉えることは難しい。

このような背景のもと、上記調査データ等により整備された既存の交通資料を有効に活用し、また入手しやすい交通量観測値のデータを用いて、1日単位の静的なOD交通量を直接推定するための手法が提案された。これら推定手法は、道路交通ネットワーク上におけるドライバーの経路選択行動に対する仮定の違いから大きく二つに分けられる。一つは道路混雑の影響を考慮しないflow-independentな手法であり、これら手法の詳細なレビューは飯田、高山⁴⁾、高山⁵⁾、Cascetta and Nguyen⁶⁾らによって得られる。これら手法では、OD間の経路選択率をDial⁷⁾の確率配分アルゴリズムなどによって外生的に与え、エントロピー最大化手法、残差平方和最小化手法あるいは最尤推定法などにより観測交通量に一致するようなOD交通量を求めるものである。もう一つは道路混雑の影響を考慮したflow-dependentな手法であり、OD交通量の推定問題をネットワーク均衡問題とともに構築し、経路選択率はOD交通量の推定過程で内生的に求めるという方法である。

利用者均衡条件下におけるリンク交通量に基づくOD交通量の推定問題は、Nguyen⁸⁾により定式化された。このNguyenの方法では唯一のOD交通量を得るためにはターゲットOD情報が必要であり、ターゲットOD交通量と推定OD交通量の残差平方和を最小にする手法^{8),9),10),11),12)}やエントロピーを最大にする手法^{8),13),14),15)}が提案された。LeBlanc and Farhangian⁹⁾はこれらの問題を部分ラグランジェ法を用いて解く方法を提案し、Nguyen⁸⁾、Hall *et al.*¹³⁾、Fisk¹⁴⁾、楊ら¹¹⁾、Yang *et al.*¹²⁾は2レベル問題を繰り返し解く方法を提案している。また楊、佐佐木¹⁶⁾、Yang, Iida and Sasaki¹⁷⁾は、Nguyenの問題をシングル凸計画問題に変換し、より簡便に解く方法を提案した。

このように、既存のOD交通量に関する情報を有効に活用し、かつ現在の道路交通ネットワーク上で観測されている交通量の値を用いて現在のOD交通量を推定するための手法の開発が進められており、これら手法の実用化が進めば安価にかつ迅速にOD交通量の推定値が得られることになり、またその値に基づいて将来のOD交通量も予測できることから、道路交通網の将来計画にも役立てることが可能となる。

しかしながら上記手法はすべて平日における通常の1日単位のOD交通量を対象とした静的枠組みに立脚した推定手法であり、平日OD交通量とはその構造自体が異なると考えられる休日OD交通量の推定や、日単位のODトリップとは構造が異なる1時間単位といった短い時間間隔におけるOD交通量の推定への適用は不可能であると考えられる。そこで本研究ではODトリップの構造の差異を考慮した休日OD交通量の推定手法および時間帯別のOD交通量の推定手法を提案する。これら手法は上記における静的なOD交通量の推定手法と同様な考え方に立脚した手法であるが、

観測交通量としてリンク交通量の値を用いるのではなく、スクリーンラインの断面交通量の値を用いる。スクリーンライン断面交通量の値を用いてOD表を修正する方法を井上¹⁸⁾が提案したが、この手法においてはODトリップの構造の変化を考慮していないことから、休日OD交通への適用や時間帯別OD交通への適用には限界があると言える。

ところで、一般街路における信号制御や都市高速道路におけるランプ制御といった交通運用方は、既存の道路交通ネットワークの有効利用を促進し、交通混雑を緩和するのに役立っているが、これら交通運用は交通需要の時間変動を反映して実施される方がその効果は大きくなると考えられる。このような交通需要の時間変動を反映した交通運用に欠かせないOD交通量は、これまで述べた静的なOD交通量とは異なり、時間軸という新たな次元を加えた枠組みでの扱いが不可欠であり、動的なOD交通量を推定するための方法の実用化が期待されている。

交通量観測値は道路交通ネットワーク上の交通需要の変動を直接的に反映することから、この交通量観測値の時系列データを有効に活用して動的なOD交通量を推定する手法が、Cremer and Keller^{19),20)}らによって提案された。その後単一の交差点などを対象としたODマトリックスの推定法としてCremer and Keller²¹⁾やNihan and Davis²²⁾は再帰的推定法とカルマンフィルタ法を用いた手法を示し、また楊、秋山、佐々木²³⁾はニューラルネットワークを適用した手法を提案した。しかしながらこれらの手法では、OD間の旅行時間は推定時間間隔に比べ無視できるほど小さいか、あるいは各ODペア間でほぼ等しくかつ一定値であると仮定しており、個々の交差点あるいは非常に小さなネットワークでしか本質的には適用できない。

現実的な都市ネットワークにおいて動的OD交通量を推定する問題は、時間変動するOD交通量とリンク交通量との動的な関係を経路選択行動を介して設定する必要があることから、非常に複雑になる。その一方で、単路線の高速道路の各ランプ間のOD交通量やジャンクションなどの方向別交通量の推定問題は起終点間の経路選択を考える必要が無く、また各起点からネットワークへ流入する交通量と各終点でネットワークから流出する交通量の観測値が入手可能であるため比較的扱いやすくなる。Bell²⁴⁾は各時間インターバルにおける旅行時間の分布が幾つかの時間インターバルにまたがる場合の動的OD推定手法を提案した。またChang and Wu²⁵⁾は高速道路回廊において、流出入交通量及び本線上の区間交通量の観測値と時間変動するOD交通量との動的な関係を定式化し、拡張カルマンフィルタ法に基づくパラメータの推定手法を示し、Sherali, Arora and Hobeika²⁶⁾は各ODペア間で旅行時間が異なる場合のOD交通量の推定問題を制約条件付き残差平方和最小化問題及び制約条件付き最小ノルム問題として定式化を行い、それぞれ射影共役勾配法及び線形計画法を用いたアルゴリズムを提案している。このように、動的OD交通量を推定するためには、時間変動するOD交通量と交通量観測値との関係を捉えるための動的な関係式の設定は不可欠であり、その関係式においては観測交通量間相互の関係を交通量の関数とし、またネットワークを横断する各ODペア間の旅行時間は交通量従属もしくは時間従属として扱われるべきである。そこで本研究では、時間変動するOD交通量と交通量観測値との動的な関係を詳細に記述し、旅行時間が一定で同一の場合およびOD間の旅行時間が異なりかつ時間変動をする場合の2つの場合において動的OD交通量を推定するための手法を提案する。

以上のOD交通量の動的推定手法では、いずれもOD間に複数の経路が存在するような場合へ

の適用は不可能となっており、対象となるネットワークは限定されることになる。OD間に複数経路が存在するネットワークにおける動的OD交通量の推定手法として、Chang and Tao²⁷⁾は流入交通量及びコードラインの観測データを利用した推定手法を提案しているが、この手法においては経路を明示的に扱っておらず、基本的にはOD間の経路選択行動を考慮しないモデルと同様であると言える。OD間の経路選択行動を明示的に考慮した動的なOD交通量の推定手法として、安井、池之上、竹内²⁸⁾、小根山、桑原²⁹⁾はOD間の経路選択モデルに確率配分モデルを適用したOD交通量の推定手法を提案した。同様に本研究においても、複数経路が存在するネットワークにおける動的OD交通量の推定手法を提案するが、OD間推移確率に関する不等式制約条件を明示的に推定問題に導入している点および利用者均衡原理を推定問題に組み込んだ点等が特徴的となっている。

これまで述べてきたように、その利用目的を問わずOD交通量というものは交通計画、交通運用計画にとって最も重要な情報であり、OD交通量を静的な場合および動的な場合のそれぞれにおいて安価にかつ迅速に精度良く推定可能な手法の開発が期待されている。

1.3 本研究の概要

本論文は第1章序論および第7章結論を含めて全7章で構成されるが、用いる観測交通量の違いおよびOD交通量を扱う時間軸に関する枠組みの違いからその内容は大きく二つに分けられる。すなわち、対象地域のスクリーンライン断面交通量に基づいてOD交通量を推定するための手法を第2章および第3章において展開する。これらのOD交通量は、基本的には交通現象の定常性を仮定した静的な枠組みの中で扱われる。続いて対象ネットワークの流出入交通量およびリンク交通量の観測値に基づいて動的なOD交通量を推定するための手法を第4章および第5章において展開し、この動的OD交通量を用いた具体的な交通運用の一例として、都市高速道路における動的ランプ制御手法について第6章において述べる。これら本論文後半部分で扱うOD交通量は、交通現象の時間変動を考慮した動的な枠組みの中での扱いとなる。以下、各章における研究の内容を順を追って説明する。

第2章では、対象地域のスクリーンライン断面交通量の休日における観測値を用いて、休日OD交通量を推定するための手法を提案する。経済的發展、ライフスタイルの変化および価値観の変化から、休日交通計画の必要性はますます高まってきているが、従来より休日交通計画に不可欠である休日交通関連資料はほとんど整備されてきていないのが現状である。そこで本章では、これまで整備されてきた平日交通関連資料を有効に活用し、さらにできるだけ最小限の入手しやすい休日に関する情報を用いて休日OD交通量を推定するための手法を開発する。すなわち、休日交通に関する情報として休日におけるスクリーンライン断面交通量の値を用いる。休日OD交通量の推定手法は2つの方法論により展開される。一つは、休日OD交通量を表すモデルにより得られるスクリーンライン断面交通量と観測休日スクリーンライン断面交通量との残差平方和が最小になるように休日OD交通量を表すモデルのパラメータを求める方法で、一つは観測休日スクリーンライン断面交通量と一致する断面交通量を生じるODパターンのうちで、同時生起確率が最大となるODパターンを休日ODパターンの推定値とする方法である。本章では、これら両方法論に

より休日 OD 交通量の推定手法を展開するとともに、実際に京阪神都市圏地域において適用計算を行い、推定手法の検証を行う。

第3章では、スクリーンライン断面交通量の時間帯別観測値を用いて、時間帯別 OD 交通量を推定するための手法を提案する。従来より交通需要推定は1日を単位として行われてきたが、朝・夕のピーク時間帯における慢性的な交通渋滞などを1日単位での交通需要推定手法を用いて表現するには限界があり、交通需要の時間変動を、少なくとも1時間程度の間隔で捉えることができる交通需要推定手法の確立が望まれている。そこで本章では、これまでの1日単位における OD 交通量に基づいて、観測しやすい時間帯別のスクリーンライン断面交通量の値を用いて時間帯別 OD 交通量を推定するための手法を開発する。本章においては、交通現象に時間軸という新たな次元を導入しモデルの定式化を行っていくが、ここでの OD 交通量はその推定単位時間内においては定常的であると仮定することから、基本的には静的な枠組みからの脱却はできていないことになる。時間帯別 OD 交通量の推定手法は、第2章における休日 OD 交通量の推定手法を展開する場合と同様に2つの方法論によって展開される。一つはモデルにより与えられる時間帯別スクリーンライン断面交通量と観測時間帯別スクリーンライン断面交通量の残差平方和を最小にするように時間帯別 OD 交通量を求める方法であり、一つは観測された時間帯別スクリーンライン断面交通量と一致する断面交通量を生じる OD パターンのうちで、同時生起確率が最大になるものを時間帯別 OD 交通量の推定値とする方法であり、これら両手法を実際に愛知県豊田市周辺地域において適用計算を行い、両手法の検証を行う。

第4章では、対象道路交通ネットワークにおける流入交通量と流出交通量の値に基づいて動的 OD 交通量を推定するための手法を提案する。道路混雑を緩和し、交通流の円滑化を促進するためには時々刻々と変化する交通現象の時間変動を反映した交通運用が不可欠であるが、このようなきめの細かな交通運用を行うためには交通現象を動的に扱った交通需要推定手法の開発が必要である。そこで本章では、道路交通ネットワーク上で観測されている流出入交通量の時系列観測値に基づいて、OD 交通量の時間変動を捉えることが可能な動的 OD 交通量の推定手法の開発を目指す。本章で対象とするネットワークは、単独の信号交差点、高速道路ジャンクション、単路線の高速道路および交差点を直列に組み合わせた一般街路ネットワークなどの OD 間に存在する経路が一つに限定されるようなネットワークを対象とする。したがってこの場合には、ドライバーの経路選択行動を考慮せずに推定問題を展開することが可能となる。動的 OD 交通量の推定問題は、OD 交通量を介した流出入交通量観測値間の動的な関係から構成され、本研究ではオンラインでの適用を念頭に置き、この問題の解法を再帰的なアルゴリズムにより実現する。この提案される単一経路ネットワークにおける動的 OD 交通量の推定手法は、シミュレーションデータを用いて、OD 間の所要時間が一定で同一の場合と OD 間で異なり時間変動する場合の両方の場合において検証される。

第5章では、第4章で提案された動的 OD 交通量の推定手法においては、対象道路交通ネットワークが各 OD 間に経路が一つだけ存在する場合に限定されていたので、複数経路が OD 間に存在するようなネットワークにおいても動的 OD 交通量が推定可能な手法を提案する。OD 間に複数の経路が存在する場合には、ドライバーの経路選択行動を考慮する必要が出てくることから、推定

問題の複雑化は避けられない。本章では、ドライバーの経路選択行動に2つの経路選択原理を仮定し、それぞれの場合において動的OD交通量の推定問題を展開する。一つは確率配分原理であり、一つは利用者均衡配分原理である。ドライバーの経路選択行動に利用者均衡配分原理を仮定した場合の動的OD交通量の推定問題は、上位問題となる交通量観測値間の動的な関係式から構成される問題と下位問題となる利用者均衡配分問題の2レベル最適化問題の構造を取るが、ドライバーの経路選択行動に確率配分原理を仮定した場合の動的OD交通量の推定問題はこの上位問題と同様になる。この2レベル最適化問題を解くために本章では、ヒューリスティックな解法を採用し、オンラインでの適用が可能な再帰的なアルゴリズムを示すとともに、シミュレーションデータを用いて本推定手法の検証を行う。

第6章では、第4章および第5章において提案された動的OD交通量の推定手法により得られる推定値を用いた具体例として、都市高速道路における動的ランプ制御手法について提案する。都市高速道路における本線上の交通混雑を緩和する方策として、ランプ制御手法が現在でも広く用いられているが、交通需要の時間変動を反映したきめの細かなランプ制御は行われていない。当然のことながらそのためには、動的なOD交通量の情報が不可欠であることは言うまでもなく、本章では第4章および第5章で得られる動的OD交通量の活用を前提にした動的ランプ制御手法の開発を目指す。動的ランプ制御手法は、LP(Linear Programming)問題として定式化できることを示すが、本手法の特徴の一つは、動的OD交通量の情報を活用することによって交通流の時間的・空間的分布が考慮可能となり、したがって前の時間に流入した車両の残留も表現できることである。続いて交通容量、待ち行列などの交通現象のあいまいさを考慮するために、動的ランプ制御手法をファジィLP問題として定式化し、さらにこのファジィLP問題は通常のLP問題に変換でき、特別な解法を用いることなく解くことが可能であることを示す。これら両手法を実際に阪神高速道路のデータを用いて適用計算を行い、本線上の交通混雑緩和能力などを検証する。

最後に第7章では、以上の研究成果をとりまとめる。

参考文献

- 1) ITS アメリカ著, 財団法人道路新産業開発機構訳: ITS(高度道路交通システム)日米欧3極比較レポート PARTII, 財団法人道路新産業開発機構, 1997
- 2) 社団法人土木学会: 交通需要予測ハンドブック, 技法堂出版, 1981
- 3) 社団法人交通工学研究会: 交通工学ハンドブック, 技法堂出版, 1984
- 4) 飯田恭敬, 高山純一: リンクフローによるOD交通量推計モデル, 第18回土木計画学講習会テキスト, pp. 97-118, 1987
- 5) 高山純一: リンクフロー観測値に基づいた道路網交通需要分析モデルに関する方法論的研究, 京都大学学位論文, 1988
- 6) Cascetta, E. and Nguyen, S. : A unified framework for estimating or updating origin/destination matrices from traffic counts, *Transportation Research*, Vol. 22B, No. 6, pp. 437-455, 1988
- 7) Dial, R. B. : A probabilistic multipath traffic assignment algorithm which obviates path enumeration, *Transportation Research*, Vol. 5, No. 2, pp. 83-111, 1971
- 8) Nguyen, S. : Estimating origin-destination matrices from observed flows, *Transportation Planning Models*, Elsevier Science Publishers B. V., pp. 363-380, 1984
- 9) LeBlanc, L. J. and Farhangian, K. : Selection of a trip table which reproduces observed link flows, *Transportation Research*, Vol. 16B, No. 2, pp. 83-88, 1982
- 10) Sheffi, Y. : *Urban Transportation Networks - Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1985
- 11) 楊海, 朝倉康夫, 飯田恭敬, 佐佐木綱: 交通混雑を考慮した観測リンク交通量からのOD交通量推計モデル, 土木学会論文集, No. 440/IV-16, pp. 117-124, 1992
- 12) Yang, H., Sasaki, T., Iida, Y. and Asakura, Y. : Estimation of origin-destination matrices from link traffic counts on congested networks, *Transportation Research*, Vol. 26B, No. 6, pp. 417-434, 1992
- 13) Hall, M. D., Van, Vliet, D. and Willumsen, L. G. : SATURN - a simulation assignment model for the evaluation of traffic management schemes, *Traffic Engineering and Control*, 21, pp. 168-176, 1980
- 14) Fisk, C. S. : On combining maximum entropy trip matrix estimation with user optimal assignment, *Transportation Research*, Vol. 22B, No. 1, pp. 69-79, 1988
- 15) Fisk, C. S. : Trip matrix estimation from link traffic counts - the congested network case, *Transportation Research*, Vol. 23B, No. 5, pp. 331-336, 1989

- 16) 楊海, 佐佐木綱: ネットワーク均衡に基づく観測リンクフローからのOD交通量推計法に関する検討, 土木計画学研究・論文集, No. 9, pp. 29-36, 1991
- 17) Yang, H., Iida, Y. and Sasaki, T. : The equilibrium-based origin-destination matrix estimation problem, *Transportation Research*, Vol. 28B, No. 1, pp. 23-33, 1994
- 18) 井上博司: スクリーンライン調査によるOD調査の精度の検定およびOD表の修正法, 交通工学, Vol. 12, No. 6, pp. 11-19, 1977
- 19) Cremer, M. and Keller, H. : Dynamic identification of flows from traffic counts at complex intersections, *Proceedings of the Eighth International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, University of Toronto Press, pp. 121-142, 1981.
- 20) Cremer, M. and Keller, H. : A systems dynamics approach to the estimation of entry and exit O-D flows, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, VNS Science Press, pp. 431-450, 1984.
- 21) Cremer, M. and Keller, H. : A new class of dynamic methods for the identification of origin-destination flows, *Transportation Research*, Vol. 21B, No. 2, pp. 117-132, 1987.
- 22) Nihan, N. L. and Davis, G. A. : Recursive estimation of origin-destination matrices from input/output counts, *Transportation Research*, Vol. 21B, No. 2, pp. 149-163, 1987
- 23) 楊海, 秋山孝正, 佐佐木綱: 時系列観測交通量を用いたODフローのオンライン推計法, 交通工学, Vol. 27, No. 1, pp. 33-41, 1992
- 24) Bell, M. G. H. : The real time estimation of origin-destination flows in the presence of platoon dispersion, *Transportation Research*, Vol. 25B, Nos. 2/3, pp. 115-125, 1991
- 25) Chang, G. L. and Wu, J. : Recursive estimation of time-varying origin-destination flows from traffic counts in freeway corridors, *Transportation Research*, Vol. 28B, No. 2, pp. 141-160, 1994
- 26) Sherali, H. D., Arora, N. and Hobeika, A. G. : Parameter optimization methods for estimating dynamic origin-destination trip-tables, *Transportation Research*, Vol. 31B, No. 2, pp. 141-157, 1997
- 27) Chang, G. L. and Tao, X. : Estimation of dynamic O-D distributions for urban networks, *Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Pergamon, pp. 1-20, 1996
- 28) 安井一彦, 池之上慶一郎, 竹内秀城: ネットワークにおけるOD交通量のリアルタイム推計手法について, 土木計画学研究・講演集, No. 17, pp. 457-460, 1995
- 29) 小根山裕之, 桑原雅夫: 路側観測交通量からの時間変化するOD交通量の推定, 交通工学, Vol. 32, No. 2, pp. 5-16, 1997

第2章 断面交通量に基づく休日OD交通量の推定

2.1 概説

道路ネットワークの整備は人々の行動圏を拡大させ、また一世帯に複数台といった自家用車保有率の増大が交通行動を誘発している。さらに休日制度の変化として週休二日制や長期休暇の浸透にともない、人々の関心は物質的豊かさから精神的豊かさへと移行し、観光・レクリエーションなどの自由目的行動が増加し、国民のライフスタイルにも大きな変化が進行中である。

このような背景のもと休日交通、特に観光・リゾート地域周辺における交通計画の重要性が高まりつつあると言えるが、特に既存の観光・リゾート地域およびその周辺では、観光・レクリエーション交通などの休日交通の需要を反映した交通基盤計画がなされていない。したがって、休日のピーク時においては道路交通の渋滞が深刻化し、観光・リゾート地域としての魅力も半減し、さらに地元住民にも大きな支障をきたしているという今日的課題も指摘されるようになってきた。また近年そのような背景のもと、観光地において休日における交通需要の特性を考慮した交通流の分析^{1),2)}や道路網の整備計画を検討した事例³⁾も幾つかみられるようになってきている。

一般に観光・リゾート地域における交通の特徴として、国民の嗜好の変化、価値観の変化、景気動向の変化をより直接的に受けること、またその発生ピークが平日ではなく土、日、祝日に集中することや、季節的変動が大きいことなどが挙げられる。ところで、従来の交通計画の対象は、平日の通勤・通学を中心とした日常的な交通が主体であるため、観光・レクリエーションを中心とした非日常的な交通が主体となる休日における交通需要予測の手法については研究の蓄積も少なく、とりわけ基礎データとなる休日交通関連資料については、いまだ未整備の状態であると言える。行政機関などによる大規模な数少ない休日交通に関する調査としては、昭和45年に実施された京阪神都市圏パーソントリップ調査⁴⁾、平成3年に実施された東駿河湾都市圏パーソントリップ調査⁵⁾および5年ごとに実施されている全国道路交通情勢調査⁶⁾が挙げられるが、休日交通関連資料は依然十分な整備水準に達しているとは言い難い状況である。

そこで本章^{7),8)}では、休日交通需要の変動を反映した交通計画を行なう際に必要不可欠である休日OD交通量を、休日交通需要の変動を直接的に集計ベースで観測可能である対象地域の休日のスクリーンラインの観測調査結果を用いて推定するための方法を提案する。

本章第2節において、休日OD交通量と平日OD交通量の基本的な関係を、昭和45年度に実施された京阪神都市圏パーソントリップ調査によって集計された平日OD交通量と休日OD交通量のデータを用いて分析する。分析は、パーソントリップ調査対象地域のほぼ全域を含めた大きな14ゾーンの場合と、大阪市周辺部地域のみを対象とした小さな15ゾーンの場合の2種類のゾーニングにおいて行い、休日OD交通量と平日OD交通量の基本的な関係を簡単に分析する。第3節においては、第2節における分析結果を基に、休日OD交通量を平日OD交通量を用いて表現するいくつかのモデルを提案するとともに、スクリーンライン断面交通量から休日OD交通量を推定する

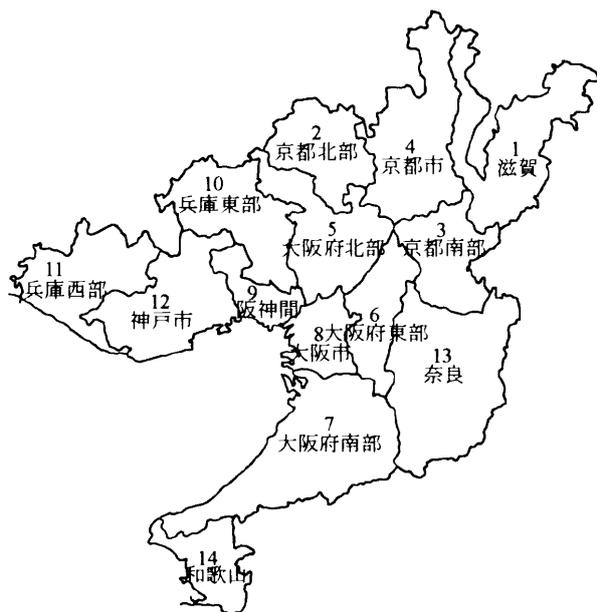


図-2.1 大ゾーンの場合のゾーニング図

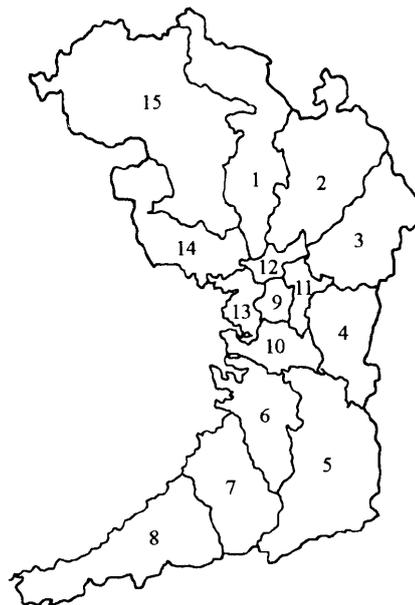


図-2.2 小ゾーンの場合のゾーニング図

ための手法を展開する．その手法は2つの方法論によって展開される．1つは、休日のスクリーンライン断面交通量とモデルによって表現される休日のスクリーンライン断面交通量との残差平方和が最小になるようなOD交通量を求める方法であり、1つは休日のスクリーンライン断面交通量と一致する断面交通量を生じるODパターンのうちで、もっとも起こりやすいODパターンを求めようとする方法である．第4節においては、提案したモデルを実際のデータを用いて適用する．適用計算に用いたデータは、先ほどと同様に京阪神都市圏パーソントリップ調査によって集計された平日および休日のOD交通量であり、大ゾーンの場合と小ゾーンの場合についてそれぞれ適用計算を行う．最後に第5節において、本章で得られた知見をまとめる．

2.2 休日 OD 交通量と平日 OD 交通量の関係

ここでは、休日 OD 交通量と平日 OD 交通量の関係を、各 OD ペア間のゾーン間距離に着目して分析し、休日 OD 交通量を平日 OD 交通量、ゾーン間距離およびその他のパラメータを用いて表すことを考える．分析の対象地域は、昭和45年度に実施された京阪神都市圏パーソントリップ調査の対象地域と同地域とし、図-2.1、図-2.2に分析の対象地域のゾーニングを示す．図-2.1は、京阪神都市圏パーソントリップ調査の対象地域のうち、滋賀県域外や近畿圏域外などの域外を除いたすべての地域を含んだ14の大ゾーンであり、図-2.2は、そのうち5大阪府北部、6大阪府東部、7大阪府南部、8大阪市、9阪神間、10兵庫東部の合計6つの大ゾーンをさらに細かくゾーニングしたものである．

ゾーン間距離のデータは、昭和60年度物資流動調査⁹⁾により得られた3桁ゾーンにおける平均トリップ長から、それぞれ対応するゾーン間における平均トリップ長を算出し直したものとした．

図-2.3は、大ゾーンにおけるゾーン間距離と実績休日 OD 交通量の関係を示してあり、図-2.4

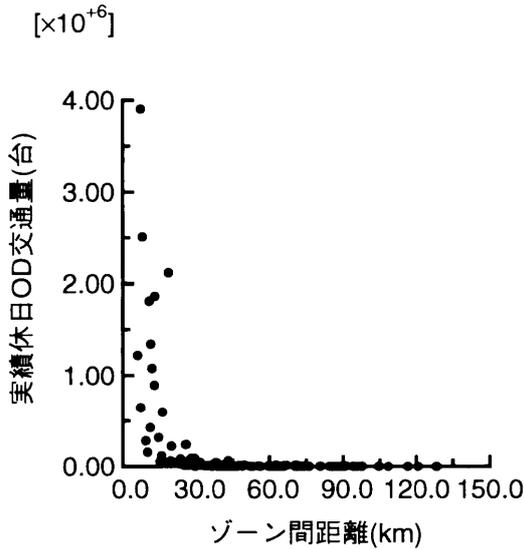


図-2.3 ゾーン間距離と休日 OD 交通量の関係(大ゾーン)

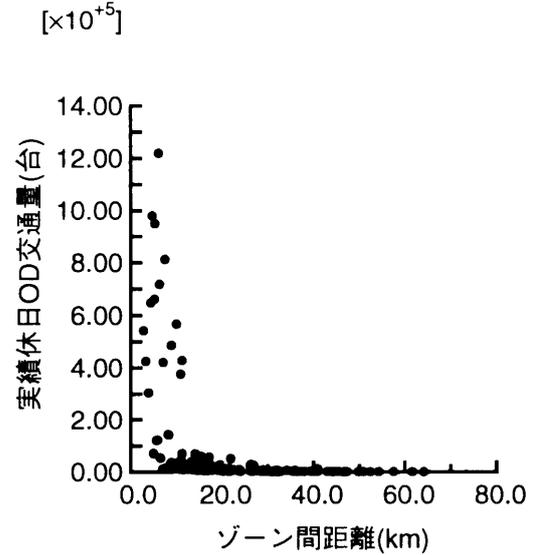


図-2.4 ゾーン間距離と休日 OD 交通量の関係(小ゾーン)

は同様に小ゾーンにおけるゾーン間距離と実績休日 OD 交通量の関係を示してある。この図から、休日 OD 交通量はゾーン間距離の指数関数で表せられることがわかる。このことは休日 OD 交通量に限らず、平日 OD 交通量に関しても同様になると思われ、OD 交通量はゾーン間距離が大きくなるほど減少すると考えられる。したがって、休日 OD 交通量は平日 OD 交通量の関数として表現できる部分と指数関数として表現できる部分の和の形として表されると考えられる。すなわちゾーン $i-j$ 間の平日 OD 交通量を a_{ij} 、ゾーン間距離を D_{ij} 、また幾つかのパラメータを用いると、休日 OD 交通量 z_{ij} は次のような形で表せられると考えられる。

$$z_{ij} = \rho a_{ij} + \omega \exp(\zeta D_{ij}) \quad i, j \in \Omega \quad (2.1)$$

ここで、 ρ 、 ω 、 ζ はパラメータであり、 Ω は OD ペアの集合を表す。

この式において、休日 OD 交通量は右辺第一項で表せられる平日 OD 交通量に関するトリップと右辺第二項で表せられる休日交通特有のトリップの和であることを意味している。つまり休日のトリップは、例えばサービス業などに多く見られる休日と平日に共通したトリップや日常的な買い物などといった平日交通と同様なトリップと、例えば観光やレクリエーションなどの休日特有のトリップから構成されていると考えることができる。

図-2.5、図-2.6 は、ゾーン間距離と休日平日比の関係をそれぞれのゾーニングにおいて示したものである。この図から休日平日比は、以下のようなゾーン間距離の指数関数で表せられると考えることができる。

$$\frac{z_{ij}}{a_{ij}} = \rho \exp(\zeta D_{ij}) \quad i, j \in \Omega \quad (2.2)$$

この関係は、休日平日比すなわち平日トリップに対する休日トリップの発生割合は、ゾーン間距離が大きいほど高いということの意味している。このことは休日のトリップほどトリップ長が

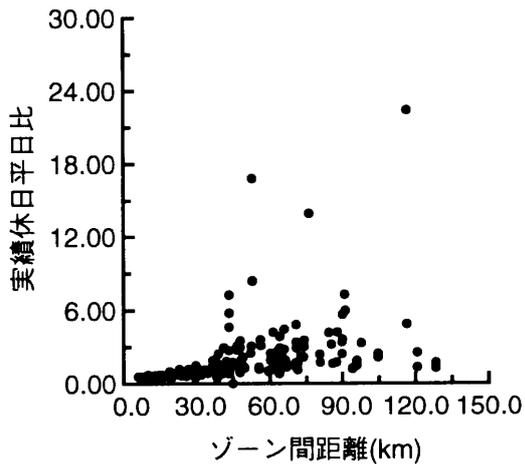


図-2.5 ゾーン間距離と休日平日比の関係
(大ゾーン)

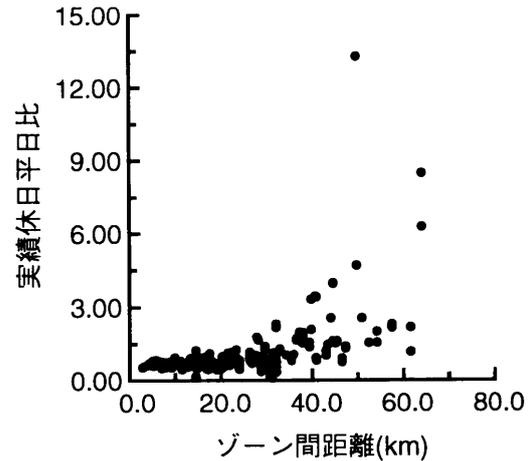


図-2.6 ゾーン間距離と休日平日比の関係
(小ゾーン)

大きいということになり、休日には観光目的などで遠出をするといった休日交通行動の特徴を明確に表していると言える。

2.3 休日OD交通量の推定モデルの定式化

本研究では、2種類の方法論による休日OD交通量の推定手法を提案する。両手法において共通する点は、対象地域において休日にスクリーンライン調査を実施して得られた休日断面交通量を休日交通に関する情報として用いることである。すなわち対象地域を二分するスクリーンラインを数本任意に設定する。その各スクリーンラインは対象地域のゾーン境界線に沿って引くものとし、次にそれらスクリーンラインと交差する道路断面において、必要とする休日の調査日に断面交通量を観測する。後述するように、実際にはスクリーンラインの断面交通量の休日と平日の比のみが与えられればよいから、スクリーンラインと交差する全ての道路断面で休日交通量を観測する必要はなく、主要な道路断面だけを選んで休日と平日の断面交通量比を観測し、その加重平均値を用いることにすれば観測箇所を減らすことができる。このようなことから実際には道路断面の観測値として、交通量常時観測調査¹⁰⁾の結果などを利用可能であるということになる。

2.3.1 残差平方和最小化手法によるモデルの定式化

本手法は、推定休日OD交通量による計算断面交通量と休日に観測された断面交通量との残差平方和が最小になるように休日OD交通量を推定する手法であり、道路交通センサスなどで集計された平日OD表と休日のスクリーンライン調査により得られた休日断面交通量および対象地域のゾーン間距離のデータを用いて休日のOD交通量を推定する。

はじめに設定するスクリーンラインに関して以下の仮定を設ける。

1. 任意に設定されたスクリーンラインによって分割された二つの地域間を通行する交通は、こ

のスクリーンラインをただ一回のみ横断する。

2. あるスクリーンラインに対して同一側に起終点を持つ交通は、そのスクリーンラインを横断しない。

いまゾーン $i-j$ 間の平日 OD 交通量を a_{ij} とし、休日 OD 交通量の真値を z_{ij} 、推定値を x_{ij} とする。また第 k 番目のスクリーンラインの休日断面交通量を s_k とし、さらにゾーン $i-j$ 間の OD 交通が第 k 番目のスクリーンラインを横切るとき $\delta_{ijk} = 1$ 、それ以外は $\delta_{ijk} = 0$ となるようなダミー変数 δ_{ijk} を定義する。ここで第 k 番目のスクリーンラインの断面交通量の休日と平日の比を F_k とし、先に示した仮定に基づくと、 F_k は

$$F_k = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \delta_{ijk} z_{ij}}{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \delta_{ijk} a_{ij}} \quad k \in K \quad (2.3)$$

と表せられる。ここで I, J はそれぞれ発ゾーンの集合、着ゾーンの集合を表し、 K は設置したスクリーンラインの集合を表す。さらにこの式 (2.3) を変形し

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \delta_{ijk} z_{ij} = F_k \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \delta_{ijk} a_{ij} = s_k \quad k \in K \quad (2.4)$$

とすると、 a_{ij} は既知であるので F_k をデータとして与える場合と s_k をデータとして与える場合は同値であることがわかる。

ここで、前節で分析した休日 OD 交通量と平日 OD 交通量の関係を基に、休日 OD 交通量を表現したモデルを次のように考える。

$$\text{model-1} \quad x_{ij} = \alpha_i \beta_j a_{ij} \quad (2.5)$$

$$\text{model-2} \quad x_{ij} = \alpha_i \beta_j a_{ij} + \omega \exp(\zeta D_{ij}) \quad (2.6)$$

$$\text{model-3} \quad x_{ij} = \alpha_i \beta_j a_{ij} \exp(\zeta D_{ij}) \quad (2.7)$$

model-1 は発生側パラメータ α_i 、集中側パラメータ β_j のみで休日の OD 交通量を表現した形であり、休日 OD 交通量は平日 OD 交通量の分布パターンに大きく依存した表現形式となっており、休日交通の構造変化を反映しにくいと思われるが比較のため用いる。

次に目的関数として式 (2.4) の残差平方和をとり、休日 OD 交通量の推定値を用いて表すと

$$Q = \sum_{k \in K} \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \delta_{ijk} x_{ij} - s_k \right)^2 \quad (2.8)$$

となり、この Q が最小となるような x_{ij} を求めれば、その x_{ij} が推定休日 OD 交通量ということになる。

式 (2.8) においては未知変数は x_{ij} であり、このままではどのスクリーンラインも横切らない OD 交通量はどのような値をとっても目的関数 Q の値には影響を与えないことになり推定不可能であるが、式 (2.5) から式 (2.7) にあるように未知変数を x_{ij} から α_i, β_j および ζ, ω に変換することによ

り、ゾーン*i*からの発生交通がいずれかのスクリーンラインを横切れば α_i は制約され、ゾーン*j*への集中交通についても同様のことが言える。また ζ, ω についてもトリップがいずれかのスクリーンラインを横切ることにより制約を受け推定されることになり、つまりどのスクリーンラインも横切らないOD交通量も、発生側パラメータ、集中側パラメータなどの導入により推定が可能になるということである。

このモデルにおいては、スクリーンラインを一本しか設けなかった場合にも、 ζ, ω を0と仮定し

$$x_{ij} = F_1 a_{ij} \quad i, j \in \Omega \quad (2.9)$$

とおけば式(2.8)より $Q = 0$ となることがわかる。つまり推定される休日OD交通量は、一律に F_1 が平日OD交通量 a_{ij} に乘じられることにより求められる。しかしながら、このようにスクリーンラインをただ一本しか設けない場合には、特別な場合として推定休日OD交通量と平日OD交通量の構造は全く同一となってしまうため、休日交通の変動を反映した休日OD交通量を推定するためには、スクリーンラインを2本以上設けなければならないことがわかる。

2.3.2 同時生起確率最大化手法によるモデルの定式化

このモデルの定式化においても先に示した残差平方和最小化手法によるモデルの定式化の際に用いたスクリーンラインに関する仮定は成立するものとし、また同じ記号は同じものを意味するものとする。

同時生起確率最大化手法によるモデルの定式化においては、各スクリーンラインでの観測休日断面交通量に一致する推定休日OD交通量のODパターンのなかで、確率的に見て最も起こりやすいODパターンを求める。なお同時生起確率最大化に基づいてODパターンを推定するという考え方は、佐佐木(1967)¹¹⁾のエントロピー法がその先駆をなす。

いま平日OD交通量のゾーン*i* - *j*に関するOD交通量を、平日OD交通量の総和で除したものをゾーン*i* - *j*間の平日OD交通の生起確率であると考え、すなわちある平日のODトリップがゾーン*i* - *j*間の平日OD交通をもつ生起確率 p_{ij} は

$$p_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} a_{ij}} \quad i, j \in \Omega \quad (2.10)$$

となる。この p_{ij} は平日OD交通量を与えられるので既知の値である。

次に推定休日OD交通量の総和を X とすると

$$X = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} \quad (2.11)$$

であり、休日のOD交通の先験確率を v_{ij} とすれば、発ゾーンおよび着ゾーンでの総和は1でなければならないことから

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} v_{ij} = 1 \quad (2.12)$$

であり、休日にある OD 表が得られる同時生起確率 \mathcal{P} は

$$\mathcal{P} = \frac{X!}{\prod_{i \in I} \prod_{j \in J} x_{ij}!} \prod_{i \in I} \prod_{j \in J} (v_{ij})^{x_{ij}} \quad (2.13)$$

で定義される。この同時生起確率 \mathcal{P} が最大となるような v_{ij} ，すなわち x_{ij} を求めればよい。そこで両辺の対数をとると

$$\log \mathcal{P} = \log X! - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \log x_{ij}! + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} \log v_{ij} \quad (2.14)$$

となり、 $x_{ij} \gg 1$ と仮定し、スターリングの公式を用いると

$$\log \mathcal{P} = X \log X - X - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} \log x_{ij} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} \log v_{ij} \quad (2.15)$$

となる。ここで各スクリーンラインでの推定休日 OD 交通量による計算断面交通量が⁸、観測休日断面交通量に一致しなければならないので

$$s_k = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \delta_{ijk} x_{ij} \quad k \in K \quad (2.16)$$

を満たさなければならない。そこで式 (2.16)，式 (2.11) および式 (2.12) のもとで式 (2.15) の $\log \mathcal{P}$ を最大にするため、ラグランジェの未定乗数法を用いる。ラグランジェの未定乗数をそれぞれ μ_k ， ρ ， λ とすると、ラグランジェ関数 \mathcal{L} は

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & X \log X - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} \log x_{ij} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} \log v_{ij} + \sum_{k \in K} \mu_k \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \delta_{ijk} x_{ij} - s_k \right) \\ & + \rho \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} - X \right) + \lambda \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} v_{ij} - 1 \right) \end{aligned} \quad (2.17)$$

となる。この \mathcal{L} を最大とする x_{ij} を求めれば、それが推定された休日 OD 交通量ということになるが、このままではどのスクリーンラインも横切らない OD 交通量は、 δ_{ijk} が 0 であり、式 (2.16) の等式制約条件において何の制約も受けないということから、休日交通の需要変動を反映できない可能性がある。そこで先程の式 (2.10) の平日 OD 表から得られる平日 OD 交通の生起確率 p_{ij} を用いて休日 OD 交通量の先験確率 v_{ij} を表すモデルを、残差平方和最小化モデルを参考に以下のように表現するモデルを考える。

$$\text{model-1'} \quad v_{ij} = \alpha_i \beta_j p_{ij} \quad (2.18)$$

$$\text{model-2'} \quad v_{ij} = \alpha_i \beta_j p_{ij} + \omega \exp(\zeta D_{ij}) \quad (2.19)$$

$$\text{model-3'} \quad v_{ij} = \alpha_i \beta_j p_{ij} \exp(\zeta D_{ij}) \quad (2.20)$$

もし $v_{ij} = p_{ij}$ と仮定する場合は、スクリーンライン調査による OD 表の修正法として提案された井上¹²⁾のモデル構造と形の上で一致するが、そのモデルは OD パターンが同一であるという仮

定のもとにOD表を修正していくという点で、休日OD交通量の推定に関する手法としての限界がある。

そこで本研究における提案手法では、平日交通と休日交通に関するODパターンの分布特性の違いをmodel-1'、model-2'やmodel-3'のような構造を持った先験確率を与えることにより考慮し、このような構造の先験確率を導入することにより、平日交通とは異なったODパターン特性を持った休日OD交通量の推定にも十分対応できるようになると考えられる。以上3つのモデルにおける v_{ij} を式(2.17)に代入し α_i 、 β_j 、 μ_k 、 λ 、 X およびmodel-2'においては ζ と ω 、model-3'においては ζ といったパラメータを非線型最適化計算を行ない求めるわけであるが、その過程はモデルによって異なる。そこでここではmodel-2'における場合のみ簡単に示す。

式(2.17)の \mathcal{L} にmodel-2'を代入し、それぞれの未知変数で偏微分し0と置く。その式から x_{ij} 、 ρ を導くと

$$x_{ij} = X (\alpha_i \beta_j p_{ij} + \omega \exp(\zeta D_{ij})) \exp \left(\sum_{k \in K} \mu_k \delta_{ijk} \right) \quad i, j \in \Omega \quad (2.21)$$

$$\rho = \log X + 1 \quad (2.22)$$

となり、これらの式を用いて x_{ij} 、 ρ を消去すると以下の非線形連立方程式が導かれる。

$$X \sum_{j \in J} \beta_j p_{ij} \exp \left(\sum_{k \in K} \mu_k \delta_{ijk} \right) + \lambda \sum_{j \in J} \beta_j p_{ij} = 0 \quad i \in I \quad (2.23)$$

$$X \sum_{i \in I} \alpha_i p_{ij} \exp \left(\sum_{k \in K} \mu_k \delta_{ijk} \right) + \lambda \sum_{i \in I} \alpha_i p_{ij} = 0 \quad j \in J \quad (2.24)$$

$$X \omega \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} D_{ij} \exp(\zeta D_{ij}) \exp \left(\sum_{k \in K} \mu_k \delta_{ijk} \right) + \lambda \omega \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} D_{ij} \exp(\zeta D_{ij}) = 0 \quad (2.25)$$

$$X \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \exp(\zeta D_{ij}) \exp \left(\sum_{k \in K} \mu_k \delta_{ijk} \right) + \lambda \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \exp(\zeta D_{ij}) = 0 \quad (2.26)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (\alpha_i \beta_j p_{ij} + \omega \exp(\zeta D_{ij})) - 1 = 0 \quad (2.27)$$

$$X \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left[(\alpha_i \beta_j p_{ij} + \omega \exp(\zeta D_{ij})) \exp \left(\sum_{k \in K} \mu_k \delta_{ijk} \right) \right] - X = 0 \quad (2.28)$$

$$X \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left[\delta_{ijk} (\alpha_i \beta_j p_{ij} + \omega \exp(\zeta D_{ij})) \exp \left(\sum_{k \in K} \mu_k \delta_{ijk} \right) \right] - s_k = 0 \quad k \in K \quad (2.29)$$

以上の非線形連立方程式を解き、 α_i 、 β_j 、 ζ 、 ω 、 μ_k 、 λ 、 X を求め、式(2.21)に代入し x_{ij} を求める。

表-2.1 スクリーンラインの設定数(大ゾーン)

	パターン1	パターン2	パターン3	パターン4	パターン5	パターン6
本数	2	3	3	2	3	6

2.4 適用事例

本節では、これまでに提案した残差平方和最小化および同時生起確率最大化に基づく休日OD交通量の推定モデルを実際のデータを用いて適用し、それぞれの適用結果について比較、検討し、モデルの妥当性や有用性などを検証する。

本研究の提案モデルは、休日交通が主体となる観光・リゾート地域における適用を想定しており、そのような地域における平日OD交通量に関するデータは、全国規模で行われる全国道路交通センサ自動車起終点調査¹³⁾によって得ることができる。しかしながら、本適用事例においてはモデルの検証に必要な休日OD交通量が調査されていないことから、昭和45年度に京阪神都市圏を対象地域として実施された京阪神都市圏パーソントリップ調査により集計されたカートリップOD表のデータを用いて適用計算を行った。ゾーニングについては、本章第2節で用いた調査対象地域から域外を除いて大きく14にゾーニングした図-2.1の場合と、大阪市周辺部のみを小さく15にゾーニングした図-2.2の場合の2種類についてそれぞれ適用計算を行った。また同調査では全目的平日OD交通量と全目的休日OD交通量が集計されており、それら調査結果の実績休日OD交通量を用いて推定モデルの検証を行なう。また本研究で提案した休日OD交通量の推定モデルにはゾーン間距離のデータが必要であるが、本適用事例においてはOD交通量と同様に、第2節で用いた昭和60年に実施された物資流動調査により得られた3桁ゾーンにおける平均トリップ長を用い、そのデータからそれぞれ対応するゾーニングに集計し直し平均トリップ長を求め、そのデータをゾーン間距離として用いた。さらに、調査時点のスクリーンラインの断面交通量の休日平日比は観測データがないため、本適用事例においては便宜的に調査された実績休日OD交通量と実績平日OD交通量を用いて以下のように算出した。

$$F_k = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \delta_{ijk} z_{ij}}{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \delta_{ijk} a_{ij}} \quad k \in K \quad (2.30)$$

ここに z_{ij} , a_{ij} は休日および平日の実績OD交通量であるが、実際の適用の際には休日OD交通量は未知であるので、スクリーンラインの休日断面交通量の観測は不可欠であることは言うまでもない。

適用計算に際してスクリーンラインの設定は、本数が2本から4本ぐらいが適当⁸⁾であることを考慮して大ゾーンの場合には任意に6パターンを、小ゾーンの場合には3パターンを考えたが、その各パターンごとのスクリーンラインの本数をそれぞれ表-2.1および表-2.2に示し、各パターンごとのスクリーンラインの設置場所を大ゾーンの場合には図-2.7から図-2.12に、小ゾーンの場

表-2.2 スクリーンラインの設定数(小ゾーン)

	パターン1	パターン2	パターン3
本数	3	4	3

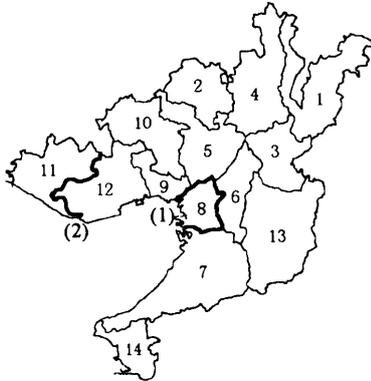


図-2.7 パターン1のスクリーンライン位置(大ゾーン)

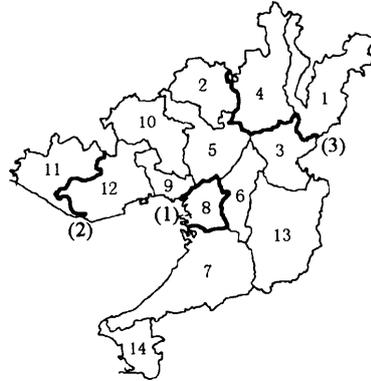


図-2.8 パターン2のスクリーンライン位置(大ゾーン)

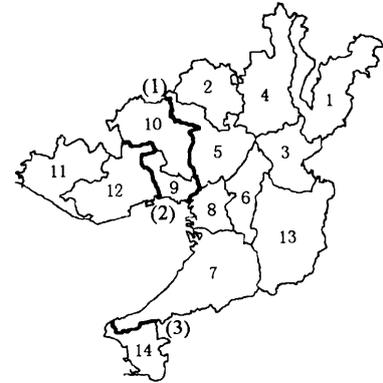


図-2.9 パターン3のスクリーンライン位置(大ゾーン)

合には図-2.13から図-2.15に示す。

両モデルの非線形最適化計算は、準ニュートン法の一つであるDFP法^{14),15)}を用いて行い、最適化計算における初期値は、 α_i^0 , β_j^0 を同値として各スクリーンラインの休日平日比 F_k を平均的に評価し、次式を満たすように与えて計算を行ない、 ζ^0 , ω^0 についての初期値は0とした。

$$x_{ij} = Fa_{ij} \quad i, j \in \Omega \quad (2.31)$$

$$v_{ij} = Fp_{ij} \quad i, j \in \Omega \quad (2.32)$$

ここに \bar{K} をスクリーンラインの設置本数とし

$$F = \frac{\sum_{k \in K} F_k}{\bar{K}} \quad (2.33)$$

である。ゾーン間距離 D_{ij} についてはその絶対値は必要なく、より一般性をもたせるために本適用事例においては以下に示すようにその平均で除したものをを用いた。

$$D_{ij} = \frac{D_{ij}}{\bar{D}} \quad i, j \in \Omega \quad (2.34)$$

ここで $\bar{\Omega}$ を全ODペア数として

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} D_{ij}}{\bar{\Omega}} \quad (2.35)$$

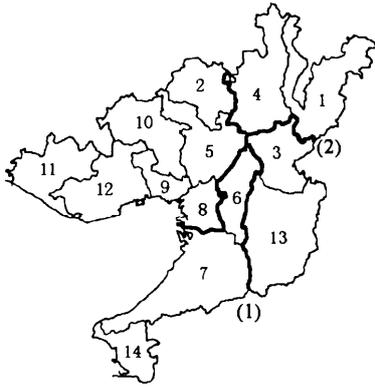


図-2.10 パターン4のスクリーンライン位置(大ゾーン)

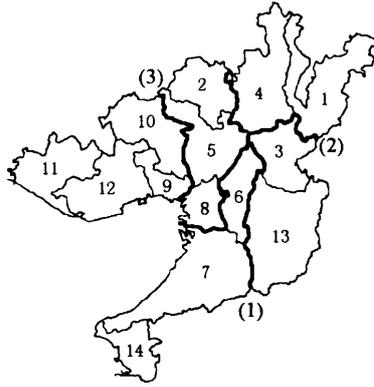


図-2.11 パターン5のスクリーンライン位置(大ゾーン)

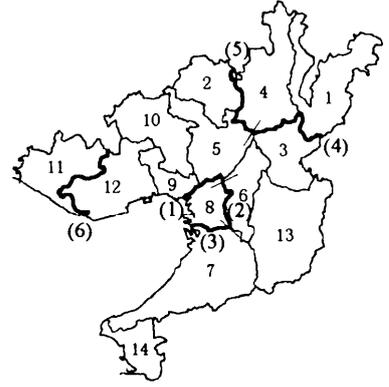


図-2.12 パターン6のスクリーンライン位置(大ゾーン)

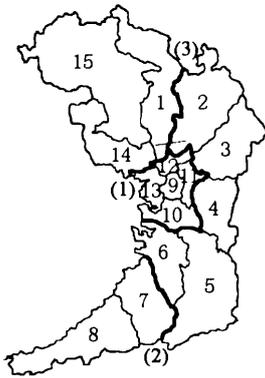


図-2.13 パターン1のスクリーンライン位置(小ゾーン)

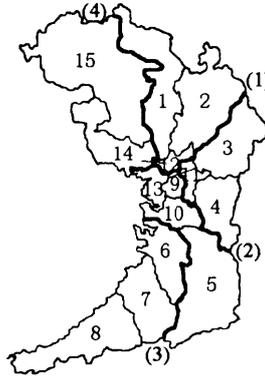


図-2.14 パターン2のスクリーンライン位置(小ゾーン)

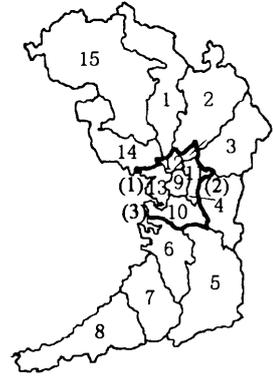


図-2.15 パターン3のスクリーンライン位置(小ゾーン)

である。

推定結果の適合度検定には、実績値と推定値の相関係数、平均トリップ長および以下に示すRMS誤差、合計比の値を用いて行なった。

$$\text{RMS 誤差} = \sqrt{\frac{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (z_{ij} - x_{ij})^2}{\bar{\Omega}}} \quad (2.36)$$

$$\text{合計比} = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij}}{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} z_{ij}} \quad (2.37)$$

表-2.3 残差平方和最小化モデルにおける実績値と推定値の相関係数(大ゾーン)

	model-1		model-2		model-3	
	case-1	case-2	case-1	case-2	case-1	case-2
パターン1	0.9838	0.9865	0.9987	0.9888	0.9881	0.9885
パターン2	0.9015	0.9756	0.9899	0.9902	0.9397	0.9887
パターン3	0.9397	0.9794	0.9847	0.9917	0.9670	0.9883
パターン4	0.8997	0.9750	0.9794	0.9868	0.9428	0.9797
パターン5	0.8915	0.9780	0.9312	0.9909	0.9128	0.9886
パターン6	0.8131	0.9494	0.9760	0.9919	0.9344	0.9908
平均	0.9049	0.9740	0.9767	0.9901	0.9475	0.9874
レンジ	0.1707	0.0371	0.0675	0.0051	0.0753	0.0111

2.4.1 残差平方和最小化モデルの適用結果

残差平方和最小化モデルを実際に適用する際に、内々交通を含めた全てのOD交通を対象とする場合を case-1 とし、内々交通以外のOD交通のみを対象とする場合を case-2 とし、両方について検証した。

(1) 大ゾーンにおける適用結果

表-2.3は、実績休日OD交通量と推定休日OD交通量の相関係数を示してある。実績休日OD交通量に対する実績平日OD交通量の相関係数が case-1 の場合には0.9947であり、case-2 の場合には0.9870とかなり高い値を示していることから予想されるように、この表から全般に高い相関性を有していることがわかり、また全モデルとも内々交通を含めないcase-2の方が高めの相関性を有し、特にmodel-1はその傾向が強いことがわかる。さらにスクリーンラインの設定の違いによる推定結果のばらつきもmodel-1が特に大きく、モデルにゾーン間距離を組み込むことでモデルの安定性が増すことがわかり、またcase-1、case-2との差もあまり大きくない。相関性については特にcase-1、case-2ともその安定性を含めmodel-2が一番優れていることがわかり、次いでmodel-3が良いことがわかる。

表-2.4は、休日OD交通量の実績値と推定値のRMS誤差の値を示してあるが、特にmodel-1のcase-1の値が大きく、実績平日OD交通量とのRMS誤差の値が411657であるので、その値よりも大きくなっていることがわかる。しかしながら逆にcase-2の場合は、実績平日OD交通量とのRMS誤差の値が42270であるので、全パターンにおいてその値よりも全て小さくあまり大きな値を示していないということから、model-1では内々交通以外の交通量に関してはほぼ妥当な値で推定しているが、内々交通に関しての推定結果が極端に悪いということがわかる。またmodel-2、model-3に関しては、実績平日OD交通量に関するRMS誤差の値よりもかなり小さく、妥当な値を示していることがわかり、全ての値はmodel-1の値よりも小さく、特にmodel-2の値が優れていることがわかる。さらにスクリーンラインの設定の差異による変動も、model-1に比べ小さく安定

表-2.4 残差平方和最小化モデルにおける実績値と推定値のRMS誤差(大ゾーン)

	model-1		model-2		model-3	
	case-1	case-2	case-1	case-2	case-1	case-2
パターン1	129950	9812	51456	7770	109338	5869
パターン2	368942	12068	95532	7141	136182	5984
パターン3	446788	32223	128707	7701	207966	16075
パターン4	521154	16990	121800	8379	189050	12900
パターン5	524683	16246	209051	8118	214508	7245
パターン6	585080	19937	124219	6537	174402	5798
平均	429433	17879	121794	7608	171908	8979
レンジ	455130	22411	157595	1842	105169	10277

表-2.5 残差平方和最小化モデルにおける実績値と推定値の合計比(大ゾーン)

	model-1		model-2		model-3	
	case-1	case-2	case-1	case-2	case-1	case-2
パターン1	1.1223	0.8673	1.0579	0.9649	1.1105	0.8825
パターン2	1.3576	0.9520	1.1157	1.0147	1.2475	0.9530
パターン3	1.6691	1.1914	1.1923	0.9809	1.4420	1.1697
パターン4	1.5812	1.0851	1.1824	1.0428	1.4013	1.1191
パターン5	1.5554	1.0606	1.1734	0.9503	1.3757	1.0540
パターン6	1.7337	1.0721	1.1257	0.9895	1.3206	1.0609
平均	1.5032	1.0381	1.1412	0.9905	1.3463	1.0399
レンジ	0.6144	0.3241	0.1344	0.0925	0.3315	0.2872

していることから、推定モデルにゾーン間距離を組み込むことにより、内々交通も含めた推定結果が向上し、より安定性も増すことがわかった。

表-2.5は休日OD交通量の実績値と推定値の合計比の値を示してあるが、全般にcase-1の方は過大推計傾向があり、case-2の方はそのような傾向は見られないことから、内々交通をより過大に推定していることがわかる。しかしながらmodel-2のcase-1の誤差は十数パーセントであり、ほぼ妥当な値であると思われる。また次いでmodel-3の値が良好であり、推定結果の安定性についても同様のことが言え、モデルにゾーン間距離を組み込むことの有意性を示していると言える。なお休日OD交通量に対する平日OD交通量の合計比の実績値は、case-1の場合に1.7338、case-2の場合に1.3873であり、つまり内々交通を含めた平日の総トリップ数は休日の約1.7倍であり、内々交通以外は約1.4倍であるということである。

表-2.6は、実績値の平日および休日の平均トリップ長とその比率を示してあるが、休日トリップの方が平均的にcase-1、case-2とも10パーセントほど長いトリップであることから、休日交通

表-2.6 平均トリップ長の実績値(大ゾーン)

	case-1	case-2
実績平日平均トリップ長	12.7086	24.4628
実績休日平均トリップ長	13.9978	27.8770
平日/休日	1.1014	1.1396

表-2.7 残差平方和最小化モデルにおける平均トリップ長(大ゾーン)

	model-1		model-2		model-3	
	case-1	case-2	case-1	case-2	case-1	case-2
パターン1	12.8790	24.9174	13.8903	29.1609	13.0462	25.2708
パターン2	12.3392	25.6054	13.9605	29.9806	12.8446	26.2467
パターン3	13.2118	25.3513	13.7432	28.0922	13.5874	26.2697
パターン4	12.0484	25.7730	14.0156	30.1444	12.9252	26.4902
パターン5	12.0470	25.7794	13.8768	30.1457	13.0005	26.6999
パターン6	13.4632	26.7145	13.9808	29.9962	13.6928	27.2274
平均	12.6648	25.6902	13.9112	29.5867	13.1828	26.3675
レンジ	1.4162	1.7971	0.2724	2.0535	0.8482	1.9566

の一つの特徴である休日には遠くへ出かけているという傾向がこの値からわかる。

表-2.7は休日OD交通量の推定値の平均トリップ長を示してある。これらの表から model-1 については、その平均トリップ長はほとんど平日の実績値と変化が無く、そのモデル形式からも判断すると model-1 はやはり平日のOD分布に大きく依存していると考えられ、その構造自体は大きく変化することなく、休日OD分布の構造を反映しにくいモデルであると言える。model-3の平均トリップ長は、model-1よりは実績値に近い値ではあるが、case-1, case-2とも多少小さめの値を示していることがわかり、model-2は全モデルの中で最も妥当な値を示していると言え、ゾーン間距離をモデルに組み込んだ model-2, model-3は、平日OD分布とは異なった構造を持っていることがわかる。

表-2.8は、model-2, model-3における ω の値を示してある。これらの値のみを見る限り model-2のパターン1, パターン2でそのオーダーも他のパターンの値とは異なり、また model-3についても多少小さめの値を示しており安定性に欠けているように思われるが、これらの値のみでパラメータは推定されず、発生側パラメータ α_i や集中側パラメータ β_j との兼ね合いの中で最適に求まっているためこのような値となったと思われる。さらに model-2の ω の値を見てみると、その値はかなり全般的に大きな値を示し、このモデル形式では相対的に交通量の小さいOD交通量は表現できないことがわかる。

スクリーンラインの本数と推定結果については、本適用結果を見る限りはあまり関係がなく、む

表-2.8 残差平方和最小化モデルにおける ζ , ω の値(大ゾーン)

	model-2		model-3
	ζ	ω	ζ
パターン1	-0.00202	3740.42775	0.12988
パターン2	-0.00200	4518.76403	0.25989
パターン3	-0.05341	2759.76965	0.39509
パターン4	-0.06707	4955.12942	0.38615
パターン5	-0.03142	3969.66973	0.37660
パターン6	-0.02735	4443.36500	0.55542
平均	-0.03055	4064.5209	0.35051
レンジ	0.06507	2195.3598	0.42554

しる設定する場所との関係の方が大きいようである。各モデルによってスクリーンラインの設定パターンと推定精度の関係は異なり、普遍的な傾向は見出せないが、トリップの発生量の大きな大阪市周辺部にスクリーンラインを設置したパターン1、パターン2、パターン6の推定結果が他に比べて優れているようである。逆に比較的長いスクリーンラインを設けたパターン4、パターン5における推定結果が他に比べて劣るようである。これは長いスクリーンラインが、各OD間のトリップの大部分を捉えてしまうことにより、OD間のトリップに関する情報量が減少してしまうことによるものと思われる。

図-2.16は、休日OD交通量の実績値と推定値の散布図のうち、パターン6の各モデルにおける結果を示してある。図中、OD交通量の値が1,000,000台/日を越えるものはほぼ内々交通である。この図から各モデルともにパターン6における推定結果は、絶対値の大きな内々交通量の推定があまり良くないことがわかるが、絶対値の小さなOD交通量の推定結果はほぼ妥当であることがわかる。特に、ゾーン間距離をモデルに取り入れていないmodel-1の内々交通の推定結果が他の2つのモデルに比較して、実績値と推定値の適合度指標から推察されたように過大推定傾向になっていることが見て取れる。model-1における内々交通の推定結果に比較し、model-2およびmodel-3における内々交通の推定結果は、45度線により近い位置にプロットされていることもわかる。

(2) 小ゾーンにおける推定結果

続いて、小ゾーンにおける適用結果について考察する。表-2.9、表-2.10、表-2.11には大ゾーンの場合と同様に休日OD交通量の実績値と推定値の相関係数、RMS誤差、合計比の値を示してある。相関係数を見てみると、大ゾーンの場合とは異なり、全モデル、全パターンで内々交通を含めたcase-1の場合の方が相関性が高くなっていることがわかるが、特に各モデルにおいてパターン1の内々交通を含めないcase-2の場合の相関性が劣っていることがわかる。これは、スクリーンラインの設定に起因するものと考えられる。内々交通を含めた場合の推定結果の方が全般的に相関性が高くなったことについては、ゾーンを小さく設定することによって、内々交通の全トリップ

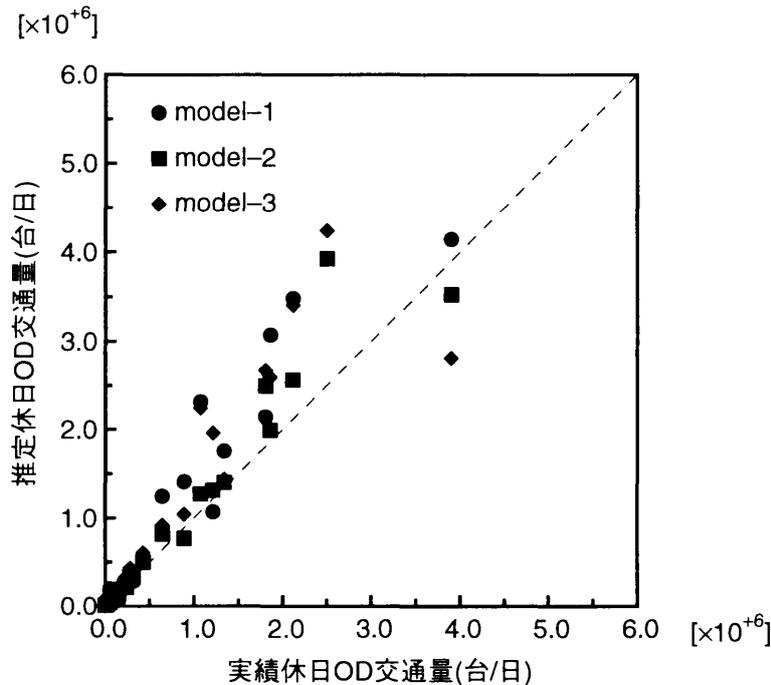


図-2.16 残差平方和最小化モデルにおける実績値と推定値の散布図(大ゾーン：パターン6)

表-2.9 残差平方和最小化モデルにおける実績値と推定値の相関係数(小ゾーン)

	model-1		model-2		model-3	
	case-1	case-2	case-1	case-2	case-1	case-2
パターン1	0.8646	0.7544	0.9949	0.8837	0.9514	0.7691
パターン2	0.9766	0.9410	0.9868	0.9599	0.9859	0.9584
パターン3	0.9903	0.9319	0.9901	0.9322	0.9889	0.9343
平均	0.9438	0.8758	0.9906	0.9253	0.9754	0.8873
レンジ	0.1257	0.1865	0.0081	0.0763	0.0375	0.1893

に占める相対的な割合が減少したためであると思われる、ゾーンが小さな場合には内々交通とそれ以外の交通を特に区別せずに推定できることを意味する。RMS誤差についても同様にパターン1での値が全モデルにおいて大きくなっており、合計比については全モデル、各caseとも数パーセントの誤差であり、ほぼ妥当な値であることがわかる。全般的には、大ゾーンにおける適用結果と同様に、model-2での推定結果が優れ、次いでmodel-3の推定結果が優れていることがわかるが、大ゾーンにおける適用結果ほどの差異は見られない。

表-2.11の合計比の値をさらに見てみると、大ゾーンにおける適用結果とは異なり内々交通の過大推計傾向は見られず、パターン1のcase-1を除けば全モデルとも全て数パーセント以内の誤差で収まっており、非常に優れた値であることが確認できる。

表-2.12に実績交通量における平日および休日の平均トリップ長の値を示してある。この場合に

表-2.10 残差平方和最小化モデルにおける実績値と推定値のRMS誤差(小ゾーン)

	model-1		model-2		model-3	
	case-1	case-2	case-1	case-2	case-1	case-2
パターン1	124318	19311	22432	11167	54111	16143
パターン2	36566	8116	29148	6701	28976	6874
パターン3	23839	8824	25420	8714	25668	8702
平均	61574	12084	25667	8861	36252	10573
レンジ	100479	11195	6716	4467	28443	9269

表-2.11 残差平方和最小化モデルにおける実績値と推定値の合計比(小ゾーン)

	model-1		model-2		model-3	
	case-1	case-2	case-1	case-2	case-1	case-2
パターン1	1.1179	1.0088	0.9309	0.9670	1.0029	0.9761
パターン2	0.9655	0.9707	0.9445	0.9663	0.9620	0.9753
パターン3	0.9754	0.9763	0.9542	0.9698	0.9698	0.9783
平均	1.0196	0.9853	0.9432	0.9677	0.9782	0.9766
レンジ	0.1524	0.0381	0.0233	0.0034	0.0409	0.0030

も大ゾーンの場合と同様に、休日におけるトリップの方が平日に比べて平均的に長いことがわかるが、その差は非常に小さい。これは、大阪市周辺部のみを対象としたためであり、大阪市周辺部からさらに郊外へのトリップが含まれていないことによると考えられる。

表-2.13に、推定OD交通量を用いて求めた休日の推定平均トリップ長が示されているが、これらの値もほぼ妥当な値であることがわかる。model-1における平均トリップ長の値は多少小さめの値を示しているが、これに比べmodel-2やmodel-3の値の方が実績値に近い値であることがわかり、モデルにゾーン間距離を組み込んだ方が休日交通需要の構造を捉えやすいことを示した結果となっている。

表-2.14は、推定したパラメータの一部の値を示してある。これらの値の符号は、大ゾーンの場合と同様に合理的な結果となっており、モデル構造の妥当性を示していると考えられる。model-2の ω の値を見てみると、大ゾーンの場合より1桁ほど小さな値を示しているが、これは対象とするOD交通量の絶対値がゾーニングを小さくしたために小さくなったためであり、妥当な結果である。

スクリーンラインの設置場所に着目してみると、大阪市を取り囲むような1本のスクリーンラインを設置したパターン1の推定結果が悪く、同じスクリーンラインを3つに分割したパターン3での推定結果は優れていた。これは、パターン1のようなスクリーンラインの設定では、OD間のトリップの方向に関する情報が失われてしまい、特にトリップの発生量の大きな大阪市周辺にこのようなスクリーンラインが設定されたために推定結果が悪くなったと考えられる。

表-2.12 平均トリップ長の実績値(小ゾーン)

	case-1	case-2
実績平日平均トリップ長	8.4638	14.4596
実績休日平均トリップ長	8.6814	14.8504
休日/平日	1.0257	1.0270

表-2.13 残差平方和最小化モデルにおける平均トリップ長(小ゾーン)

	model-1		model-2		model-3	
	case-1	case-2	case-1	case-2	case-1	case-2
パターン1	8.6133	15.2699	8.9587	15.5859	9.0042	15.5180
パターン2	8.3085	14.3560	8.4508	14.5856	8.3748	14.4185
パターン3	8.4440	14.4842	8.5336	14.6497	8.4530	14.4683
平均	8.4553	14.7034	8.6477	14.9404	8.6107	14.8016
レンジ	0.3048	0.9139	0.5078	1.0003	0.6293	1.0995

図-2.17にパターン3における実績値と推定値の散布図を示すが、各適合度指標の値からも推察されたようにmodel-1での推定値が、45度線から多少離れた位置にプロットされ、推定結果があまり良くないことがわかる。特にこのmodel-1の場合には、交通量が相対的に大きなODペアにおける推定値が、過小推定されていることもこの図からわかる。一方、model-2やmodel-3の推定結果は45度線近傍にプロットされ、優れた推定結果が得られていることが見て取れる。

2.4.2 同時生起確率最大化モデルの適用結果

同時生起確率最大化モデルによる適用計算においても残差平方和最小化モデルによる適用計算の場合と同様に、内々交通を含めた全OD交通を対象とする場合をcase-1とし、内々交通以外のOD交通を対象とする場合をcase-2として考察していく。

(1) 大ゾーンにおける適用結果

表-2.15から表-2.19は、残差平方和最小化モデルの場合と同様に、休日OD交通量の実績値と推定値の各適合度指標の値を示してある。表-2.15の相関係数の値を見てみると、全般的に高い相関性を示していることがわかり、特にmodel-2'、model-3'が優れていることがわかり、またcase-1、case-2については大きな差異は無いと言える。安定性については、レンジの値からmodel-3'が優れていることがわかる。

表-2.16のRMS誤差の値を見てみると、model-1'のcase-1の値が全般的にかなり大きくなっており、このことは内々交通量の推定誤差によると思われる、また全般にcase-1ではmodel-3'、case-2

表-2.14 残差平方和最小化モデルにおける ζ , ω の値(小ゾーン)

	model-2		model-3
	ζ	ω	ζ
パターン1	-0.01602	1648.41296	0.14772
パターン2	-0.00276	367.63434	0.01610
パターン3	-0.00289	331.88314	0.01018
平均	-0.00722	782.64348	0.05800
レンジ	0.01326	1316.52982	0.13754

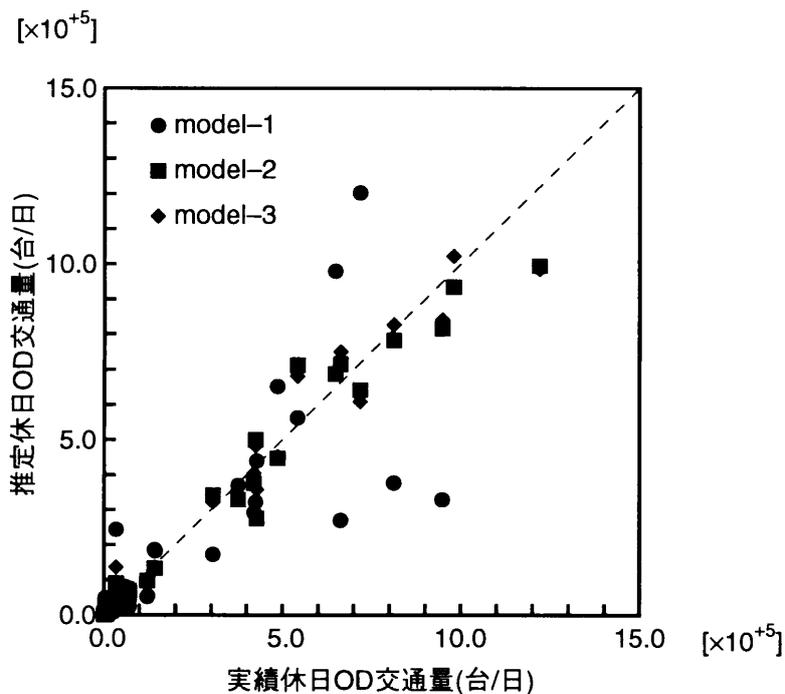


図-2.17 残差平方和最小化モデルにおける実績値と推定値の散布図(小ゾーン：パターン3)

では model-2' の値が優れていることがわかる。

表-2.17の合計比の値を見てみると、case-1において各モデルの相違はかなり小さくすべて似通った値となっている。これは推定休日 OD 交通量の総計 X が未知変数として目的関数に入っているためであると思われる、この X が制約となり各モデルの合計比は似たものとなったと思われる。逆に case-2 の合計比の値は各モデルで多少異なった値を示しているが、全て十数パーセント以内の誤差となっており、合計比は優れた値であることがわかる。

表-2.18の平均トリップ長の値は、model-1'の値が小さくなっており、平日の実績平均トリップ長に似たような値となっているが、model-2', model-3'では休日平均トリップ長の実績値に近い値になっていることがわかる。また model-2' の case-2 の平均トリップ長の値が実績値よりも多少

表-2.15 同時生起確率最大化モデルにおける実績値と推定値の相関係数(大ゾーン)

	model-1'		model-2'		model-3'	
	case-1	case-2	case-1	case-2	case-1	case-2
パターン1	0.9839	0.9721	0.9975	0.9905	0.9927	0.9809
パターン2	0.9543	0.9507	0.9564	0.9404	0.9762	0.9697
パターン3	0.8829	0.8806	0.9882	0.9729	0.9828	0.9696
パターン4	0.8933	0.8906	0.9680	0.9634	0.9664	0.9326
パターン5	0.8981	0.9167	0.9215	0.9596	0.9500	0.9363
パターン6	0.9341	0.9308	0.9612	0.9895	0.9538	0.9777
平均	0.9244	0.9236	0.9655	0.9694	0.9703	0.9611
レンジ	0.1010	0.0915	0.0760	0.0501	0.0427	0.0483

表-2.16 同時生起確率最大化モデルにおける実績値と推定値のRMS誤差(大ゾーン)

	model-1'		model-2'		model-3'	
	case-1	case-2	case-1	case-2	case-1	case-2
パターン1	105003	16462	68568	7181	78976	11173
パターン2	161259	17952	217007	17551	132229	12933
パターン3	330862	30545	248655	26944	233132	28117
パターン4	367389	27159	220164	16140	231554	27152
パターン5	335019	24749	260285	16072	245902	23315
パターン6	275690	29470	181299	7360	174491	11562
平均	262537	24390	199330	15208	182714	19042
レンジ	262386	14083	191717	19763	166926	16944

大きめの値を示しているが、このことは小さなOD交通量を過大に推定していることによるものであると考えることができる。

表-2.19に model-2', model-3' の ζ , ω の値を示してある。これらのパラメータにおける正負の符号は、合理的なものであることがわかる。全般に model-2' の ζ の値にばらつきがみられるのは、これらの値は他のパラメータとの兼ね合いの中で最適に求まっていることによるものと考えられる。

図-2.18は、パターン6における休日OD交通量の実績値と推定値の散布図であるが、この図からも model-1' の内々交通の推定誤差が大きいことがわかるが、model-2', model-3' においては45度線近傍に多くが位置し、ほぼ妥当な推定結果が得られていることがわかる。

(2) 小ゾーンにおける適用結果

続いて、小ゾーンの適用結果について考察する。表-2.20から表-2.24は、休日OD交通量の小ゾーンにおける実績値と推定値の各適合度指標の値を示してある。相関性は全般的に高く、特に

表-2.17 同時生起確率最大化モデルにおける実績値と推定値の合計比(大ゾーン)

	model-1'		model-2'		model-3'	
	case-1	case-2	case-1	case-2	case-1	case-2
パターン1	1.0721	0.8465	1.0734	0.9531	1.0721	0.8725
パターン2	1.1721	0.8987	1.1767	0.9412	1.1717	0.9539
パターン3	1.3965	1.0118	1.3962	1.1357	1.3964	1.1595
パターン4	1.3754	1.0483	1.3751	1.1523	1.3751	1.1642
パターン5	1.3554	1.0409	1.3549	1.0218	1.3549	1.0656
パターン6	1.2539	0.9302	1.2440	1.0033	1.2438	1.0294
平均	1.2709	0.9627	1.2701	1.0346	1.2690	1.0409
レンジ	0.3244	0.2018	0.3228	0.2111	0.3243	0.2917

表-2.18 同時生起確率最大化モデルにおける平均トリップ長(大ゾーン)

	model-1'		model-2'		model-3'	
	case-1	case-2	case-1	case-2	case-1	case-2
パターン1	12.8562	24.7240	13.7224	28.8731	13.0634	25.2861
パターン2	12.3420	25.1309	13.0840	28.7757	13.0706	26.3253
パターン3	12.8406	25.4021	13.4102	26.8410	13.1905	26.1534
パターン4	12.7151	25.2303	14.5627	28.5079	12.9121	26.2131
パターン5	12.6175	25.1340	13.3823	27.5834	13.1177	26.5318
パターン6	13.1241	25.9704	13.5706	29.4686	13.6723	27.3742
平均	12.7493	25.2653	13.6220	28.3416	13.1711	26.3140
レンジ	0.7821	1.2464	1.4787	2.6276	0.7602	2.0881

内々交通を含めた case-1 の場合の方が全モデル、全パターンで優れているが、これは先にも述べたように、ゾーンが小さく設定されていることによって内々交通の割合が減少していることによるものであり、内々交通を個別に推定するのではなく他のトリップと同様に推定できるということである。RMS 誤差の値についてもほぼ妥当な値であり、また合計比についても大ゾーンの場合と同様に全トリップ数 X による制約がかかることによって、全て数パーセント以内の優れた値となっていることがわかる。

表-2.23の平均トリップ長も実績値に近い値となっており、表-2.24の各パラメータの符号も合理的であることがわかる。パラメータの値には多少のばらつきが見られるが、これは先にも述べたように、これらのパラメータは、他の発生側パラメータや集中側パラメータとの兼ね合いの中で最適に求まるためであると考えられる。

図-2.19にパターン3における休日OD交通量の実績値と推定値の散布図を示すが、model-2'およびmodel-3'の推定結果はほぼ45度線の近傍にプロットされていることから、妥当な推定値が得

表-2.19 同時生起確率最大化モデルにおける ζ , ω の値(大ゾーン)

	model-2'		model-3'
	ζ	ω	ζ
パターン1	-0.00396	0.00013	0.17985
パターン2	-0.00308	0.00009	0.35821
パターン3	-0.00671	0.00006	0.40117
パターン4	-0.43498	0.00019	0.40636
パターン5	-0.21634	0.00008	0.29750
パターン6	-0.00051	0.00012	0.57894
平均	-0.11093	0.00011	0.37034
レンジ	0.43447	0.00013	0.39909

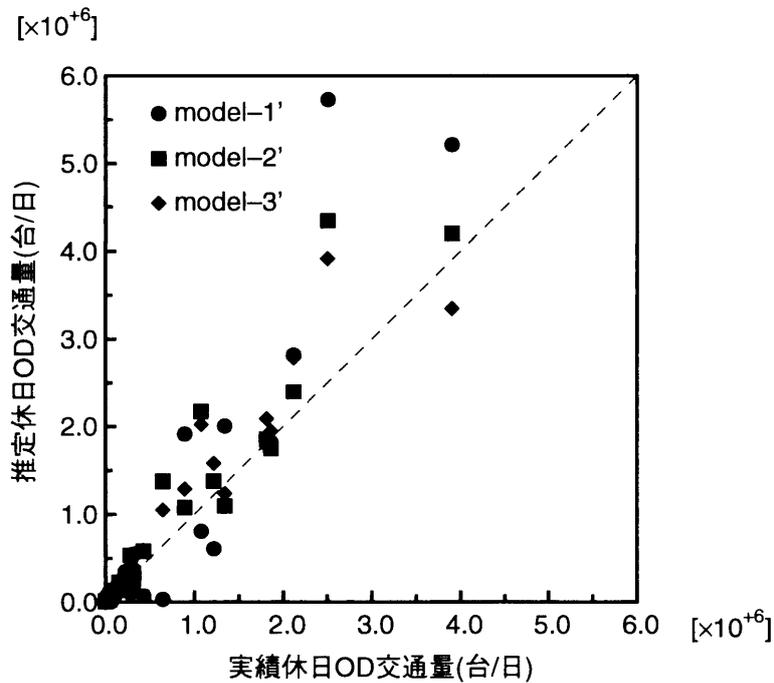


図-2.18 同時生起確率最大化モデルにおける実績値と推定値の散布図(大ゾーン：パターン6)

られていることがわかる。

2.4.3 両モデルによる適用結果の比較

これまでに、残差平方和最小化手法および同時生起確率最大化手法による休日OD交通量の推定モデルの適用結果についての考察をそれぞれ行ってきたが、ここではそれら両モデルの適用結果を比較・検討していく。

まず両手法、各ゾーンでの推定結果に共通することは、推定モデルにゾーン間距離を組み込む

表-2.20 同時生起確率最大化モデルにおける実績値と推定値の相関係数(小ゾーン)

	model-1'		model-2'		model-3'	
	case-1	case-2	case-1	case-2	case-1	case-2
パターン1	0.9245	0.7459	0.9916	0.7968	0.9566	0.7439
パターン2	0.9870	0.9611	0.9919	0.9623	0.9895	0.9608
パターン3	0.9891	0.9364	0.9912	0.9303	0.9907	0.9334
平均	0.9669	0.8812	0.9915	0.8965	0.9789	0.8794
レンジ	0.0646	0.2152	0.0006	0.1655	0.0341	0.2169

表-2.21 同時生起確率最大化モデルにおける実績値と推定値のRMS誤差(小ゾーン)

	model-1'		model-2'		model-3'	
	case-1	case-2	case-1	case-2	case-1	case-2
パターン1	67956	17611	22111	14798	50585	16834
パターン2	27586	6641	21906	6544	24955	6630
パターン3	25542	8580	23073	8868	23731	8717
平均	40361	10944	22364	10070	33090	10727
レンジ	42415	10970	1167	8254	26855	10205

ことで推定結果の安定性が向上し、また相関性、RMS誤差、合計比、平均トリップ長などの各適合度指標の値も向上したことである。

続いて大ゾーンにおける適用計算での推定結果の比較を行うと、両モデルの推定結果の違いは、残差平方和最小化モデルにおいては、内々交通を含めた全OD交通を対象としたcase-1と内々交通以外のOD交通を対象としたcase-2での結果が大きく異なり、全般的にcase-2の方が優れ、特に合計比の値でそのような傾向となったことである。しかしながらmodel-2では比較的その両者の差は小さく、優れた推定結果が得られることがわかった。また同時生起確率最大化モデルにおいてはcase-1、case-2での差異はあまり見られず、合計比の値を除いて全般にcase-1の結果の方が優れていた。このことはモデルの定式化に説明したように、同時生起確率最大化モデルについては休日OD交通量の総計 X が目的関数に未知変数として組み込まれるが、残差平方和最小化モデルには、総計に関する変数は一切無いためであると思われる。

以上のことから大ゾーンにおいては、内々交通を含めた全OD交通量の推定には同時生起確率最大化モデルの方が適しており、内々交通以外のOD交通を対象とする場合には残差平方和最小化モデルの方が適していることがわかった。しかしながら両モデルおよび内々交通を含むcase-1、内々交通を含まないcase-2における適用計算を通じて総合的に優れた推定結果を得ることができるのは残差平方和最小化モデルにおけるmodel-2であることがわかった。またこのモデルによって、一般的な交通計画に必要な相対的に大きなOD交通量は、十分な精度で推定できること

表-2.22 同時生起確率最大化モデルにおける実績値と推定値の合計比(小ゾーン)

	model-1'		model-2'		model-3'	
	case-1	case-2	case-1	case-2	case-1	case-2
パターン1	1.0010	0.9597	1.0006	0.9814	1.0009	0.9672
パターン2	0.9671	0.9750	0.9671	0.9675	0.9671	0.9746
パターン3	0.9688	0.9775	0.9687	0.9742	0.9688	0.9753
平均	0.9790	0.9707	0.9788	0.9744	0.9789	0.9724
レンジ	0.0338	0.0178	0.0335	0.0139	0.0338	0.0082

表-2.23 同時生起確率最大化モデルにおける平均トリップ長(小ゾーン)

	model-1'		model-2'		model-3'	
	case-1	case-2	case-1	case-2	case-1	case-2
パターン1	9.0157	15.5246	8.8833	15.5280	8.9702	15.5116
パターン2	8.3796	14.4312	8.4615	14.6865	8.4102	14.4933
パターン3	8.4435	14.4566	8.4918	14.5762	8.4649	14.5032
平均	8.6129	14.8042	8.6122	14.9302	8.6151	14.8360
レンジ	0.6360	1.0934	0.4219	0.9518	0.5600	1.0184

がわかったが、そのモデル形式から判断できるように、最大OD交通量と最小OD交通量の差がかなり大きな場合に、小さなOD交通量の把握までは難しいと思われる。次に同時生起確率最大化モデルにおける model-3' の推定結果が優れており、このモデルの場合は model-2' の形式と比較し、相対的に小さなOD交通量も把握できると考えられる。

小ゾーンにおける適用結果においては、残差平方和最小化手法および同時生起確率最大化手法を用いた両モデルにおいて、特に特徴的な違いは見られなかったが、全般的には同時生起確率最大化モデルを用いたモデルによる推定結果の方が優れており、またスクリーンラインの設定の差異によるばらつきも小さめであった。モデルとしては、同時生起確率最大化モデルにおける model-2' が最も優れており、小ゾーンの場合には内々交通も含めて推定した方が優れた推定結果が得られることがわかった。

2.5 まとめ

国民のライフスタイルの変化とともに休日交通需要を反映した交通計画の重要性が高まる中、休日の交通計画に必要な休日交通関連資料が未整備であるという状況を背景に、本章では、既知の平日OD交通量とより入手しやすい休日のスクリーンライン断面交通量のデータをもとに、休日OD交通量を推定するための手法について検討した。

本章第2節においては、休日OD交通量と平日OD交通量の関係を、各OD間のゾーン間距離に

表-2.24 同時生起確率最大化モデルにおける ζ , ω の値(小ゾーン)

	model-2'		model-3'
	ζ	ω	ζ
パターン1	-0.00322	0.00009	0.16628
パターン2	-0.00003	0.00004	0.03231
パターン3	-0.00562	0.00001	0.01865
平均	-0.00296	0.00005	0.07241
レンジ	0.00559	0.00008	0.14763

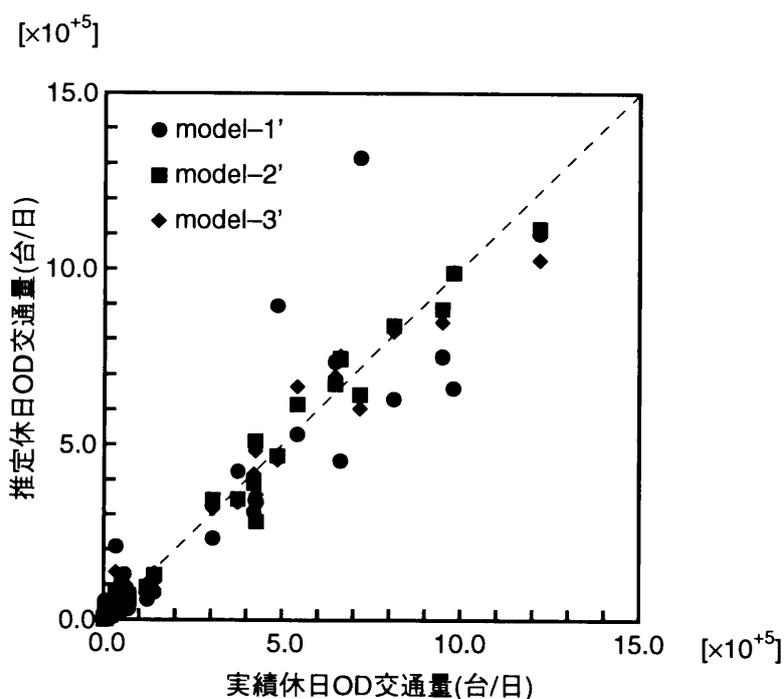


図-2.19 同時生起確率最大化モデルにおける実績値と推定値の散布図(小ゾーン：パターン3)

着目して分析し、休日には長距離のトリップほど平日に対するトリップの発生率が高いことなどを明らかにし、休日OD交通量と平日OD交通量の基本的な関係を定式化した。第3節においては、この分析結果を基に休日OD交通量を表すモデルをいくつか提案し、休日のスクリーンライン断面交通量から休日OD交通量を推定する手法を展開した。一つは残差平方和最小化に基づく推定手法であり、一つは同時生起確率最大化に基づく推定手法であった。そして実際に提案した幾つかのモデルを京阪神都市圏地域において適用し、その各手法の有用性や妥当性について第4節において検証した。以下、適用事例を通して得られた知見をまとめる。

(1) ゾーン間距離が大きくなるほどOD交通量は減少し、また休日には長距離のトリップが多くなるといった休日交通の特徴を表すために、ゾーン間距離を休日OD交通量を表すモデルに組み

込んだ。その結果、休日 OD 交通量の推定結果は安定し、ゾーン間距離を組み込まないモデルにおける推定結果よりも優れた値が得られることがわかった。

(2) 両手法を通じて総合的に残差平方和最小化モデルの model-2 および同時生起確率最大化モデルの model-2' による推定結果が最も優れており、休日 OD 交通量を推定するに際して十分有用性のあるモデルであることがわかった。

(3) 京阪神都市圏パーソントリップ調査における対象地域のほぼ全域を対象とした大きな 14 ゾーンにおける適用結果から、残差平方和最小化モデルにおいては、内々交通を除いた case-2 の場合の推定結果の方が優れ、また内々交通以外の推定結果は精度の高いものであることがわかった。同時生起確率最大化モデルによる推定結果は、内々交通を含めた全 OD 交通を対象とした case-1 の場合と内々交通以外の OD 交通を対象とした case-2 の場合との差異は小さくなく、OD 交通量の総計の過大推計の傾向を除けば十分全 OD の推計に耐え得ることができるモデルであることがわかった。

(4) 大阪市周辺地域のみ小さな 15 ゾーンにおける適用結果から、残差平方和最小化モデルおよび同時生起確率最大化モデルの両者において、内々交通も含めた case-1 の場合の推定結果の方が優れていることがわかった。また推定結果は十分な精度を有していることがわかった。これはゾーニングを小さくすることによって、内々交通の割合が減少し、内々交通とそれ以外の交通の差異が小さくなったためであると考えられる。

(5) スクリーンラインの設置については、設置する本数と推定精度の直接的な関係は見出されず、スクリーンラインの長さおよび設置する場所が推定結果に影響を及ぼすことがわかった。本適用事例の結果からは、スクリーンラインの長さをあまり長くせずに、またトリップの多いところに設置するのが良いことがわかった。

大ゾーンで問題となる内々交通の推定に関しては今後より多くの検討が必要であるが、一つの方法として内々率を平日、休日ともに一定とする方法¹⁶⁾や、事前に休日 OD 交通量の総計 X を別に予測し、その予測された X を制約式に組み込むことが考えられる。

本研究では得られるデータの都合上、観光・リゾート地域ではなく都市圏である京阪神都市圏地域において提案した推定手法の適用計算を行なったが、データとして用いる休日のスクリーンラインの観測断面交通量、あるいは観測休日平日比は、対象地域の季節変動・地域特性や経年変化を観測値に直接捉えるため、推定値にも十分それら変動や特性を反映することが可能であると考えられる。しかしながら本研究では、そのようなことを検証できなかったため、今後は他の都市圏や特に観光・リゾート地域のデータや多年度のデータを用いて、本研究で提案した手法の妥当性や地域移転可能性などについて検証していく必要があると思われる。またスクリーンラインの設定に関する仮定についての影響評価や、休日平日比の観測値の分析による断面交通量の与え方の妥当性や観測誤差による影響評価についての検証が必要であると思われる。

本研究は、将来の休日 OD 交通量を予測する方法にまで言及したものではないが、比較的短期的な将来予測については本研究で提案した推定モデルで十分対応可能であると思われる。また長期的予測の一つの方法として、現状の休日 OD 交通量が推定されれば、その OD 交通量をもとに平日 OD 交通量の将来予測と同じ手順で将来の休日 OD 交通量が予測可能である。さらに休日断面交通量、あるいは休日平日比の時系列分析から求まるそれぞれの将来予測値を用いて、本手法によ

り将来の休日 OD 交通量の予測も可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 谷口栄一, 安田泰二, 橋口賢治, 中口和巳: 休日観光交通特性と道路計画, 土木計画学研究・講演集, No. 13, pp. 751-758, 1990
- 2) 奥山育英, 高梨 誠: 観光特化型道路における休日交通流現象に関する研究, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, 第4部, pp. 200-201, 1991
- 3) 例えば, 丹野 弘, 舟山義広, 増沢 亨: 休日観光交通に着目した道路整備計画事例, 第18回日本道路会議・特定課題論文集, pp. 300-302, 1989
- 4) 京阪神都市圏パーソントリップ調査委員会: 昭和46年度京阪神都市圏パーソントリップ調査報告書・現況解析編, 1972
- 5) 東駿河湾都市圏総合都市交通計画調査会: 東駿河湾都市圏の人の動き, 1992
- 6) 建設省道路局, 社団法人交通工学研究会: 平成6年度道路交通センサス・一般交通量調査・箇所別基本表, 1995
- 7) 松本幸正, 藤田素弘, 松井寛: 断面交通量に基づく休日OD交通量の推定手法に関する研究, 土木学会論文集, No. 458/IV-18, pp. 7-16, 1993
- 8) 松本幸正, 山本幸司, 松井 寛: 休日OD交通量の簡易推定に関する研究, 第24回日本都市計画学会学術研究論文集, No. 24, pp. 301-306, 1989
- 9) 京阪神都市圏交通計画協議会: 第2回京阪神都市圏物資流動調査・総集編, 1988
- 10) 例えば, 建設省: 平成2年度交通量常時観測調査報告書, 1992
- 11) 佐左木綱: トリップのOD分布を求める確率論的方法, 交通工学, Vol. 2, No. 6, pp. 12-21, 1967
- 12) 井上博司: スクリーンライン調査によるOD調査の精度の検定およびOD表の修正法, 交通工学, Vol. 12, No. 6, pp. 11-19, 1977
- 13) 例えば, 建設省中部地方建設局: 昭和60年度道路交通センサス・自動車起終点調査・車種別OD表, 1986
- 14) 相吉英太郎, 志水清孝: 数理計画法演習, 朝倉書店, 1985
- 15) 嘉納秀明: システムの最適理論と最適化, コロナ社, 1987
- 16) 松本幸正, 松井 寛: 観測交通量に基づく休日OD交通量推定手法に関する一考察, 土木学会中部支部平成元年度研究発表会講演概要集, pp. 370-371, 1989

第3章 断面交通量に基づく時間帯別OD交通量の推定

3.1 概説

交通現象というものは時々刻々と流動する極めて動的なものであり、また曜日や天候、季節などによってもその発生状況は大きく変化する。したがって、道路交通現象の把握には、従来から広く用いられている定常性の仮定をもつ一日単位の静的な交通需要推定手法では十分に適しているとは言い難く、動的交通需要推定手法や少なくとも1時間程度の時間間隔での適用が可能であり、かつ日々の交通需要の変動にも対応が可能な交通需要推定手法の開発が必要である。そこで本章¹⁾では、交通現象の時間変動を考慮した交通運用に欠かすことのできない時間帯別OD交通量を、日単位OD交通量と時間帯別のスクリーンライン断面交通量のデータを用いて推定するための手法を提案する。

本章における時間帯別OD交通量の推定では、交通需要の構造変化やday-to-dayの変動を直接捉えることが可能な観測時間リンク交通量を用いる。観測リンク交通量からは、任意の仮想スクリーンラインの時間断面交通量を求め、その時間断面交通量に基づいた残差平方和最小化手法および同時生起確率最大化手法を用いて短い時間間隔でのOD交通量の推定が可能なモデルを提案する。なお本研究では、入力データとして日OD交通量や日平均旅行時間などの日単位の既知情報をもとに、最小限の時間交通量に関する情報を用いて時間帯別OD交通量を推定するための手法を開発することに主眼を置いており、OD交通量の扱いは基本的には静的な枠組み内での扱いとなる。

はじめに本章第2節において、対象地域に設置したスクリーンライン断面交通量の時間比率を、リンク交通量から算出する方法を説明する。本章における時間帯別OD交通量の推定モデルにおいては、スクリーンライン断面交通量の絶対値は必要なく、各時間帯における断面交通量の時間比率のみが与えられれば適用可能である。したがって、設置したスクリーンライン上に位置する幾つかのリンク交通量の観測値を用いて、スクリーンラインの平均的な時間比率を算出する。時間帯別OD交通量を推定する際には、この算出した時間比率に基づいてスクリーンラインの時間断面交通量を計算し、この値を用いることになる。

第3節においては、算出したスクリーンラインの時間断面交通量と、推定する時間帯別OD交通量によって計算されるスクリーンラインの時間断面交通量の残差平方和が最小になるように、時間帯別OD交通量を推定する方法を提案する。この方法においては、はじめに各OD間のトリップがスクリーンラインを横断する方向を考慮せず、それら両方向のトリップを同一に扱う基本モデルを定式化する。このモデルにおいては、トリップがゾーンを出発してからスクリーンラインを横断するまでの時間差を考慮したモデルとなっている。また時間帯別OD交通量の発生側および集中側の各時間帯における総和が、日単位における発生交通量および集中交通量にそれぞれ一致するような制約条件についても考える。続いて、各トリップがスクリーンラインを横断する方向

を別々に扱う横断方向考慮型モデルについて定式化を行う。このモデルは、基本モデルにおいてスクリーンラインの横断方向を考慮可能なように拡張したモデルである。

第4節においては、算出したスクリーンラインの時間断面交通量と一致する断面交通量を生じるODパターンのうち、同時生起確率が最大になるようなODパターンから時間帯別OD交通量を推定する手法を提案する。この手法においては、トリップが出発してからスクリーンラインを横断するまでの時間は推定単位時間に比べて無視できるほど小さいか、もしくは各OD間においてそれらの値は同一で一定であると仮定するが、本仮定の導入により、簡便で実用的な繰り返し計算によるアルゴリズムを作成することが可能となっている。

第5節において、提案された残差平方和最小化手法に基づく時間帯別のOD交通量の推定モデルと同時生起確率最大化手法に基づく時間帯別のOD交通量の推定モデルを、実際に愛知県豊田市周辺地域において適用する。残差平方和最小化手法に基づくモデルの場合、基本モデルおよび横断方向考慮型モデルの適用計算の他に、対象地域で観測されるリンク交通量には通過交通・域内外交通が含まれるということから、これらの交通をリンク交通量の観測値から除外し、修正したリンク交通量を用いた場合の適用計算も行う。そして各モデルにおける適用計算の結果を比較する。続いて同時生起確率最大化による時間帯別OD交通量の推定モデルの適用計算を行い、残差平方和最小化および同時生起確率最大化によるモデルの適用結果を比較する。最後に第6節において、本章で得られた知見をまとめる。

3.2 スクリーンライン断面交通量の時間比率の算出

対象地域を二分するように数本任意にスクリーンラインを設定するが、そのスクリーンラインによって分割された二つの地域間を通行する交通は、ただ一回のみこのスクリーンラインを横断し、スクリーンラインの同一側に起終点をもつ交通はこのスクリーンラインを横断しないものと仮定する。

ここでリンク番号 l のリンクが、第 k 番目のスクリーンラインを横断するとき 1、それ以外するとき 0 となるダミー変数 δ_{kl} を定義し、観測されている時間リンク交通量を $v_l(t)$ とすると、リンク l の時間比率 $V_l(t)$ は以下のように求められる。

$$V_l(t) = \frac{v_l(t)}{\sum_{t=1}^T v_l(t)} \quad l \in L \quad (3.1)$$

ここで t は時間帯であり、その単位時間を u 、終端時間を T とする。また L は観測されているリンクの集合である。このリンクの時間比率を用いると、第 k 番目のスクリーンラインの時間比率 $F_k(t)$ は

$$F_k(t) = \frac{\sum_{l \in L} \delta_{kl} V_l(t)}{\sum_{l \in L} \delta_{kl}} \quad k \in K \quad (3.2)$$

として求められる。ここで、 K は設定したスクリーンラインの集合である。

以上の式からもわかるようにスクリーンラインの時間比率は、そのスクリーンラインを横断する各リンクの時間比率の平均値であると考えることにより求める。したがって、スクリーンライ

ンを横断するリンク全てを観測する必要はなくなり、またリンク交通量の絶対量が必ずしも必要ではないことがわかる。

3.3 残差平方和最小化手法によるモデルの定式化

本節では残差平方和最小化手法に基づいて時間帯別OD交通量の推定手法の定式化を行っていくが、OD交通量に関しては、単位時間内では一様に分布し、また旅行時間は各時間帯で大きく変化しないものとして考える。推定単位時間間隔は任意に設定可能であるが、前節で述べたように設定した推定単位時間間隔のリンク交通量の観測値、あるいはリンク時間比率の観測値が必要となる。

はじめに、トリップがスクリーンラインを横断する方向を考慮しない基本モデルの定式化を行い、続いてトリップがスクリーンラインを横断する方向を考慮できるように基本モデルを拡張した横断方向考慮型モデルについて定式化を行う。

3.3.1 基本モデルの定式化

本モデルは、3.2節で述べた方法により求めたスクリーンラインの断面交通量時間比率を用いて算出する推定単位時間のスクリーンライン時間断面交通量と、推定時間帯別OD交通量により求められるスクリーンライン時間断面交通量との残差平方和が最小になるように、時間帯別OD交通量を求めるという手法であるが、各トリップがスクリーンラインを横断する方向は考慮しない基本的なモデルとして位置付けられる。

いまゾーン*i* - *j*間の日単位OD交通量を a_{ij} 、*t*時間帯の実績時間帯別OD交通量を $z_{ij}(t)$ 、*t*時間帯の推定時間帯別OD交通量を $x_{ij}(t)$ とし、また日平均ゾーン間旅行時間を τ_{ij} 、ゾーン*i* - *j*間の各ODペアに対する実最短距離を D_{ij} 、ゾーン*i* から *j*へのトリップの際での第*k*番目のスクリーンラインまでの実最短距離を d_{ijk} とするが、時間帯別OD交通量の推定には各距離の絶対値は必要なく、 d_{ijk}/D_{ij} の値のみが必要である。さらにゾーン*i* - *j*間のOD交通が第*k*番目のスクリーンラインを横断するとき1、それ以外るとき0となるようなダミー変数 δ_{ijk} を定義する。

ここでゾーン*i*で発生し、ゾーン*j*へ向かうトリップが第*k*番目のスクリーンラインに到達するまでの時間は、平均的に見て $\tau_{ij} \cdot d_{ijk}/D_{ij}$ であると考えられる。いま推定単位時間は u であるので、 $\tau_{ij} \cdot d_{ijk}/D_{ij}$ が u より大きな場合はトリップの発生時間帯とスクリーンラインを横断する時間帯との間に時間差が生じる。この時間差を以下に定義する η_{ijk} で表現する。

$$\eta_{ijk} \equiv \text{int} \left[\frac{\tau_{ij} \cdot d_{ijk}/D_{ij}}{u} \right] \quad (3.3)$$

すなわち η_{ijk} の値は、[]内の値を切り捨て整数化した値である。この式からわかるように、時間差が設定単位時間 u より短い場合には η_{ijk} はもちろん0であり、この η_{ijk} を用いると *t*時間帯に第*k*番目のスクリーンラインを横断可能なゾーン*i* - *j*間のOD交通は $t - \eta_{ijk} - 1$ から $t - \eta_{ijk}$ の時間帯にゾーン*i*を出発したOD交通であると考えられる。つまり *t*時間帯に第*k*番目のスクリーンラ

インを横断可能な OD 交通量 $Y_{ijk}(t)$ は

$$Y_{ijk}(t) = \left(\frac{\tau_{ij} \cdot d_{ijk}/D_{ij}}{u} - \eta_{ijk} \right) x_{ij}(t - \eta_{ijk} - 1) + \left(\eta_{ijk} + 1 - \frac{\tau_{ij} \cdot d_{ijk}/D_{ij}}{u} \right) x_{ij}(t - \eta_{ijk})$$

$$k \in K, i, j \in \Omega \quad (3.4)$$

$$= (\gamma_{ijk} - \eta_{ijk}) x_{ij}(t - \eta_{ijk} - 1) + (\eta_{ijk} + 1 - \gamma_{ijk}) x_{ij}(t - \eta_{ijk})$$

$$k \in K, i, j \in \Omega \quad (3.5)$$

となる。ここで Ω は OD ペア $i-j$ の集合を表し、 γ_{ijk} は以下のものである。

$$\gamma_{ijk} \equiv \frac{\tau_{ij} \cdot d_{ijk}/D_{ij}}{u} \quad (3.6)$$

次に第 k 番目のスクリーンラインの時間断面交通量 $s_k(t)$ を先に式 (3.2) で示した第 k 番目のスクリーンラインの断面交通量時間比率 $F_k(t)$ 、日 OD 交通量 a_{ij} などを用いて表すと以下のようになる。

$$s_k(t) = F_k(t) \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \delta_{ijk} a_{ij} \quad k \in K \quad (3.7)$$

ここで I は発生ゾーンの集合、 J は集中ゾーンの集合を表す。

この $s_k(t)$ と式 (3.5) に示した $Y_{ijk}(t)$ による断面交通量は一致しなければならないことから

$$s_k(t) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \delta_{ijk} \{ (\gamma_{ijk} - \eta_{ijk}) x_{ij}(t - \eta_{ijk} - 1) + (\eta_{ijk} + 1 - \gamma_{ijk}) x_{ij}(t - \eta_{ijk}) \} \quad k \in K \quad (3.8)$$

という関係が成立し、この両辺の残差平方和をとり各時間、各スクリーンラインで総和すると

$$Q = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{k \in K} \left[\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \delta_{ijk} \{ (\gamma_{ijk} - \eta_{ijk}) x_{ij}(t - \eta_{ijk} - 1) + (\eta_{ijk} + 1 - \gamma_{ijk}) x_{ij}(t - \eta_{ijk}) \} - s_k(t) \right]^2 \right] \quad (3.9)$$

が導かれる。そしてこの Q が最小となるような $x_{ij}(t)$ が推定時間帯別 OD 交通量ということになる。またどのスクリーンラインも横切らない OD 交通量は、その値自体は目的関数に何ら影響を与えないので推定することができない。そこで $x_{ij}(t)$ を日 OD 交通量 a_{ij} と発生側パラメータ $\alpha_i(t)$ 、集中側パラメータ $\beta_j(t)$ を用いて

$$x_{ij}(t) = \frac{\alpha_i(t) + \beta_j(t)}{2} a_{ij} \quad i, j \in \Omega \quad (3.10)$$

と表せられると考え、この $x_{ij}(t)$ を式 (3.9) に代入し、非線形最適化計算手法^{4),5)}を用いて時間帯別 OD 交通量を推定する。さらに以下の制約条件をつけ加えた場合も考える。なお制約条件-0 は、無制約とする。

制約条件-1:

$$\sum_{j \in J} a_{ij} = \sum_{t=1}^T \sum_{j \in J} x_{ij}(t) \quad i \in I \quad (3.11)$$

$$\sum_{i \in I} a_{ij} = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in I} x_{ij}(t) \quad j \in J \quad (3.12)$$

制約条件 (3.11) は、日単位の発生交通量と推定時間帯別 OD 交通量の発生交通量の合計が等しいことを意味し、式 (3.12) は同様に集中側での合計が等しいことを意味している。

3.3.2 横断方向を考慮したモデルの定式化

本モデルは先に提案した時間帯別OD交通量推定の基本モデルを、各トリップがスクリーンラインを横断する方向を考慮可能なように拡張したモデルである。日単位におけるスクリーンライン断面交通量には、通勤・通学トリップなどとそれらと逆方向になる帰宅トリップの両方向のトリップが含まれることから、横断する方向による断面交通量の大きな差異はないと考えられる。しかしながら、短い時間間隔における断面交通量を考えた場合には、その両者のトリップの含まれる時間帯が異なり、特に朝夕の時間帯においてはスクリーンラインを横断する方向による断面交通量の差異が大きくなると考えられる。

このスクリーンラインを横断する方向を考慮したモデルは、その方向を考慮しない基本モデルと基本的な考え方に相違はないが、リンク交通量の観測値を上り・下り車線別々に観測する必要がある。またスクリーンライン、OD交通量に関する仮定は横断方向を考慮しないモデルと同様とし、同じ記号は同じ意味であるとする。ここで数本任意に設定したスクリーンラインにその横断方向 n という新たな次元をつけ加える。この横断方向 n は任意に設定する。また n はその方向により1か2の値をとり、それぞれ方向1、方向2とする。ここでリンク番号 l 、観測車線方向 m ($m=1$ の時上り車線、 $m=2$ の時下り車線)のリンクが第 k 番目のスクリーンラインを方向 n から横断するとき1、それ以外のとき0となるダミー変数 δ_{klmn} を定義し、観測されている上り・下り車線の時間リンク交通量を $\tilde{v}_{lm}(t)$ とすると、第 k 番目のスクリーンラインの方向 n の時間比率 $\tilde{F}_{kn}(t)$ は

$$\tilde{F}_{kn}(t) = \frac{\sum_{l \in L} \sum_{m \in M} \delta_{klmn} \tilde{V}_{lm}(t)}{\sum_{l \in L} \sum_{m \in M} \delta_{klmn}} \quad n = 1, 2, k \in K \quad (3.13)$$

となる。ここで

$$\tilde{V}_{lm}(t) = \frac{\tilde{v}_{lm}(t)}{\sum_{t=1}^T \tilde{v}_{lm}(t)} \quad m = 1, 2, l \in L \quad (3.14)$$

である。またゾーン i から j へのトリップの際での第 k 番目のスクリーンラインの方向 n までの相対距離を \tilde{d}_{ijkn} とし、ゾーン $i-j$ 間のOD交通が第 k 番目のスクリーンラインを方向 n から横断する時1、それ以外のときは0となるようなダミー変数 $\tilde{\delta}_{ijkn}$ を定義する。ここでゾーン i で発生し、ゾーン j へ向かうトリップが方向 n から第 k 番目のスクリーンラインまでに到達するまでの時間は、平均的に見て $\tau_{ij} \cdot \tilde{d}_{ijkn} / D_{ij}$ であると考えられ、先ほどと同様に $\tilde{\eta}_{ijkn}$ を以下のように定義する。

$$\tilde{\eta}_{ijkn} \equiv \text{int} \left[\frac{\tau_{ij} \cdot \tilde{d}_{ijkn} / D_{ij}}{u} \right] \quad (3.15)$$

また t 時間帯に第 k 番目のスクリーンラインを方向 n から横断可能なOD交通量 $\tilde{Y}_{ijkn}(t)$ は、その時間差を考慮し

$$\begin{aligned} \tilde{Y}_{ijkn}(t) &= (\tilde{\gamma}_{ijkn} - \tilde{\eta}_{ijkn}) x_{ij}(t - \tilde{\eta}_{ijkn} - 1) + (\tilde{\eta}_{ijkn} + 1 - \tilde{\gamma}_{ijkn}) x_{ij}(t - \tilde{\eta}_{ijkn}) \\ &n = 1, 2, k \in K, i, j \in \Omega \end{aligned} \quad (3.16)$$

となる。ここで

$$\tilde{\gamma}_{ijkn} \equiv \frac{\tau_{ij} \cdot \bar{d}_{ijkn} / D_{ij}}{u} \quad (3.17)$$

である。次に第 k 番目のスクリーンラインの方向別時間断面交通量 $\tilde{s}_{kn}(t)$ を $\tilde{F}_{kn}(t)$ を用いて表すと以下のようになる。

$$\tilde{s}_{kn}(t) = \tilde{F}_{kn}(t) \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \bar{d}_{ijkn} a_{ij} \quad n = 1, 2, k \in K \quad (3.18)$$

この $\tilde{s}_{kn}(t)$ と $\tilde{Y}_{ijkn}(t)$ による断面交通量は一致しなければならないことから、基本モデルと同様にそれらの両辺の残差平方和をとり、各時間、各スクリーンラインで総和し

$$\begin{aligned} \tilde{Q} = & \sum_{t=1}^T \left[\sum_{k \in K} \sum_{n=1}^2 \left[\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \bar{d}_{ijkn} \{ (\tilde{\gamma}_{ijkn} - \tilde{\eta}_{ijkn}) x_{ij}(t - \tilde{\eta}_{ijkn} - 1) \right. \right. \\ & \left. \left. + (\tilde{\eta}_{ijkn} + 1 - \tilde{\gamma}_{ijkn}) x_{ij}(t - \tilde{\eta}_{ijkn}) \} - \tilde{s}_{kn}(t) \right]^2 \right] \quad (3.19) \end{aligned}$$

が導かれ、この \tilde{Q} が最小となるような $x_{ij}(t)$ が推定時間帯別 OD 交通量ということになる。また $x_{ij}(t)$ は横断方向を考えない基本モデルの場合と同様のモデル形式とし、制約条件も同様とする。

3.4 同時生起確率最大化手法によるモデルの定式化

同時生起確率最大化手法による時間帯別 OD 交通量の推定モデルの定式化においても、前節で示した残差平方和最小化手法に基づくモデルの定式化の際に用いた仮定は成立するものとし、また同じ記号は同じものを意味しているものとする。同時生起確率最大化手法によるモデルの定式化は、各スクリーンラインでの時間断面交通量に一致する断面交通量を生じる OD パターンのうちで、確率的に見て最も起こりやすい OD パターンを求めるという方法である。

本手法では、繰り返し計算によって簡便に時間帯別 OD 交通量を推定する方法を採用する。したがって、1つの推定単位時間におけるスクリーンライン断面交通量は、1つの時間帯の OD 交通量のみで表現されなければならない。隣り合う2つ以上の時間帯の OD 交通量を用いて関係式を定式化した場合には、繰り返し計算を用いた簡便な計算が不可能となる。残差平方和最小化によるモデルの定式化においては、スクリーンラインを通過する時間を基準とした OD 交通量と断面交通量の関係式の定式化を行ったが、ここではトリップの出発時間を基準にした関係式の定式化を行い、1つの時間帯の OD 交通量を用いてスクリーンライン断面交通量を表すことを考える。OD 間トリップの出発時間を基準にした関係式の定式化のため、トリップが出発してからスクリーンラインを横断するまでの時間は、設定した推定単位時間に比べて無視できるほど小さいか、もしくは各 OD ペア間においてほぼ等しい値であると仮定する。

3.4.1 モデルの定式化

日単位の OD ペア $i-j$ に関する OD 交通量を日 OD 交通量の総和で除したものをゾーン $i-j$ 間の日単位の OD 生起確率であると考え。すなわち、ある日単位の OD トリップがゾーン $i-j$ 間

の日ODをもつ生起確率 p_{ij} は

$$p_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} a_{ij}} \quad i, j \in \Omega \quad (3.20)$$

となる。この日単位のOD生起確率は、日OD表が与えられているため既知である。

次に推定時間帯別OD交通量の総和を X とすると

$$X = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij}(t) \quad (3.21)$$

であり、あるOD表が得られる同時生起確率 \mathcal{P} は、時間帯別OD交通量の先験確率を $v_{ij}(t)$ とすると

$$\mathcal{P} = \frac{X!}{\prod_{t=1}^T \prod_{i \in I} \prod_{j \in J} x_{ij}(t)!} \prod_{t=1}^T \prod_{i \in I} \prod_{j \in J} v_{ij}(t)^{x_{ij}(t)} \quad (3.22)$$

で定義される。この同時生起確率 \mathcal{P} が最大となるような $v_{ij}(t)$ 、すなわち $x_{ij}(t)$ を求めれば良い。そこで両辺の対数を取り、 $x_{ij}(t) \gg 1$ と仮定してスターリングの公式を用い、 X は式(3.21)で表されることを考慮すると

$$\log \mathcal{P} = X \log X - X - \sum_{t=1}^T \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (x_{ij}(t) \log x_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij}(t) \log v_{ij}(t) \quad (3.23)$$

$$= X \log X - \sum_{t=1}^T \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij}(t) \log x_{ij}(t) + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij}(t) \log v_{ij}(t) \quad (3.24)$$

のようになる。ここで、各スクリーンラインでの推定時間帯別OD交通量が観測断面交通量に一致しなければならないので、以下の関係を満足しなければならない。

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \delta_{ijk} x_{ij}(t) = s_k(t) \quad k \in K \quad (3.25)$$

ただしこれは、冒頭でも述べたように、各スクリーンラインを横断するまでの所用時間については、無視できる場合のものである。各スクリーンラインまでの所用時間が各ODペア間でほぼ一定値と見なせる場合には、各スクリーンラインまでの所要時間に応じて断面交通量を補正すれば良い。すなわち第 k 番目のスクリーンラインに対する所用時間による補正係数を ν_k とすれば

$$\nu_k = \bar{\gamma}_k - \bar{\eta}_k \quad k \in K \quad (3.26)$$

となる。ここで

$$\bar{\gamma}_k \equiv \frac{1}{\bar{\Omega}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \frac{\tau_{ij} \cdot d_{ijk} / D_{ij}}{u} \quad (3.27)$$

$$\bar{\eta}_k \equiv \text{int} \left[\frac{1}{\bar{\Omega}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \frac{\tau_{ij} \cdot d_{ijk} / D_{ij}}{u} \right] \quad (3.28)$$

であり、 $\bar{\Omega}$ は集合 Ω に含まれる全ODペア数を表す。この補正係数を用いて

$$s_k(t) = (1 - \nu_k)s_k(t + \bar{\eta}_k) + \nu_k s_k(t + \bar{\eta}_k + 1) \quad k \in K \quad (3.29)$$

のように、スクリーンライン断面交通量を補正すれば良いことになる。これは、スクリーンラインの観測時間の基準時間を $\bar{\eta}_k \cdot u$ 時間遅らせることに相当する。

式(3.25)のもとで式(3.24)の $\log \mathcal{P}$ を最大にするためにラグランジェの未定乗数法を用いる。式(3.25)に対するラグランジェの未定乗数を $\lambda_k(t)$ とするとラグランジェ関数は以下のように表せられる。

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & X \log X - \sum_{t=1}^T \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij}(t) \log x_{ij}(t) + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij}(t) \log v_{ij}(t) \\ & + \sum_{t=1}^T \lambda_k(t) \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \delta_{ijk} x_{ij}(t) - s_k(t) \right) \end{aligned} \quad (3.30)$$

このラグランジェ関数 \mathcal{L} を $x_{ij}(t)$ 、 $\lambda_k(t)$ で偏微分して0と置くと

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_{ij}(t)} = \log X - \log x_{ij}(t) + \log v_{ij}(t) + \sum_{k \in K} \lambda_k(t) \delta_{ijk} = 0 \quad i, j \in \Omega \quad (3.31)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_k(t)} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \delta_{ijk} x_{ij}(t) - s_k(t) = 0 \quad k \in K \quad (3.32)$$

となり、式(3.31)より

$$x_{ij}(t) = X v_{ij}(t) e^{\sum_{k \in K} \lambda_k(t) \delta_{ijk}} \quad i, j \in \Omega \quad (3.33)$$

を得る。また式(3.32)に式(3.33)の $x_{ij}(t)$ を代入し

$$X \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \delta_{ijk} v_{ij}(t) e^{\sum_{k \in K} \lambda_k(t) \delta_{ijk}} = s_k(t) \quad k \in K \quad (3.34)$$

となり、この式から

$$\lambda_k(t) = \log \frac{s_k(t)}{X \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \delta_{ijk} v_{ij}(t) e^{\sum_{\bar{k} \neq k} \lambda_{\bar{k}}(t) \delta_{ij\bar{k}}}} \quad k \in K \quad (3.35)$$

を得る。

ここで、式(3.20)の日OD表から得られる p_{ij} を用いて $v_{ij}(t)$ を表すモデルを以下のように考える。

$$v_{ij}(t) = \zeta \frac{\alpha_i(t) + \beta_j(t)}{2} p_{ij} \quad i, j \in \Omega \quad (3.36)$$

ここで、 $v_{ij}(t)$ は各OD間の先験確率であるので

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} v_{ij}(t) = 1 \quad (3.37)$$

でなければならない。

次に、 $\alpha_i(t)$, $\beta_j(t)$ などを表す式を導くために、式(3.36)の $v_{ij}(t)$ を式(3.33)へ代入し、両辺の集中側での和をとると

$$\alpha_i(t) = \frac{2X \sum_{j \in J} x_{ij}(t) - \zeta \sum_{j \in J} \beta_j(t) p_{ij} e^{k \in K} \sum \lambda_k(t) \delta_{ijk}}{X \zeta \sum_{j \in J} p_{ij} e^{k \in K} \sum \lambda_k(t) \delta_{ijk}} \quad i \in I \quad (3.38)$$

を得る。同様に発生側での和をとると

$$\beta_j(t) = \frac{2X \sum_{i \in I} x_{ij}(t) - \zeta \sum_{i \in I} \alpha_i(t) p_{ij} e^{k \in K} \sum \lambda_k(t) \delta_{ijk}}{X \zeta \sum_{i \in I} p_{ij} e^{k \in K} \sum \lambda_k(t) \delta_{ijk}} \quad j \in J \quad (3.39)$$

を得る。また式(3.37)に式(3.36)を代入すると以下の式が導かれる。

$$\zeta = \frac{2}{T \sum_{t=1} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (\alpha_i(t) + \beta_j(t)) p_{ij}} \quad (3.40)$$

3.4.2 計算手順

前項で展開した式より、同時生起確率最大化手法に基づいて時間帯別OD交通量を推定するための繰り返し計算の手順は以下ようになる。

step0 初期化する。すなわち $\alpha_i^{(0)}(t)$, $\beta_j^{(0)}(t)$, $\zeta^{(0)}$, $X^{(0)}$ に任意の値を与え、 $\lambda_k^{(0)}(t) = 0$ とし、 $m = 0$ とする。

step1 時間帯別OD交通量をすべてのODペアについて求める。

$$x_{ij}^{(m+1)}(t) = X^{(m)} \zeta^{(m)} \frac{\alpha_i^{(m)}(t) + \beta_j^{(m)}(t)}{2} p_{ij} e^{k \in K} \sum \lambda_k^{(m)}(t) \delta_{ijk}$$

step2 収束判定。すなわちもし $\max \{ |x_{ij}^{(m+1)}(t) - x_{ij}^{(m)}(t)| / x_{ij}^{(m)}(t) \} < \varepsilon$ ならば計算を終了し、そうでなければ次のstepへ。ただし ε は十分小さな正数である。

step3 時間帯別OD交通量の総和を計算する。

$$X^{(m+1)} = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij}^{(m+1)}(t)$$

step4 ラグランジェ乗数 $\lambda_k(t)$ を更新する。

$$\lambda_k^{(m+1)}(t) = \log \frac{s_k(t)}{X^{(m+1)} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \delta_{ijk} \zeta^{(m)} \frac{\alpha_i^{(m)}(t) + \beta_j^{(m)}(t)}{2} p_{ij} e^{k \neq \bar{k}} \sum \lambda_{\bar{k}}^{(m)}(t) \delta_{ij\bar{k}}}$$

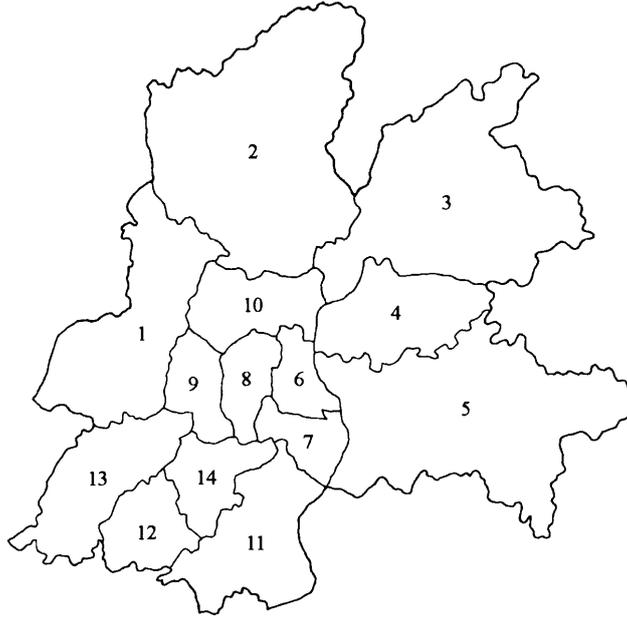


図-3.1 豊田市周辺地域のゾーニング図

step5 $\alpha_i(t)$, $\beta_j(t)$ の値を更新する.

$$\alpha_i^{(m+1)}(t) = \frac{2 \sum_{j \in J} x_{ij}^{(m+1)}(t) X^{(m+1)} - \zeta^{(m)} \sum_{j \in J} \beta_j^{(m)}(t) p_{ij} e^{k \in K} \sum_{k \in K} \lambda_k^{(m+1)}(t) \delta_{ijk}}{X^{(m+1)} \zeta^{(m)} \sum_{j \in J} p_{ij} e^{k \in K} \sum_{k \in K} \lambda_k^{(m+1)}(t) \delta_{ijk}}$$

$$\beta_j^{(m+1)}(t) = \frac{2 \sum_{i \in I} x_{ij}^{(m+1)}(t) X^{(m+1)} - \zeta^{(m)} \sum_{i \in I} \alpha_i^{(m)}(t) p_{ij} e^{k \in K} \sum_{k \in K} \lambda_k^{(m+1)}(t) \delta_{ijk}}{X^{(m+1)} \zeta^{(m)} \sum_{i \in I} p_{ij} e^{k \in K} \sum_{k \in K} \lambda_k^{(m+1)}(t) \delta_{ijk}}$$

step6 ζ の値を更新し, $m = m + 1$ として step1 へ.

$$\zeta^{(m+1)} = \frac{2}{\sum_{t=1}^T \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (\alpha_i^{(m+1)}(t) + \beta_j^{(m+1)}(t)) p_{ij}}$$

3.5 適用事例

スクリーンライン断面交通量に基づいた時間帯別OD交通量の推定モデルを実際に図-3.1に示した豊田市周辺地域において適用し, モデルの妥当性や有用性について検証する. 本提案モデルは任意時間間隔のOD交通量の推定が可能であるが, その時間間隔でのリンク交通量の観測値あるいはリンク交通量の時間比率が必要である. そこで本適用事例では昭和55年度道路交通センサス²⁾によって得られたリンク交通量のデータを用いて適用計算を行うこととし, 推定時間間隔は

表-3.1 各パターンのスクリーンラインの設定状況

	パターン1	パターン2	パターン3	パターン4	パターン5
設定本数	2	3	4	3	4
横断ペア延べ数	146	190	142	183	189
平均地点数	3.5	3.7	2.8	3.7	3.3

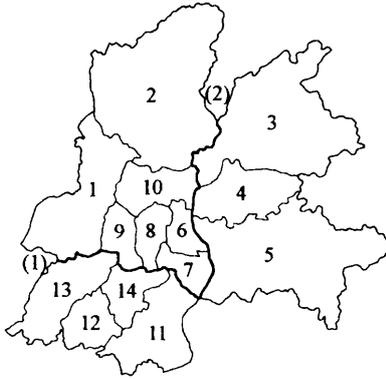


図-3.2 パターン1のスクリーンライン位置



図-3.3 パターン2のスクリーンライン位置



図-3.4 パターン3のスクリーンライン位置

60分間に設定した。また日OD交通量や適合度検定に用いる実績時間帯別OD交通量のデータは、昭和56年度に実施された第2回中京都市圏パーソントリップ調査³⁾により集計されたデータを用い、時間帯別OD交通量は発地ベースの集計値とした。なお得られるリンク交通量の都合上、本適用事例では昼間12時間のみを対象とし、日単位OD交通量は昼間12時間OD交通量とする。

本適用事例においては、スクリーンラインの設定は任意に5パターンを考え、各パターンごとのスクリーンラインの設定本数、スクリーンラインを横切るODペアの延べ数およびスクリーンライン1本あたりの平均観測リンク地点数を表-3.1に示す。なおODペア延べ数は重複するODペアを含んでいる。各パターンごとのスクリーンライン設定状況は、図-3.2から図-3.6に示してある。

推定結果の適合度検定には、実績値と推定値の全時間帯の相関係数、各時間帯ごとの相関係数、全時間帯のRMS誤差、各時間帯ごとのRMS誤差および以下に示す全時間帯の合計比、各時間帯ごとの合計比を用いて行ったが、本研究では各ODトリップのスクリーンライン横断の有無に関わらず全OD交通量を推定することを目的とするため、全ODペアを対象に検定を行った。

$$\text{全時間帯の合計比} = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij}(t)}{\sum_{t=1}^T \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} z_{ij}(t)} \quad (3.41)$$

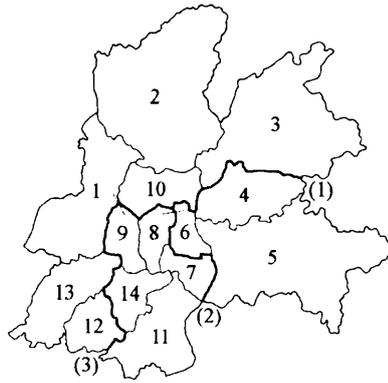


図-3.5 パターン4のスクリーンライン位置

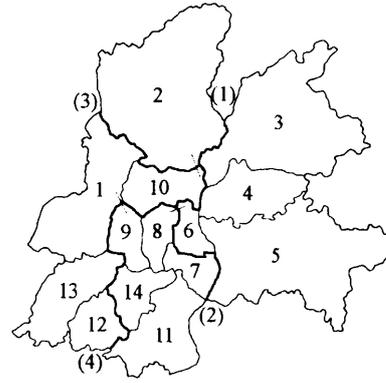


図-3.6 パターン5のスクリーンライン位置

$$\text{各時間帯ごとの合計比} = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij}(t)}{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} z_{ij}(t)} \quad (3.42)$$

3.5.1 残差平方和最小化モデルの適用結果

ここでは残差平方和最小化手法に基づく時間帯別OD交通量の推定モデルの基本モデルと、スクリーンラインを横断する方向を考慮可能な横断方向考慮型モデルについて、実際に図-3.2から図-3.6に示した豊田市周辺地域において適用する。またリンク交通量の観測値には内外交通・通過交通などが含まれているということから、リンク交通量観測値から内外交通や通過交通に相当する分を減じた値を用いた適用事例についても述べる。はじめに基本モデルにおける適用結果、次に横断方向考慮型モデルにおける適用結果について考察し、続いてリンク交通量に含まれる内外交通・通過交通を除外したリンク修正モデルにおける適用結果について考察する。さらにこれら各モデルの適用結果を比較・検討する。

(1) 基本モデル

表-3.2はパターン3、制約条件-1における推定値と実績値の各時間帯ごとの各適合度指標を示してあり、この表から各時間帯で高い相関性を有していることがわかるが、18時台と特に7時台の相関性はほかの時間帯に比べて劣っていることがわかる。このことは本研究で提案した残差平方和最小化モデルにおいては、各OD間トリップのスクリーンラインまでの所要時間をモデルに組み込んだために、トリップの発生時間帯とスクリーンラインを横断する時間帯との間に時間差が生じ、1つの時間帯のOD交通量が2つの隣り合った時間帯の目的関数に組み込まれているが、本適用事例においては6時台以前、19時台以降のデータを与件としなかったためにこのように推定時間帯の両端の7時台、18時台では低い相関性を示すこととなってしまったものと思われる。しかしながらその他の時間帯においては十分に高い相関性を有していることがわかる。

次にRMS誤差の値を見てみると、交通量の多い朝夕の時間帯において大きめの値を示し、逆に

表-3.2 基本モデルにおける実績値と推定値の各適合度指標(パターン3:制約条件-1)

時間帯	相関係数	RMS 誤差	合計比
7	0.7530	196	0.8338
8	0.9606	119	0.7947
9	0.9587	39	1.0946
10	0.9219	60	1.2848
11	0.9518	44	1.1340
12	0.9710	48	1.0576
13	0.9501	49	1.3726
14	0.9424	46	1.2584
15	0.9540	45	1.3210
16	0.9482	44	1.1634
17	0.9399	93	0.9181
18	0.8370	104	0.7537
平均	0.9241	74	1.0822
レンジ	0.2179	157	0.6189

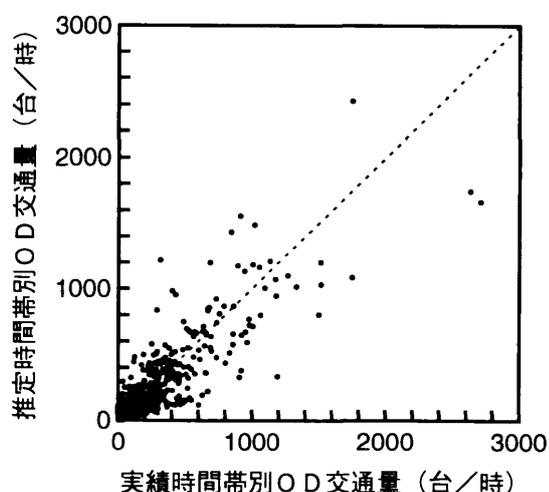


図-3.7 時間帯別OD交通量の実績値と推定値の散布図(基本モデル:制約条件-0,パターン3)

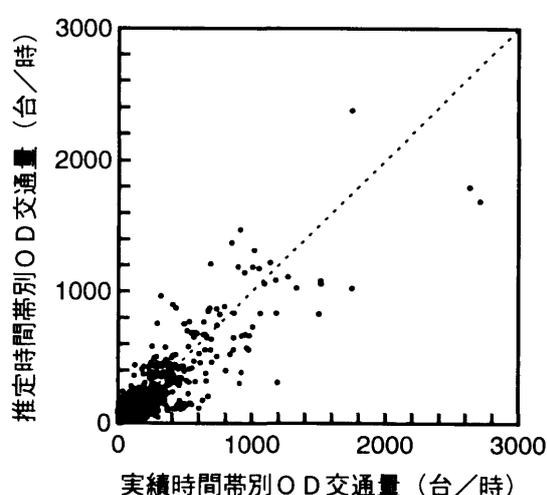


図-3.8 時間帯別OD交通量の実績値と推定値の散布図(基本モデル:制約条件-1,パターン3)

交通量の少ない昼間の時間帯に小さめの値を示していることから、RMS 誤差の値は交通量の絶対値に比例していることがわかるが、やはり推定時間帯の両端の時間帯の値が相対的に大きくなっていることがわかる。また合計比の値は朝夕で小さめの値を示し、昼間に大きめの値を示していることがわかるが、これは先に述べた理由により、朝夕の時間帯が過小推定されたことの相対的なものと、推定時間昼間にはODペア間の実績OD交通量が0台/時間というトリップが多数出てくるためであると思われる。

図-3.7に制約条件-0におけるパターン3での時間帯別OD交通量の実績値と推定値の全時間帯

表-3.3 横断方向考慮型モデルにおける実績値と推定値の各適合度指標 (パターン3：制約条件-1)

時間帯	相関係数	RMS 誤差	合計比
7	0.7665	190	0.8353
8	0.9715	118	0.7750
9	0.9591	39	1.1086
10	0.9202	60	1.2878
11	0.9525	44	1.1310
12	0.9705	48	1.0634
13	0.9492	50	1.3757
14	0.9417	46	1.2615
15	0.9539	46	1.3246
16	0.9483	44	1.1679
17	0.9472	88	0.9195
18	0.8365	104	0.7543
平均	0.9264	73	1.0837
レンジ	0.2051	151	0.6213

の散布図を、図-3.8に同じく制約条件-1における散布図を示す。プロットされた点を見てみると多少45度線からの乖離はみられるものの、大きくかけ離れた場所にプロットされるような点もなく、全般的にはほぼ妥当な推定結果が得られていることがわかり、また制約条件-0および制約条件-1における推定結果の大きな差異も、この図からのみでは見られない。

(2) 横断方向考慮型モデル

表-3.3は先程と同様にパターン3、制約条件-1における各時間帯ごとの各適合度指標の値を示しているが、横断方向考慮型モデルに関しても推定時間両端の7時台、18時台の相関性が劣っていることがわかる。しかしながらその他の時間帯においては0.9以上の相関性を示しており、基本モデルと比較すると、朝の時間帯の相関性が高くなっていることがわかる。RMS 誤差に関しても特に7時台の値が大きいですが、これは先に述べた理由によるものであり、その他は交通量の絶対量を考えるとほぼ妥当な値であると思われる、また基本モデルと比較すると7、8時台での値が改善されていることがわかる。合計比に関しては朝の過小、夕の過大傾向が大きくは改善されていないと言える。

図-3.9に横断方向考慮型モデルの制約条件-0におけるパターン3での時間帯別OD交通量の実績値と推定値の全時間帯の散布図を、図-3.10に同じく制約条件-1における散布図を示すが、この図からも全般的に妥当な推定結果が得られていることがわかる。

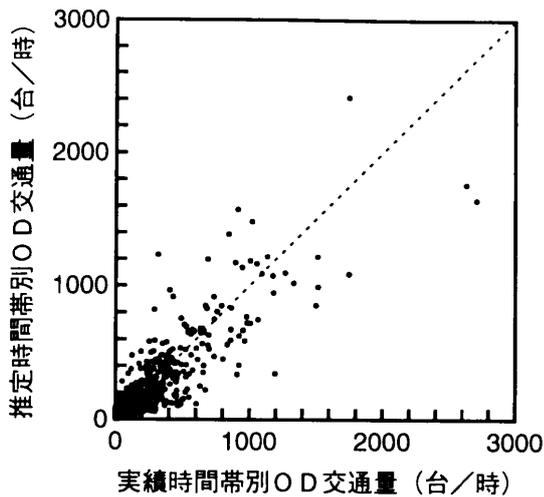


図-3.9 時間帯別OD交通量の実績値と推定値の散布図(横断方向考慮型モデル:制約条件-0,パターン3)

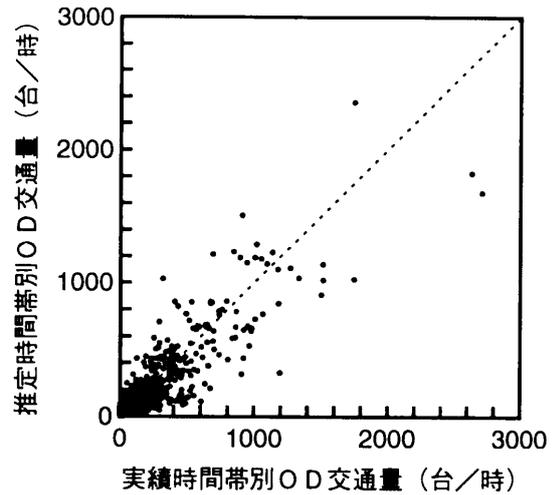


図-3.10 時間帯別OD交通量の実績値と推定値の散布図(横断方向考慮型モデル:制約条件-1,パターン3)

(3) リンク交通量の修正

基本モデル、横断方向考慮型モデルの適用事例では、道路交通センサスによって得られたリンク交通量のデータをそのまま用いた。しかしながらリンク交通量の観測値にはそのリンク上を通過するすべてのトリップが含まれ、その中には本提案モデルでは扱っていない通過交通、域内外交通も観測値に含まれる。そこでここではリンク交通量から通過交通、域内外交通を削除した場合の適用事例について述べる。

観測リンク交通量から対象地域内のみの交通量を取り出すには、各リンク、各観測車線ごとにそれぞれ通過交通率、ゾーン域内外率などを求めることができればより正確ではあるが、これらの値を観測もしくは推定する事は非常に困難である。そこで本研究では表-3.4に示した各時間帯ごとのリンク交通量補正係数をすべてのリンクに一律に乘以、補正したものをを用いて計算を行った。この補正係数は、第2回中京都市圏パーソントリップ調査により集計されたデータを用い、本適用事例の対象地域全域のトリップを域内々トリップ、域内外トリップ、通過トリップに分類し、それらの分類されたデータから域内々トリップ率を求め、それを補正係数とした。この値は、豊田市周辺地域の平均的な時間帯別内々トリップ率であると考えられる。なおモデルは横断方向考慮型モデルを用いて適用計算を行ったが、これをリンク修正モデルと呼ぶ。

表-3.5にパターン3、制約条件-1における推定結果を示すが、全般的な傾向はこれまでと同様で、推定時間両端の7時台、18時台での相関性、RMS誤差、合計比の値が劣り、逆に昼間の時間帯で相関性が高く、RMS誤差の値が小さくなっている。また朝夕の過小推定、昼間の過大推定の傾向も同様である。リンク交通量を修正しなかった基本モデル、横断方向考慮型モデルの推定結果と比較すると相関係数、RMS誤差、合計比の値は、全般に良くなっていることがわかる。特に推定時間両端の推定結果が改善されており、その他の時間帯についても十分有意に推定されていることがわかる。

表-3.5 リンク修正モデルにおける実績値と推定値の各適合度指標(パターン3:制約条件-1)

表-3.4 リンク交通量補正係数

時間帯	補正係数
7	0.6252
8	0.7018
9	0.6324
10	0.6429
11	0.6855
12	0.7300
13	0.6401
14	0.6550
15	0.6370
16	0.5858
17	0.6499
18	0.6883

時間帯	相関係数	RMS 誤差	合計比
7	0.7675	188	0.7874
8	0.9685	103	0.8617
9	0.9542	40	1.0197
10	0.9211	59	1.2806
11	0.9523	44	1.1948
12	0.9707	42	1.1965
13	0.9479	46	1.3091
14	0.9426	46	1.2759
15	0.9533	43	1.2766
16	0.9462	40	1.0270
17	0.9465	88	0.9249
18	0.8368	103	0.7990
平均	0.9256	70	1.0794
レンジ	0.2032	148	0.5217

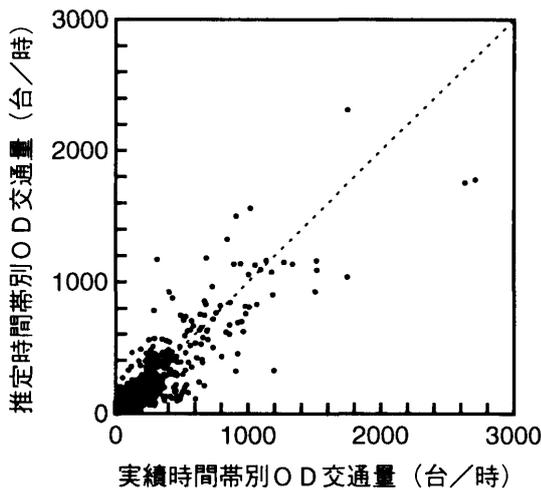


図-3.11 時間帯別OD交通量の実績値と推定値の散布図(リンク修正モデル:制約条件-0,パターン3)

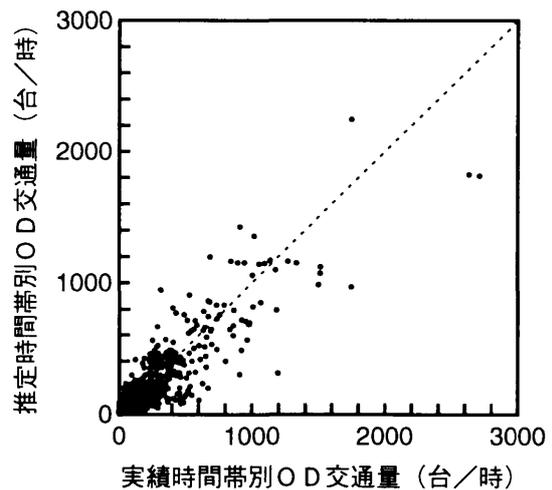


図-3.12 時間帯別OD交通量の実績値と推定値の散布図(リンク修正モデル:制約条件-1,パターン3)

図-3.11にリンク修正モデルの制約条件-0におけるパターン3での時間帯別OD交通量の実績値と推定値の全時間帯の散布図を、図-3.12に同じく制約条件-1における散布図を示すが、45度線から大きくかけ離れた場所にプロットされているような点もなく、ほぼ妥当な推定値が得られていることが見て取れる。

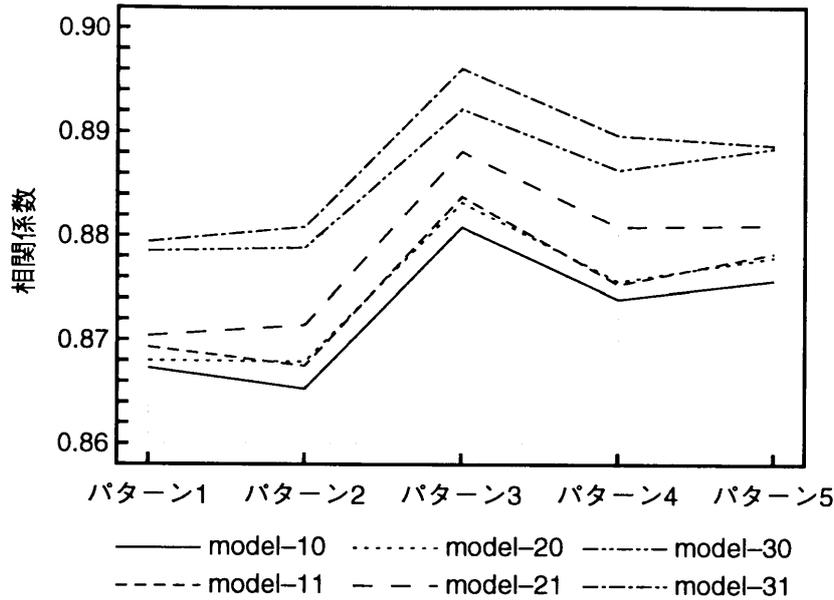


図-3.13 各モデルにおける実績値と推定値の全時間帯相関係数

(4) 各モデルの適用結果の比較

これまで基本モデル，横断方向考慮型モデル，リンク修正モデルの3モデルを実際に豊田市周辺地域において適用計算を行ったが，ここではそれらの推定結果について比較する．なおここでは基本モデルの制約条件-0，制約条件-1をそれぞれmodel-10，model-11とし，横断方向考慮型モデルのそれぞれをmodel-20，model-21，またリンク修正モデルのそれぞれをmodel-30，model-31とする．

図-3.13は，各パターンごとの全時間帯における相関係数を示してあるが，この図から全般に高い相関性を示しており，特に全モデルにおいて式(3.11)，(3.12)で示した制約条件-1における推定結果の方が相関性が優れていることがわかる．また各モデルを比較するとリンク修正モデルの相関性が最も優れ，次いで横断方向考慮型モデル，基本モデルの順に相関性が高いことがわかり，これらの差異は最大で0.015ほどになっていることがわかる．

図-3.14のRMS誤差の値をみてもやはりリンク修正モデル，横断方向考慮型モデル，基本モデルの順に優れており，リンク修正モデルと基本モデルでは平均的に4ポイント，横断方向考慮型モデルとは3ポイントほどRMS誤差の値が向上していることがわかり，リンク交通量の補正の必要性を示す結果となっている．

図-3.15の合計比の値をみると，当然のことながら全モデルにおいて制約条件-1における合計比の値はすべて1.0となっている．制約条件-0における値は，相関係数，RMS誤差とは逆にリンク修正モデルがわずかながら大きな値を示しているが，その差は0.02しかなく，全モデルにおいて制約条件-0の合計比の値は最大1.016程度であることがわかる．その結果として本適用事例においては制約条件-0と制約条件-1の両者の推定結果に大きな違いが見られなかったと考えられる．

次に，スクリーンラインの設定状況の差異による各パターンごとの推定結果を比較してみると，

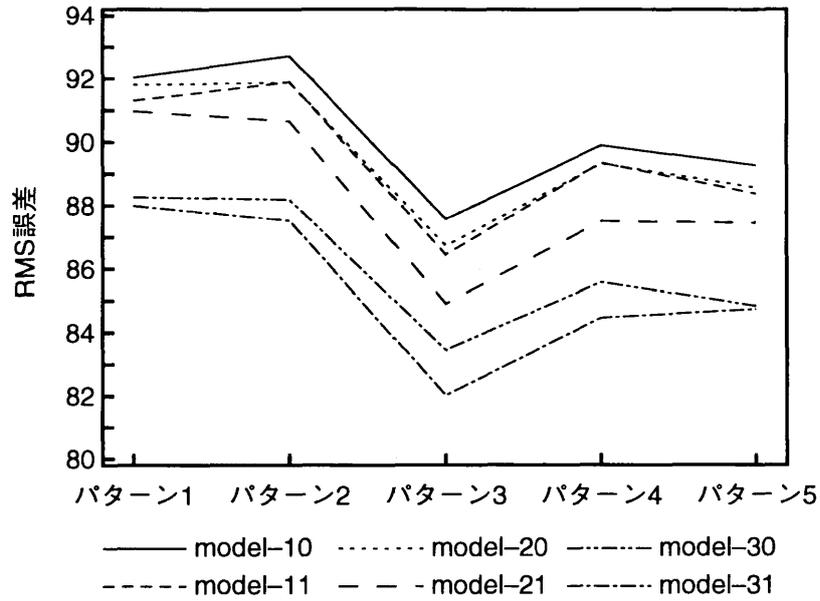


図-3.14 各モデルにおける実績値と推定値の全時間帯 RMS 誤差

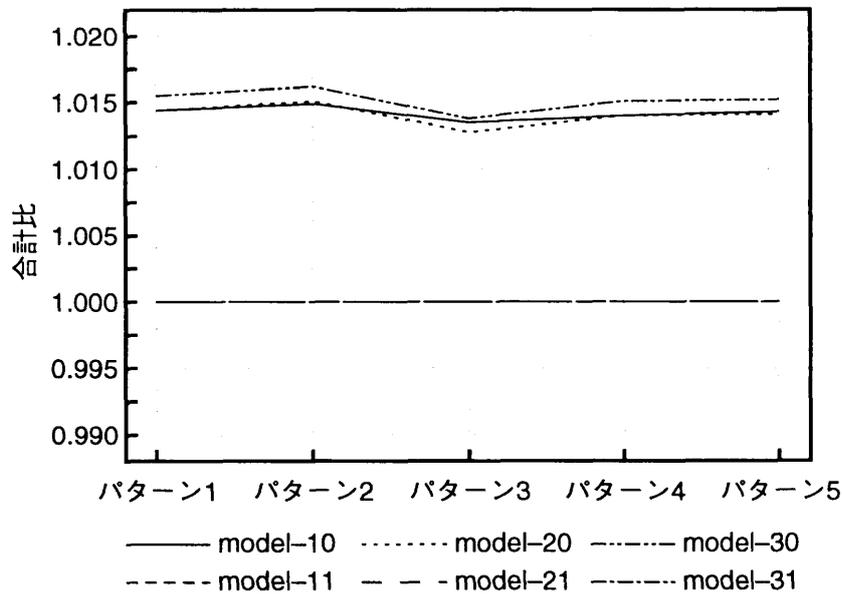


図-3.15 各モデルにおける実績値と推定値の全時間帯合計比

相関係数，RMS 誤差，合計比とも全モデルにおいてパターン3における推定結果が最も優れ，次いでパターン4か5が優れている．このことは，対象地域を大きく横断または縦断するようなスクリーンラインを設定するよりも，そのスクリーンラインを数本のスクリーンラインに分割するように設定した方が推定結果が良くなることを示している．またパターン1とパターン2およびパターン4とパターン5の推定結果を比較してみる限り，スクリーンラインの設定本数自体は推定結果に大きく影響を及ぼさないことがわかる．

表-3.6 同時生起確率最大化モデルにおける実績値と推定値の全時間帯相関係数

	パターン1	パターン2	パターン3	パターン4	パターン5
7時台	0.7555	0.7560	0.7351	0.7534	0.7514
8時台	0.9756	0.9756	0.9761	0.9772	0.9773
9時台	0.9646	0.9650	0.9626	0.9631	0.9629
10時台	0.9289	0.9283	0.9265	0.9303	0.9300
11時台	0.9510	0.9502	0.9541	0.9515	0.9514
12時台	0.9669	0.9636	0.9597	0.9614	0.9588
13時台	0.9422	0.9417	0.9423	0.9425	0.9423
14時台	0.9544	0.9542	0.9577	0.9613	0.9618
15時台	0.9511	0.9513	0.9539	0.9507	0.9521
16時台	0.9620	0.9621	0.9624	0.9585	0.9589
17時台	0.9435	0.9427	0.9451	0.9466	0.9461
18時台	0.8601	0.8601	0.8545	0.8593	0.8603
平均	0.9296	0.9292	0.9275	0.9296	0.9294
レンジ	0.2201	0.2195	0.2410	0.2238	0.2259

3.5.2 同時生起確率最大化モデルの適用結果

ここでは同時生起確率最大化手法に基づく時間帯別OD交通量推定モデルについて、実際に豊田市周辺地域において適用計算を行う。同時生起確率最大化モデルにおいては、各トリップがスクリーンラインを横断するまでの時間は、推定単位時間に比べて無視できるほど小さいか、各OD間のトリップにおいてはほぼ一定値であると仮定しているため、ここではスクリーンラインを横断するまでの時間を無視して考えることとした。

表-3.6には、時間帯別OD交通量の実績値と推定値の各時間帯別ごとの相関係数を示してある。相関係数は、推定時間帯の両端の時間帯を除いてかなり高い相関性を有していることがわかる。この両端の時間帯の相関性が劣るのは、この同時生起確率最大化モデルにおいてはスクリーンラインまでの所要時間は無視できるものとしてモデルの定式化を行ったが、朝夕のピーク時間帯にはその所要時間が大きく変動し、また渋滞による所要時間の増大によりこの仮定が成り立たなくなっていることによるものであると考えられる。逆に、ピーク時間帯以外においては、所要時間は大きく変動することなく一定値に近いことから、スクリーンラインまでの時間差による断面交通量の計算誤差は、各時間帯でほぼ一定の割合になることから、隣り合う時間帯での誤差が相殺されて、このような結果となったと考えられる。

各パターンごとに相関係数の値を見てみると、その差異は非常に小さく、スクリーンラインの設定の差異による影響は小さいことがわかる。これは各時間帯ごとの相関係数の平均値を見てもわかり、パターン1およびパターン4での値が最も高く、パターン3での値が最も低くなっているが、その差は0.0021と非常に小さく、パターンによる違いが小さいと言える。

次に表-3.7にある各時間帯ごとのOD交通量の実績値と推定値のRMS誤差の値を見てみると、

表-3.7 同時生起確率最大化モデルにおける実績値と推定値の全時間帯 RMS 誤差

	パターン1	パターン2	パターン3	パターン4	パターン5
7時台	193	192	203	193	196
8時台	105	106	110	104	104
9時台	41	39	40	41	43
10時台	60	56	55	60	59
11時台	44	44	42	43	43
12時台	49	47	52	50	48
13時台	50	48	45	50	48
14時台	42	41	42	42	42
15時台	45	44	44	44	51
16時台	37	37	40	39	44
17時台	100	98	99	100	100
18時台	97	97	98	97	97
平均	72	71	72	72	73
レンジ	156	156	163	154	154

朝夕の交通量の絶対値が大きなところで大きな RMS 誤差の値を示しているが、全般的にはほぼ妥当な値であると言える。スクリーンラインの設定の違いによる RMS 誤差の値を見てみると、各時間帯の RMS 誤差の全時間帯における平均値は、相関係数と同様に各パターンごとで大きな差異は見られないと言える。最も値が大きくなっているのがパターン5で、逆に最も値が小さいのがパターン2となっており、その差が約2ポイントと非常に小さいことがわかる。

表-3.8には時間帯別 OD 交通量の実績値と推定値の合計比の値を各時間帯ごとでそれぞれ計算した結果を示してある。全般的には、交通量の多い朝夕の時間帯に過小傾向、交通量の少ない昼間の時間帯で過大傾向となっていることがわかる。このことは先にも述べたように、朝夕の時間帯の過小推定による相対的な影響と、昼間の時間帯には実績 OD 交通量が0台という OD ペアが出現するためによるものであると考えられる。

なお図-3.16に同時生起確率最大化モデルによる実績値と推定値の散布図を示すが、この図からも妥当な推定結果が得られていることがわかる。

3.5.3 残差平方和最小化モデルと同時生起確率最大化モデルの推定結果の比較

これまで残差平方和最小化手法に基づく時間帯別 OD 交通量の推定モデルの適用結果と同時生起確率最大化手法に基づく時間帯別 OD 交通量の推定モデルの適用結果をそれぞれ考察してきたが、本項ではそれら両者の適用結果を比較する。実際には、モデル構築の際の仮定や適用計算に用いるデータの差異から、両者の適用結果を単純に比較することはできないが、ここでは大まかな傾向を分析することとする。比較に用いたのは、残差平方和最小化モデルにおいては、最も推定結果の優れていたリンク修正モデルの制約条件-1の結果とする。

表-3.8 同時生起確率最大化モデルにおける実績値と推定値の全時間帯合計比

	パターン1	パターン2	パターン3	パターン4	パターン5
7時台	0.7032	0.7222	0.8109	0.7083	0.6472
8時台	0.8187	0.8164	0.8132	0.8290	0.8286
9時台	1.2438	1.2275	1.2049	1.2394	1.2611
10時台	1.3243	1.2815	1.2493	1.3175	1.3082
11時台	1.1993	1.1744	1.1115	1.1974	1.1837
12時台	1.0658	1.1104	1.0545	1.0701	1.1232
13時台	1.3639	1.3376	1.2845	1.3685	1.3404
14時台	1.3611	1.3400	1.3470	1.3895	1.3826
15時台	1.3725	1.3605	1.3626	1.3496	1.4314
16時台	1.2111	1.2191	1.2443	1.2134	1.2743
17時台	0.8219	0.8382	0.8331	0.8209	0.8220
18時台	0.8025	0.8027	0.7710	0.7833	0.7978
平均	1.1073	1.1025	1.0906	1.1072	1.1167
レンジ	0.6693	0.6383	0.5916	0.6812	0.7843

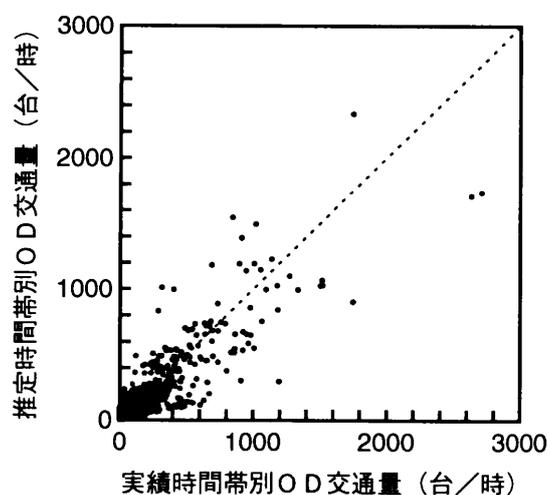


図-3.16 時間帯別OD交通量の実績値と推定値の散布図(同時生起確率最大化モデル:パターン3)

表-3.9に残差平方和最小化手法および同時生起確率最大化手法における時間帯別OD交通量の推定結果の全推定時間帯における相関係数, RMS誤差および合計比の値を示してある。表中, 残差と示してあるのが残差平方和最小化手法に基づくリンク修正モデルの制約条件-1の推定結果を, 同時と示してあるのが同時生起確率最大化モデルの推定結果を意味する。

相関係数の値を見てみると, 両モデルとも全パターンで約0.88以上の高い相関性を有していることがわかり, 両者の差異も大きくないと言える。残差平方和最小化モデルにおいて相関性の低かったパターン1およびパターン2では, 同時生起確率最大化モデルによる結果の方が相関性が高

表-3.9 各手法における実績値と推定値の全時間帯の各適合度指標

	相関係数		RMS 誤差		合計比	
	残差	同時	残差	同時	残差	同時
パターン 1	0.8794	0.8888	88	84	1.0000	1.0000
パターン 2	0.8808	0.8972	88	78	1.0000	1.0257
パターン 3	0.8961	0.8823	82	75	1.0000	1.0464
パターン 4	0.8896	0.8890	84	72	1.0000	1.0242
パターン 5	0.8887	0.8836	85	77	1.0000	0.9450
平均	0.8869	0.8882	85	77	1.0000	1.0083
レンジ	0.0167	0.0149	6	12	1.0000	0.1014

くなっているが、その他のパターンにおいては残差平方和最小化モデルによる結果の方が相関性が優れていることがわかる。

RMS 誤差の値を見てみると、各パターンで同時生起確率最大化モデルの推定結果の方が小さな値を示していることがわかり、その差は最大で12ポイントとなっており、同時生起確率最大化モデルの優位性を示している。

合計比の値は、残差平方和最小化モデルでは制約条件が組み込まれているため1.00の値となっている。同時生起確率最大化モデルにおいては、同様の制約は含まれていないが、全時間帯全OD交通量の総計が変数としてモデルに組み込まれているため、大きな誤差を生じることなくすべて数パーセント以内の誤差となっており、ほぼ妥当な値で推定されていることがわかる。

スクリーンラインの設定の差異による推定結果の違いを見てみると、残差平方和最小化モデルにおいてはパターン3の結果が最も優れ、パターン1もしくはパターン2の推定結果が他のパターンに比べて劣っていた。しかしながら同時生起確率最大化モデルの場合には、同じような傾向は見られず、相関性においてはパターン2の値が最も高く、続いてパターン4、パターン1と続く。同様にRMS 誤差の値は、パターン4での値が最も優れ、パターン3、5と続き、合計比についてはパターン1、パターン4、パターン2の順で優れている。このように同時生起確率最大化モデルの場合には、用いる適合度指標によってパターンごとの推定結果の優劣の順序が変わることがわかるが、全般的にはパターン4、パターン2の結果が優れていると言える。

以上のことから、合計比で残差平方和最小化モデルの推定結果が優れ、RMS 誤差の値で同時生起確率最大化モデルの推定結果の方が優れていることがわかり、相関性においてはパターンにより、モデルによる相関係数の大小は異なることがわかった。しかしながら、相関性や合計比の値の差異は両モデルにおいて大きくなく、全般的には本適用事例における推定結果から判断すると、同時生起確率最大化モデルによる推定結果の方が有意であると言える。これらの結果は、ゾーニングの大きさ、スクリーンラインの位置、推定単位時間の設定等に大きく関係し、本適用事例においてはそれらの設定がどちらかと言えば同時生起確率最大化モデルにおける仮定と一致したため結果ではないかと思われる。

3.6 まとめ

本章では、スクリーンラインの断面交通量に基づいて時間帯別OD交通量を推定する手法を提案した。スクリーンラインの断面交通量は、推定単位時間ごとに集計されている必要があるが、時間帯別OD交通量を推定するためには、その断面交通量の絶対値は必要なく、断面交通量の時間比率のみが必要であり、本章第2節においてはそのスクリーンラインの時間比率を、リンク交通量の観測値から算出できることを示した。

第3節においては、スクリーンラインの時間帯別断面交通量と推定時間帯別OD交通量による時間帯別断面交通量の残差平方和が最小になるように、時間帯別OD交通量を推定するモデルについて提案した。このモデルにおいては、OD間のトリップがスクリーンラインを横断する方向を考慮しない基本モデルと、その方向を考慮可能のように基本モデルを拡張した横断方向考慮型モデルの2つのモデルについてそれぞれ定式化を行った。次に第4節においては、スクリーンラインの時間断面交通量と一致するODパターンの同時生起確率を最大にするように時間帯別OD交通量を推定するモデルについて提案した。

第5節において、提案した残差平方和最小化手法に基づく時間帯別OD交通量の推定モデルと、同時生起確率最大化手法に基づく時間帯別OD交通量の推定モデルを実際に豊田市周辺部地域においてそれぞれ適用し、時間帯別OD交通量の各推定モデルの検証を行った。残差平方和最小化手法に基づく時間帯別OD交通量の推定モデルの適用計算に際しては、基本モデルおよび横断方向考慮型モデルの適用計算に加えて、リンク交通量の観測値から通過交通・内外交通を排除するようにリンク交通量を修正した場合の適用計算も行った。以下、本適用事例を通して得られた知見をまとめる。

(1) 残差平方和最小化手法に基づく時間帯別OD交通量の推定モデルおよび同時生起確率最大化手法に基づく時間帯別OD交通量の推定モデルとも、本適用時間帯の両端の時間帯を除いた8時台から17時台の推定結果においては、十分有意な推定結果を得ることができた。残差平方和最小化手法に基づく推定モデルにおいては、リンク交通量から通過交通・内外交通を排除したリンク修正モデルでの推定結果が最も優れていることがわかった。両手法によるモデルの推定結果を比較すると、本適用事例からだけ判断すると、同時生起確率最大化モデルにおける推定結果の方が優れていることがわかった。

(2) 残差平方和最小化手法に基づく各モデルにおける適用結果においては、日単位の発生側の総計と集中側の総計を制約条件として取り入れた制約条件-1での推定結果の方が優れていたが、本適用事例においてはその差は大きなものではなかった。各モデルにおいては、スクリーンラインを横断する方向を考慮した場合の方が、考慮しない基本モデルよりも推定結果が良くなり、さらにリンク交通量の観測値をその域内交通量率で補正することにより、推定結果が向上することが示された。

(3) スクリーンラインは、残差平方和最小化モデルの場合には、長いスクリーンラインを短く分割した方がより精度の高い推定ができることがわかったが、同時生起確率最大化モデルの場合にはその逆の傾向も見られた。これはモデルの特徴およびモデル構築の際の仮定の差異によるもの

であると考えられる。残差平方和最小化モデルの場合には、トリップの変動をより多く捉えた方がよいことから、短いスクリーンラインの設置が適しており、逆に同時生起確率最大化モデルの場合には、トリップの平均的な変動を捉えた方がよいことから、多くのトリップを一度に捉える長いスクリーンラインの設置が適しているという結果となったと考えられる。

(4) 両手法に基づくモデルにおいて、推定時間帯両端の7時台、18時台の推定結果が劣っていた。残差平方和最小化モデルの場合、各OD間トリップのスクリーンラインまでの所要時間をモデルに組み込んだが、そのためにトリップの発生時間帯とスクリーンラインを横断する時間帯との間に時間差が生じ、1つの時間帯のOD交通量が2つの隣り合った時間帯の目的関数に組み込まれている。しかしながら本適用事例においては、6時台以前、19時台以降のデータと与件としなかったためこのような結果になったと考えられる。同時生起確率最大化モデルの場合には、スクリーンラインまでの所要時間は無視できるものとして適用計算を行ったが、朝夕のピーク時間帯にはその所要時間が大きく変動し、また渋滞による所要時間の増大によりこの仮定が成り立たなくなっていることにより7時台、18時台の推定結果が悪くなったと考えられる。

上述したように、本適用事例においては推定時間帯の両端の7時台、18時台の推定結果からは有意な値が得られないことがわかったが、このような推定時間帯の推定結果の精度の低下を防ぐには、24時間のデータを用いて推定するか、推定時間帯を交通量が非常に少ない早朝や深夜に設定すればよいと考えられるが、今後多くの適用計算を行い、このことを検証していく必要がある。またゾーニングの大きさの影響、スクリーンラインまでの所要時間の変動、推定単位時間の大きさと各モデルにおける推定結果の関係を分析するためにもより多くの適用計算を今後進めていく必要があると思われる。

本提案モデルは実測リンクデータに基づくモデルであるということから、基本的には日単位OD交通量のデータが入手可能である地域において、リンク交通量の実測時点における任意の時間間隔のOD交通量を推定するための手法であるが、リンク交通量の時間比率の変動の幅が比較的小さいと考えられる短期的な予測モデルとしては十分実用に耐え得ると考えられる。

参考文献

- 1) 松本幸正, 藤田素弘, 松井寛: リンク交通量に基づく時間OD交通量の推定手法に関する研究, 交通工学, Vol. 29, No. 3, pp. 11-19
- 2) 建設省中部地方建設局: 昭和55年度道路交通センサス報告書, 一般交通量調査編(3の1)箇所別基本表, 1981
- 3) 中京都市圏総合都市交通計画協議会: 第2回中京都市圏パーソントリップ調査報告書, 総括報告書, 1987
- 4) 相吉英太郎, 志水清孝: 数理計画法演習, 朝倉書店, 1985
- 5) 嘉納秀明: システムの最適理論と最適化, コロナ社, 1987

第4章 流出入交通量観測値に基づく単一経路ネットワーク上における動的OD交通量の推定

4.1 概説

道路ネットワークの高度有効利用を促進すべく、現在道路交通のインテリジェント化¹⁾が進められつつある。そのような中、交通需要を分析する際にも交通現象の時間軸上での取り扱いが不可欠となってきており、車両感知器やAVI装置などの交通需要の時間変動を直接観測可能な機器の設置拡充も計られ、交通需要の時間変動を分析する際に必要となる各種交通資料は比較的容易に入手可能となってきた。これにともない、交通需要の時間変動データをより有効に活用したきめの細かな交通運用計画の必要性がますます高まってきており、OD交通量の時間変動の把握が不可欠となってきている。

しかしながら従来、OD交通量の推定は交通需要の定常性を仮定した静的な枠組みの中で行われてきており、これまで提案された多くの推定手法は時間軸上での取り扱いが困難である。したがって、交通量観測値のような交通需要の時間変動に関する情報を含有するデータを有効に活用した動的なOD交通量の推定手法の確立が望まれている。

そこで本章²⁾では、これら道路ネットワーク上で観測されている交通量の時系列観測値を用いて動的OD交通量を推定するための手法を提案する。ただし本章で対象とするネットワークは、各OD間の経路が一つに限定されるようなネットワークとする。提案する手法では、対象ネットワークへの流入交通量と流出交通量の時系列観測値に基づいてOD交通量を推定するが、各OD間の旅行時間に関しては既知として考え、モデルの定式化に際して旅行時間分布に関する特別な仮定は設けない。また旅行時間は時間変動するものとして考えるため、OD間の旅行時間が幾つかの時間インターバルにまたがるような場合にも適用可能である。さらに時間変動するOD交通量と流出入交通量観測値の間の動的な関係を構築し、流入交通量と流出交通量の間での動的な交通量保存則が成り立つような手法を提案する。

はじめに第2節では、時系列で観測されているネットワークへの流入交通量と流出交通量の間での動的な関係を、OD交通量を介して定式化する。ネットワークへ流入する時間とネットワークから流出する時間には、そのODペア間の旅行時間分の時間差が生じる。本研究では、ネットワーク上で車両の追い越しはほとんどなく、かつ同じインターバルに流入した車両はネットワーク上で一様に分布していると仮定し、この時間差を考慮して流出入交通量間の動的な関係を定式化する。この動的な関係式をもとに、OD交通量を動的過程として扱い、OD間推移確率は急激には変化しないという仮定のもとで、動的OD交通量の推定問題を定式化する。この問題は、OD間推移確率に関する等式および不等式制約条件を含んだ有制約非線型最適化問題として定式化される。

第3節においては、前節で定式化された推定問題の解法を示す。一つはネットワークを走行する旅行時間が各ODペア間で等しくかつ一定値であると考えられる単独の交差点や高速道路ジャン

クションを対象にした場合であり、この場合にはOD間推移確率に関する等式および不等式制約条件を明示的に扱い、各制約条件下における最適解を求める。もう一つは、旅行時間が各ODペア間で異なりかつ時間変動するような高速道路部分区間や交差点を直列に接続したような街路ネットワークを対象にした場合であるが、この場合にはOD間推移確率の推定インターバルが各ODペアごとに異なる場合があることから、等式制約条件を明示的に扱うことが困難となる。したがって等式制約条件の代わりに、不等式制約条件によってOD間推移確率の上限値と下限値を同時に設定することによって問題を解き、求められた解を等式制約条件を満たすように後から修正する方法を示す。これら両者の解法においては、時々刻々と得られる観測データをもとにオンラインでOD交通量が推定可能なように、再帰的な手法を採用する。さらにOD間推移確率に関する不等式制約条件を満たす解を得るために双対問題を構成し、その問題を用いた不等式制約条件に対するラグランジュ乗数の最適解を求める方法を示す。

第4節においては、提案した手法をシミュレーションデータを用いて検証する。シミュレーションは、OD間で旅行時間が一定で同一と見なせるネットワークを対象にした場合と、OD間で旅行時間が異なるネットワークを対象とした場合でそれぞれ行い、対応するモデルの検証を行う。また観測値に含まれる誤差が推定結果に及ぼす影響についても考察する。最後に第5節で本章で得られた知見をまとめる。

4.2 単一経路ネットワーク上における動的OD交通量の推定問題の定式化

本章では、各ODペア間で経路が一つに限定される様なネットワークを対象とする。このようなネットワークは、高速道路の一部であるとも考え、あるいは単独の信号交差点や幾つかの信号交差点を直列に組み合わせた街路ネットワークの一部と考えることもできる。また対象とするネットワークへの流入および流出交通量が車両感知器などによって観測されていると考え、本節ではこれらの交通量観測値の時間連続データに基づいた、単一経路ネットワーク上における動的OD交通量の推定モデルの定式化を行う。なお本研究ではOD間の旅行時間を既知として考えるが、旅行時間の推定方法としてはAVI装置等により直接的に観測するか、あるいは路線上の車両感知器データから得られる交通量やオキュパンシーのデータに基づいて推定する方法^{3),4),5),6)}などが考えられる。

4.2.1 流入交通量と流出交通量間の動的関係

はじめに、対象とするネットワーク上で観測されていたり、あるいは推定しようとする各種交通量を以下の記号のように定義する。

- $q_i(t)$: インターバル t の時間内に流入地点 i からネットワークへ流入する交通量
- $y_j(t)$: インターバル t の時間内に流出地点 j からネットワークを流出する交通量
- $b_{ij}(t)$: インターバル t の時間内に流入地点 i からネットワークへ流入する交通量のうち、流出地点 j へ到着する交通量の比率
- $f_{ij}(t)$: インターバル t の時間内に流入地点 i からネットワークへ流入し、流出地点 j から流出するODペア $i-j$ 間の交通量

$g_{ij}(t)$: 流入地点 i から流入し、インターバル t の時間内に流出地点 j からネットワークを流出する OD ペア $i-j$ 間の交通量

$\tau_{ij}(t)$: インターバル t のはじめの時間 $t \cdot u$ に流出地点 j へ到着した車両の流入地点 i からの旅行時間

u : 推定単位時間

インターバル t は連続時間表示では、 $[t \cdot u, (t+1) \cdot u)$ の範囲とする。 $f_{ij}(t)$, $b_{ij}(t)$ はそれぞれ流入時刻ベースの OD 交通量と OD 間推移確率を、 $g_{ij}(t)$ は流出時刻ベースの OD 交通量を意味する。

上述の記号の間には、その定義から次のような関係が成り立つことがわかる。なお I はネットワークへの流入地点の集合、 J は流出地点の集合、 Ω は OD ペア $i-j$ の集合を表す。

$$f_{ij}(t) = q_i(t)b_{ij}(t) \quad i, j \in \Omega \quad (4.1)$$

$$q_i(t) = \sum_{j \in J} f_{ij}(t) \quad i \in I \quad (4.2)$$

$$y_j(t) = \sum_{i \in I} g_{ij}(t) \quad j \in J \quad (4.3)$$

さらに OD 間推移確率 $b_{ij}(t)$ は、以下の条件を満足しなければならない。

$$\sum_{j \in J} b_{ij}(t) = 1 \quad i \in I \quad (4.4)$$

$$0 \leq b_{ij}(t) \quad i, j \in \Omega \quad (4.5)$$

$$b_{ij}(t) = 0 \quad i, j \notin \Omega \quad (4.6)$$

式(4.4)の等式制約条件は、式(4.1)を式(4.2)へ代入することにより導かれるが、これは流入時刻ベースの OD 交通量と流入交通量観測値の間の保存則を表しており、式(4.5)の不等式制約条件は OD 交通量の非負条件を表している。また進入禁止や右折禁止などの規制のある場合には、これらの OD ペア間の交通量は 0 であり、高速道路においては流れに逆らい上流側へ流出するような OD ペア間の車両の通行もあり得ない。 Ω にはこのような OD ペア間の交通量が 0 である OD ペアは含まれておらず、式(4.6)はそのような OD ペア間における OD 交通量を事前に 0 と設定することを意味している。

一般に、交通制御や交通誘導などの各種交通運用を行うために必要な OD 交通量は、到着時刻ベースでの値よりも出発時刻ベースでの値である。ところで上記関係式においては、それぞれ流入交通量と流入時刻ベースの OD 交通量、流出交通量と流出時刻ベースの OD 交通量の関係のみしか記述できていない。そこでこれまでの関係式を用いて、流入交通量と流出交通量の観測値と流入時刻ベースでの OD 交通量の動的な関係を一元的に確立する必要がある。すなわち上記関係式に追加するものとして、流入時刻ベースの OD 交通量と流出時刻ベースの OD 交通量の動的な関係が表現できれば良いことになる。

いまある特定の OD ペアに着目して考える。図-4.1に、ある OD ペア $i-j$ 間における概念的な時間-距離線図を示した。図中、斜めの実線は個々の車両の走行状況を示し、横軸下部に連続時間

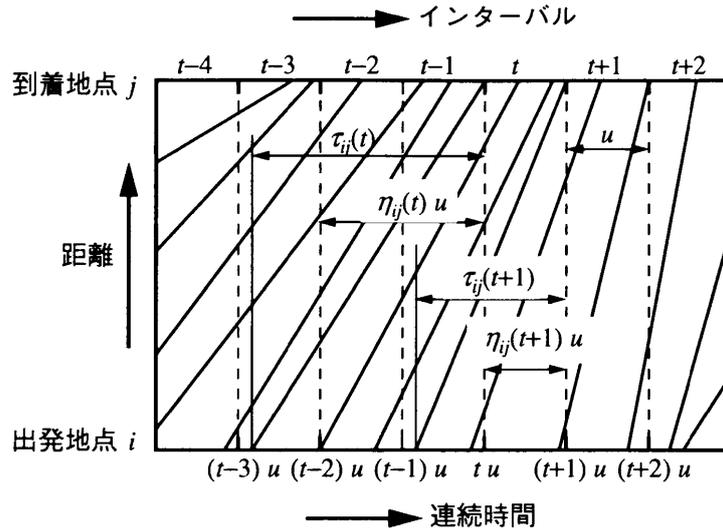


図-4.1 リンクにおける概念的な時間-距離線図

表示における時間を，また横軸上部には単位時間 u により離散化したインターバルが示してある．この図からもわかるように，推定時間インターバル t のはじめての時間，すなわち連続時間で表すと $t \cdot u$ に流出地点へ到着する車両は， $\tau_{ij}(t)$ 時間前に流入地点からネットワークへ流入したことになる．同様に次のインターバルのはじめての時間 $(t+1) \cdot u$ に流出地点へ到着した車両は， $\tau_{ij}(t+1)$ 時間前に流入地点からネットワークへ流入したことになる．ここで，車両の追い越しはほとんど無く，また各時間インターバル内においては車両がネットワーク上で一様に分布していると仮定する．このときインターバル t の時間内に流出地点へ到着する車両は，連続時間表示で $t \cdot u - \tau_{ij}(t)$ から $(t+1) \cdot u - \tau_{ij}(t+1)$ の時間内に流入地点からネットワークへ流入した車両ということになる．すなわち流入時刻ベースの OD 交通量と流出時刻ベースの OD 交通量の間には，次の関係が成立する．

$$g_{ij}(t) = \sum_{n=t-\eta_{ij}(t)-1}^{t-\eta_{ij}(t+1)} f_{ij}(n) - \left\{ 1 - \left(\frac{\tau_{ij}(t)}{u} - \eta_{ij}(t) \right) \right\} f_{ij}(t - \eta_{ij}(t) - 1) - \left(\frac{\tau_{ij}(t+1)}{u} - \eta_{ij}(t+1) \right) f_{ij}(t - \eta_{ij}(t+1)) \quad i, j \in \Omega \quad (4.7)$$

ここで

$$\eta_{ij}(t) \equiv \text{int} \left[\frac{\tau_{ij}(t)}{u} \right]$$

であり， $\eta_{ij}(t)$ は $[]$ 内の値を切り捨て整数化した値であることを表す．この流入時刻ベースの OD 交通量と流出時刻ベースの OD 交通量の関係を式 (4.3) へ代入し，

$$y_j(t) = \sum_{i \in I} \left[\sum_{n=t-\eta_{ij}(t)-1}^{t-\eta_{ij}(t+1)} f_{ij}(n) - \left\{ 1 - \left(\frac{\tau_{ij}(t)}{u} - \eta_{ij}(t) \right) \right\} f_{ij}(t - \eta_{ij}(t) - 1) - \left(\frac{\tau_{ij}(t+1)}{u} - \eta_{ij}(t+1) \right) f_{ij}(t - \eta_{ij}(t+1)) \right] \quad j \in J \quad (4.8)$$

が得られ、さらに式(4.1)を用いて、流入交通量の観測値 $q_i(t)$ と流出交通量の観測値 $y_j(t)$ の間の動的な関係が次のように確立される。

$$y_j(t) = \sum_{i \in I} \left[\sum_{n=t-\eta_{ij}(t)-1}^{t-\eta_{ij}(t+1)} q_i(n) b_{ij}(n) - \left\{ 1 - \left(\frac{\tau_{ij}(t)}{u} - \eta_{ij}(t) \right) \right\} q_i(t - \eta_{ij}(t) - 1) b_{ij}(t - \eta_{ij}(t) - 1) - \left(\frac{\tau_{ij}(t+1)}{u} - \eta_{ij}(t+1) \right) q_i(t - \eta_{ij}(t+1)) b_{ij}(t - \eta_{ij}(t+1)) \right] \quad j \in J \quad (4.9)$$

ここで簡単のために記号を定義し直し

$$y_j(t) = \sum_{i \in I} \left[\sum_{n=\theta_{ij}(t)}^{\theta_{ij}(t+1)} q_i(n) b_{ij}(n) - (1 - \xi_{ij}(t)) q_i(\theta_{ij}(t)) b_{ij}(\theta_{ij}(t)) - \xi_{ij}(t+1) q_i(\theta_{ij}(t+1)) b_{ij}(\theta_{ij}(t+1)) \right] \quad j \in J \quad (4.10)$$

と表せられる。ここで

$$\theta_{ij}(t) \equiv t - \eta_{ij}(t) - 1 \quad (4.11)$$

$$\xi_{ij}(t) \equiv \frac{\tau_{ij}(t)}{u} - \eta_{ij}(t) \quad (4.12)$$

である。

4.2.2 動的OD交通量の推定問題の定式化

前節で導いた流出入交通量観測値間の動的な関係、すなわち式(4.10)からわかるように、旅行時間の変動を考慮した動的な流入交通量と流出交通量の関係を定式化するため、流出地点へ到着する時間インターバルは1インターバルであるにも関わらず、流入地点から流入する時間インターバルは旅行時間の時間変動によっては数インターバルにまたがる場合もあることがわかる。すなわち上式においては、1インターバル分の関係式に $t - \eta_{ij}(t) - 1$ から $t - \eta_{ij}(t+1)$ の間のインターバル区間のOD間推移確率が含まれてしまう場合がある。しかしながらこの場合、到着時間インターバル t に対して成り立つ関係式の数はいずれも各流出地点に対し一つであり、 $t - \eta_{ij}(t) - 1$ から $t - \eta_{ij}(t+1)$ の間のOD間推移確率を個別に同定するためには、他の何らかの情報の追加が必要となってしまう。そこで本研究では、 $t - \eta_{ij}(t) - 1$ から $t - \eta_{ij}(t+1)$ のインターバル内における平均的なOD間推移確率を求めることとする。すなわち

$$y_j(t) = \sum_{i \in I} \left[\sum_{n=\theta_{ij}(t)}^{\theta_{ij}(t+1)} q_i(n) - (1 - \xi_{ij}(t)) q_i(\theta_{ij}(t)) - \xi_{ij}(t+1) q_i(\theta_{ij}(t+1)) \right] \bar{b}_{ij}(\theta_{ij}(t)) \quad j \in J \quad (4.13)$$

$$= \sum_{i \in I} \varpi_{ij}(t) \bar{q}_i(\theta_{ij}(t)) \bar{b}_{ij}(\theta_{ij}(t)) \quad j \in J \quad (4.14)$$

となる。ここで

$$\bar{q}_i(\theta_{ij}(t)) = \left[\sum_{n=\theta_{ij}(t)}^{\theta_{ij}(t+1)} q_i(n) - (1 - \xi_{ij}(t)) q_i(\theta_{ij}(t)) - \xi_{ij}(t+1) q_i(\theta_{ij}(t+1)) \right] / \varpi_{ij}(t) \quad i \in I \quad (4.15)$$

$$\bar{b}_{ij}(\theta_{ij}(t)) = \left[\sum_{n=\theta_{ij}(t)}^{\theta_{ij}(t+1)} f_{ij}(n) - (1 - \xi_{ij}(t)) f_{ij}(\theta_{ij}(t)) - \xi_{ij}(t+1) f_{ij}(\theta_{ij}(t+1)) \right] / (\varpi_{ij}(t) \bar{q}_i(\theta_{ij}(t))) \quad i, j \in \Omega \quad (4.16)$$

$$\varpi_{ij}(t) = \theta_{ij}(t+1) - \theta_{ij}(t) + 1 - (1 - \xi_{ij}(t)) - \xi_{ij}(t+1) \quad i, j \in \Omega \quad (4.17)$$

$$= \left(\frac{\tau_{ij}(t) - \tau_{ij}(t+1)}{u} + 1 \right) \quad i, j \in \Omega \quad (4.18)$$

である。

一般に交通量観測値からOD交通量を求める問題は、求める未知変数の数がそれらの相互関係を記述する独立な方程式の数より多い劣決定問題であり、したがってそのような問題において唯一解を得るためにはターゲットODなどの付加的な情報を与えたりしなければならない。しかしながらOD間推移確率は急激には変化しないという仮定の下でOD交通量を動的過程として扱い、それらの時間的変動を直接反映する交通量観測値の時系列データを用いることによって、何ら付加的な情報を与えることなく唯一的にOD間推移確率を同定でき、したがってOD交通量も一意に推定可能となる。このような考えから、動的OD交通量の推定問題は以下のように表される。

$$\min Q_j^0 = \sum_{t=1}^T d^{T-t} \left(\sum_{i \in I} \varpi_{ij}(t) \bar{q}_i(\theta_{ij}(t)) \bar{b}_{ij}(\theta_{ij}(T)) - y_j(t) \right)^2 \quad j \in J \quad (4.19)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in J} \bar{b}_{ij}(\theta_{ij}(T)) = 1 \quad i \in I \quad (4.20)$$

$$0 \leq \bar{b}_{ij}(\theta_{ij}(T)) \quad i, j \in \Omega \quad (4.21)$$

$$\bar{b}_{ij}(\theta_{ij}(T)) = 0 \quad i, j \notin \Omega \quad (4.22)$$

ここで d は忘却係数^{7),8)}で、その値によりOD間推移確率の時間的変動を捉えることが可能となるが、具体的な値の設定については適用事例を通して検討する。

上記問題は、各ODペア間での旅行時間が等しい場合と異なる場合において、その制約条件の取り扱いが異なってくる。そこでこの両者の場合のパラメータの推定方法について、それぞれ次節以降で述べる。

4.3 問題の解法

ここでは旅行時間が各ODペア間でほぼ同一である渋滞の発生していない単独の信号交差点や高速道路のジャンクションなどを対象とした場合と、OD間の旅行時間が各ODペア間で異なる高速道路部分区間や街路ネットワークの一部を対象とした場合について、それぞれOD間推移確率の推定方法について述べる。

4.3.1 旅行時間が同一で一定の場合の解法

ネットワークを流入地点から流出地点へ横断する旅行時間が、各ODペア間でほぼ同一でかつ一定値であると考えられる場合のパラメータの推定方法について述べる。このような場合は、渋滞

の発生していない単独の信号交差点を対象にした場合や、高速道路のジャンクションなどを対象とした場合にあたる。またこれまで提案された多くの手法^{9),10),11),12),13)}では、基本的にはこのような各OD間での旅行時間がほぼ同一でかつ一定値であると仮定できるような場合に適用可能な手法である。さらにこれら手法においては、その多くがOD間推移確率に関する制約条件式(4.20)、式(4.21)、式(4.22)を考慮しない手法となっている。唯一Nihan and Davis(1987)¹²⁾は、非負制約条件を扱うために切り詰め法を、等式制約条件を扱うために正規化法や投影法などを提案しているが、いずれも制約条件を明示的に扱ったものではなく、各制約条件下における最適解を求めているものではない。そこで本研究ではOD間推移確率に関する制約条件を明示的に扱い、各制約条件下における最適解を求める手法を提案する。

はじめに各OD間で等しい旅行時間を τ とし、それを推定単位時間により切り捨て整数化したものを η とする。この場合式(4.18)においては

$$\tau_{ij}(t) = \tau_{ij}(t+1) = \tau \quad (4.23)$$

であることから $\omega_{ij}(t)$ は1となることがわかる。また式(4.15)より

$$\bar{q}_i(t-\eta-1) = \sum_{n=t-\eta-1}^{t-\eta} q_i(n) - \left\{1 - \left(\frac{\tau}{u} - \eta\right)\right\} q_i(t-\eta-1) - \left(\frac{\tau}{u} - \eta\right) q_i(t-\eta) \quad i \in I \quad (4.24)$$

$$= \left(\frac{\tau}{u} - \eta\right) q_i(t-\eta-1) + \left\{1 - \left(\frac{\tau}{u} - \eta\right)\right\} q_i(t-\eta) \quad i \in I \quad (4.25)$$

となる。さらに簡単のため上式により求められる $\bar{q}_i(t-\eta-1)$ を $\bar{q}_i(t)$ と置く。この $\bar{q}_i(t)$ は流入地点において観測時間を $\tau/u - \eta$ だけ前方へシフトし、流入地点観測値のインターバルに η だけ時間遅れを持たせた場合の交通量観測値に相当する。

以上の関係を用い、等式制約条件式(4.20)に対するラグランジュ乗数を $\varphi_i(t)$ 、不等式制約条件式(4.21)に対するラグランジュ乗数を $\lambda_{ij}(t)$ とすると、ラグランジュ問題は次のようになる。

$$\begin{aligned} \min Q^1 = & \sum_{j \in J} \left[\sum_{t=1}^T d^{T-t} \left\{ \sum_{i \in I} \bar{q}_i(t) b_{ij}(T) - y_j(t) \right\}^2 \right] \\ & + \sum_{i \in I} \varphi_i(T) \left(1 - \sum_{j \in J} b_{ij}(T) \right) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \lambda_{ij}(T) (-b_{ij}(T)) \end{aligned} \quad (4.26)$$

この場合の最適性の一次の必要条件は、上記ラグランジュ関数は凸関数であることから

$$\frac{\partial Q^1}{\partial b_{ij}(T)} = 0 \quad i, j \in \Omega \quad (4.27)$$

$$\frac{\partial Q^1}{\partial \varphi_i(T)} = 0 \quad i \in I \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial Q^1}{\partial \lambda_{ij}(T)} \leq 0, \quad \lambda_{ij}(T) \frac{\partial Q^1}{\partial \lambda_{ij}(T)} = 0, \quad \lambda_{ij}(T) \geq 0 \quad i, j \in \Omega \quad (4.29)$$

である。式(4.27)は以下のように表せられる。

$$2 \sum_{t=1}^T d^{T-t} \bar{q}_i(t) \left\{ \sum_{i \in I} \bar{q}_i(t) b_{ij}(T) - y_j(t) \right\} - \varphi_i(T) - \lambda_{ij}(T) = 0 \quad i, j \in \Omega \quad (4.30)$$

この式を変形し，流出地点 j ごとのベクトル表記を用いれば以下のようなになる。

$$\mathbf{b}_j(T) = \left(\sum_{t=1}^T d^{T-t} \mathbf{q}_j(t) \mathbf{q}'_j(t) \right)^{-1} \left(\sum_{t=1}^T d^{T-t} \mathbf{q}_j(t) y_j(t) + \frac{1}{2} \boldsymbol{\varphi}(T) + \frac{1}{2} \boldsymbol{\lambda}_j(T) \right) \quad j \in J \quad (4.31)$$

ここで各ベクトルはすべて次のような縦ベクトルであるが，制約条件(4.22)を満たすために各ベクトルにおいて集合 Ω に含まれない OD ペアに対する要素は削除する。したがって $\mathbf{q}_j(t)$ においても，それらの値は流出地点 j によって異なる要素が削除されるため，それらを区別するために添字 j を付加してある。なお記号'は転置を表す。

$$\mathbf{b}_j(t) = \left[b_{1j}(t) \quad b_{2j}(t) \quad \cdots \quad b_{Ij}(t) \right]' \quad (4.32)$$

$$\mathbf{q}_j(t) = \left[\tilde{q}_1(t) \quad \tilde{q}_2(t) \quad \cdots \quad \tilde{q}_I(t) \right]' \quad (4.33)$$

$$\boldsymbol{\varphi}(t) = \left[\varphi_1(t) \quad \varphi_2(t) \quad \cdots \quad \varphi_I(t) \right]' \quad (4.34)$$

$$\boldsymbol{\lambda}_j(t) = \left[\lambda_{1j}(t) \quad \lambda_{2j}(t) \quad \cdots \quad \lambda_{Ij}(t) \right]' \quad (4.35)$$

ここで，式(4.28)は

$$1 - \sum_{j \in J} b_{ij}(T) = 0 \quad i \in I \quad (4.36)$$

となり，これに式(4.31)を代入し，変形すると

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varphi}(T) &= 2 \left\{ \sum_{j \in J} \left(\sum_{t=1}^T d^{T-t} \mathbf{q}_j(t) \mathbf{q}'_j(t) \right)^{-1} \right\}^{-1} \\ &\quad \times \left[1 - \sum_{j \in J} \left\{ \left(\sum_{t=1}^T d^{T-t} \mathbf{q}_j(t) \mathbf{q}'_j(t) \right) \left(\sum_{t=1}^T d^{T-t} \mathbf{q}_j(t) y_j(t) + \frac{1}{2} \boldsymbol{\lambda}_j(T) \right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (4.37)$$

が得られる。ここで観測値から計算される値を次のように定義し，変形すると

$$\mathbf{H}_j(T) \equiv \sum_{t=1}^T d^{T-t} \mathbf{q}_j(t) \mathbf{q}'_j(t) \quad (4.38)$$

$$= \mathbf{H}_j(T-1)d + \mathbf{q}_j(T) \mathbf{q}'_j(T) \quad (4.39)$$

$$\mathbf{C}_j(T) \equiv \sum_{t=1}^T d^{T-t} \mathbf{q}_j(t) y_j(t) \quad (4.40)$$

$$= \mathbf{C}_j(T-1)d + \mathbf{q}_j(T) y_j(T) \quad (4.41)$$

と表せられる。次に

$$\mathbf{P}_j(T) \equiv \mathbf{H}_j(T)^{-1} \quad (4.42)$$

とし，式(4.39)の両辺の左右から $\mathbf{P}_j(T)$ ， $\mathbf{P}_j(T-1)$ をそれぞれ乗じ，さらに右から $\mathbf{q}_j(T)$ を乗じて変形すると

$$\boldsymbol{\Lambda}_j(T) \equiv \mathbf{P}_j(T) \mathbf{q}_j(T) \quad (4.43)$$

$$= \mathbf{P}_j(T-1) \mathbf{q}_j(T) \left(d + \mathbf{q}'_j(T) \mathbf{P}_j(T-1) \mathbf{q}_j(T) \right)^{-1} \quad (4.44)$$

が得られる。さらに逆行列の補助定理を用いると

$$P_j(T) = \frac{1}{d} (I - \Lambda_j(T) q'_j(T)) P_j(T-1) \quad (4.45)$$

が得られ、これらを用いて式(4.31)、式(4.37)を表すと次のようになる。

$$b_j(T) = P_j(T) \left(C_j(T) + \frac{1}{2} \varphi(T) + \frac{1}{2} \lambda_j(T) \right) \quad (4.46)$$

$$\varphi(T) = 2 \left(\sum_{j \in J} P_j(T) \right)^{-1} \left\{ 1 - \sum_{j \in J} P_j(T) \left(C_j(T) + \frac{1}{2} \lambda_j(T) \right) \right\} \quad (4.47)$$

以上より旅行時間が各ODペア間で等しく、ほぼ一定の値をとる場合におけるOD間推移確率は、オンラインで得られる流出入交通量の観測値により式(4.41)、式(4.44)、式(4.45)、式(4.46)、式(4.47)を順次計算することにより推定可能となり、また式(4.1)によりOD交通量の推定値が得られる。

この手法では式(4.41)、式(4.44)、式(4.45)から明らかなように、インターバル T においてオンラインで得られる流出入交通量の観測値と一時点前のインターバルにおける各変量の値を用いて現時点の各変量の値を逐次更新していくため、交通量観測値のデータを過去にわたって記憶しておく必要はなく、オンラインに適した手法であると言える。なおこれまでの推定方法においては、交通量の非負条件に対するラグランジェ乗数の求め方については触れていないが、後ほどそれらの扱いについて述べることにし、また推定アルゴリズムについても後述する。

4.3.2 旅行時間が異なる場合の解法

前項ではこれまで提案された多くの手法において対象としていた、旅行時間が各ODペア間で等しくかつほぼ一定値である場合におけるOD間推移確率の求め方を示した。しかしながらこのような手法においてはモデルの性格上、適用できる対象が限定されてしまう。そこでここではより一般的に、各ODペア間の旅行時間が異なり、また時間変動するような場合に適用可能な方法について述べる。

旅行時間が各ODペア間で異なり、かつ時間変動する場合のOD交通量の推定問題は、旅行時間が各ODペア間で同一でほぼ一定の場合の推定問題とは式(4.20)の等式制約条件の取り扱いの点で大きく異なる。旅行時間が同一である場合には、推定されるOD間推移確率の時間インターバルが各ODペア間で同一であり、したがって各推定時間インターバルごとに式(4.20)の等式制約条件を明示的に組み込むことが可能であった。しかしながら旅行時間が各ODペア間で異なる場合には、推定されるOD間推移確率の時間インターバルがODペアごとに異なり、等式制約条件を明示的に扱える問題としての定式化は難しい。したがってここでは等式制約条件を考慮しない問題により解を求めた後、等式制約条件を満たすように解を修正する方法について述べる。

旅行時間が各ODペア間で異なる場合においてはOD間推移確率に関する等式制約条件を明示的に扱うことができないため、OD間推移確率に関する不等式制約条件(4.21)をあらたに次のように置き換える。

$$0 \leq \bar{b}_{ij}(t) \leq 1 \quad i, j \in \Omega \quad (4.48)$$

したがってこの場合のラグランジェ問題は、この制約条件の右辺に対するラグランジェ乗数を $\mu_{ij}(t)$ とすれば次のような問題となる。なおこの場合には、OD 交通量の推定問題は流出地点により分割が可能となるため、以降流出地点 j ごとに個別に考える。

$$\min Q_j^2 = \sum_{t=1}^T d^{T-t} \left(\mathbf{q}'_j(t) \mathbf{b}_j(T) - y_j(t) \right)^2 - \boldsymbol{\lambda}'_j(T) \mathbf{b}_j(T) + \boldsymbol{\mu}'_j(T) (\mathbf{b}_j(T) - \mathbf{1}) \quad (4.49)$$

ここで各ベクトルは式(4.15), 式(4.16), 式(4.18)を用いて

$$\mathbf{b}_j(T) = \begin{bmatrix} \bar{b}_{1j}(T - \eta_{1j}(T) - 1) \\ \bar{b}_{2j}(T - \eta_{2j}(T) - 1) \\ \vdots \\ \bar{b}_{Ij}(T - \eta_{Ij}(T) - 1) \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

$$\mathbf{q}_j(t) = \begin{bmatrix} \varpi_{1j}(t) \bar{q}_1(t - \eta_{1j}(t) - 1) \\ \varpi_{2j}(t) \bar{q}_2(t - \eta_{2j}(t) - 1) \\ \vdots \\ \varpi_{Ij}(t) \bar{q}_I(t - \eta_{Ij}(t) - 1) \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

$$\boldsymbol{\lambda}_j(T) = \begin{bmatrix} \lambda_{1j}(T - \eta_{1j}(T) - 1) \\ \lambda_{2j}(T - \eta_{2j}(T) - 1) \\ \vdots \\ \lambda_{Ij}(T - \eta_{Ij}(T) - 1) \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

$$\boldsymbol{\mu}_j(T) = \begin{bmatrix} \mu_{1j}(T - \eta_{1j}(T) - 1) \\ \mu_{2j}(T - \eta_{2j}(T) - 1) \\ \vdots \\ \mu_{Ij}(T - \eta_{Ij}(T) - 1) \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

である。ただし Ω に含まれない OD ペアに対する要素は除く。この場合の最適性の一次の必要条件は

$$\frac{\partial Q_j^2}{\partial \mathbf{b}_j(T)} = \mathbf{0} \quad (4.54)$$

$$\frac{\partial Q_j^2}{\partial \lambda_j(T)} \leq \mathbf{0}, \quad \lambda_{ij}(T - \eta_{ij}(T) - 1) \frac{\partial Q_j^2}{\partial \lambda_{ij}(T - \eta_{ij}(T) - 1)} = 0 \quad i, j \in \Omega, \quad \boldsymbol{\lambda}_j(T) \geq \mathbf{0} \quad (4.55)$$

$$\frac{\partial Q_j^2}{\partial \mu_j(T)} \leq \mathbf{0}, \quad \mu_{ij}(T - \eta_{ij}(T) - 1) \frac{\partial Q_j^2}{\partial \mu_{ij}(T - \eta_{ij}(T) - 1)} = 0 \quad i, j \in \Omega, \quad \boldsymbol{\mu}_j(T) \geq \mathbf{0} \quad (4.56)$$

であり、式(4.54)から以下の式が得られる。

$$2 \sum_{t=1}^T d^{T-t} \mathbf{q}_j(T) \left(\mathbf{q}'_j(T) \mathbf{b}_j(T) - y_j(T) \right) - \boldsymbol{\lambda}_j(T) + \boldsymbol{\mu}_j(T) = \mathbf{0} \quad (4.57)$$

この式を変形すると

$$\mathbf{b}_j(T) = \left(\sum_{t=1}^T d^{T-t} \mathbf{q}_j(t) \mathbf{q}'_j(t) \right)^{-1} \left(\sum_{t=1}^T d^{T-t} \mathbf{q}_j(t) y_j(t) + \frac{1}{2} \boldsymbol{\lambda}(T) - \frac{1}{2} \boldsymbol{\mu}_j(T) \right) \quad j \in J \quad (4.58)$$

となる。ここで前項と同様の手順により以下の関係が得られる。

$$H_j(T) = H_j(T-1)d + \mathbf{q}_j(T)\mathbf{q}'_j(T) \quad (4.59)$$

$$C_j(T) = C_j(T-1)d + \mathbf{q}_j(T)y_j(T) \quad (4.60)$$

$$\Lambda_j(T) = P_j(T-1)\mathbf{q}_j(T)(d + \mathbf{q}'_j(T)P_j(T-1)\mathbf{q}_j(T))^{-1} \quad (4.61)$$

$$P_j(T) = \frac{1}{d}(\mathbf{I} - \Lambda_j(T)\mathbf{q}'_j(T))P_j(T-1) \quad (4.62)$$

$$\mathbf{b}_j(T) = P_j(T) \left(C_j(T) + \frac{1}{2}\lambda_j(T) - \frac{1}{2}\mu_j(T) \right) \quad (4.63)$$

以上より，得られる観測結果をもとに上記各式を計算することによって，ラグランジェ乗数 $\lambda_{ij}(T)$ ， $\mu_{ij}(T)$ のある実行可能解のもとでのOD間推移確率の最適解を求めることができる。また式(4.20)の等式制約条件を満たすように次のような正規化法¹²⁾を用いてOD間推移確率の推定値を修正する。なお不等式制約条件に対するラグランジェ乗数の求め方については次節で述べる。

$$b_{ij}(T) = \frac{b_{ij}(T)}{\sum_{j \in J} b_{ij}(T)} \quad i, j \in \Omega \quad (4.64)$$

4.3.3 不等式制約条件に対するラグランジェ乗数の求め方

これまでの方法では，不等式制約条件式(4.21)あるいは(4.48)に対するラグランジェ乗数 $\lambda_{ij}(t)$ ， $\mu_{ij}(t)$ が，ある任意の実行可能領域の値である場合のOD間推移確率 $b_{ij}(t)$ の最適解を求めることしかできない。そこでここでは，ODペア間の旅行時間が異なり，その旅行時間が時間変動する場合におけるラグランジェ乗数の求め方について説明する。ここでのラグランジェ乗数の求め方は，制約条件(4.48)の上下限值に対するラグランジェ乗数を個別に更新していく方法とする。したがって旅行時間が一定で同一の場合にも全く同様な方法で非負制約条件に対するラグランジェ乗数を求めることができる。

式(4.19)，式(4.22)および式(4.48)で示されるOD交通量の推定問題の双対問題を構成し，その問題を解くことによって非負制約条件に対するラグランジェ乗数を求める方法¹⁴⁾を示す。OD交通量の推定問題の原問題に対する双対問題はベクトル表記を用いると

$$\max_{\lambda, \mu} \mathcal{N}_j(\lambda_j(T), \mu_j(T)) = \inf_{\mathbf{b}} \left(\sum_{t=1}^T d^{T-t} \mathbf{q}'_j(t) \mathbf{b}_j(T) - y_j(t) \right)^2 - \lambda'_j(T) \mathbf{b}_j(T) + \mu'_j(T) (\mathbf{b}_j(T) - \mathbf{1}) \quad (4.65)$$

$$\text{s.t. } \lambda'_j(T) \geq \mathbf{0}, \quad \mu'_j(T) \geq \mathbf{0} \quad (4.66)$$

となる。この問題から式(4.63)を用いて $\mathbf{b}_j(t)$ を消去することにより，双対問題は次のような形で表現できる。

$$\begin{aligned} \max_{\lambda, \mu} \mathcal{N}_j(\lambda_j(T), \mu_j(T)) &= -\frac{1}{4}\lambda'_j(t)P_j(t)\lambda_j(t) - C'_j(t)P_j(t)\lambda_j(t) - \frac{1}{4}\mu'_j(t)P_j(t)\mu_j(t) \\ &\quad + C'_j(t)P_j(t)\mu_j(t) - \mathbf{1}'\mu_j(t) + \frac{1}{2}\lambda'_j(t)P_j(t)\mu_j(t) + \text{const.} \end{aligned} \quad (4.67)$$

$$\text{s.t. } \boldsymbol{\lambda}'_j(T) \geq \mathbf{0}, \boldsymbol{\mu}'_j(T) \geq \mathbf{0} \quad (4.68)$$

この問題の最適解が得られれば、この解に対する式(4.63)のOD間推移確率の最適解が、その凸性から原問題の最適解になる。ここで

$$\frac{\partial \mathcal{N}_j(\boldsymbol{\lambda}_j(T), \boldsymbol{\mu}_j(T))}{\partial \boldsymbol{\lambda}_j(T)} = -\mathbf{b}_j(T) \quad (4.69)$$

$$\frac{\partial \mathcal{N}_j(\boldsymbol{\lambda}_j(T), \boldsymbol{\mu}_j(T))}{\partial \boldsymbol{\mu}_j(T)} = \mathbf{b}_j(T) - \mathbf{1} \quad (4.70)$$

であるから、もし $-b_{ij}(T) \neq 0$, $b_{ij}(T) - 1 \neq 0$ ならば、それは双対目的関数の増加方向ということになる。ところでラグランジェ乗数のある成分が0で、その成分に対応する式(4.69), 式(4.70)の値が負であるならば、その方向に解の更新方向をとるとラグランジェ乗数は負値となってしまう。そこで双対目的関数の解の更新方向を非負制約条件を侵害しないように次のようにとる。

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} -b_{ij}(T) & \text{if } \lambda_{ij}(T) > 0 \\ \max(0, -b_{ij}(T)) & \text{if } \lambda_{ij}(T) = 0 \end{cases} \quad (4.71)$$

$$\rho_{ij} = \begin{cases} b_{ij}(T) - 1 & \text{if } \mu_{ij}(T) > 0 \\ \max(0, b_{ij}(T) - 1) & \text{if } \mu_{ij}(T) = 0 \end{cases} \quad (4.72)$$

さらにこの方向を用いて次のようにラグランジェ乗数を更新する。

$$\lambda_{ij}(T) = \lambda_{ij}(T) + \hat{\sigma} \sigma_{ij} \quad i, j \in \Omega \quad (4.73)$$

$$\mu_{ij}(T) = \mu_{ij}(T) + \hat{\rho} \rho_{ij} \quad i, j \in \Omega \quad (4.74)$$

ここで $\hat{\sigma}$, $\hat{\rho}$ は直線探索パラメータであり、例えば $\hat{\sigma}$ については以下の問題により求められる値である。

$$\max_{\hat{\sigma}} \quad \mathcal{N}_j(\boldsymbol{\lambda}_j(T) + \hat{\sigma} \boldsymbol{\sigma}_j, \boldsymbol{\mu}_j(T)) \quad (4.75)$$

$$\text{s.t. } \hat{\sigma} \geq 0 \quad (4.76)$$

$$\lambda_{ij}(T) + \hat{\sigma} \sigma_{ij} \geq 0 \quad i, j \in \Omega \quad (4.77)$$

式(4.75)は $\hat{\sigma}$ に関して凹関数であることから最適性の一次の必要条件は

$$\frac{\partial \mathcal{N}_j(\boldsymbol{\lambda}_j(T) + \hat{\sigma} \boldsymbol{\sigma}_j, \boldsymbol{\mu}_j(T))}{\partial \hat{\sigma}} = \left(-\frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}'_j \mathbf{P}_j(T) \boldsymbol{\sigma}_j \right) \hat{\sigma} - \mathbf{b}'_j(T) \boldsymbol{\sigma}_j = 0 \quad (4.78)$$

$$\frac{\partial \mathcal{N}_j(\boldsymbol{\lambda}_j(T), \boldsymbol{\mu}_j(T) + \hat{\rho} \boldsymbol{\rho}_j)}{\partial \hat{\rho}} = \left(-\frac{1}{2} \boldsymbol{\rho}'_j \mathbf{P}_j(T) \boldsymbol{\rho}_j \right) \hat{\rho} + (\mathbf{b}_j(T) - \mathbf{1})' \boldsymbol{\rho}_j = 0 \quad (4.79)$$

を満たさなければならない。ここで制約条件(4.77)を考慮すると直線探索パラメータは以下のようになれば良いことがわかる。

$$\hat{\sigma} = \min \left\{ -\frac{2 \boldsymbol{\sigma}'_j \mathbf{b}_j(T)}{\boldsymbol{\sigma}'_j \mathbf{P}_j(T) \boldsymbol{\sigma}_j}, \min_{i \in \tilde{I}} \left(-\frac{\lambda_{ij}(T)}{\sigma_{ij}} \right) \right\} \quad (4.80)$$

さらに同様の手順により

$$\hat{\rho} = \min \left\{ \frac{2 \boldsymbol{\rho}'_j (\mathbf{b}_j(T) - \mathbf{1})}{\boldsymbol{\rho}'_j \mathbf{P}_j(T) \boldsymbol{\rho}_j}, \min_{i \in \tilde{I}} \left(-\frac{\mu_{ij}(T)}{\rho_{ij}} \right) \right\} \quad (4.81)$$

となる。ここで \tilde{I} はそれぞれ $\sigma_{ij} < 0, \rho_{ij} < 0$ となるような i の集合である。

4.3.4 推定アルゴリズム

これまでに不等式制約条件を考慮したOD交通量の推定問題の解法について説明したが、ここでは動的OD交通量の推定値を得るための具体的なアルゴリズムについて述べる。

(1) 旅行時間が同一の場合

step0 初期化する。すなわち $C_j(0) = \mathbf{0}$, $P_j(0) = \kappa I$, $\lambda_j(0) = \mathbf{0}$, とする。ただし κ は十分大きな数であり, I は単位行列である。また $T = 1$ とする。

step1 オンラインで得られる流出入交通量の観測値により以下の値を順次計算する。

$$C_j(T) = C_j(T-1)d + q_j(T)y_j(T)$$

$$A_j(T) = P_j(T-1)q_j(T) \left(d + q_j'(T)P_j(T-1)q_j(T) \right)^{-1}$$

$$P_j(T) = \frac{1}{d} (I - A_j(T)q_j'(T))P_j(T-1)$$

step2 等式制約条件(4.20)に対するラグランジェ乗数の値を更新する。

$$\varphi(T) = 2 \left(\sum_{j \in J} P_j(T) \right)^{-1} \left\{ 1 - \sum_{j \in J} P_j(T) \left(C_j(T) + \frac{1}{2} \lambda_j(T) \right) \right\}$$

step3 OD間推移確率の値を更新する。

$$b_j(T) = P_j(T) \left(C_j(T) + \frac{1}{2} \varphi(T) + \frac{1}{2} \lambda_j(T) \right)$$

step4 収束判定, すなわちもし $|-b_{ij}(T)| < \varepsilon, i \in \{i | \lambda_{ij}(T) > 0\}$, $b_{ij}(T) < \varepsilon, i \in \{i | \lambda_{ij}(T) = 0\}$ および $|b_{ij}(T) - 1| < \varepsilon$ ならば step5 へいき, そうでなければ step6 へいく。ただし ε は十分小さな正数である。

step5 OD交通量の推定値を計算し, $T = T + 1$ として step1 へ。

$$f_{ij}(T) = q_i(T)b_{ij}(T)$$

step6 非負制約条件に対するラグランジェ乗数の更新方向およびステップ幅を求める。

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} -b_{ij}(T) & \text{if } \lambda_{ij}(T) > 0 \\ \max(0, -b_{ij}(T)) & \text{if } \lambda_{ij}(T) = 0 \end{cases}$$

$$\hat{\sigma} = \min \left\{ -\frac{2\sigma_j' b_j(T)}{\sigma_j' P_j(T) \sigma_j}, \min_{i \in I} \left(-\frac{\lambda_{ij}(T)}{\sigma_{ij}} \right) \right\}$$

step7 非負制約条件に対するラグランジェ乗数を更新し step2 へ。

$$\lambda_{ij}(T) = \lambda_{ij}(T) + \hat{\sigma} \sigma_{ij}$$

(2) 旅行時間が異なる場合

step0 初期化する．すなわち $\mathbf{H}_j(0) = \mathbf{0}$, $\mathbf{C}_j(0) = \mathbf{0}$, $\mathbf{P}_j(0) = \kappa \mathbf{I}$, $\boldsymbol{\lambda}_j(0) = \mathbf{0}$, $\boldsymbol{\mu}_j(0) = \mathbf{0}$, とする．ただし κ は十分大きな数であり, \mathbf{I} は単位行列である．また $T = 1$ とする．

step1 オンラインで得られる流出入交通量の観測値により以下の値を順次計算する．

$$\begin{aligned}\mathbf{H}_j(T) &= \mathbf{H}_j(T-1)d + \mathbf{q}_j(T)\mathbf{q}'_j(T) \\ \mathbf{C}_j(T) &= \mathbf{C}_j(T-1)d + \mathbf{q}_j(T)y_j(T) \\ \mathbf{A}_j(T) &= \mathbf{P}_j(T-1)\mathbf{q}_j(T) \left(d + \mathbf{q}'_j(T)\mathbf{P}_j(T-1)\mathbf{q}_j(T) \right)^{-1} \\ \mathbf{P}_j(T) &= \frac{1}{d}(\mathbf{I} - \mathbf{A}_j(T)\mathbf{q}'_j(T))\mathbf{P}_j(T-1)\end{aligned}$$

step2 OD間推移確率の値を更新する．

$$\mathbf{b}_j(T) = \mathbf{P}_j(T) \left(\mathbf{C}_j(T) + \frac{1}{2}\boldsymbol{\lambda}_j(T) - \frac{1}{2}\boldsymbol{\mu}(T) \right)$$

step3 収束判定, すなわちもし $|-b_{ij}(T)| < \varepsilon, i \in \{i | \lambda_{ij}(T) > 0\}$, $b_{ij}(T) < \varepsilon, i \in \{i | \lambda_{ij}(T) = 0\}$ および $|b_{ij}(t) - 1| < \varepsilon, i \in \{i | \mu_{ij}(t) > 0\}$, $b_{ij}(t) - 1 < \varepsilon, i \in \{i | \mu_{ij}(t) = 0\}$ ならば step4 へいき, そうでなければ step6 へいく．ただし ε は十分小さな正数である．

step4 全ODペアが推定されたインターバル T_0 のOD間推移確率の値を修正する．

$$b_{ij}(T_0) = \frac{b_{ij}(T_0)}{\sum_{j \in J} b_{ij}(T_0)}$$

step5 OD交通量の推定値を計算し, $T = T + 1$ として step1 へ．

$$f_{ij}(T_0) = q_i(T_0)b_{ij}(T_0)$$

step6 非負制約条件に対するラグランジェ乗数の更新方向およびステップ幅を求める．

$$\begin{aligned}\sigma_{ij} &= \begin{cases} -b_{ij}(T) & \text{if } \lambda_{ij}(T) > 0 \\ \max(0, -b_{ij}(T)) & \text{if } \lambda_{ij}(T) = 0 \end{cases} \\ \rho_{ij} &= \begin{cases} b_{ij}(T) - 1 & \text{if } \mu_{ij}(T) > 0 \\ \max(0, b_{ij}(T) - 1) & \text{if } \mu_{ij}(T) = 0 \end{cases} \\ \hat{\sigma} &= \min \left\{ -\frac{2\boldsymbol{\sigma}'_j \mathbf{b}_j(T)}{\boldsymbol{\sigma}'_j \mathbf{P}_j(T) \boldsymbol{\sigma}_j}, \min_{i \in I} \left(-\frac{\lambda_{ij}(T)}{\sigma_{ij}} \right) \right\} \\ \hat{\rho} &= \min \left\{ \frac{2\rho'_j (\mathbf{b}_j(T) - \mathbf{1})}{\rho'_j \mathbf{P}_j(T) \rho_j}, \min_{i \in I} \left(-\frac{\mu_{ij}(T)}{\rho_{ij}} \right) \right\}\end{aligned}$$

step7 非負制約条件に対するラグランジェ乗数を更新し step2 へ．

$$\lambda_{ij}(T) = \lambda_{ij}(T) + \hat{\sigma}\sigma_{ij}$$

$$\mu_{ij}(t) = \mu_{ij}(t) + \hat{\rho}\rho_{ij}$$

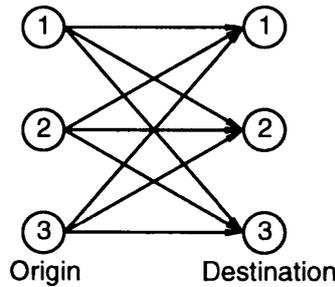


図-4.2 旅行時間が一定値の場合のネットワーク

4.4 適用事例

本章で提案した単一経路ネットワーク上における動的OD交通量の推定手法を、シミュレーションデータを用いて検証する。はじめに旅行時間が同一の場合の適用事例について述べ、次に旅行時間が変動する場合について述べる。後者においては、OD間推移確率が時間的な傾向変動をした場合および観測値に誤差が含まれる場合についても検討する。

4.4.1 旅行時間が一定値の場合の適用結果

ODペア数が3×3である図-4.2に示した簡単なネットワークを対象に、提案するモデルの検証を行った。このネットワークにおいては各OD間の所用時間は無視できるほど小さいと考える。シミュレーションデータは以下に示す3種類を考え、またそれぞれ100インターバル分を発生させ、これを観測値とした。

sim-1 発生交通量を平均値 \bar{q} が以下のようなポワソン乱数として与え、またOD間推移確率の平均値 \bar{B} を以下のように与え、その偏差 ΔB の分布を平均0、標準偏差0.03の正規分布として与えた。OD交通量はこれらから計算される値を整数化して与えた。

$$\bar{q}' = \begin{bmatrix} 30 & 60 & 40 \end{bmatrix}$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.1 & 0.7 \\ 0.8 & 0.05 & 0.15 \\ 0.3 & 0.2 & 0.5 \end{bmatrix}$$

sim-2 OD間推移確率の偏差 ΔB の分布を平均0、標準偏差0.1の正規分布として与えた。

sim-3 OD間推移確率の偏差 ΔB の分布を平均0、標準偏差0.3の正規分布として与えた。

表-4.1は観測値と推定値の全100インターバルにおける相関係数を示している。この表より一般に高い相関性を有していることがわかり、またsim-3以外の結果においては、 d の値が小さくなるほど少しずつ相関性が劣っていくことがわかる。このことはOD間推移確率の変動が大きな場合には、推定時点に近いデータほど大きな重みで、つまり過去のデータは減却していくように評価した方が良い結果が得られるということである。

表-4.1 旅行時間が同一の場合の相関係数

d	1.00	0.98	0.96	0.94
sim-1	0.9969	0.9965	0.9960	0.9954
sim-2	0.9723	0.9712	0.9697	0.9676
sim-3	0.8026	0.8175	0.8265	0.8304

表-4.2 旅行時間が同一の場合の RMS 誤差

d	1.00	0.98	0.96	0.94
sim-1	1.0786	1.1447	1.2205	1.3025
sim-2	3.2462	3.2990	3.3750	3.4785
sim-3	8.3951	8.1055	7.9214	7.8427

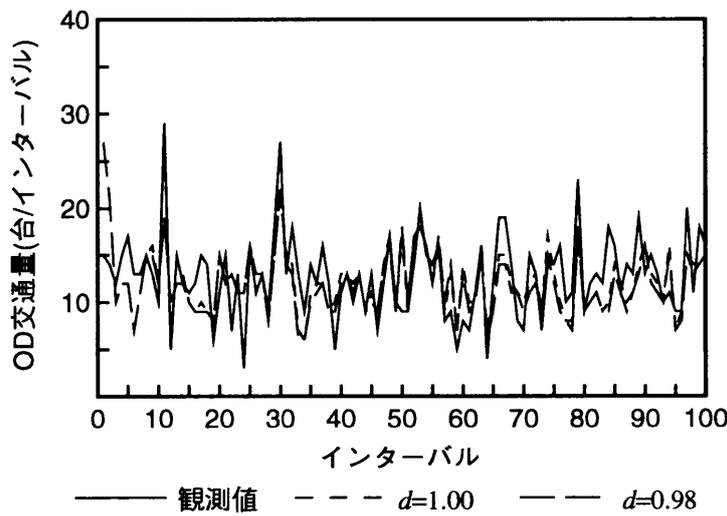


図-4.3 推定 OD(3-1) 交通量の時間変動 (sim-3)

表-4.2は観測値と推定値の全100インターバルにおけるRMS誤差の値を示してある。この表よりRMS誤差の値は、OD間推移確率の発生の違いによる差異が大きく表れており、本推定手法における推定結果はOD間推移確率の変動に敏感であるということがわかる。なおsim-3におけるシミュレーション値と推定値の時間変動の一例として、ODペア3-1、ODペア3-2、ODペア3-3における推定結果を図-4.3、図-4.4、図-4.5に示したが、この図から本推定手法によるOD交通量の推定結果がほぼ妥当な値であることがわかる。

4.4.2 旅行時間が時間変動する場合の適用結果

ここでは、図-4.6に示したような高速道路部分区間を想定したシミュレーションデータを用いて、旅行時間が各ODペア間で異なり、また時間変動するような場合におけるモデルの妥当性を検証する。OD間推移確率については、平均値回りのランダム変動がある場合および時間的な傾向変動がある場合の2種類の状況を考え、また流出入交通量の観測値に誤差が含まれる場合についても検討する。

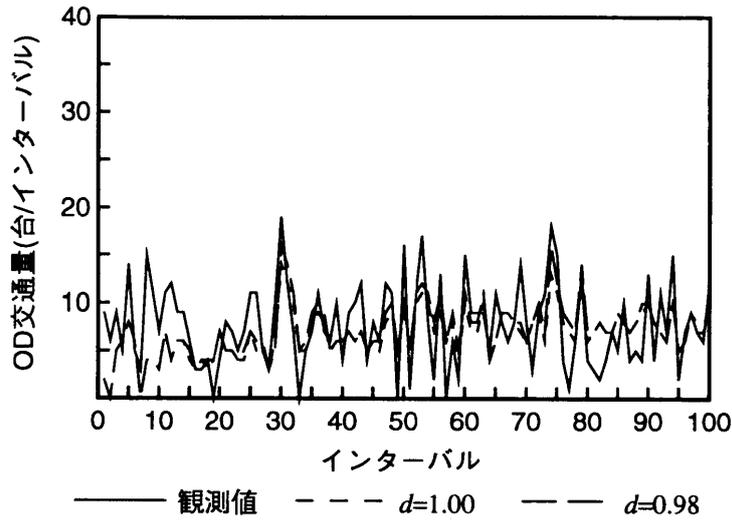


図-4.4 推定OD(3-2)交通量の時間変動(sim-3)

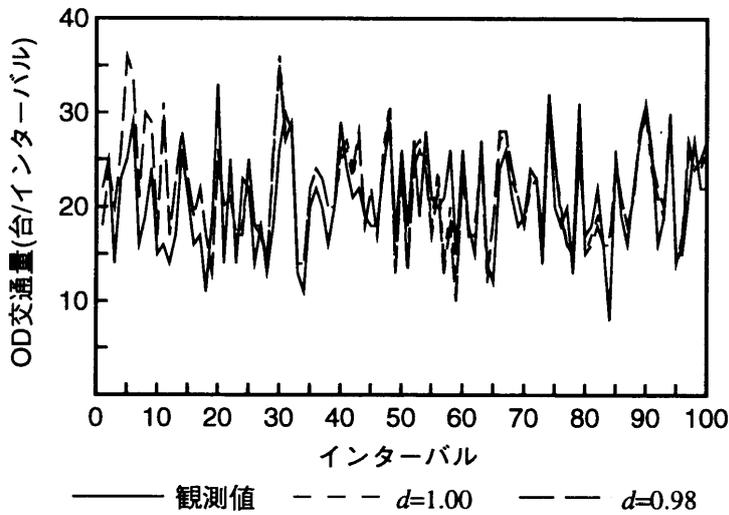


図-4.5 推定OD(3-3)交通量の時間変動(sim-3)

(1) 平均値まわりのランダム変動がある場合

ここでは、OD間推移確率が定常的で、ある平均値の回りをランダムに変動する場合におけるモデルの適用性を検証する。データは以下に示す4種類を、それぞれ100インターバル分発生させた。

sim-i 発生交通量を平均値 \bar{q} が以下のようなポワソン乱数として与え、またOD間推移確率 B を以下のように一定値として与え、OD交通量はこれらから計算される値を整数化して与えた。

$$\bar{q}' = \begin{bmatrix} 50 & 20 & 30 \end{bmatrix}$$

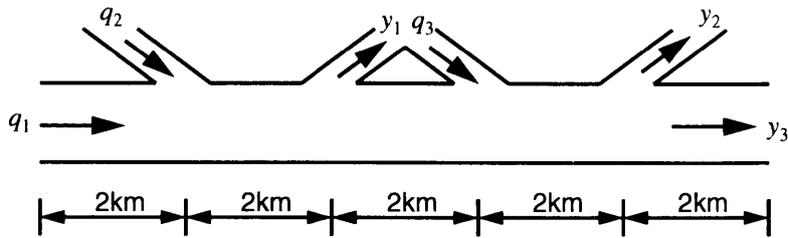


図-4.6 高速道路の部分区間

$$B = \begin{bmatrix} 0.15 & 0.25 & 0.6 \\ 0.05 & 0.20 & 0.75 \\ - & 0.05 & 0.95 \end{bmatrix}$$

sim-ii 発生交通量はsim-iに同じで、OD間推移確率の平均値 \bar{B} がsim-iの B に等しく、その偏差 ΔB の分布を平均0、標準偏差0.05の正規分布として与えた。

sim-iii OD間推移確率の偏差 ΔB の分布を平均0、標準偏差0.10の正規分布として与えた。

sim-iv OD間推移確率の偏差 ΔB の分布を平均0、標準偏差0.15の正規分布として与えた。

なお旅行時間は実際には、交通量や交通容量に従属すると考えられるが、ここでは簡単のために以下のような値として考え、また追い越しが発生するような場合にはその値を切り詰め調整した。

case-1 各OD間の旅行時間の平均値 $\bar{\tau}$ およびその標準偏差 Ξ を以下のように与えた。

$$\bar{\tau} = \begin{bmatrix} 4.0 & 8.0 & 10.0 \\ 2.0 & 6.0 & 8.0 \\ - & 2.0 & 4.0 \end{bmatrix}$$

$$\Xi = \begin{bmatrix} 0.20 & 0.40 & 0.50 \\ 0.20 & 0.10 & 0.40 \\ - & 0.10 & 0.10 \end{bmatrix}$$

case-2 標準偏差 Ξ を以下のようにした。

$$\Xi = \begin{bmatrix} 0.39 & 0.86 & 1.18 \\ 0.15 & 0.53 & 0.95 \\ - & 0.21 & 0.32 \end{bmatrix}$$

case-3 標準偏差 Ξ を以下のようにした。この値は100インターバル内において負値を生じないような最大の標準偏差となっている。

$$\Xi = \begin{bmatrix} 0.78 & 1.72 & 2.36 \\ 0.30 & 1.06 & 1.90 \\ - & 0.42 & 0.63 \end{bmatrix}$$

また旅行時間があまりにも小さすぎることは非現実的であることから、その下限値を下に示した τ_0 のように設け、これを下回るものは下限値と置き換えた。

$$\tau_0 = \begin{bmatrix} 1.8 & 3.6 & 4.5 \\ 0.90 & 2.7 & 3.6 \\ - & 0.9 & 1.8 \end{bmatrix}$$

表-4.3 旅行時間変動の場合の相関係数
($d = 1.00$)

	case-1	case-2	case-3
sim-i	0.9998	0.9997	0.9998
sim-ii	0.9887	0.9887	0.9885
sim-iii	0.9630	0.9628	0.9620
sim-iv	0.9298	0.9295	0.9278

表-4.4 旅行時間変動の場合のRMS誤差
($d = 1.00$)

	case-1	case-2	case-3
sim-i	0.2507	0.2529	0.2479
sim-ii	1.7217	1.7243	1.7411
sim-iii	3.1977	3.2118	3.2566
sim-iv	4.5737	4.5906	4.6611

以上の3種類の旅行時間に対応した流出交通量をそれぞれ計算し、これを流出交通量観測値とした。

表-4.3および表-4.4に推定結果が最も優れていた $d = 1.00$ の場合の各適合度指標を示してある。なお旅行時間が時間変動する場合には推定時間帯に差が生じ、推定時間インターバルの始めと終わりの部分についてはその前後のデータがなければ正確には推定できないため、ここでの考察においては20インターバルから80インターバルの区間の推定結果を対象とする。

相関係数を見てみると全般に高い相関性を有していることがわかり、またこれらの値はOD間推移確率の変動の大きさに比例しており、特にsim-iの場合には非常に高い相関性があることがわかる。旅行時間の変動の大きさに関しては、その影響はあまり大きくなく、旅行時間を正確に捉えることが可能であれば、その変動の大きさはOD交通量の推定結果には大きな影響を及ぼさないとと言える。次にRMS誤差の値を見ても同様のことが言え、本提案モデルにおいて旅行時間が時間変動するような現実的な場合においてもOD交通量の推定結果は、ほぼ妥当な値で得られることがわかる。

(2) 時間的な傾向変動がある場合

これまではOD間推移確率が時間的にランダムに変動する場合についての推定結果を検証してきたが、ここではOD間推移確率が時間的な傾向変動をする場合について検証する。発生させたデータは、基本的な部分は上述したsim-i, sim-ii, sim-iii, sim-ivと同様であるが、それぞれODペア1-3に対応するOD間推移確率の平均値をサインカーブにより0.6から0.2へと傾向変動させ、またODペア1-2をその逆とした。この場合のcase-3に対応する観測値と推定値の各適合度指標を表-4.5および表-4.6に示してある。一般的な傾向はOD間推移確率が時間的に傾向変動を見せない場合に良く似ているが、相対的にOD間推移確率の変動の大きさの影響が小さくなるようであり、相関係数、RMS誤差ともsim-iとsim-ivの差が小さくなっていることがわかる。また d の値を見てみると、0.92か0.90の場合の推定結果が最も優れていることがわかり、OD間推移確率が傾向変動をする場合には d の値を1より小さくし、過去のデータを減却するように評価することにより推定結果が良くなると言える。

表-4.5 傾向変動がある場合の相関係数
(case-3)

d	1.00	0.98	0.92	0.90
sim-i	0.9906	0.9880	0.9942	0.9937
sim-ii	0.9825	0.9800	0.9866	0.9864
sim-iii	0.9656	0.9631	0.9694	0.9694
sim-iv	0.9509	0.9483	0.9515	0.9511

表-4.6 傾向変動がある場合のRMS誤差
(case-3)

d	1.00	0.98	0.92	0.90
sim-i	1.3603	1.7377	1.3610	1.3967
sim-ii	2.0111	2.3363	1.9613	1.9581
sim-iii	3.0187	3.2775	3.0177	2.9996
sim-iv	4.0635	4.3025	4.1857	4.1800

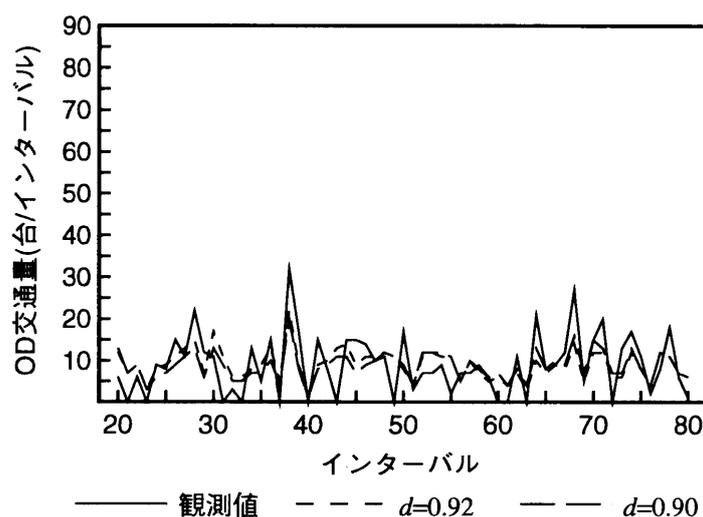


図-4.7 推定OD(1-1)交通量の時間変動(sim-iv)

図-4.7, 図-4.8, 図-4.9に sim-iv の場合の OD ペア 1-1, 1-2, 1-3 における推定結果を示したが, この図からも $d = 0.90$ における推定結果は妥当であることがわかる。

(3) 観測値に誤差が含まれる場合

車両感知器などから得られる観測交通量は実際には正確な値ではなく, ある程度の誤差を含んでいるのが一般的である。ここでは観測値に含まれる誤差が推定結果にどのような影響を及ぼすかを検証する。発生させた誤差はその平均値が0で標準偏差が流入交通量の平均値の10%, 20%, 30%の3種類の場合を考え, またランダムに存在する場合と偏って存在する場合などについても検証するため, 以下の3種類についてそれぞれ適用計算を行った。なおこの場合のOD交通量は sim-iv で旅行時間は case-3 とした。

$$\text{err0} \quad q_i(t) = q_i(t) + \epsilon_i(t) \quad i \in I \quad (4.82)$$

$$\text{err+} \quad q_i(t) = q_i(t) + 0.2\bar{q}_i + \epsilon_i(t) \quad i \in I \quad (4.83)$$

$$\text{err-} \quad q_i(t) = q_i(t) - 0.2\bar{q}_i + \epsilon_i(t) \quad i \in I \quad (4.84)$$

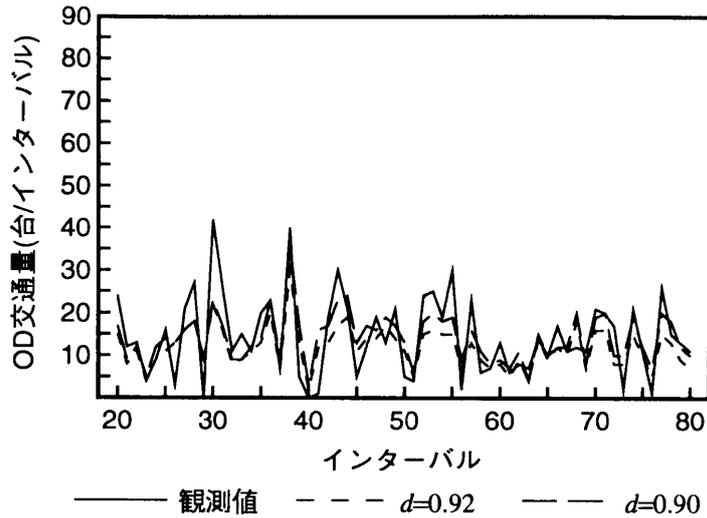


図-4.8 推定OD(1-2)交通量の時間変動(sim-iv)

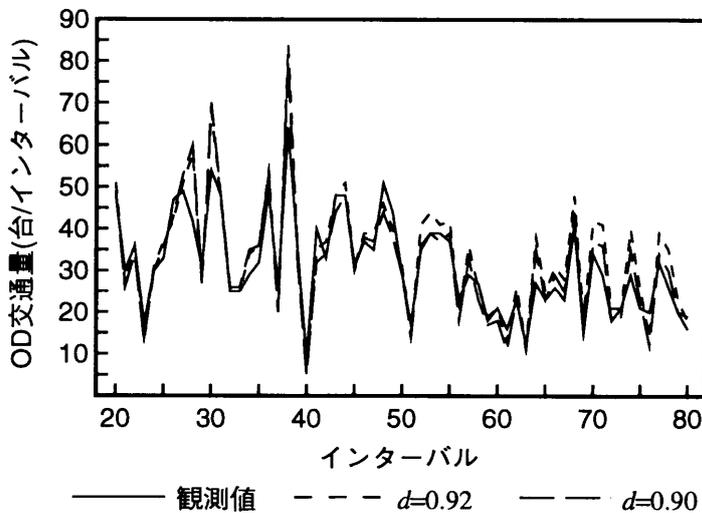


図-4.9 推定OD(1-3)交通量の時間変動(sim-iv)

ここで $\epsilon_i(t)$ は発生させた誤差， \bar{q}_i は流入交通量の平均値であり，流出交通量についても同様に計算した。

表-4.7および表-4.8に各誤差を含んだ場合の観測値と推定値の各適合度指標を示してある。当然のことながら誤差が大きくなるに従い相関係数，RMS誤差とも悪くなっていることがわかるが，相関性については誤差の標準偏差が平均流出入交通量の10%の場合においては誤差がない場合とほとんど差がなく，err+においては優れている場合さえあることがわかる。しかしながらRMS誤差の値を見てみると，err+およびerr-でRMS誤差の値が約1.0程増加していることがわかる。全般的には偏った誤差を含んでいるerr+およびerr-の推定結果の方が精度は悪くなっている。

表-4.7 誤差を含んだ場合の相関係数

	10%	20%	30%
err0	0.9269	0.8970	0.8718
err+	0.9299	0.9036	0.8869
err-	0.9162	0.8797	0.8438

表-4.8 誤差を含んだ場合のRMS誤差

	10%	20%	30%
err0	4.6878	5.5705	6.2600
err+	5.5166	6.3567	6.5846
err-	5.5667	6.3086	7.2611

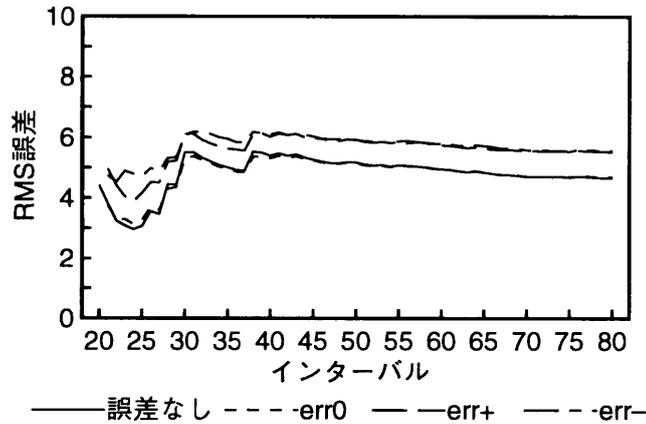


図-4.10 RMS誤差の変動(10%)

図-4.10, 図-4.11, 図-4.12に20インターバルから各時間インターバルまでにおける全推定結果のRMS誤差のうち誤差の標準偏差が観測値の10%, 20%, 30%の場合の図を示してあるが, この図から全般的に40インターバルぐらいまではRMS誤差の値は変動するが, インターバルが進むに従ってOD間推移確率が不偏推定量に漸近していくため, それ以降RMS誤差の値は各状況下で緩やかに収束していくことがわかる. また全般的に誤差なし, err0, err+およびerr-の順にRMS誤差の値が大きく, その相互間の差は時間の経過とともに一定値になっていくようである. さらにこの図から, 観測値に含まれる誤差が累積され, 推定結果の精度が時間の経過とともに悪くなるような傾向はないことがわかる.

4.5 まとめ

本章では, 経路選択行動を考慮する必要のない各ODペア間の経路が一つに限定されるようなネットワークを対象とし, ネットワークへの流入交通量および流出交通量の時系列観測値を用いて, 時間変動するOD交通量をオンラインで推定可能な手法を提案した. 提案した手法においては, OD交通量を動的過程として扱い, ネットワークで観測されている流入交通量および流出交通量の時系列データを有効に用いることから, 静的なOD交通量の推定手法で必要となるターゲットODのようなOD交通量に関する事前情報は必要ない.

本章第2節では, 時間変動するOD交通量とネットワークへの流出入交通量観測値の間の動的關係を定式化し, この関係式をもとに動的OD交通量の推定問題を定式化した. 続いて第3節で,

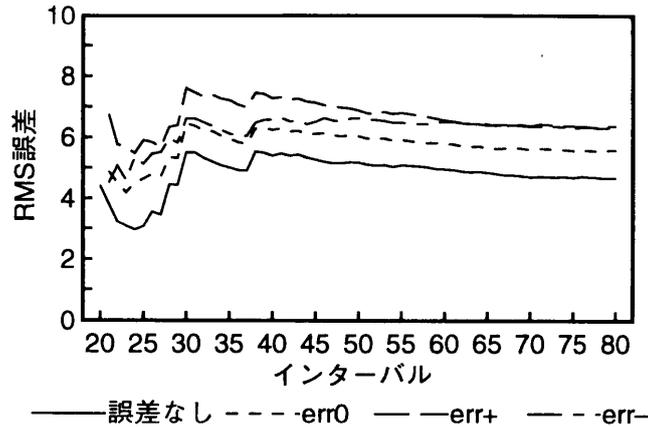


図-4.11 RMS 誤差の変動 (20%)

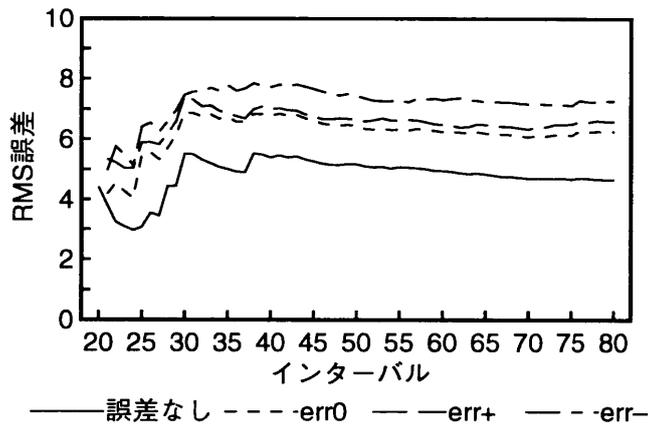


図-4.12 RMS 誤差の変動 (30%)

第2節で定式化した推定問題を、これまで多くの手法で扱ってきた各ODペア間の旅行時間が等しく一定値であるような高速道路ジャンクションや交差点を対象にした場合と、各ODペア間の旅行時間が異なり時間変動するような場合について、それぞれ推定問題を解くための方法を示した。またOD間推移確率に対する不等式制約条件を扱うための方法を述べた。

第4節においては、シミュレーションデータを用いて提案した手法の適用計算を実際に行った。適用計算は、旅行時間が同一で一定の場合と、旅行時間が各ODペア間で異なり時間変動する場合のそれぞれについて行った。後者の場合には、さらにOD間推移確率が定常的に変動する場合と時間的に傾向変動する場合の2つの場合を想定したシミュレーションデータを作成し、さらに観測値に誤差が含まれている場合の影響も分析した。適用計算を通して得られた知見をまとめると以下のようなになる。

(1) 旅行時間が各ODペアで同一で時間的に変動しない場合における適用結果から、提案した手法によって非常に優れたOD交通量の推定結果が得られることがわかった。推定精度はOD間推移確率の変動の大きさに比例し、OD間推移確率の変動が大きな場合には忘却係数の値を1.0より小

さくして、過去のデータほど減却して評価した方が良い結果が得られることがわかった。

(2) 旅行時間が各ODペアで異なり時間的に変動する場合における適用結果から、各状況下において全般的に妥当なOD交通量の推定値が得られることがわかった。OD間推移確率が平均値の周りでランダムに変動する場合は、OD交通量の推定精度はOD間推移確率の変動の大きさに比例するが、旅行時間の変動の大きさにはあまり影響を受けないことがわかった。OD間推移確率が時間的に傾向変動を見せる場合においては、OD間推移確率の変動の大きさによる影響が小さくなり、また忘却係数の値は約0.9の場合の推定結果が最も優れていた。このことは、取り入れる過去のデータほどより小さな重みを乗じて評価した場合の推定結果の方が優れているということであり、OD間推移確率の時間的な変動を捉えるという本手法の特徴を反映した結果であると言える。

(3) 観測値にランダムな誤差が含まれる場合の適用結果から、その誤差の標準偏差が観測値の10%程度であれば、推定結果にあまり大きな影響がないことがわかった。また観測値の誤差がかなり大きな場合や、偏った誤差がある場合においては推定結果の精度は悪化するが、誤差が累積されるような傾向は見られなかった。

(4) 適用事例を通し、提案した有制約非線形最適化計算の再帰的アルゴリズムによって、OD間推移確率に関する等式および不等式制約条件を満足した解が、各交通状況、ネットワーク状況下で得られることがわかった。

以上のように、シミュレーションデータを用いた適用計算の結果からは本手法の妥当性が示されたが、今後はより多くのネットワークや交通状況下における適用計算を行い、より普遍的な分析を行う必要があると思われる。また何よりも、実際の道路ネットワーク上における適用計算を行い、本手法の実用性を検証していく必要がある。

参考文献

- 1) ITS アメリカ著, 財団法人道路新産業開発機構訳: ITS(高度道路交通システム)日米欧3極比較レポートPARTII, 財団法人道路新産業開発機構, 1997
- 2) 松本幸正, 藤田素弘, 松井寛: 流出入交通量観測値を用いた時間OD交通量のオンライン推定手法に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No. 12, pp. 463-474, 1995
- 3) Chang, G. L. and Wu, J. : Recursive estimation of time-varying origin - destination flows from traffic counts in freeway corridors, *Transportation Research*, Vol. 28B, No. 2, pp. 141-160, 1994
- 4) 安井一彦, 池之上慶一郎, 桜井慎一: 街路における旅行時間予測, 土木計画学研究・論文集, No. 11, pp. 137-144, 1993
- 5) 高橋一哉, 井上健士, 横田孝義, 小林芳樹: 車群パターンマッチングによる旅行時間計測の検討, 第14回交通工学研究発表会論文集, pp. 29-32, 1994
- 6) 松井寛, 藤田素弘, 中川雄太郎: ニューラルネット駆動型ファジィ推論による所要時間推定, 土木計画学研究・講演集, No. 17, pp. 197-220, 1995
- 7) Ljung, L. and Söderström, T. : *Theory and practice of recursive identification*, MIT Press, Cambridge, MA, 1983
- 8) 中溝高好: 信号解析とシステム同定, コロナ社, 1988
- 9) Cremer, M. and Keller, H. : Dynamic identification of flows from traffic counts at complex intersections, *Proceedings of the 8th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, University of Toronto Press, pp. 121-142, 1981
- 10) Cremer, M. and Keller, H. : A systems dynamics approach to the estimation of entry and exit O-D flows, *Proceedings of the 9th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, VNS Science Press, pp. 431-450, 1984
- 11) Cremer, M. and Keller, H. : A new class of dynamic methods for the identification of origin - destination flows, *Transportation Research*, Vol. 21B, No. 2, pp. 117-132, 1987
- 12) Nihan, N. L. and Davis, G. A. : Recursive estimation of origin - destination matrices from input / output counts, *Transportation Research*, Vol. 21B, No. 2, pp. 149-163, 1987
- 13) 楊海, 秋山孝正, 佐佐木綱: 時系列観測交通量を用いたODフローのオンライン推計法, 交通工学, Vol. 27, No. 1, pp. 33-41, 1992
- 14) 相吉英太郎, 志水清孝: 数理計画法演習, 朝倉書店, 1985

第5章 リンク交通量観測値に基づく多経路ネットワーク上における動的OD交通量の推定

5.1 概説

第4章において、各OD間に存在する経路が1つに限定されるようなネットワークを対象として、道路ネットワーク上から得られる交通量の時系列観測値に基づいて動的OD交通量を推定する手法を示した。この手法においてはOD間の経路が限定されるためドライバーの経路選択行動を扱う必要がなく、対象とするネットワーク内での交通量観測値は直接的には必要なく、ネットワーク境界での観測値、すなわち流出入交通量の観測値のみからOD交通量が推定可能であった。しかしながら現実の道路ネットワークにおいては、各OD間で複数の経路が存在することも多く、ドライバーの経路選択行動を考慮した動的OD交通量の推定手法の確立が不可欠である。

そこで本章¹⁾では、OD間に複数の経路が存在するような都市高速道路ネットワークや部分街路ネットワークで適用可能な動的OD交通量の推定手法を提案する。本手法では、対象とするネットワークへの流入交通量とネットワーク上のいくつかのリンクおよびネットワークからの流出地点での交通量観測値を用いるが、ドライバーの経路選択行動に関しては2つの場合を考える。一つは、ドライバーの経路選択行動が確率配分原理に従うと仮定する場合で、この場合にはドライバーの経路選択行動を規定する配分パラメータの設定が事前に必要となる。もう一つは、ドライバーの経路選択行動が利用者均衡原理に従うと仮定した場合で、この場合にはネットワークの交通状況に応じてOD交通量および経路利用率を同時的に推定することになる。これら両手法においてはOD交通量は動的過程として扱われるため、他の静的な手法^{2),3),4),5)}において必要であるOD交通量に関する事前情報は何ら必要なく、また提案する再帰的アルゴリズムにより、過去のすべての観測データを記憶しておく必要はなくなることから、オンラインでの適用が可能である。

本章は以下のように構成される。最初に第2節において、ネットワーク上で観測される各交通量観測値間の動的な相互関係を定式化する。一つはネットワークへの流入交通量とネットワーク上のリンク交通量の関係であり、もう一つは流入交通量とネットワークからの流出交通量の関係である。次に第3節において、第2節で定式化した観測交通量間の動的な関係式を基に、動的OD交通量の推定問題を定式化するが、ドライバーの経路選択行動が確率配分原理に従うと仮定した場合と利用者均衡原理に従うと仮定した場合の2つの場合についてそれぞれ定式化を行う。特に利用者均衡原理に従うと仮定した場合の推定問題は、観測交通量間の相互関係式からなる上位問題と静的なネットワーク均衡問題からなる下位問題の2レベル問題の構造を持ち、この問題の特徴についても説明する。さらに第4節において、ドライバーの経路選択行動が確率配分原理に従うと仮定した場合の動的OD交通量の推定問題の解法を示すが、これはドライバーの経路選択行動が利用者均衡原理に従うと仮定した場合のOD交通量の推定問題の上位問題の解法と同様になる。続いて不等式制約条件に対するラグランジェ乗数の更新方法を示し、さらに推定問題を解くため

の再帰的アルゴリズムを、それぞれの場合について示す。

第5節では、動的な交通状況を再現するために簡単なネットワークを用いてシミュレーションデータを作成し、このシミュレーションデータを用いて、提案する動的OD交通量の推定手法の検証を行う。シミュレーションは、ドライバーの経路選択行動が確率配分原理、利用者最適化原理および利用者均衡原理に従う場合のそれぞれについて行い、道路ネットワーク上での動的な交通流状態を再現する。はじめに経路選択行動に確率配分原理を仮定した場合の動的OD交通量の推定手法の適用計算を行い、続いて利用者均衡原理を仮定した場合の動的OD交通量の推定手法の適用計算を行うが、後者の場合においてはドライバーの経路選択行動が仮定と異なる利用者最適化原理に従う場合のシミュレーションデータを用いた適用計算も行い、提案する手法の一般性を検証する。また両者において、OD間推移確率が定常的に変動する場合と時間傾向的に変動する場合の2つの状況下における適用計算を行う。最後に第6節で本章において得られた知見をまとめる。

5.2 多経路ネットワーク上における交通量観測値間の動的関係

対象とする道路ネットワークへの流入交通量とネットワーク上のいくつかのリンクおよび流出交通量が車両感知器などによって、推定単位時間毎に観測されていると考える。ここではこれら交通量の時系列観測値間相互の動的な関係を定式化する。はじめに流入交通量とリンク交通量の関係を、続いて流入交通量と流出交通量の関係を定式化する。

5.2.1 流入交通量とリンク交通量の動的関係の定式化

ネットワークへの流入地点で観測されている流入交通量とネットワーク上で観測されているリンク交通量との間の動的な関係を、OD交通量を介して定式化する。はじめに以下のように記号を定義する。

- $q_i(t)$: インターバル t の時間内に流入地点 i からネットワークへ流入する交通量の観測値
- $v_l(t)$: インターバル t の時間内にリンク l で観測される交通量
- $f_{ij}(t)$: インターバル t の時間内に流入地点 i からネットワークへ流入するODペア $i-j$ 間の交通量
- $b_{ij}(t)$: インターバル t の時間内に流入地点 i からネットワークへ流入する交通量のうち、流出地点 j へ到着する交通量の比率
- $h_{ijm}(t)$: インターバル t の時間内に流入地点 i からネットワークへ流入し、経路 m を利用して流出地点 j へ到着する交通量
- $p_{ijm}(t)$: インターバル t の時間内に流入地点 i からネットワークへ流入し、流出地点 j へ到着する交通量のうち、経路 m を利用する交通量の比率

ここでインターバル t は連続時間表示では u を推定単位時間とし、 $[t \cdot u, (t+1) \cdot u)$ の範囲とする。 $f_{ij}(t)$, $h_{ijm}(t)$ はそれぞれ流入時刻ベースのOD交通量、経路交通量を、 $b_{ij}(t)$, $p_{ijm}(t)$ はそれぞれ流入時刻ベースのOD間推移確率、経路利用率を意味する。

流入交通量とOD交通量および経路交通量の間には、以下のような関係が成り立つ。なお I はネットワークへの流入地点の集合、 J は流出地点の集合、 Ω はODペアの集合を表し、 M_{ij} はODペア $i-j$ 間の経路の集合を表す。

$$f_{ij}(t) = q_i(t)b_{ij}(t) \quad i, j \in \Omega \quad (5.1)$$

$$h_{ijm}(t) = p_{ijm}(t)f_{ij}(t) \quad m \in M_{ij}, i, j \in \Omega \quad (5.2)$$

$$= p_{ijm}(t)q_i(t)b_{ij}(t) \quad m \in M_{ij}, i, j \in \Omega \quad (5.3)$$

またOD間推移確率は、以下の条件を満足しなければならない。

$$\sum_{j \in J} b_{ij}(t) = 1 \quad i \in I \quad (5.4)$$

$$0 \leq b_{ij}(t) \quad i, j \in \Omega \quad (5.5)$$

式(5.4)の等式制約条件は、流入時刻ベースのOD交通量と流入交通量観測値の間の保存則を表しており、式(5.5)の不等式制約条件はOD交通量の非負条件を表している。同様に経路利用率は、以下の条件を満足する。

$$\sum_{m \in M_{ij}} p_{ijm}(t) = 1 \quad i, j \in \Omega \quad (5.6)$$

$$0 \leq p_{ijm}(t) \quad m \in M_{ij}, i, j \in \Omega \quad (5.7)$$

交通現象を動的に扱うため、車両がネットワークへ流入した時刻と、ネットワーク上のリンクで観測される時刻との間にはその距離により時間差が生じる。特に同一車両が観測される時刻は、観測されるリンクの位置によって異なってくる。ここでインターバルのはじめの時間にリンク観測地点を通過する車両の流入地点から観測地点までの旅行時間を $\tau_{ijml}(t)$ とする。ただし $l \in L_{ijm}$ であり、 L_{ijm} はODペア $i-j$ 間の経路 m 上に存在するリンクの集合を表す。

いまある一つのリンクに着目して考えてみる。図-5.1に、2つの経路が1つのリンクで合流するような簡単なネットワークにおける概念的な時間-距離線図を示す。この図からわかるように、インターバル t のはじめの時間にあるリンクで観測される車両は、 $\tau(t)$ 時間前に流入地点からネットワークへ流入したことになり、同様に次のインターバル $t+1$ のはじめの時間にあるリンクで観測される車両は、 $\tau(t+1)$ 時間前に流入地点から流入したことになる。ここで、車両の追い越しはほとんど無く、また各時間インターバル内においては車両が一様に分布していると仮定し、ODペア $i-j$ 間の経路 m に着目すると、インターバル t の時間内にリンク l で観測される車両は、 $t \cdot u - \tau_{ijml}(t)$ から $(t+1) \cdot u - \tau_{ijml}(t+1)$ の時間内に流入地点 i から流入し、経路 m を通行してきた車両ということになる。

ここで観測時刻ベースの経路交通量、すなわちODペア $i-j$ 間の経路 m を通行する交通量のうち、インターバル t の時間内にリンク l で観測される交通量を $\chi_{ijml}(t)$ とすると、

$$\chi_{ijml}(t) = \sum_{n=t-\eta_{ijml}(t)-1}^{t-\eta_{ijml}(t+1)} h_{ijm}(n) - \left\{ 1 - \left(\frac{\tau_{ijml}(t)}{u} - \eta_{ijml}(t) \right) \right\} h_{ijm}(t - \eta_{ijml}(t) - 1)$$

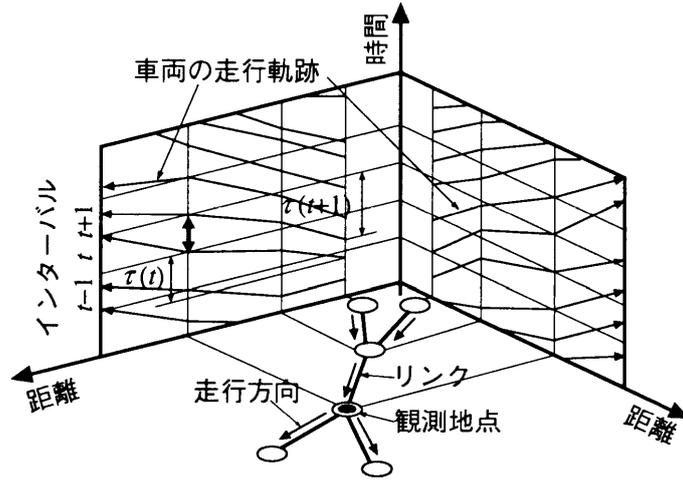


図-5.1 概念的な時間-距離線図

$$- \left(\frac{\tau_{ijml}(t+1)}{u} - \eta_{ijml}(t+1) \right) h_{ijm}(t - \eta_{ijml}(t+1)) \quad l \in L_{ijm}, m \in M_{ij}, i, j \in \Omega \quad (5.8)$$

と表せられる。ここで $\eta_{ijml}(t)$ は以下に示すように、観測リンクまでの旅行時間を単位時間で離散化したものである。

$$\eta_{ijml}(t) \equiv \text{int} \left[\frac{\tau_{ijml}(t)}{u} \right]$$

式(5.8)で表せられる交通量をODペアおよびその経路で総和することにより、インターバル t の時間内に観測されるリンク l の交通量が表せられる。すなわち

$$v_l(t) = \sum_{i,j \in \Omega} \sum_{m \in M_{ij}} \delta_{ijml} \chi_{ijml}(t) \quad l \in L \quad (5.9)$$

となり、この式に式(5.3)および式(5.8)を代入すると、流入交通量観測値とリンク交通量観測値の動的な関係が以下のように定式化される。なお δ_{ijml} は、リンク l がODペア $i-j$ 間の経路 m 上に存在するとき1、その他0となるダミー変数であり、 L はネットワーク全体のリンク集合である。

$$v_l(t) = \sum_{i,j \in \Omega} \sum_{m \in M_{ij}} \delta_{ijml} \left[\sum_{n=\theta_{ijml}(t)}^{\theta_{ijml}(t+1)} p_{ijm}(n) q_i(n) b_{ij}(n) - (1 - \xi_{ijml}(t)) p_{ijm}(\theta_{ijml}(t)) q_i(\theta_{ijml}(t)) b_{ij}(\theta_{ijml}(t)) - \xi_{ijml}(t+1) p_{ijm}(\theta_{ijml}(t+1)) q_i(\theta_{ijml}(t+1)) b_{ij}(\theta_{ijml}(t+1)) \right] \quad l \in L \quad (5.10)$$

ここで

$$\begin{aligned} \theta_{ijml}(t) &\equiv t - \eta_{ijml}(t) - 1 \\ \xi_{ijml}(t) &\equiv \frac{\tau_{ijml}(t)}{u} - \eta_{ijml}(t) \end{aligned}$$

である。

式(5.10)からわかるように、旅行時間の変動を考慮した動的な流入交通量とリンク交通量の関係を定式化するため、リンクで観測される時間インターバルは1インターバルであるにも関わらず、流入地点から流入する時間インターバルは各ODペアの経路ごとの旅行時間の差異により数インターバルにまたがることもあり得ることがわかる。しかしながらこの場合、リンク観測時間インターバル t に対して成り立つ関係式の数はいずれのリンクに対しても一つであるため、ここでは $t - \eta_{ijml}(t) - 1$ から $t - \eta_{ijml}(t + 1)$ のインターバル内における平均的なOD間推移確率を用いて表すことにする。すなわち

$$v_l(t) = \sum_{i,j \in \Omega} \sum_{m \in M_{ij}} \delta_{ijml} \left[\sum_{n=\theta_{ijml}(t)}^{\theta_{ijml}(t+1)} p_{ijm}(n) q_i(n) - (1 - \xi_{ijml}(t)) p_{ijm}(\theta_{ijml}(t)) q_i(\theta_{ijml}(t)) - \xi_{ijml}(t+1) p_{ijm}(\theta_{ijml}(t+1)) q_i(\theta_{ijml}(t+1)) \right] b_{ij}(\theta_{ijml}(t)) \quad l \in L \quad (5.11)$$

により、流入交通量とリンク交通量の動的な関係が表せられることになる。なおこれ以降 $b_{ij}(\theta_{ijml}(t))$ は $t - \eta_{ijml}(t) - 1$ から $t - \eta_{ijml}(t + 1)$ のまでの平均的な推移確率を表す。

5.2.2 流入交通量と流出交通量の動的関係の定式化

ネットワークからの流出交通量が観測されている場合には、OD交通量を推定する際に、その観測流出交通量の情報を用いることができる。ここでは、流入交通量とリンク交通量との関係を定式化した場合と同様に、流入交通量と流出交通量の動的な関係を定式化する。

流出交通量は、流出ノードに接続するリンクを流出する交通量の総和であると考えられるため、基本的には前章における定式化の手順と全く同様になるが、リンク観測地点 l に関する情報が無くなる点が異なる。

ここでリンク交通量観測値と流出交通量観測値の違いを明確にするために、以下のような記号を新たに定義する。

- $y_j(t)$: インターバル t の時間内に流出地点 j からネットワークを流出する交通量の観測値
- $g_{ijm}(t)$: 流入地点 i から流入し、インターバル t の時間内に流出地点 j からネットワークを流出する経路 m を通過してきた交通量
- $\tilde{\tau}_{ijm}(t)$: インターバル t のはじめの時間 $t \cdot u$ に流出地点 j へ到着した車両の流入地点から経路 m を利用した場合の旅行時間

流入交通量と流入時刻ベースのOD交通量および流出交通量と流出時刻ベースのOD交通量の間には、以下の関係が成り立つ。

$$q_i(t) = \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_{ij}} h_{ijm}(t) \quad i \in I \quad (5.12)$$

$$y_j(t) = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_{ij}} g_{ijm}(t) \quad j \in J \quad (5.13)$$

さらに流入時刻ベースの経路交通量と流出時刻ベースの経路交通量の間には，流入交通量とリンク交通量の関係を定式化した場合と同様な考えにより，次の関係が成立することがわかる．

$$g_{ijm}(t) = \sum_{n=t-\tilde{\eta}_{ijm}(t)-1}^{t-\tilde{\eta}_{ijm}(t+1)} h_{ijm}(n) - \left\{ 1 - \left(\frac{\tilde{\tau}_{ijm}(t)}{u} - \tilde{\eta}_{ijm}(t) \right) \right\} h_{ijm}(t - \tilde{\eta}_{ijm}(t) - 1) \\ - \left(\frac{\tilde{\tau}_{ijm}(t+1)}{u} - \tilde{\eta}_{ijm}(t+1) \right) h_{ijm}(t - \tilde{\eta}_{ijm}(t+1)) \quad m \in M_{ij}, i, j \in \Omega \quad (5.14)$$

ここで，先程と同様に

$$\tilde{\eta}_{ijm}(t) \equiv \text{int} \left[\frac{\tilde{\tau}_{ijm}(t)}{u} \right]$$

である．この流入時刻ベースの経路交通量と流出時刻ベースの経路交通量の関係を式(5.13)へ代入し，さらに式(5.3)を用いると，流入交通量の観測値 $q_i(t)$ と流出交通量の観測値 $y_j(t)$ の動的な関係が次のように定式化される．

$$y_j(t) = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_{ij}} \left[\sum_{n=\tilde{\theta}_{ijm}(t)}^{\tilde{\theta}_{ijm}(t+1)} p_{ijm}(n) q_i(n) b_{ij}(n) \right. \\ \left. - \left(1 - \tilde{\xi}_{ijm}(t) \right) p_{ijm}(\tilde{\theta}_{ijm}(t)) q_i(\tilde{\theta}_{ijm}(t)) b_{ij}(\tilde{\theta}_{ijm}(t)) \right. \\ \left. - \tilde{\xi}_{ijm}(t+1) p_{ijm}(\tilde{\theta}_{ijm}(t+1)) q_i(\tilde{\theta}_{ijm}(t+1)) b_{ij}(\tilde{\theta}_{ijm}(t+1)) \right] \quad j \in J \quad (5.15)$$

ここで

$$\tilde{\theta}_{ijm}(t) \equiv t - \tilde{\eta}_{ijm}(t) - 1 \\ \tilde{\xi}_{ijm}(t) \equiv \frac{\tilde{\tau}_{ijm}(t)}{u} - \tilde{\eta}_{ijm}(t)$$

である．この場合にも，上記関係を $t - \tilde{\eta}_{ijm}(t) - 1$ から $t - \tilde{\eta}_{ijm}(t+1)$ のインターバル内における平均的な OD 間推移確率を用いて表すことにする．すなわち

$$y_j(t) = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_{ij}} \left[\sum_{n=\tilde{\theta}_{ijm}(t)}^{\tilde{\theta}_{ijm}(t+1)} p_{ijm}(n) q_i(n) - \left(1 - \tilde{\xi}_{ijm}(t) \right) p_{ijm}(\tilde{\theta}_{ijm}(t)) q_i(\tilde{\theta}_{ijm}(t)) \right. \\ \left. - \tilde{\xi}_{ijm}(t+1) p_{ijm}(\tilde{\theta}_{ijm}(t+1)) q_i(\tilde{\theta}_{ijm}(t+1)) \right] b_{ij}(\tilde{\theta}_{ijm}(t)) \quad j \in J \quad (5.16)$$

となる．以上の定式化は，流入交通量とリンク交通量を定式化した場合において，リンク l の観測地点がノード j と置き換わったと考えられ，その結果ダミー変数 δ_{ijml} が式中より消える．しかしながらこの場合には，各リンクまでの旅行時間に関する情報は失われ，OD ペア間の旅行時間に関する情報しか利用できなくなる．

5.3 動的 OD 交通量の推定問題の定式化

前節では，ネットワーク上で観測されている各交通量観測値間の動的な関係を定式化した，ここではこれらの定式化した関係式を基に動的 OD 交通量の推定問題を定式化する．はじめに，ドラ

イバーの経路選択行動が確率配分原理に従うと仮定した場合の動的OD交通量の推定問題を、続いてドライバーの経路選択行動が利用者均衡原理に従うと仮定した場合の動的OD交通量の推定問題を定式化する。

5.3.1 確率配分原理に基づく動的OD交通量の推定問題の定式化

ドライバーの経路選択行動が、ネットワークへ流入する時点の瞬間的な確率配分原理に従うと仮定した場合の動的OD交通量の推定問題を定式化する。したがって、これまでに示した旅行時間の変動を考慮した交通量観測値間の動的な概念および経路選択行動の静的な概念を同時に扱うために次のような仮定を設ける。すなわち、ドライバーはネットワークを走行中にネットワークへ流入する時点で選択した経路を変更することはないと仮定する。この仮定は、ドライバーがネットワークへの流入時点での道路状況で経路を決定するといった意志決定の過程を表すものであり、現実的な仮定であると考えられる。またネットワークへ流入した車両は、ネットワークに設置されている少なくとも一カ所以上の観測地点を1インターバル以内に通過するものとする。これは、ネットワークへの流入地点のすぐ下流には交通量を観測する車両感知器等が設置されているということの意味する。

これまでも述べてきたように、一般に交通量観測値からOD交通量を求める問題は、求めるODペアの数よりも問題を構成する独立な方程式の数の方が少ない劣決定問題であり、したがってそのような問題において唯一解を求めるためにはターゲットODなどの付加的な情報を与えたりしなければならず、OD交通量の推定精度はそのターゲットODの精度に大きく依存する事が知られている。しかしながら時間変動するOD交通量を推定する場合には、精度の高いターゲットODのような付加的な情報の入手は期待できない場合が多い。そこでOD間推移確率は急激には大きく変化しないという仮定の下で、OD交通量を動的過程として扱い、それらの時間的変動を直接反映する交通量観測値の時系列データを用いることによって、何ら付加的な情報を与えることなく唯一的にOD間推移確率を同定でき、したがってOD交通量も一意に推定可能となる。このような考えから、リンク交通量と流入交通量および流出交通量と流入交通量の観測値間の動的な関係は、次のように表せられる。

$$v_l(t) = \sum_{i,j \in \Omega} \gamma_{ijl}(t) b_{ij}(T) + \varepsilon_l(t) \quad l \in L, t = 1, 2, \dots, T \quad (5.17)$$

$$y_j(t) = \sum_{i \in I} \tilde{\gamma}_{ij}(t) b_{ij}(T) + \varepsilon_j(t) \quad j \in J, t = 1, 2, \dots, T \quad (5.18)$$

ただし

$$\gamma_{ijl}(t) \equiv \sum_{m \in M_{ij}} \delta_{ijml} \left[\sum_{n=\theta_{ijml}(t)}^{\theta_{ijml}(t+1)} p_{ijm}(n) q_i(n) - (1 - \xi_{ijml}(t)) p_{ijm}(\theta_{ijml}(t)) q_i(\theta_{ijml}(t)) - \xi_{ijml}(t+1) p_{ijm}(\theta_{ijml}(t+1)) q_i(\theta_{ijml}(t+1)) \right]$$

$$\tilde{\gamma}_{ij}(t) \equiv \sum_{m \in M_{ij}} \left[\sum_{n=\tilde{\theta}_{ijm}(t)}^{\tilde{\theta}_{ijm}(t+1)} p_{ijm}(n) q_i(n) - \left(1 - \tilde{\xi}_{ijm}(t)\right) p_{ijm}(\tilde{\theta}_{ijm}(t)) q_i(\tilde{\theta}_{ijm}(t)) - \tilde{\xi}_{ijm}(t+1) p_{ijm}(\tilde{\theta}_{ijm}(t+1)) q_i(\tilde{\theta}_{ijm}(t+1)) \right]$$

であり, $\varepsilon_l(t), \varepsilon_j(t)$ は観測値, 所要時間などの誤差や時系列の確率的変動誤差などをすべて含んだ誤差を表す.

ここで OD ペア $i-j$ 間の経路利用率 $p_{ijm}(t)$ は, ドライバーの経路選択行動が logit 型の確率配分原理に従うと仮定すると, OD ペア $i-j$ 間の経路 m の所用時間 $\tau_{ijm}(t)$ を用いて以下のように与えられる. なおこの経路所要時間は直接観測されているか, もしくは推定されているものとする.

$$p_{ijm}(t) = \frac{e^{-\vartheta \tau_{ijm}(t)}}{\sum_{m \in M_{ij}} e^{-\vartheta \tau_{ijm}(t)}} \quad m \in M_{ij}, i, j \in \Omega \quad (5.19)$$

ここで, ϑ は配分パラメータであり, ネットワーク上を走行するドライバーの経路選択特性を表すものであり, 適用するネットワークの交通状況に応じて事前に最適な値を設定しておく必要がある^{1),6),7)}.

本研究においては, 流入した車両は 1 インターバル以内にいずれかの観測地点を通過するように観測地点が配置されていると仮定していることから, 上式において推定する OD 間推移確率のインターバル $\theta_{ijml}(t), \tilde{\theta}_{ijm}(t)$ の最も現時点に近いインターバルは現インターバル T と等しくなり, したがってこれらの式は各時間断面において, 観測時点から過去に向けて OD 間推移確率は一定であると仮定した場合と同様な表現となっていることがわかる. しかしながらこのままでは OD 間推移確率の時間的変動を捉えることは難しい. そこで忘却係数 $d^{8),9)}$ を導入し, 上式の各両辺の残差平方和をとることによって, 与えられた経路利用率下における OD 間推移確率の推定問題は, 以下のように構成される.

$$\min \sum_{t=1}^T d^{T-t} \sum_{l \in L} \left(\sum_{i,j \in \Omega} \gamma_{ijl}(t) b_{ij}(T) - v_l(t) \right)^2 + \sum_{t=1}^T d^{T-t} \sum_{j \in J} \left(\sum_{i \in I} \tilde{\gamma}_{ij}(t) b_{ij}(T) - y_j(t) \right)^2 \quad (5.20)$$

$$\text{s.t.} \quad 0 \leq b_{ij}(T) \leq 1 \quad i, j \in \Omega \quad (5.21)$$

$$b_{ij}(T) = 0 \quad i, j \notin \Omega \quad (5.22)$$

なおこの問題においては, 等式制約条件 (5.4) を明示的に扱うことは困難となるため, 代わりに OD 間推移確率に関する制約に上限値を加え, 式 (5.21) にあるような不等式制約条件として扱い, その後等式制約条件 (5.4) を満たすように解を修正する方法を用いることとする. 具体的な修正方法については, 後ほど述べる.

5.3.2 利用者均衡原理に基づく OD 交通量の推定問題の定式化

前項では, ドライバーの経路選択行動が確率配分原理に従うと仮定した場合の OD 交通量の推定問題の定式化を行った. しかしながらこの方法では, ドライバーの経路選択行動を規定する配

分パラメータ等を事前に最適に設定する必要があった。そこでここでは、ドライバーの経路選択行動とOD交通量をネットワークの交通状況に応じて同時に求めていく方法を提案する。

ドライバーの経路選択行動は瞬間的な利用者均衡原理に従うと仮定する。この利用者均衡原理の導入により、対象とするネットワーク上のすべてのリンク上での交通量観測データは必要なくなり、流入地点およびいくつかのリンク、もしくは流出地点での時系列観測値があれば本手法が適用可能となり、また事前に配分パラメータの設定等の必要もなくなる。流入地点から各観測地点までの所要時間は前項と同様に直接観測されているか、もしくは推定され利用可能であるとする。

利用者均衡原理を仮定した経路選択行動は、静的な枠組みでの扱いとする。その理由は、本章で提案するOD交通量の推定モデルにおいては、各時間インターバルごとのOD交通量を再帰的に推定するため、単一時間インターバルでの情報により経路選択行動が決定可能な配分原理の導入が不可欠なためであることと、その扱いが簡便であることである。

動的OD交通量の推定問題は、2つの問題から構成される。一つはある任意の経路利用率の条件下で交通量観測値に基づいてOD間推移確率すなわちOD交通量を推定する問題であり、もう一つは与えられたOD交通量に基づく均衡ネットワーク交通量の配分問題である。上位問題として位置付けられる各交通量観測値間の動的関係式からなるOD間推移確率の推定問題の定式化は、前項の定式化において、経路利用率が事前に与えられない場合に相当する。したがって前項とまったく同様な手順により、以下の問題が導かれる。

$$\min \sum_{t=1}^T d^{T-t} \sum_{l \in L} \left(\sum_{i,j \in \Omega} \gamma_{ijl}(t) b_{ij}(T) - v_l(t) \right)^2 + \sum_{t=1}^T d^{T-t} \sum_{j \in J} \left(\sum_{i \in I} \tilde{\gamma}_{ij}(t) b_{ij}(T) - y_j(t) \right)^2 \quad (5.23)$$

$$\text{s.t.} \quad 0 \leq b_{ij}(T) \leq 1 \quad i, j \in \Omega \quad (5.24)$$

$$b_{ij}(T) = 0 \quad i, j \notin \Omega \quad (5.25)$$

ただしこの場合には、経路利用率 $p_{ijm}(t)$ は未知である。

この交通量観測値間の関係式から構成される問題を上位問題として位置付ければ、ドライバーの経路選択行動がネットワークへの流入時点における瞬間的な利用者均衡原理に基づく仮定した場合の動的OD交通量の推定問題は以下のように構成される。

$$\min \sum_{t=1}^T d^{T-t} \sum_{l \in L} \left(\sum_{i,j \in \Omega} \gamma_{ijl}(t) b_{ij}(T) - v_l(t) \right)^2 + \sum_{t=1}^T d^{T-t} \sum_{j \in J} \left(\sum_{i \in I} \tilde{\gamma}_{ij}(t) b_{ij}(T) - y_j(t) \right)^2 \quad (5.26)$$

$$\text{s.t.} \quad 0 \leq b_{ij}(T) \leq 1 \quad i, j \in \Omega \quad (5.27)$$

$$b_{ij}(T) = 0 \quad i, j \notin \Omega \quad (5.28)$$

$$\min \sum_{l \in L} \int_0^{v_l(t)} \pi_l(\omega) d\omega \quad (5.29)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{m \in M_{ij}} h_{ijm}(t) = f_{ij}(t) \quad i, j \in \Omega \quad (5.30)$$

$$h_{ijm}(t) \geq 0 \quad i, j \in \Omega, m \in M_{ij}$$

ここで

$$f_{ij}(t) = q_i(t)b_{ij}(t) \quad i, j \in \Omega \quad (5.31)$$

$$v_l(t) = \sum_{i,j \in \Omega} \sum_{m \in M_{ij}} \delta_{ijml} h_{ijm}(t) \quad l \in L \quad (5.32)$$

であり、 $\pi_l(\omega)$ はリンクコスト関数である。

(1) 推定問題の特徴

本問題は以下のような上位問題と下位問題を持つ Stackelberg 計画問題¹⁰⁾として表すことができる。

$$\min \quad \mathcal{F}_1(b, v(b, p(b))) \quad (5.33)$$

$$\text{s.t.} \quad \mathcal{G}_1(b, v(b, p(b))) \leq 0 \quad (5.34)$$

$$\mathcal{F}_2(b, v(b, p(b))) = \min_v \mathcal{F}_2(b, v(b, p(b))) \quad (5.35)$$

$$\text{s.t.} \quad \mathcal{G}_2(b, v) \leq 0 \quad (5.36)$$

本問題においては、上位問題は b と v に関して狭義な凸関数、下位問題は与えられた b のもとで v に関して狭義な凸関数、また上・下位問題の制約条件も凸関数である凸2レベル最適化問題¹¹⁾となっている。このような問題では下位問題をその必要十分条件に置き換えたり、変分不等式条件などに置き換えて厳密にその解を求める方法が提案される一方で、そのアルゴリズムの簡便さやモデルの実用性を重んじてヒューリスティックに解を求める方法も数多く提案されてきた。すなわち本問題のような Stackelberg 計画問題におけるヒューリスティックな解法は、 b と v を交互に固定しながら上位問題と下位問題を交互に解いて、その収束解を求める^{12),13),14),15)}というものである。

一般にこのような解法では必ずしも Stackelberg 計画問題の大域的最適解が得られる保証はない。しかし最適道路網計画で Stackelberg 計画問題を扱った佐佐木、朝倉¹⁶⁾のモデルや、利用者均衡条件下における静的な OD 交通量推定モデルとして Stackelberg 計画問題を扱った楊ら¹⁴⁾、Yan *et al*¹⁵⁾の数値計算例において示されたように、本モデルにおいてのヒューリスティックな解法もまた効率よく大域的な最適解に収束することが期待できる。しかしながら本モデルの上位問題は動的なモデルであり、その解法には双補性の収束方法を利用していることなどから、解の収束性の検討については適用事例で確認することとする。

本研究で提案する利用者均衡問題を下位問題に位置付けた動的な OD 交通量の推定モデルの特徴をまとめると次のようになる。

(i) 動的な OD 交通量の推定において、本モデルでは時系列で入手したデータを有効利用でき、また下位問題に利用者均衡問題を位置付けていることから、観測地点数がある程度少なくとも OD 交通量が推定可能である。

(ii) 従来の研究では、既存の OD 表からターゲット OD を作成することがモデル適用において不可欠であったが、本研究では時系列データが利用可能なことと、流入交通量の観測値を用いると

いう理由から、そのようなターゲット OD を必要とせず、よって既存の OD 表が得られないネットワークにおいても適用可能である。

(iii) 本研究では、静的な OD 交通量の推定問題を扱った従来のほとんどの研究のように OD 交通量を直接求めるのではなく、まず OD 間推移確率 $b_{ij}(t)$ を求めて、この $b_{ij}(t)$ に観測流入交通量を乗じることによって OD 交通量としている。これによって、 $b_{ij}(t)$ は時系列に取り入れる観測交通量の大きさ自体の変化にはあまり影響を受けず、OD 間推移確率が緩やかに変化するという仮定の下において、忘却係数が時系列の OD 間推移確率を適度に加重して $b_{ij}(t)$ を推定できるように考慮されている。

(iv) 本研究における動的な OD 交通量推定手法では、常に過去のデータを用いて、現時点の OD 交通量を推定するため、あらかじめ適用の対象とする全時間帯において観測交通量データを用意しておく必要はなく、過去のデータを利用しながらオンラインで OD 交通量を推定することが可能である。

(v) 上位問題では経路上の所要時間を取り入れることによって、流入交通量とリンク交通量相互の時間的なずれおよび流出入交通量相互の時間的なずれをそれぞれ考慮して動的な関係を取り込んでいるが、下位問題では各時間帯で別々に行う静的配分を基本としている。これは下位問題で得られたリンク交通量、経路交通量は上位問題でそのまま使うのではなく、経路利用率に置き換えて利用しているということを考慮すれば、下位問題に静的配分を利用しても OD 間推移確率の精度に大きく影響を与えないとして考え、また静的配分の持つ操作性と上位問題との整合性の高さを考慮し、簡便に交通均衡条件を取り入れられるという意味において採用したものである。さらに冒頭でも述べたように本研究の再帰的推定手法においては、単一のインターバルにおいて経路選択率を決定する必要があることから、本研究では静的な配分原則を取り入れることとした。

5.4 問題の解法

前節において、ドライバーの経路選択行動が確率配分原理に基づく場合と、利用者均衡原理に基づく場合の2つの場合における OD 交通量の推定問題を定式化したが、ここではその問題の解法について説明する。確率配分原理に基づく場合の OD 交通量の推定問題の解法と、利用者均衡原理に基づく場合の OD 交通量の推定問題の上位問題の解法は全く同様となる。したがってここでは、利用者均衡原理に基づく OD 交通量の推定問題の解法を述べる。

本研究で用いる解法は、その実用性を考慮して上位問題と下位問題を繰り返し解いていくヒューリスティックな方法とする。下位問題を解く方法については良く知られた Frank-Wolfe 法¹⁷⁾などを用いて解くことができるため、その説明については省略する。

はじめに上位問題に対応するラグランジュ問題のうち、任意のラグランジュ乗数が与えられた時の OD 間推移確率の求め方を、続いてラグランジュ乗数の求め方について説明する。なお確率配分に基づく OD 交通量の推定の場合には、事前に配分パラメータを設定し、各インターバルごとの経路利用率を計算することにより、この上位問題のみから OD 交通量の推定値が得られることになる。

5.4.1 上位問題の解法

上位問題に対応するラグランジェ問題は、 $\lambda(T)$ 、 $\mu(T)$ を不等式制約に対するラグランジェ乗数とすると以下のように構成される。

$$\begin{aligned} \min \mathcal{L} = & \sum_{t=1}^T d^{T-t} (\Gamma'(t)\mathbf{b}(T) - \mathbf{v}(t))' (\Gamma'(t)\mathbf{b}(T) - \mathbf{v}(t)) \\ & + \sum_{t=1}^T d^{T-t} (\Psi'(t)\mathbf{b}(T) - \mathbf{y}(t))' (\Psi'(t)\mathbf{b}(T) - \mathbf{y}(t)) \\ & - \lambda'(T)\mathbf{b}(T) + \mu'(T) (\mathbf{b}(T) - \mathbf{1}) \end{aligned} \quad (5.37)$$

ここで、ベクトル、マトリクスは以下に示すとおりであり、記号'は転置を表し、 Ω に含まれないODペアに対する要素は除くものとする。

$$\begin{aligned} \mathbf{v}'(t) &\equiv [v_1(t), v_2(t), \dots, v_l(t), \dots] \\ \mathbf{y}'(t) &\equiv [y_1(t), y_2(t), \dots, y_j(t), \dots] \\ \Gamma(t) &\equiv \begin{bmatrix} \gamma_{111}(t) & \gamma_{112}(t) & \dots & \gamma_{11l}(t) & \dots \\ \gamma_{121}(t) & \gamma_{122}(t) & \dots & \gamma_{12l}(t) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{ij1}(t) & \gamma_{ij2}(t) & \dots & \gamma_{ijl}(t) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \\ \Psi(t) &\equiv \begin{bmatrix} \psi_{111}(t) & \psi_{112}(t) & \dots & \psi_{11m}(t) & \dots \\ \psi_{121}(t) & \psi_{122}(t) & \dots & \psi_{12m}(t) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \psi_{ij1}(t) & \psi_{ij2}(t) & \dots & \psi_{ijm}(t) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \\ &\begin{cases} \psi_{ijm}(t) \equiv \tilde{\gamma}_{ij}(t) & (m = j) \\ \psi_{ijm}(t) \equiv 0 & (m \neq j) \end{cases} \\ \mathbf{b}'(T) &\equiv [b_{11}(T), b_{12}(T), \dots, b_{ij}(T), \dots] \\ \lambda'(T) &\equiv [\lambda_{11}(T), \lambda_{12}(T), \dots, \lambda_{ij}(T), \dots] \\ \mu'(T) &\equiv [\mu_{11}(T), \mu_{12}(T), \dots, \mu_{ij}(T), \dots] \end{aligned}$$

この場合の最適性の一次の必要条件は

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{b}(T)} &= 2 \sum_{t=1}^T d^{T-t} \Gamma(t) (\Gamma'(t)\mathbf{b}(T) - \mathbf{v}(t)) + 2 \sum_{t=1}^T d^{T-t} \Psi(t) (\Psi'(t)\mathbf{b}(T) - \mathbf{y}(t)) \\ &\quad - \lambda(T) + \mu(T) = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (5.38)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda(T)} \leq \mathbf{0}, \quad \lambda_{ij}(T) \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_{ij}(T)} = 0 \quad i, j \in \Omega, \quad \lambda(T) \geq \mathbf{0} \quad (5.39)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \boldsymbol{\mu}(T)} \leq \mathbf{0}, \quad \mu_{ij}(T) \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mu_{ij}(T)} = 0 \quad i, j \in \Omega, \quad \boldsymbol{\mu}(T) \geq \mathbf{0} \quad (5.40)$$

であり、式(5.38)から以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} \mathbf{b}(T) = & \left(\sum_{t=1}^T d^{T-t} \boldsymbol{\Gamma}(t) \boldsymbol{\Gamma}'(t) + \sum_{t=1}^T d^{T-t} \boldsymbol{\Psi}(t) \boldsymbol{\Psi}'(t) \right)^{-1} \\ & \times \left(\sum_{t=1}^T d^{T-t} \boldsymbol{\Gamma}(t) \mathbf{v}(t) + \sum_{t=1}^T d^{T-t} \boldsymbol{\Psi}(t) \mathbf{y}(t) + \frac{1}{2} \boldsymbol{\lambda}(T) - \frac{1}{2} \boldsymbol{\mu}(T) \right) \end{aligned} \quad (5.41)$$

ここで、交通量観測値から計算される値を以下のように定義し直す。

$$\mathbf{C}_1(T) \equiv \sum_{t=1}^T d^{T-t} \boldsymbol{\Gamma}(t) \mathbf{v}(t) \quad (5.42)$$

$$= \mathbf{C}_1(T-1) \cdot d + \boldsymbol{\Gamma}(T) \mathbf{v}(T) \quad (5.43)$$

$$\mathbf{C}_2(T) \equiv \sum_{t=1}^T d^{T-t} \boldsymbol{\Psi}(t) \mathbf{y}(t) \quad (5.44)$$

$$= \mathbf{C}_2(T-1) \cdot d + \boldsymbol{\Psi}(T) \mathbf{y}(T) \quad (5.45)$$

$$\mathbf{A}_1(T) \equiv \sum_{t=1}^T d^{T-t} \boldsymbol{\Gamma}(t) \boldsymbol{\Gamma}'(t) \quad (5.46)$$

$$= \mathbf{A}_1(T-1) \cdot d + \boldsymbol{\Gamma}(T) \boldsymbol{\Gamma}'(T) \quad (5.47)$$

$$\mathbf{A}_2(T) \equiv \sum_{t=1}^T d^{T-t} \boldsymbol{\Psi}(t) \boldsymbol{\Psi}'(t) \quad (5.48)$$

$$= \mathbf{A}_2(T-1) \cdot d + \boldsymbol{\Psi}(T) \boldsymbol{\Psi}'(T) \quad (5.49)$$

これらの値は、現インターバル T の各交通量観測値およびインターバル $T-1$ における計算値のみから算出できるものであり、すなわち本手法においては全時間インターバルにおける各交通量観測値の値を記憶しておく必要はなく、オンラインでの推定に適した手法であることがわかる。

これらを式(5.41)へ代入すると

$$\mathbf{b}(T) = (\mathbf{A}_1(T) + \mathbf{A}_2(T))^{-1} \left(\mathbf{C}_1(T) + \mathbf{C}_2(T) + \frac{1}{2} \boldsymbol{\lambda}(T) - \frac{1}{2} \boldsymbol{\mu}(T) \right) \quad (5.50)$$

が得られ、以上より得られる観測結果をもとに上記各式を計算することによって、ラグランジュ乗数 $\lambda_{ij}(T), \mu_{ij}(T)$ のある実行可能解のもとでのOD間推移確率の最適解を再帰的に求めることができる。また(5.4)の等式制約条件を満たすように次のような正規化法¹⁸⁾を用いてOD間推移確率の推定値を修正する。

$$b_{ij}(t) = \frac{b_{ij}(t)}{\sum_{j \in J} b_{ij}(t)} \quad i, j \in \Omega \quad (5.51)$$

5.4.2 ラグランジェ乗数の更新

ラグランジェ乗数は、前章と同様に式(5.37)で示されるOD交通量の推定問題の双対問題を構成し、その問題を解くことによって求められ¹⁹⁾、この双対問題に対する最適解が得られれば、その解に対する式(5.50)のOD間推移確率の値が原問題の最適解になる。前章においては、OD間推移確率の不等式制約条件の上下限值に対するラグランジェ乗数を個別に更新していく方法を説明したが、ここではより効率的にラグランジェ乗数の最適解を求めることができる不等式制約条件の上下限値を同時に考慮した更新方法について説明する。ここで

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\boldsymbol{\lambda}(T), \boldsymbol{\mu}(T))}{\partial \boldsymbol{\lambda}(T)} = -\mathbf{b}(T) \quad (5.52)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\boldsymbol{\lambda}(T), \boldsymbol{\mu}(T))}{\partial \boldsymbol{\mu}(T)} = \mathbf{b}(T) - \mathbf{1} \quad (5.53)$$

であるから、もし $-b_{ij}(T) \neq 0$ 、 $b_{ij}(T) - 1 \neq 0$ ならば、それは双対目的関数の増加方向ということになる。ところでラグランジェ乗数のある成分が0で、その成分に対応する式(5.52)、式(5.53)の値が負であるならば、その方向に解の更新方向をとるとラグランジェ乗数は負値となってしまう。そこで双対目的関数の解の更新方向を非負制約条件を侵害しないように次のようにとる。

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} -b_{ij}(T) & \text{if } \lambda_{ij}(T) > 0 \\ \max(0, -b_{ij}(T)) & \text{if } \lambda_{ij}(T) = 0 \end{cases} \quad (5.54)$$

$$\rho_{ij} = \begin{cases} b_{ij}(T) - 1 & \text{if } \mu_{ij}(T) > 0 \\ \max(0, b_{ij}(T) - 1) & \text{if } \mu_{ij}(T) = 0 \end{cases} \quad (5.55)$$

さらにこの方向を用いて次のようにラグランジェ乗数を更新する。

$$\lambda_{ij}(T) = \lambda_{ij}(T) + \hat{\sigma} \sigma_{ij} \quad i, j \in \Omega \quad (5.56)$$

$$\mu_{ij}(T) = \mu_{ij}(T) + \hat{\sigma} \rho_{ij} \quad i, j \in \Omega \quad (5.57)$$

ここで $\hat{\sigma}$ は直線探索パラメータである。これらの式を双対問題に代入し、その必要条件から以下が得られる。

$$\hat{\sigma} = 2 \frac{-\mathbf{b}'\boldsymbol{\sigma} + (\mathbf{b} - \mathbf{1})'\boldsymbol{\rho}}{\boldsymbol{\sigma}'\mathbf{A}^{-1}\boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\rho}'\mathbf{A}^{-1}\boldsymbol{\rho} - 2\boldsymbol{\sigma}'\mathbf{A}^{-1}\boldsymbol{\rho}} \quad (5.58)$$

ここで \mathbf{A} は、 $\mathbf{A}_1(T) + \mathbf{A}_2(T)$ である。なお上記の値以外に、 $\hat{\sigma}$ には制約条件(5.21)に対する上下限値が存在するため、それらの範囲内で設定する必要がある。

ところでBell²⁰⁾の提案したラグランジェ乗数の更新アルゴリズムは基本的には

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ij} - 2 \frac{b_{ij}}{A_{(ij)(ij)}} \quad (5.59)$$

となっている。これは、本研究で提案するラグランジェ乗数の更新アルゴリズムにおいて、各要素のラグランジェ乗数を別々に個別に更新する場合に相当する。この場合には、各乗数間の相互関係を無視し各乗数を独立に更新していくことになる。一方、本研究で提案するアルゴリズムは各乗数間の相互関係を考慮し、さらに制約の上下限をも同時に考慮することから、Bellのアルゴリズムと比較し、より一般的な形であるとともに、乗数更新の効率化が得られることになる。

5.4.3 動的OD交通量の推定アルゴリズム

ネットワーク上で観測される交通量観測値を推定単位時間ごとに取り入れ、それらの観測値を用いて動的OD交通量を再帰的に推定するためのアルゴリズムを示す。はじめにドライバーの経路選択行動が確率配分原理に従うと仮定した場合の確率配分型モデルのアルゴリズムを、続いてドライバーの経路選択行動に利用者均衡原理を仮定した利用者均衡型モデルのアルゴリズムを示すが、利用者均衡型モデルの上位問題の解法と確率配分型モデルの解法は原則的に全く同じである。

(1) 確率配分型モデル

確率配分型モデルのアルゴリズムは以下のようになる。

step0 初期化する。すなわち $C_1(0) = \mathbf{0}$, $C_2(0) = \mathbf{0}$, $A_1(0) = \mathbf{0}$, $A_2(0) = \mathbf{0}$ とし, $T = 1$ とする。

step1 得られる所要時間を用いて経路利用率を計算する。ただし $t = 1, 2, \dots, T_{ini}$ であり, T_{ini} は初期推定インターバルである。

$$p_{ijm}(t) = \frac{e^{-\vartheta\tau_{ijm}(t)}}{\sum_{m \in M_{ij}} e^{-\vartheta\tau_{ijm}(t)}}$$

step2 交通量観測値 $q(T)$, $v(T)$, $y(T)$ を得る。

step3 交通量観測値および経路利用率を用いて、以下の値を順次計算する。

$$C_1(T) = C_1(T-1) \cdot d + \Gamma(T)v(T)$$

$$C_2(T) = C_2(T-1) \cdot d + \Psi(T)y(T)$$

$$A_1(T) = A_1(T-1) \cdot d + \Gamma(T)\Gamma'(T)$$

$$A_2(T) = A_2(T-1) \cdot d + \Psi(T)\Psi'(T)$$

step4 T が初期推定インターバルより小さい時は $T = T + 1$ として step2 へ。それ以外は次のステップへ。

step5 上位問題に対するラグランジェ乗数の初期化。すなわち $\lambda^{(0)}(T) = \mathbf{0}$, $\mu^{(0)}(T) = \mathbf{0}$ とし, $n = 1$ とする。

step6 OD間推移確率の値を更新する。

$$b^{(n)}(T) = (A_1(T) + A_2(T))^{-1} \left(C_1(T) + C_2(T) + \frac{1}{2}\lambda^{(n-1)}(T) - \frac{1}{2}\mu^{(n-1)}(T) \right)$$

step7 収束判定。すなわちもし $|-b_{ij}^{(n)}(T)| < \varepsilon$, $j \in \{i, j | \lambda_{ij}^{(n-1)}(T) > 0\}$, $-b_{ij}^{(n)}(T) < \varepsilon$, $j \in \{i, j | \lambda_{ij}^{(n-1)}(T) = 0\}$ かつ $|b_{ij}^{(n)}(T) - 1| < \varepsilon$, $j \in \{i, j | \mu_{ij}^{(n-1)}(T) > 0\}$, $b_{ij}^{(n)}(T) - 1 < \varepsilon$, $j \in \{i, j | \mu_{ij}^{(n-1)}(T) = 0\}$ ならば step10 へ行き、そうでなければ次のステップへ行く。ただし ε は十分小さな正数である。

step8 不等式制約条件に対するラグランジェ乗数の更新方向およびステップ幅を求める。

$$\sigma_{ij}^{(n)} = \begin{cases} -b_{ij}^{(n)}(T) & \text{if } \lambda_{ij}^{(n-1)}(T) > 0 \\ \max(0, -b_{ij}^{(n)}(T)) & \text{if } \lambda_{ij}^{(n-1)}(T) = 0 \end{cases}$$

$$\rho_{ij}^{(n)} = \begin{cases} b_{ij}^{(n)}(T) - 1 & \text{if } \mu_{ij}^{(n-1)}(T) > 0 \\ \max(0, b_{ij}^{(n)}(T) - 1) & \text{if } \mu_{ij}^{(n-1)}(T) = 0 \end{cases}$$

$$\hat{\sigma}^{(n)} = 2 \frac{-\mathbf{b}^{(n)'} \boldsymbol{\sigma}^{(n)} + (\mathbf{b}^{(n)} - \mathbf{1})' \boldsymbol{\rho}^{(n)}}{\boldsymbol{\sigma}^{(n)'} \mathbf{A}^{-1} \boldsymbol{\sigma}^{(n)} + \boldsymbol{\rho}^{(n)'} \mathbf{A}^{-1} \boldsymbol{\rho}^{(n)} - 2 \boldsymbol{\sigma}^{(n)'} \mathbf{A}^{-1} \boldsymbol{\rho}^{(n)}}$$

step9 不等式制約条件に対するラグランジェ乗数を更新し, $n = n + 1$ として step6 へ

$$\lambda_{ij}^{(n)}(T) = \lambda_{ij}^{(n-1)}(T) + \hat{\sigma}^{(n)} \sigma_{ij}^{(n)}$$

$$\mu_{ij}^{(n)}(T) = \mu_{ij}^{(n-1)}(T) + \hat{\sigma}^{(n)} \rho_{ij}^{(n)}$$

step10 推定された OD 間推移確率の値を修正する。

$$b_{ij}(T) = \frac{b_{ij}^{(n)}(T)}{\sum_{j \in J} b_{ij}^{(n)}(T)}$$

step11 OD 交通量の推定値を計算し, $T = T + 1$ として step2 へ。

$$f_{ij}(T) = q_i(T) b_{ij}(T)$$

(2) 利用者均衡型モデル

利用者均衡型モデルのアルゴリズムは以下のようになる。

step0 初期化する。すなわち $\mathbf{C}_1^{(0)}(0) = \mathbf{0}$, $\mathbf{C}_2^{(0)}(0) = \mathbf{0}$, $\mathbf{A}_1^{(0)}(0) = \mathbf{0}$, $\mathbf{A}_2^{(0)}(0) = \mathbf{0}$ とし, $T = 1$ とする。

step1 初期実行可能な $p_{ijm}^{(0)}(t)$ を与える。ただし $t = 1, 2, \dots, T_{ini}$ であり, T_{ini} は初期推定インターバルである。

step2 交通量観測値 $\mathbf{q}(T)$, $\mathbf{v}(T)$, $\mathbf{y}(T)$ を得る。 $m = 0$ とする。

step3 交通量観測値および $p_{ijm}^{(m)}(T)$ を用いて, 以下の値を順次計算する。

$$\mathbf{C}_1^{(m)}(T) = \mathbf{C}_1(T-1) \cdot d + \boldsymbol{\Gamma}^{(m)}(T) \mathbf{v}(T)$$

$$\mathbf{C}_2^{(m)}(T) = \mathbf{C}_2(T-1) \cdot d + \boldsymbol{\Psi}^{(m)}(T) \mathbf{y}(T)$$

$$\mathbf{A}_1^{(m)}(T) = \mathbf{A}_1(T-1) \cdot d + \boldsymbol{\Gamma}^{(m)}(T) \boldsymbol{\Gamma}^{(m)'}(T)$$

$$\mathbf{A}_2^{(m)}(T) = \mathbf{A}_2(T-1) \cdot d + \boldsymbol{\Psi}^{(m)}(T) \boldsymbol{\Psi}^{(m)'}(T)$$

step4 T が初期推定インターバルより小さい時は $T = T + 1$ として step2 へ。それ以外は次のステップへ。

step5 上位問題に対するラグランジェ乗数の初期化. すなわち $\lambda^{(0)}(T) = \mathbf{0}$, $\mu^{(0)}(T) = \mathbf{0}$ とし,
 $n = 1$ とする.

step6 OD間推移確率の値を更新する.

$$\mathbf{b}^{(n)}(T) = \left(\mathbf{A}_1^{(m)}(T) + \mathbf{A}_2^{(m)}(T) \right)^{-1} \left(\mathbf{C}_1^{(m)}(T) + \mathbf{C}_2^{(m)}(T) + \frac{1}{2} \boldsymbol{\lambda}^{(n-1)}(T) - \frac{1}{2} \boldsymbol{\mu}^{(n-1)}(T) \right)$$

step7 収束判定. すなわちもし $|-b_{ij}^{(n)}(T)| < \varepsilon$, $j \in \{i, j | \lambda_{ij}^{(n-1)}(T) > 0\}$, $-b_{ij}^{(n)}(T) < \varepsilon$, $j \in \{i, j | \lambda_{ij}^{(n-1)}(T) = 0\}$ かつ $|b_{ij}^{(n)}(T) - 1| < \varepsilon$, $j \in \{i, j | \mu_{ij}^{(n-1)}(T) > 0\}$, $b_{ij}^{(n)}(T) - 1 < \varepsilon$, $j \in \{i, j | \mu_{ij}^{(n-1)}(T) = 0\}$ ならばstep10へ行き, そうでなければ次のステップへ行く. ただし ε は十分小さな正数である.

step8 不等式制約条件に対するラグランジェ乗数の更新方向およびステップ幅を求める.

$$\sigma_{ij}^{(n)} = \begin{cases} -b_{ij}^{(n)}(T) & \text{if } \lambda_{ij}^{(n-1)}(T) > 0 \\ \max(0, -b_{ij}^{(n)}(T)) & \text{if } \lambda_{ij}^{(n-1)}(T) = 0 \end{cases}$$

$$\rho_{ij}^{(n)} = \begin{cases} b_{ij}^{(n)}(T) - 1 & \text{if } \mu_{ij}^{(n-1)}(T) > 0 \\ \max(0, b_{ij}^{(n)}(T) - 1) & \text{if } \mu_{ij}^{(n-1)}(T) = 0 \end{cases}$$

$$\hat{\sigma}^{(n)} = 2 \frac{-\mathbf{b}^{(n)'} \boldsymbol{\sigma}^{(n)} + (\mathbf{b}^{(n)} - \mathbf{1})' \boldsymbol{\rho}^{(n)}}{\boldsymbol{\sigma}^{(n)'} \mathbf{A}^{(m)-1} \boldsymbol{\sigma}^{(n)} + \boldsymbol{\rho}^{(n)'} \mathbf{A}^{(m)-1} \boldsymbol{\rho}^{(n)} - 2 \boldsymbol{\sigma}^{(n)'} \mathbf{A}^{(m)-1} \boldsymbol{\rho}^{(n)}}$$

step9 不等式制約条件に対するラグランジェ乗数を更新し, $n = n + 1$ としてstep6へ

$$\lambda_{ij}^{(n)}(T) = \lambda_{ij}^{(n-1)}(T) + \hat{\sigma}^{(n)} \sigma_{ij}^{(n)}$$

$$\mu_{ij}^{(n)}(T) = \mu_{ij}^{(n-1)}(T) + \hat{\sigma}^{(n)} \rho_{ij}^{(n)}$$

step10 推定されたOD間推移確率の値を修正する.

$$b_{ij}^{(m)}(T) = \frac{b_{ij}^{(n)}(T)}{\sum_{j \in J} b_{ij}^{(n)}(T)}$$

step11 OD交通量の推定値を計算し, これを用いて下位問題を解き, $p_{ijm}^{(m+1)}(T)$ を求める.

$$f_{ij}^{(m)}(T) = q_i(T) b_{ij}^{(m)}(T)$$

step12 収束判定. すなわちもし $\max_{ij} \{|f_{ij}^{(m)}(T) - f_{ij}^{(m-1)}(T)| / f_{ij}^{(m-1)}(T)\} < \varepsilon$ ならば $T = T + 1$ としてstep2へ行き, そうでなければ $m = m + 1$ としてstep3へ

5.5 適用事例

本研究で提案した動的OD交通量の再帰的推定手法を実際に適用し, 本手法の有効性や妥当性を検証する. ところで実際の交通ネットワークにおいて時間間隔の短いOD交通量が調査, 観測されていることはほとんどなく, 本モデルの検証に用いることのできる精度の高いOD交通量の観測値の入手は非常に困難である. そこでここでは簡単なネットワークを用いてシミュレーションによりデータを作成し, モデルの適用計算を行う.

図-5.2に本適用事例で用いたネットワーク図を示す. このネットワークは12のノードと17のリンクから構成されている. このうち流入ノードは1, 2および3であり, 流出ノードは4, 5および6でODペア数は合計9となっている. 設定した各リンクの特性値を表-5.1に示す.

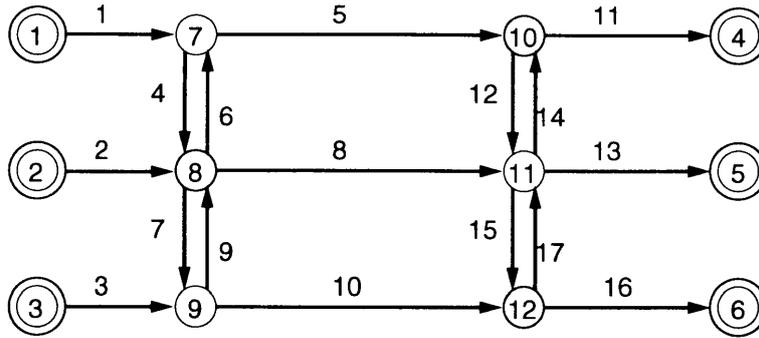


図-5.2 適用事例のネットワーク

表-5.1 リンク特性値

リンク番号	距離 (km)	容量 (台/5分)	自由速度 (km/h)
1,2,3	2	180	60
5,8,10	10	180	60
11,13,16	5	180	60
4,6,7,9,12,14,15,17	2	100	60

5.5.1 シミュレーションによるデータの作成

動的な交通状況を再現するためには、車両がネットワークへ流入した時刻とネットワーク上で観測される時刻との間に交通量に依存する時間差が生じなければならない。そこで本研究では、動的な交通状況を簡便に再現するために適用事例に用いるデータをシミュレーションにより作成した。

(1) 1分間隔OD交通量の作成

はじめに流入交通量を、平均値が時間的に変動するポワソン乱数として作成した。図-5.3に流入交通量を作成するのに用いたポワソン乱数の平均値と、一例としてノード1からの流入交通量の時間的変動を示す。

続いてOD間推移確率の平均値が以下のものであると仮定し、その偏差の分布を平均値が0、標準偏差が平均値の5%である正規分布として与え、式(5.1)を用いて1分間隔OD交通量を整数化して求めた。

同様に偏差の標準偏差が平均値の10%である場合および平均値の15%である場合についてもそれぞれ求めた。

$$\begin{bmatrix} 1-4 & 1-5 & 1-6 \\ 2-4 & 2-5 & 2-6 \\ 3-4 & 3-5 & 3-6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 & 0.2 \\ 0.25 & 0.6 & 0.15 \\ 0.22 & 0.38 & 0.4 \end{bmatrix}$$

次にOD間推移確率が時間的な傾向変動を見せる場合を想定して、ODペア1-4を0.5から0.3

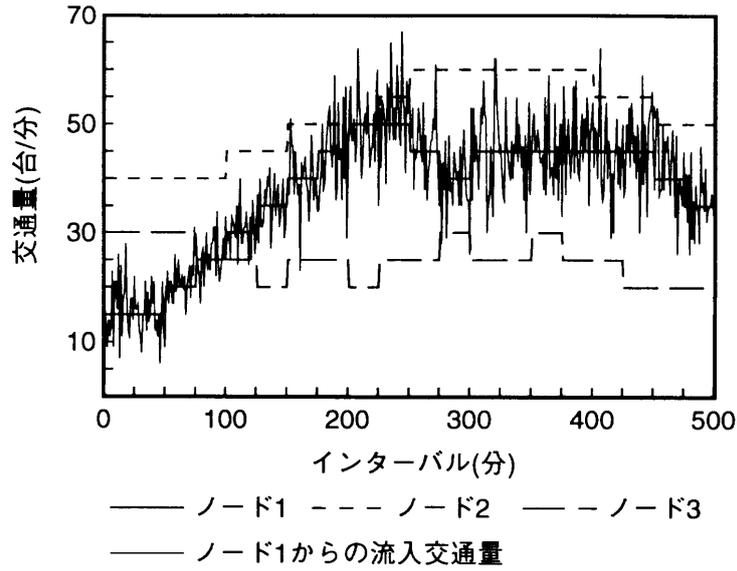


図-5.3 ポワソン乱数の平均値とノード1からの流入交通量

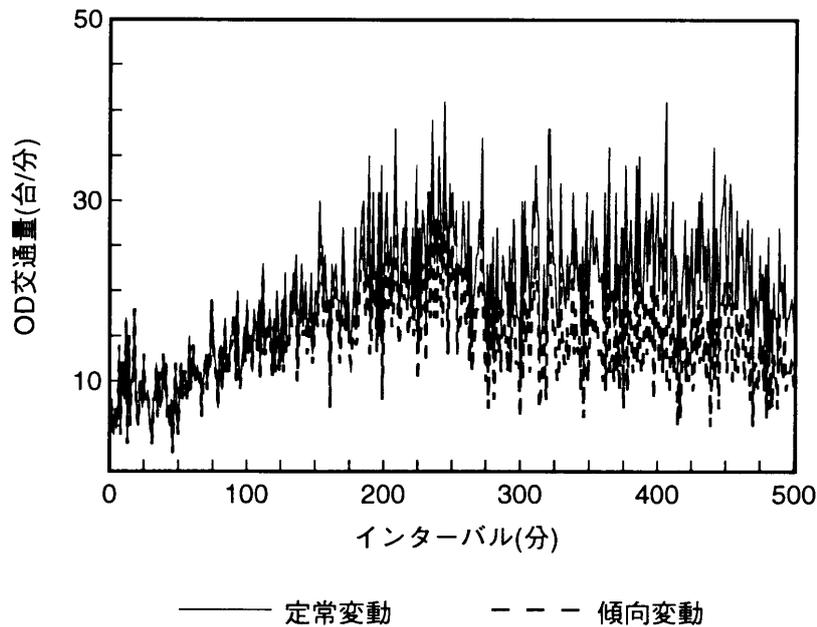


図-5.4 シミュレーションによるOD(1-4)交通量の一例

までコサインカーブに従って減少させ、ODペア1-6をその逆とした。またODペア3-4を同様に0.22から0.32まで増加させ、ODペア3-5をその逆とした。図-5.4に作成したOD交通量の一例として、ODペア1-4でOD間推移確率の偏差の標準偏差が10%の場合の定常変動および傾向変動のOD交通量の時間変動を示す。

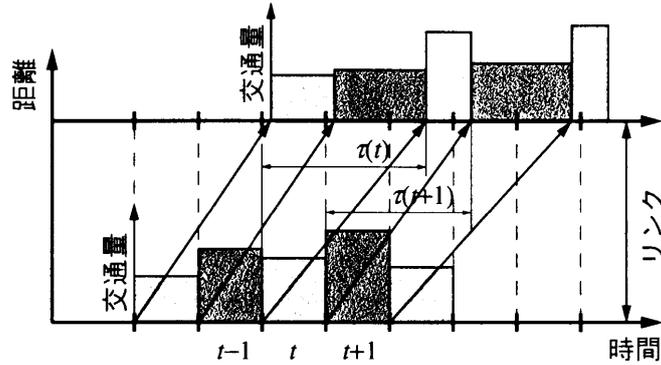


図-5.5 想定した車両の走行

(2) 動的ネットワーク交通流

動的ネットワーク交通流を作成するにあたり、問題の複雑化を避けるために経路利用率は車両がネットワークへ流入する時点で決定され、ネットワークへ流入した後経路の変更はないものとした。経路利用率については、以下の3種類の場合を想定して与えた。

SA: ネットワークへ流入する瞬間における確率配分原理に基づく経路を選択

AN: ネットワークへ流入する瞬間における最短経路を選択

UE: ネットワークへ流入する時点での静的な利用者均衡状態に基づく経路を選択

なお、確率配分原理に基づく経路利用率を計算するにあたって、配分パラメータ θ の値は1.0とした。

この経路利用率を作成したOD交通量に乗じることにより1分間隔ごとの出発時刻別経路交通量が決定される。リンク所要時間はそのリンクへ流入する時点でのリンク存在台数から、式(5.60)に示したBPR関数に対応した密度-速度式を用いて数値計算により求め、リンクを流出するまではその速度は一定とした。

$$\alpha_{\text{bpr}} k_{\text{bpr}}^{\beta_{\text{bpr}}} v_{\text{bpr}}^{\beta_{\text{bpr}}+1} + c_{\text{bpr}} (v_{\text{bpr}} - v_{0\text{bpr}}) = 0 \quad (5.60)$$

ここで α_{bpr} は0.15、 β_{bpr} は4で、 k_{bpr} 、 v_{bpr} 、 $v_{0\text{bpr}}$ 、 c_{bpr} はそれぞれBPR関数における密度、速度、初期速度、容量を表す。

この求められた速度に対応するリンク所要時間を $\tau(t)$ とすれば、図-5.5に示したように、インターバル t の間にリンクへ流入した車両は、 $t \cdot u + \tau(t)$ から $(t+1) \cdot u + \tau(t+1)$ の間にリンクを流出することになり、流入した交通量がどのインターバルに流出するかが算出できることとなる。したがってこれら手順を各リンク、各インターバルで繰り返して、動的な交通流をシミュレーションにより簡便に作成できる。なおFirst-in-First-out原則から、リンク所要時間は以下の関係を満足していなければならない。

$$\tau(t+1) > \tau(t) + u \quad (5.61)$$

以上のようにシミュレーションは1分間隔で行ったが、適用計算に用いる際の入力データと検証用データは、一般性を持たせる意味からも5分間隔で集計し直したものを、適用計算は1イン

表-5.2 全推定時間の相関係数(確率配分原理)

		case-1	case-2	case-3	case-4
定常時	5%	0.9979	0.9979	0.9975	0.9982
	10%	0.9922	0.9918	0.9895	0.9926
	15%	0.9792	0.9764	0.9659	0.9790
変動時	5%	0.9858	0.9849	0.9676	0.9568
	10%	0.9749	0.9762	0.9508	0.9445
	15%	0.9739	0.9717	0.9379	0.9358

ターバルを5分として行った。

(3) リンク観測地点の設定

作成したシミュレーションデータを用いて提案する動的OD交通量の推定モデルを適用するに際し、利用可能なリンクの観測地点や流出交通量の観測地点については以下の4つの場合を想定した。

case-1: 全リンク観測値と全流出交通量の観測値

case-2: 全リンクの観測値

case-3: リンク12,14,15,17以外のリンク観測値

case-4: リンク5,8,10以外のリンク観測値

5.5.2 確率配分原理に基づくモデルの適用結果

ここでは、ドライバーの選択行動に確率配分原理を仮定した動的OD交通量の推定手法の適用結果について考察していくが、この手法は利用者均衡条件下における動的OD交通量の推定問題の上位問題と基本的には同じであるため、本項では基本的な特性を分析するにとどめることとし、詳細な分析は利用者均衡条件下におけるモデルの適用例で行うこととする。なお、用いるシミュレーションデータは経路選択行動に確率配分原理を仮定したSAの場合とし、またOD交通量の推定はシミュレーションの過渡期を避けるため推定開始インターバルを10とし、初期推定時の過去の取り入れインターバル数を3、忘却係数の値は1.0とした。

表-5.2に観測OD交通量と推定OD交通量の全対象インターバルにおける相関係数を、各シミュレーションの条件下および各caseごとに示してある。相関係数はすべての場合において0.93以上の値を示しており、非常に高い相関性を有していることがわかる。OD間推移確率の変動の大きさは直接的に相関性に影響を及ぼし、OD間推移確率の変動が大きくなるに従って相関性が悪化していることがわかる。またOD間推移確率が傾向的に変動する場合の方が定常的な場合よりも相関性が劣っている。特に観測地点の数が少ないcase-3およびcase-4の場合にその両者の開きが大きくなっていることがわかる。

表-5.3 全推定時間のRMS誤差(確率配分原理)

		case-1	case-2	case-3	case-4
定常時	5%	2.69	2.74	2.94	2.48
	10%	5.18	5.50	6.28	4.95
	15%	8.91	9.90	12.20	8.25
変動時	5%	16.89	10.78	27.58	21.91
	10%	15.90	11.25	28.13	25.37
	15%	20.27	12.95	30.85	26.54

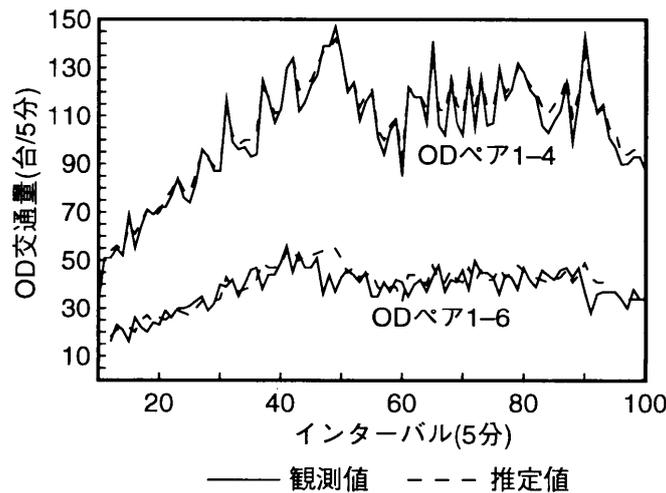


図-5.6 定常変動時における推定OD交通量の時間変動(確率配分原理)

表-5.3のRMS誤差の値を見てみると、相関性と同様にOD間推移確率の変動の大きさに比例してRMS誤差の値も大きくなっており、またOD間推移確率が傾向変動を見せる場合の方がかなり大きめの値を示していることがわかる。特にcase-3およびcase-4でのRMS誤差の値が大きくなっている。これらの結果は、経路選択行動を推定時点のネットワーク状況に応じて決めるのではなく、あらかじめ決めておくことによって、1分間隔ごとのシミュレーションにより作成されたネットワーク交通状況との間に差異が生じたためであると思われる、特にOD間推移確率が傾向的変動を見せる場合にこの傾向が顕著に表れたためであると考えられる。

OD交通量の推定結果の一例として、図-5.6にOD間推移確率が定常的に変動し、その偏差の標準偏差が10%でcase-2の場合の観測OD交通量と推定OD交通量の時間変動を示し、図-5.7に同じ場合の全ODペアの観測値と推定値の散布図を示す。これらの図からOD間推移確率が定常的に変動する場合には、経路選択行動を事前に正確に決めることができれば動的OD交通量の妥当な推定値が得られることがわかる。

同様に図-5.8、図-5.9にOD間推移確率が傾向的な変動を見せる場合の図を示してあるが、OD

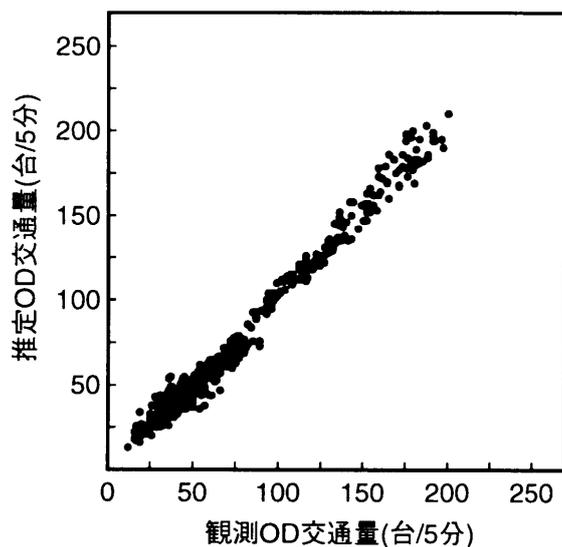


図-5.7 定常変動時における観測値と推定値の散布図(確率配分原理)

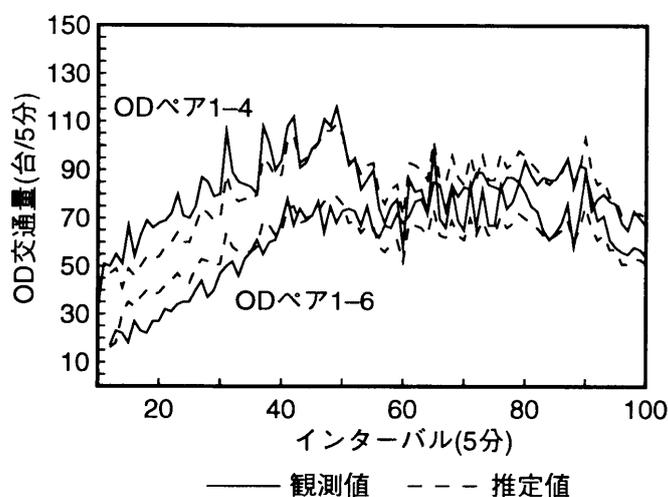


図-5.8 傾向変動時における推定OD交通量の時間変動(確率配分原理)

間推移確率が定常的に変動する場合の適用結果に比べれば推定結果は劣るが、ほぼ妥当な推定値が得られていることが見て取れる。

5.5.3 利用者均衡原理に基づくモデルの適用結果

ここでは、ドライバーの経路選択行動にネットワークへ流入する時点での瞬間的な利用者均衡原理を仮定した場合の動的OD交通量の推定手法を適用する。はじめに解の収束状況の検証および初期推定状態と推定結果の関係を分析し、続いてOD間推移確率が定常的に変動する場合と時間的に傾向変動を見せる場合の2つの場合の適用結果についてそれぞれ考察する。

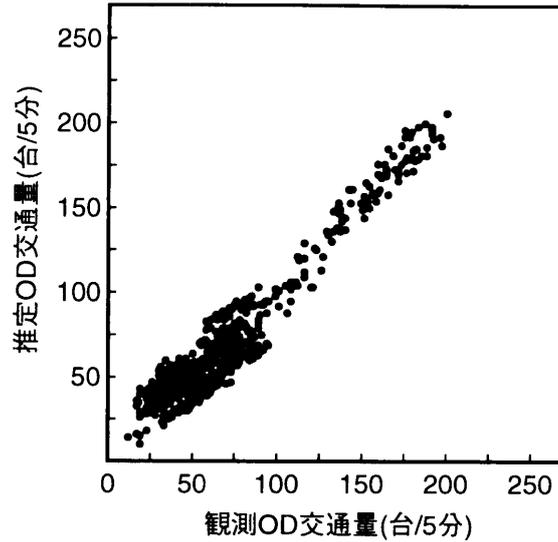


図-5.9 傾向変動時における観測値と推定値の散布図(確率配分原理)

表-5.4 初期値の違いによる OD 交通量の収束状況(利用者均衡原理)

iteration	初期値 1	初期値 2	初期値 3
0	38.8579	54.5564	42.6513
1	40.2379	42.0474	43.6458
2	41.4232	40.2148	43.6458
3	41.8314	41.0162	
⋮	⋮	⋮	
13	43.6694	42.8839	
14	43.6458	43.1156	
15	43.6458	43.7503	
15		43.7197	
16		43.6893	
17		43.6613	
18		43.6458	
19		43.6458	

(1) 解の収束状況の検証

本研究で提案したヒューリスティックな解法により解がどのように収束するかを検証するために、先に示したアルゴリズムのstep0における初期実行可能な経路利用率に異なる3つの値を与えてそれぞれ計算を実行した。表-5.4に異なる3つの初期値からの収束状況のうち、OD間推移確率が定常的に変動し、その偏差の標準偏差が10%、経路利用が利用者均衡の場合で全リンクの観測値を用いた計算結果のうち、推定開始インターバル10におけるODペア1-4の収束状況を示す。

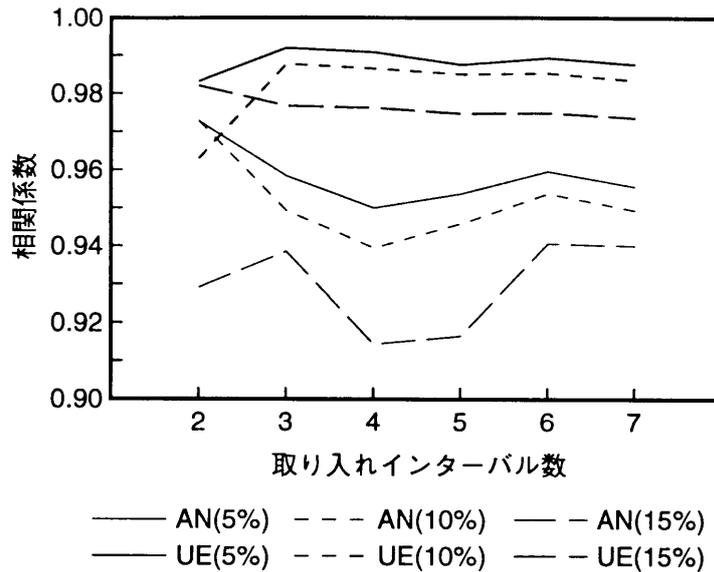


図-5.10 取り入れインターバル数と全推定時間の相関係数の関係 (利用者均衡原理)

この表から、提案したヒューリスティックなアルゴリズムは、その初期値によらず同じ解に収束していることが確認できる。ただし初期値の値により収束速度は大きく変わることがわかり、効率良く収束させるためには良い初期値が必要であることを示している。なお他の場合についても同様に同じ解に収束することが確認された。

(2) 初期推定状態と推定結果の関係

本研究で提案した動的OD交通量の推定手法は、過去の時系列データを用いて現在のOD交通量を推定するという手法である。したがって推定開始インターバルのOD交通量を推定する際に、どこまでの過去データを用いるかによってその推定結果は異なってくる。ここでは、その開始インターバルの初期推定状態とOD交通量の推定結果の関係について検討する。

図-5.10に初期推定時に取り入れたインターバルの数と全インターバルにおける推定結果の相関係数の関係を示す。この結果は先ほどと同様に、OD間推移確率が定常的に変動し、その偏差の標準偏差が10%の場合で全リンクの観測値を用いた場合の計算結果である。この図からは統一的な規則性のある関係は見い出せないが、取り入れるインターバルの数が多くなるのに従って全般的に相関性が減少していく傾向があることがわかる。ただし2インターバルの場合には、相関性が劣ることがあることもわかる。これは取り入れる過去データが少なすぎても安定性に欠けるが、多くを取り入れすぎても経路利用率の変動が取り入れられなくなることによるものと思われる。したがってこの場合には、3インターバルぐらいを推定開始時に取り入れるのが妥当であると判断できる。ただしこれらの関係は、ネットワークの状況や規模、そしてネットワーク上の交通状況により変化するものと考えられ、普遍的な傾向を見つけだすにはさらなる追求が必要であると思われる。

表-5.5 定常変動時における全推定時間の相関係数(利用者均衡原理)

		case-1	case-2	case-3	case-4
AN	5%	0.9594	0.9583	0.9736	0.9779
	10%	0.9552	0.9493	0.9644	0.9758
	15%	0.9422	0.9385	0.9442	0.9649
UE	5%	0.9919	0.9912	0.9885	0.9961
	10%	0.9877	0.9873	0.9828	0.9916
	15%	0.9767	0.9758	0.9750	0.9816

表-5.6 定常変動時における全推定時間のRMS誤差(利用者均衡原理)

		case-1	case-2	case-3	case-4
AN	5%	16.83	17.90	11.54	11.52
	10%	16.86	18.93	13.57	11.30
	15%	19.28	21.08	18.98	12.43
UE	5%	6.44	6.86	7.93	4.01
	10%	7.57	7.90	9.09	5.53
	15%	10.24	10.68	10.76	7.98

(3) 定常変動時の適用結果

利用者均衡原理に基づく動的OD交通量の推定手法をOD間推移確率が平均値の周りを定常的に変動する場合に適用した。OD交通量の推定はシミュレーションの過渡期を避けるため推定開始インターバルを10とし、初期推定時の過去の取り入れインターバル数を3とした。

表-5.5および表-5.6に全推定時間インターバルにおける観測値と推定値の相関係数およびRMS誤差を示す。これらの表から、全般的に非常に高い相関性を有していることがわかるが、全ての場合でシミュレーションデータを利用者均衡を仮定して作成したUEの場合の方が、最短経路選択を仮定したANの場合よりも優れた推定結果となっていることがわかる。これは本手法の下位問題が利用者均衡問題から構成されていることに起因するが、経路選択行動が利用者均衡に従っていない場合においても推定可能であり、その結果は妥当な値であることがわかる。OD間推移確率の偏差の変動の大きさはそれぞれの場合において推定結果に直接的に影響を及ぼし、変動が大きくなるに従い推定結果が悪くなる傾向が見られる。

次にcase-1とcase-2の推定結果を比べれば、流出交通量の観測値も用いたcase-1の方が相関係数、RMS誤差とも優れていることがわかる。しかしながら、リンク観測値だけを用いたcase-2、case-3、case-4を見てみると、ANの場合にはcase-4、case-3、case-2の順で、UEの場合にはcase-4、case-2、case-3の順で推定結果が優れていることがわかる。これは情報量の大きさと推定精度は単純に比例していないことを意味し、必要以上の情報は逆に推定精度を悪化させてしまう場合もあ

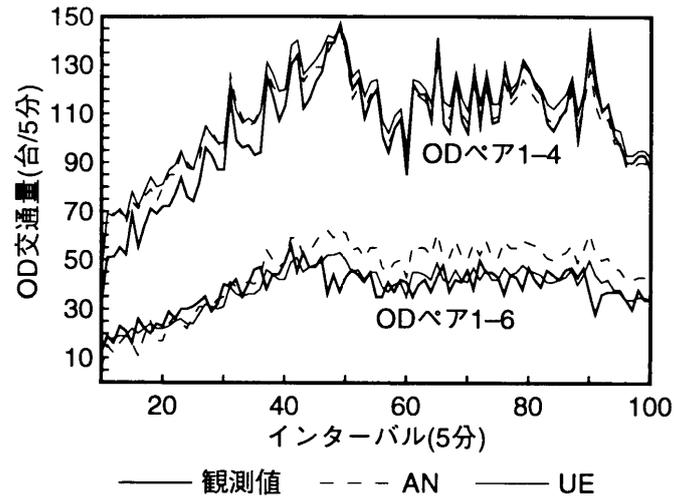


図-5.11 定常変動時における推定OD交通量の時間変動(利用者均衡原理)

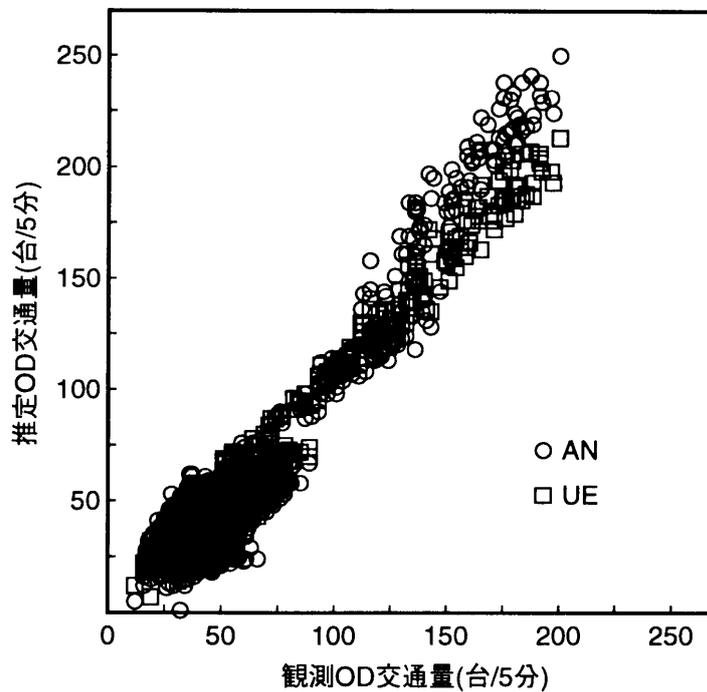


図-5.12 定常変動時における観測値と推定値の散布図(利用者均衡原理)

ると考えられる。

図-5.11にOD間推移確率の偏差の標準偏差が10%でcase-2の場合の推定結果の時間的変動を示す。また図-5.12に全ODペアの散布図を示す。これらの図からも本推定手法により優れた推定結果が得られているということがわかる。

表-5.7 傾向変動時における全推定時間の相関係数(利用者均衡原理)

		case-1	case-2	case-3	case-4
AN	5%	0.9580	0.9554	0.9409	0.9691
	10%	0.9565	0.9509	0.9418	0.9650
	15%	0.9428	0.9360	0.9243	0.9416
UE	5%	0.9858	0.9849	0.9676	0.9568
	10%	0.9749	0.9762	0.9508	0.9445
	15%	0.9739	0.9717	0.9379	0.9358

表-5.8 傾向変動時における全推定時間のRMS誤差(利用者均衡原理)

		case-1	case-2	case-3	case-4
AN	5%	18.17	19.01	17.07	12.57
	10%	18.01	20.09	17.40	13.00
	15%	20.13	22.22	21.82	14.72
UE	5%	6.36	6.63	9.64	11.13
	10%	8.45	8.32	12.42	12.59
	15%	9.10	9.36	14.11	13.52

(4) 傾向変動時の適用結果

OD間推移確率が傾向的な変動を見せる場合においても、定常変動の場合と同様に観測されている交通量に関してはcase-1からcase-4までの4つの場合を想定して適用計算を行った。計算は忘却係数 d の値を1.00から0.70まで0.02ずつ減少させてそれぞれ行った。

表-5.7および表-5.8に全推定時間インターバルの推定結果のうち相関係数およびRMS誤差の最も優れた値を、また表-5.9にRMS誤差が最も優れていたときの忘却係数の値を示す。相関係数を見てみると全ての場合において0.92以上の高い相関性を有していることがわかり、RMS誤差の値もほぼ妥当な値であることから、OD間推移確率が傾向的な変動を見せる場合においても本手法によりOD交通量を精度良く推定できることがわかる。また定常変動の場合と同様に、ANの場合の相関性がUEの場合に比べ多少劣り、RMS誤差の値も大きくなっていることがわかるが、これも本手法の下位問題が利用者均衡問題で構成されていることによるものと考えられる。

ところでUEの場合において、case-3およびcase-4でRMS誤差の値が大きくなっている。この結果を表-5.9の d の値と照らし合わせて考えると、 d の値が1.00に近いほどRMS誤差の値が大きくなっている傾向があることがわかる。本来、本モデルにおいては d の値を1.00より小さくすることによってOD間推移確率の変動を捉えようとするのであるのだが、ANの場合やUEのcase-3やcase-4の場合のようにOD間推移確率の傾向変動以外の要素の方がOD交通量の推定に大きな影響を及ぼすと考えられる場合には1.00に近い値をとることがあると言える。すなわち経路選択行動

表-5.9 RMS誤差が最小時の d の値(利用者均衡原理)

		case-1	case-2	case-3	case-4
AN	5%	1.00	1.00	1.00	1.00
	10%	1.00	1.00	1.00	1.00
	15%	1.00	1.00	1.00	1.00
UE	5%	0.84	0.86	0.88	1.00
	10%	0.86	0.88	0.94	1.00
	15%	0.76	0.74	0.96	1.00

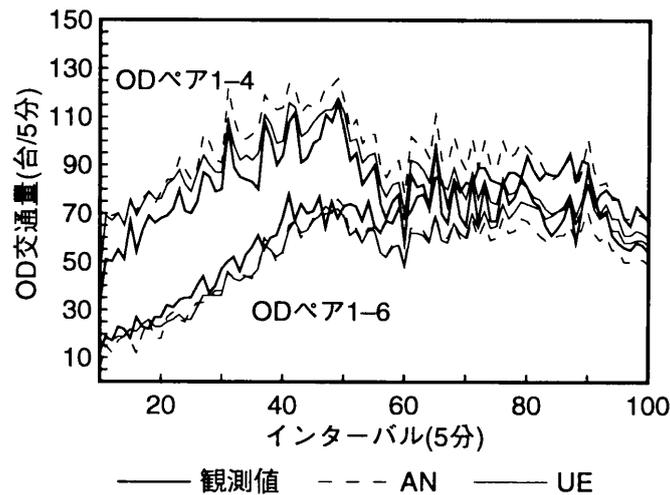


図-5.13 傾向変動時における推定OD交通量の時間変動(利用者均衡原理)

の仮定の違いや、OD間推移確率の平均値周りの変動および得られる情報量の少なさなどによる影響が大きく、これら変動要素を吸収するために d の値が1.00に近くなつたと考えられ、その結果相対的にRMS誤差の値が大きくなつたと考えられる。しかしながら全般的には d の値に関わらずほぼ妥当な推定結果が得られていることがわかり、特に他の要素に比べて傾向的変動要素が大きいと思われるUEのcase-1やcase-2の場合には非常に優れた推定結果が得られていることがわかる。

一例として、図-5.13にOD間推移確率の偏差の標準偏差が10%でcase-2の場合の推定結果の時間的変動を、図-5.14に全ODペアの散布図を示すが、これらの図からも優れた推定結果が得られていることがわかる。

5.6 まとめ

本章では、道路ネットワーク上で観測されているリンク交通量や流出交通量などの時系列観測値を用いて、OD間に複数の経路が存在するようなネットワーク上における動的OD交通量を、再帰的に推定する手法を提案した。本手法の特徴としては、OD交通に関する事前の情報はいらないこと、全リンクの観測値はいらないこと、多経路が存在するネットワークでの適用が可能である

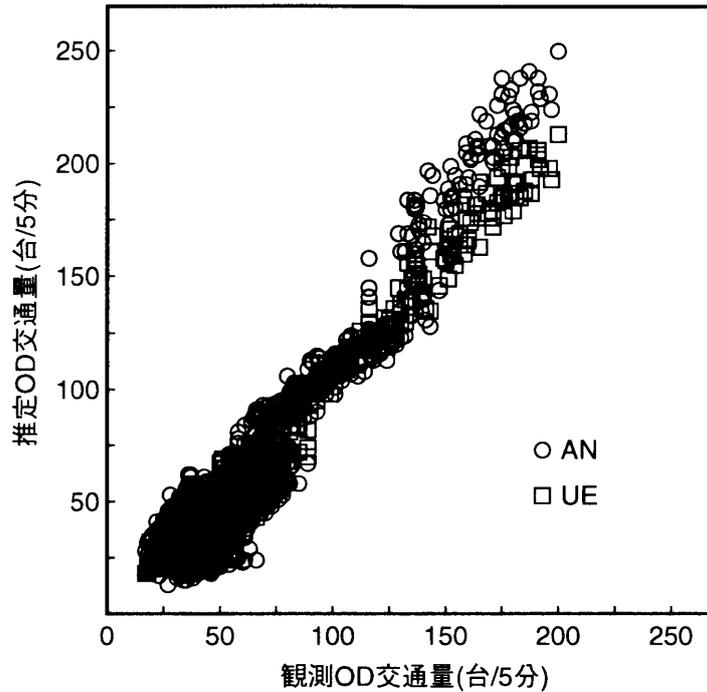


図-5.14 傾向変動時における観測値と推定値の散布図(利用者均衡原理)

こと、オンラインでの適用にふさわしいこと、OD間推移確率に関する不等式制約を満たす解が得られることなどが挙げられる。

本章第2節においては、動的OD交通量の推定手法を、ドライバーの経路選択行動に確率配分原理を仮定した場合と利用者均衡原理を仮定した場合についてそれぞれ定式化した。確率配分原理に基づく動的OD交通量の推定問題は、観測交通量間の動的な関係をOD交通量を介して定式化したOD間推移確率の推定問題として表され、これは利用者均衡原理に基づくモデルの上位問題としても用いられた。利用者均衡原理に基づくモデルは、さらに利用者均衡問題を下位問題に持つ2レベル構造を持った問題として定式化された。

第3節においては、定式化された推定問題の解法を示した。はじめにドライバーの経路選択行動に利用者均衡原理を仮定した場合の推定問題の上位問題の解法を示した。この解法は、ドライバーの経路選択行動に確率配分原理を仮定した場合の推定問題の解法と同様となっている。また下位問題を含んだ利用者均衡原理を仮定した場合の推定問題の解法としては、問題の複雑化を避け、実用性を重んじることからヒューリスティックな方法を採用し、その問題を解くための具体的なアルゴリズムを示した。

第4節においては、簡単なネットワークにおける動的シミュレーションデータを用いて、実際に提案する手法の適用計算を行った。適用計算は、ドライバーの経路選択行動に確率配分原理を仮定したモデルと利用者均衡原理を仮定したモデルのそれぞれについて行い、OD間推移確率が定常的に変動する場合と時間傾向的に変動する場合の両者の場合の適用計算を行い、提案手法の時間変動追従性を検証した。また観測地点の場所が推定結果に及ぼす影響を分析するために、ネット

ワーク上の観測地点が異なる4つの場合の適用計算を行った。これらの適用計算の結果、以下のような知見が得られた。

(1) 提案した手法により、OD間推移確率が定常的に変動する場合および傾向的に変動する場合の両者において、動的なOD交通量を精度良く推定できることがわかった。またその推定精度は、OD間推移確率の変動の大きさが小さいほど高く、OD間推移確率の変動の大きさとOD交通量の推定精度にはほぼ比例関係があることがわかった。

(2) ドライバーの経路選択行動が確率配分原理に従うと仮定したモデルにおいては、OD交通量を推定する前に経路選択行動を規定する配分パラメータの設定が必要であったが、この配分パラメータを正確に設定可能であれば、本モデルにおいて十分に精度の高い推定結果が得られることがわかった。

(3) ネットワーク上におけるドライバーの経路選択行動が利用者均衡原理に従わないような場合においても、利用者均衡原理に基づくモデルで十分な精度を有した推定結果が得られることがわかった。特にネットワークにおける交通状況が利用者均衡原理に従っており、またより多くの情報を用いることが可能であれば、OD間推移確率が傾向的な変動を見せた場合においても、非常に高い精度でOD交通量を推定可能であることがわかった。

(4) ネットワーク上でリンク交通量を観測する地点は全てである必要はなく、OD交通量の推定精度とネットワーク観測地点から得られる情報量は、必ずしも比例していないことがわかった。

(5) 提案したヒューリスティックなアルゴリズムにより、初期実行可能解の設定によらず同一の解に収束することがわかった。また双対問題によるラグランジェ乗数の更新アルゴリズムにより、OD間推移確率に関する不等式制約条件を満たしたOD交通量の推定値が得られることがわかった。

上述したように、提案した動的OD交通量の推定手法をシミュレーションデータを用いて適用計算を行った結果からは、本手法の妥当性が示された。しかしながら現実のネットワークにおける交通状況は、シミュレーションで再現した交通状況とは異なることから、今後は実際のデータを用いた適用計算を進め、本手法の実用性や有用性を検証していく必要があると思われる。またより多くのネットワークを用いた適用計算を行い、解の収束状況などの普遍的な傾向を見つけ出すとともに、ネットワークの形態と推定結果の関係等を分析していく必要がある。

参考文献

- 1) Matsui, H. and Matsumoto, Y. : Dynamic estimation of origin-destination flows from link traffic counts, *Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Transport Systems*, Vol. IV, pp. 2007-2014, 1995
- 2) 飯田恭敬, 高山純一: リンクフローによる OD 交通量推計モデル, 第 18 回土木計画学講習会テキスト, pp. 97-118, 1987
- 3) 高山純一: リンクフロー観測値に基づいた道路網交通需要分析モデルに関する方法論的研究, 京都大学学位論文, 1988
- 4) Cascetta, E. and Nguyen, S. : A unified framework for estimating or updating origin/destination matrices from traffic counts, *Transportation Research*, Vol. 22B, No. 6, pp. 437-455, 1988
- 5) Nguyen, S. : Estimating origin-destination matrices from observed flows, *Transportation Planning Models*, Elsevier Science Publishers B. V., pp. 363-380, 1984
- 6) 安井一彦, 池之上慶一郎, 竹内秀城: ネットワークにおける OD 交通量のリアルタイム推計手法について, 土木計画学研究・講演集, No. 17, pp. 457-460, 1995
- 7) 小根山裕之, 桑原雅夫: 路側観測交通量からの時間変化する OD 交通量の推定, *交通工学*, Vol. 32, No. 2, pp. 5-16, 1997
- 8) Ljung, L. and Söderström, T. : *Theory and practice of recursive identification*, MIT Press, Cambridge, MA, 1983
- 9) 中溝高好: 信号解析とシステム同定, コロナ社, 1988
- 10) 志水清孝: 多目的と競争の理論, 共立出版, 1982
- 11) Bard, J. F. : Convex two-level optimization, *Mathematical Programming*, 40, pp. 15-27, 1988
- 12) Hall, M. D., Van, Vliet, D. and Willumsen, L. G. : SATURN - a simulation assignment model for the evaluation of traffic management schemes, *Traffic Engineering and Control*, 21, pp. 168-176, 1980
- 13) Fisk, C. S. : On combining maximum entropy trip matrix estimation with user optimal assignment, *Transportation Research*, Vol. 22B, No. 1, pp. 69-79, 1988
- 14) 楊海, 朝倉康夫, 飯田恭敬, 佐佐木綱: 交通混雑を考慮した観測リンク交通量からの OD 交通量推計モデル, 土木学会論文集, No. 440/IV-16, pp. 117-124, 1992
- 15) Yang, H., Sasaki, T., Iida, Y. and Asakura, Y. : Estimation of origin-destination matrices from link traffic counts on congested networks, *Transportation Research*, Vol. 26B, No. 6, pp. 417-434, 1992

- 16) 佐佐木綱, 朝倉康夫 : OD 需要の変動を内生化した最適道路網計画モデル, 土木学会論文集, No. 383/IV-7, pp. 93-102, 1987
- 17) Sheffi, Y. : *Urban Transportation Networks - Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1985
- 18) Nihan, N. L. and Davis, G. A. : Recursive estimation of origin-destination matrices from input/output counts, *Transportation Research*, Vol. 21B, No. 2, pp. 149-163, 1987
- 19) 相吉英太郎, 志水清孝 : 数理計画法演習, 朝倉書店, 1985
- 20) Bell, M. G. H. : The real time estimation of origin-destination flows in the presence of platoon dispersion, *Transportation Research*, Vol. 25B, Nos. 2/3, pp. 115-125, 1991

第6章 OD交通量の時間変動を考慮した都市高速道路の動的ランプ制御

6.1 概説

これまでに道路ネットワーク上で観測されている交通量や旅行時間に基づいて、動的なOD交通量を推定するための方法を提案した。第4章においては、ネットワーク上におけるOD間の経路が一つに限定される場合の動的OD交通量の推定手法を提案し、第5章においてはOD間の経路が複数存在する場合の動的OD交通量の推定手法を提案した。この動的OD交通量により、トリップがどこから発生し、どこへ集中するかといった空間的な移動を短い時間間隔で把握することができるとともに、トリップがいつ発生し、いつ集中するかといった時間的な移動も同時に捉えることが可能となる。特に動的なOD交通量は、トリップが発生した時間とトリップが目的地に到着した時間が異なる点が特徴的である。したがってこの道路ネットワーク上における動的なOD交通量に関する情報は、渋滞予測、旅行時間予測、経路誘導、動的交通制御などの交通需要の時間変動を反映した動的交通運用には欠かせない情報となる。

そこで本章^{1),2)}では、この推定された動的OD交通量の情報を用いる具体的な手法として、都市高速道路における動的ランプ制御手法について提案する。都市高速道路におけるランプ制御は、都市高速道路へ流入しようとする車両をある最適化基準のもとに制御し、本線上の交通量を交通容量以下に保ち、交通渋滞を引き起こすことなく円滑な交通流を確保するための方法である。現在このようなランプ制御は、流入ブースの一部閉鎖やオンランプの完全封鎖といった形で実施^{3),4),5)}され、本線上の交通渋滞を防ぐための有用かつ実用的な交通制御手法であることが知られているが、より効果的に都市高速道路の交通流の円滑化をはかるために、交通需要の時間変動に対応した動的なランプ制御手法の運用が必要である。

本章第2節において、都市高速道路の動的ランプ制御手法をLP(Linear Programming)問題として定式化する。本手法においては、目的関数として一般的に用いられる都市高速道路の利用台数最大化ではなく、都市高速道路を利用する車両の総走行台キロ最大化を採用する。この目的関数により、長距離のトリップを優先的に都市高速道路に流入させることが可能となり、都市高速道路が具備すべき機能を損なうことなくランプ流入制御が可能となる。制約条件としては、本線上の交通容量、オンランプでの待ち台数、最大可能流入交通量などを考え、ここではこれらの値をすべて一定の確定値として与える。したがってこの手法は、第3節で述べる手法と対比し、基本LP制御モデルとして位置付けられる。

続いて第3節において、基本モデルでは確定値として与えていた本線上の交通容量やオンランプでの待ち台数の上限値などを、交通現象のあいまいさを考慮可能なようにファジィ数として扱ったファジィ線形計画^{6),7)}を用いたLP問題として定式化する。本線上で渋滞が発生し出す交通量の臨界値は一定の確定値として与えられるものではなく、その時の交通流の状態によって変動する

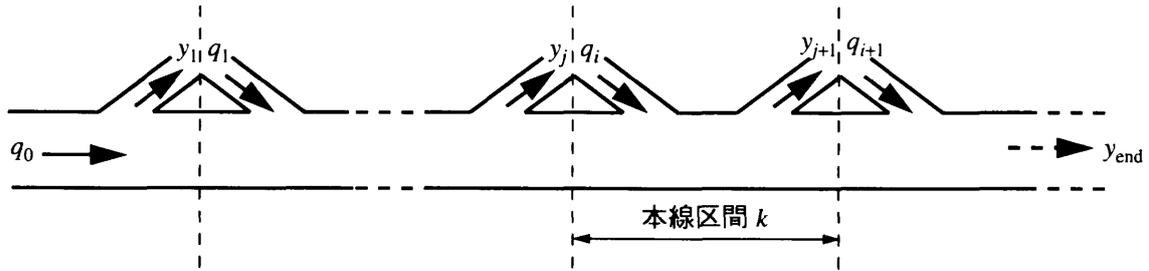


図-6.1 都市高速道路の模式図

と考えられる。またオンランプにおける車両の待ち台数の限界値もランプ流入部で待ち行列を生成している車両の特性や停止車両の車頭間隔等によって変化すると考えられる。したがってこのようなあいまいな制約値を本手法ではファジィ数として扱い、実現象に即した現実的なランプ制御を目指すものである。第3節および第4節において定式化する両手法においては、これまで提案された多くの静的なモデル^{8),9),10),11),12),13)}においては考慮されていなかった交通流の時間的・空間的な分布が、動的なOD交通量に関する情報を用いることによってモデルに組み込まれている。したがって提案する手法は、交通需要が時間的に変動した場合に適した交通制御手法であり、時々刻々と変化する交通状況に即した交通制御が可能である。

第4節においては、定式化した基本LPモデルとファジィLPモデルの2つの動的ランプ制御モデルを実際のネットワークに応用し、提案する手法の有用性を検証する。応用計算は、阪神高速道路を対象ネットワークとし、実際に観測されたデータを用い許容流入交通量の時間変動やオンランプでの待ち行列の発生状況などについて分析を行い、提案するランプ制御モデルの制御能力について検証する。最後に第5節において、本章で得られた知見をまとめる。

6.2 ランプ制御の基本モデルの定式化

本研究におけるランプ制御手法は、都市高速道路の本線上の区間交通量が交通容量以下であるという制約条件の下で、ある目的関数を最大にするような流入交通量を、数理最適化手法の一つであるLP問題の解として求めるものであり、本節におけるランプ制御の基本モデルはLP問題として定式化される。ランプ制御は交通需要の時間変動に対応するため、設定する制御単位時間ごとに行うこととし、流入制御パターンをその制御単位時間ごとに逐次更新していくものとする。なお本モデルにおける基本的な考え方は松井ら¹⁴⁾のモデルと同様であるが、本モデルにおいてはOD間推移確率を各制御単位時間ごとに推定し、ランプ間のOD交通量を動的に扱うことによって、より直接的に交通量の時間変動を反映した交通制御が可能であるという点が異なる。

モデルを定式化するにあたり、模式的に表された図-6.1の都市高速道路を考える。この都市高速道路は、オンランプ i 、オフランプ j および本線区間 k から構成されている。ここで、この都市高速道路上においては、オンランプに到着する車両の台数は制御単位時間ごとに観測されていると仮定し、また制御単位時間ごとのOD間推移確率は、第3章において提案した単一経路ネットワーク上における動的OD交通量の推定手法によって推定されるものとする。はじめに、以下の記号

を定義する.

$q_i(t)$: インターバル t の時間内にオンランプ i に到着する新規需要台数

$Q_i(t)$: インターバル t の終わりにおけるオンランプ i の累積需要台数

$x_i(t)$: インターバル t における許容流入台数(制御変数)

$X_i(t)$: インターバル t の終わりにおけるオンランプ i の累積許容流入台数

$w_i(t)$: インターバル t の終わりにおけるオンランプ i の流入待ち台数

各変量の値にはその定義から明らかなように, 次の基本的な関係式が成立する. なお I は, オンランプの集合を表す.

$$Q_i(t) = Q_i(t-1) + q_i(t) \quad i \in I \quad (6.1)$$

$$X_i(t) = X_i(t-1) + x_i(t) \quad i \in I \quad (6.2)$$

$$w_i(t) = Q_i(t) - X_i(t) \quad i \in I \quad (6.3)$$

6.2.1 目的関数

都市高速道路が本来備えるべき機能の1つとして, 通過交通といった長距離のトリップを円滑に処理し, 都市内一般街路の混雑を軽減することが挙げられる. このような都市高速道路の本来的機能を考慮して, 本研究ではLP問題の目的関数としては, これまで多くの研究において提案されてきた利用台数最大化ではなく, 総走行台キロ最大化を採用する. この目的関数の採用によって, ランプ制御を行う際に長距離のトリップが優先的に都市高速道路に流入することになり, 都市高速道路の機能を損なうことなく流入制御が可能となる.

インターバル t の時間帯にオンランプ i から流入した車両がオフランプ j へ到着する比率, すなわちランプ間におけるOD間推移確率 $b_{ij}(t)$ は, 先に述べたように, これまでに提案した動的OD交通量の推定手法によって求められるとする. このOD間推移確率と各ランプ間の距離 D_{ij} を用いると, インターバル t の時間にオンランプ i から流入する車両の平均トリップ長は以下のように表せられる.

$$s_i(t) = \sum_{j \in J} b_{ij}(t) D_{ij} \quad i \in I \quad (6.4)$$

このインターバル t におけるオンランプ i からの流入車両の平均トリップ長と許容流入交通量を乗じれば, 都市高速道路を利用する車両の総走行台キロとなる. すなわちLP問題における目的関数は

$$\mathcal{F}(t) = \sum_{i \in I} s_i(t) x_i(t) \quad (6.5)$$

となる.

以上の定式化から, 本研究においてはインターバル t ごとに目的関数を設定し, 制御単位時間ごとに流入制御パターンを求めていく手法であることがわかる. また交通需要の時間変動に対応するためにインターバルごとのOD間推移確率を用いていることがわかる.

6.2.2 制約条件

動的ランプ制御手法をLP問題として定式化する際に、幾つかの制約条件を考える必要がある。都市高速道路のランプ制御手法として最も重要な制約条件は、本線上における区間交通量が交通容量以下であるという条件である。また本研究では、流入待ち車両の一般街路交通流への影響を最小限に抑制するために、オンランプにおける車両の待ち台数の上限値を設定する。その他、最大可能流入交通量や非制御時流入交通量に関する制約などについて、本節で順に説明していく。

(1) 本線上の区間交通量

都市高速道路の本線区間の交通量が、交通容量を越えたときに交通渋滞は発生する。したがって、都市高速道路を制御する際の最も基本的かつ重要な制約条件が、この本線区間交通量が交通容量以下であるという制約条件である。

ところで、本研究においては交通流を動的現象として扱っているために、車両が流入した時間と本線上の区間を通過する時間の間には、その旅行時間に応じた時間差が生じる。また同じインターバルにオンランプから流入した車両は、本線上で旅行時間差に応じた分布を生じることになる。これら交通流の時間的・空間的分布を表現するために区間通過率というものを導入する。区間通過率 $r_{ik}^0(t)$ は、インターバル t の時間内に本線区間 k を通過する車両のうち、同じインターバルの時間内にオンランプ i から都市高速道路へ流入した車両の割合を示す。同様に、 $r_{ik}^n(t)$ は、インターバル t の時間内に本線区間 k を通過する車両のうち、 n インターバル前、すなわち $t-n$ インターバルの時間内にオンランプ i から都市高速道路へ流入した車両の割合を示す。したがって、 $t-n$ インターバルの時間内にオンランプ i から都市高速道路へ流入し、 t インターバルの時間内に本線区間 k を通過する車両は、 $r_{ik}^n(t)x_i(t-n)$ として区間通過率と $t-n$ インターバルの許容流入交通量を乗じることにより求められる。この値は、 n インターバル前にオンランプ i から都市高速道路へ流入した車両のうち、インターバル t に本線区間上で残留している交通量と見なすことができ、これを全オンランプおよび該当するインターバルでの総和を取ることによって、以下のような本線区間交通量に関する制約条件が得られる。

$$\sum_{i \in I} r_{ik}^0(t)x_i(t) + \sum_{i \in I} r_{ik}^1(t)x_i(t-1) \cdots + \sum_{i \in I} r_{ik}^n(t)x_i(t-n) \cdots \leq c_k \quad k \in K \quad (6.6)$$

ここで、 c_k は本線区間 k の交通容量であり、 K は本線区間の集合を表す。

上記制約式において、左辺第1項は流入したインターバルと区間を通過するインターバルが同じである交通量を表し、第2項以降は前のインターバルまでに都市高速道路へ流入してそれまでに区間 k を通過していなかった残留交通量を表す。この制約式においては、現インターバル t における許容流入交通量 $x_i(t)$ のみが制御変数となっており、それ以外の $x_i(t-n)$ は前のインターバルにおける流入制御によって既に求められている許容流入交通量である。

区間通過率は、推定されたOD間推移確率を用いて以下のように求められる。なお、 R_{ik} はオンランプ i から本線区間 k までに存在するオフランプの集合を表し、 $\tau_{ik}(t)$ 、 $\eta_{ik}(t)$ はそれぞれ到着時刻ベースの所要時間とその所要時間を制御単位時間で離散化したものを表す。

$\eta_{ik}(t) + 1 = \eta_{ik}(t + 1)$ の時

$$r_{ik}^n(t) = \sum_{j \in R_{ik}} \left[\left(\frac{\tau_{ik}(t+1)}{u} - \frac{\tau_{ik}(t)}{u} + 1 \right) b_{ij}(t-n) \right] \quad n = \eta_{ik}(t) + 1 \quad (6.7)$$

$\eta_{ik}(t) + 1 > \eta_{ik}(t + 1)$ の時

$$r_{ik}^n(t) = \sum_{j \in R_{ik}} \left[\left(1 - \frac{\tau_{ik}(t+1)}{u} + n \right) b_{ij}(t-n) \right] \quad n = \eta_{ik}(t + 1) \quad (6.8)$$

$$r_{ik}^n(t) = \sum_{j \in R_{ik}} b_{ij}(t-n) \quad \eta_{ik}(t + 1) < n < \eta_{ik}(t) + 1 \quad (6.9)$$

$$r_{ik}^n(t) = \sum_{j \in R_{ik}} \left[\left(\frac{\tau_{ik}(t)}{u} - n + 1 \right) b_{ij}(t-n) \right] \quad n = \eta_{ik}(t) + 1 \quad (6.10)$$

(2) オンランプにおける待ち台数

オンランプにおいて流入制限を行った場合には、流入待ち車両による待ち行列が発生する。ここでは、都市高速道路への流入待ち車両による待ち行列が、一般街路交通流に影響を及ぼすことがないように、オンランプにおける待ち台数に上限を設ける。流入制限によって生じた待ち行列が、この設定された待ち台数の上限値を超えた場合には、強制的に本線へ流入させることになる。オンランプ i における待ち台数の上限値を W_i とすれば、次の制約式が成立する。

$$w_i(t) \leq W_i \quad i \in I \quad (6.11)$$

流入待ち台数 $w_i(t)$ は式 (6.3) で表されることを考慮し、これを許容流入交通量 $x_i(t)$ を用いて表せば

$$Q_i(t) - W_i - X_i(t-1) \leq x_i(t) \quad i \in I \quad (6.12)$$

となる。待ち行列の上限値 W_i は、オンランプへの導入路の長さや車線数などの幾何形状や周辺一般街路の道路交通状況などを考慮しながら設定される値である。

(3) 非負制約条件と最大可能流入交通量

オンランプにおけるブースの数や配置、あるいは料金収集の形態などによって制御単位時間内に流入可能な交通量の最大値は決定される。これを最大可能流入交通量とし、許容流入交通量はこの値を超えることはできない。また許容流入交通量は非負であることから、以下の制約式が成立する。

$$0 \leq x_i(t) \leq x_i^{\max} \quad i \in I \quad (6.13)$$

ここで、 x_i^{\max} はオンランプ i における最大可能流入交通量を表す。

(4) 非制御時流入交通量

オンランプにおいて何ら制御が行われていない場合、許容流入交通量の値は前のインターバルまでの流入待ち台数と現在のインターバルの需要交通量の和に等しくなる。したがって許容流入交通量は、この非制御時における流入交通量の値を超えることはなく、以下の関係が成り立つ。

$$x_i(t) \leq w_i(t-1) + q_i(t) \quad i \in I \quad (6.14)$$

待ち台数は式(6.3)で表されることを考慮すると

$$x_i(t) \leq Q_i(t) - X_i(t-1) \quad i \in I \quad (6.15)$$

となる。この式において、右辺第2項を左辺に移項し、式(6.2)を代入すれば

$$X_i(t) \leq Q_i(t) \quad i \in I \quad (6.16)$$

という関係になり、これは累積許容流入交通量が累積需要交通量を超えないという意味であるという解釈も可能である。

6.2.3 LP問題

これまで述べてきた目的関数および制約条件から構成される都市高速道路の動的ランプ制御の基本モデルは、以下のようなLP問題として表現される。

$$\max \quad \mathcal{F}(t) = \sum_{i \in I} c_i(t) x_i(t) \quad (6.17)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in I} r_{ik}^0(t) x_i(t) + \sum_{i \in I} r_{ik}^1(t) x_i(t-1) \cdots + \sum_{i \in I} r_{ik}^n(t) x_i(t-n) \cdots \leq c_k \quad k \in K \quad (6.18)$$

$$\max \{Q_i(t) - W_i - X_i(t-1), 0\} \leq x_i(t) \leq \min \{x_i^{\max}, Q_i(t) - X_i(t-1)\} \quad i \in I \quad (6.19)$$

6.3 ファジィ線形計画法を用いたランプ制御手法の定式化

本章第2節において、都市高速道路における動的ランプ制御手法をLP問題として定式化した。その問題においては、本線上の交通容量制約、オンランプにおける待ち車両の上限値による制約、許容流入交通量の非負制約、物理的な最大可能流入交通量による制約および非制御時における流入交通量制約などが定式化された。これらの制約値は、全て一定の確定値として与えられるものとして考えられている。しかしながら、車両の移動は自然界における物理法則によって支配されているものではなく、意志を持った人によって行われている。したがって交通現象というものは、非常にあいまい性を有した現象であると考えられる。

そこで本節では、交通現象のあいまいさを考慮した都市高速道路における動的ランプ制御手法について提案する。本手法は、基本的な考え方は第2節における基本モデルと同じであるが、本線区間の交通容量およびオンランプにおける流入待ち車両の上限値をファジィ数として与える点が異なる。すなわち、本線区間の交通量が交通容量として与えた値と等しくなったときに必ず渋滞

が発生するというものではなく、その時の交通状況や路面状況、あるいは周辺環境によって渋滞を引き起こす交通量の値は変化する。また同様に、オンランプ流入口における流入待ち車両が周辺一般街路交通流に影響を与えることになる待ち台数の値も、周辺一般街路の交通状況や待ち車両の停止車頭間隔などによって変化するものと考えられる。したがってこれら本線区間交通容量とオンランプにおける待ち台数の上限値を、ファジィ数として与えたファジィLPモデルとして、ランプ制御手法を定式する。

6.3.1 ファジィLP問題

都市高速道路の動的ランプ制御手法をファジィLP問題として定式化する。その目的関数、制約条件の考え方は第2節における基本LPモデルの場合と全く同様であり、目的関数の与え方がファジィ目標となり、本線区間交通容量およびオンランプにおける待ち台数の上限値をファジィ数として与える点のみが異なる。したがって、ファジィLP問題による動的ランプ制御モデルは以下のように表せられる。

$$\mathcal{F}(t) = \sum_{i \in I} s_i(t)x_i(t) \succeq \mathcal{F}_0(t) \quad (6.20)$$

$$\sum_{i \in I} r_{ik}^0(t)x_i(t) + \sum_{i \in I} r_{ik}^1(t)x_i(t-1) \cdots + \sum_{i \in I} r_{ik}^n(t)x_i(t-n) \cdots \preceq c_k \quad k \in K \quad (6.21)$$

$$Q_i(t) - X_i(t-1) - x_i(t) \preceq W_i \quad i \in I_+ \quad (6.22)$$

$$0 \leq x_i(t) \leq \max \{x_i^{\max}, Q_i(t) - X_i(t-1)\} \quad i \notin I_+ \quad (6.23)$$

式(6.20)はファジィ目標を表し、記号 \succeq の意味はだいたいこの値より大きいという意味であり、したがって目的関数の値が設定したファジィ目標の値よりもだいたい大きいということを意味する。

式(6.21)は、本線区間上の交通量が交通容量を超えないという制約条件から得られるものであり、本線区間交通量の値は、だいたい交通容量よりも小さいという意味になる。制約式(6.22)は、オンランプ流入口における待ち車両に関する制約から得られるものである。この場合も待ち車両の台数は、設定した待ち車両の上限値よりもだいたい小さいということを意味する。なおこの制約条件は、オンランプが集合 I_+ に含まれる場合のみの制約で、集合 I_+ は $0 < Q_i(t) - W_i - X_i(t-1)$ となるようなオンランプの集合を表す。制約式(6.23)は可能流入交通量、非制御時の流入交通量に関する制約で、これらは決定論的制約である。

6.3.2 メンバシップ関数と問題の変換

前項で示したファジィ目標とファジィ制約のファジィ不等式に対しては、次のような線形メンバシップ関数を用いて、交通現象のあいまいさを表す。

$$\phi_m((U\mathbf{x})_m) = \begin{cases} 1 & \text{if } (U\mathbf{x})_m \leq u_m \\ 1 - \frac{(U\mathbf{x})_m - u_m}{d_m} & \text{if } u_m < (U\mathbf{x})_m \leq u_m + d_m \\ 0 & \text{if } u_m + d_m < (U\mathbf{x})_m \end{cases} \quad (6.24)$$

ここでマトリクス U はファジィ不等式に対する係数マトリクス、ベクトル \mathbf{x} は制御変数ベクトルであり、添え字 m はそのうち m 番目のファジィ不等式であるということを表す。また u_m は m 番目の

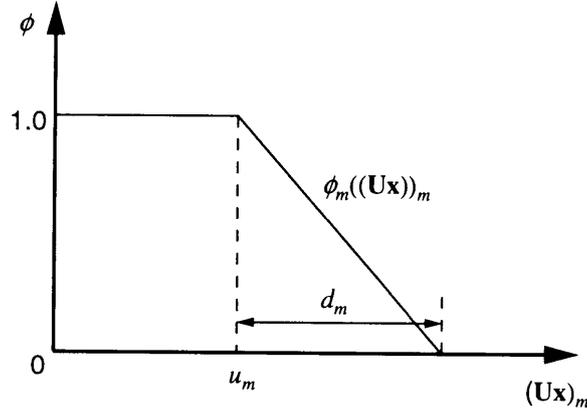


図-6.2 線形メンバシップ関数

ファジィ不等式の右辺の値を示し、 d_m は m 番目のメンバシップ関数で設定されるあいまいさの幅であり、意志決定者が交通現象のあいまいさを考慮しながら設定する値である。

この線形メンバシップ関数により、 m 番目の制約条件が完全に満たされる場合には1の値を取り、幅 d_m 以上に満たされない場合には0となり、その中間の場合には0と1の間の値を取るようになる。この線形メンバシップ関数を図示すれば、図-6.2となる。ここで上記問題に、Bellman and Zadeh¹⁵⁾のファジィ決定に対する最大化決定を採用すれば

$$\max_{\mathbf{x} \geq \mathbf{0}} \min_m \{ \phi_m((U\mathbf{x})_m) \} \quad (6.25)$$

という問題になる。すなわち最小のメンバシップ関数の値を最大にするような制御変数の値を求める問題となる。したがって、補助変数 $x_0(t)$ を導入すれば、交通現象のあいまいさを考慮したファジィLP手法を用いた都市高速道路の動的ランプ制御モデルは、以下のような通常のLP問題として表現される。

$$\max \quad x_0(t) \quad (6.26)$$

$$\text{s.t.} \quad \frac{\sum_{i \in I} c_i(t)x_i(t)}{d^{\text{obj}}} + x_0(t) - 1 \leq \frac{F_0(t)}{d^{\text{obj}}} \quad (6.27)$$

$$\frac{\sum_{i \in I} r_{ik}^0(t)x_i(t)}{d^{\text{cap}}} + x_0(t) - 1 \leq \frac{c_k - \sum_{i \in I} r_{ik}^1(t)x_i(t-1) \cdots - \sum_{i \in I} r_{ik}^n(t)x_i(t-n) \cdots}{d^{\text{cap}}} \quad k \in K \quad (6.28)$$

$$\frac{-x_i(t)}{d^{\text{que}}} + x_0(t) - 1 \leq \frac{-Q_i(t) + W_i + X_i(t-1)}{d^{\text{que}}} \quad i \in I \quad (6.29)$$

$$0 \leq x_i(t) \leq \min \{ x_i^{\text{max}}, Q_i(t) - X_i(t-1) \} \quad i \in I \quad (6.30)$$

ここで d^{obj} 、 d^{cap} 、 d^{que} はそれぞれ目的関数、本線区間交通容量、流入待ち台数の上限値に対するあいまいさの幅である。

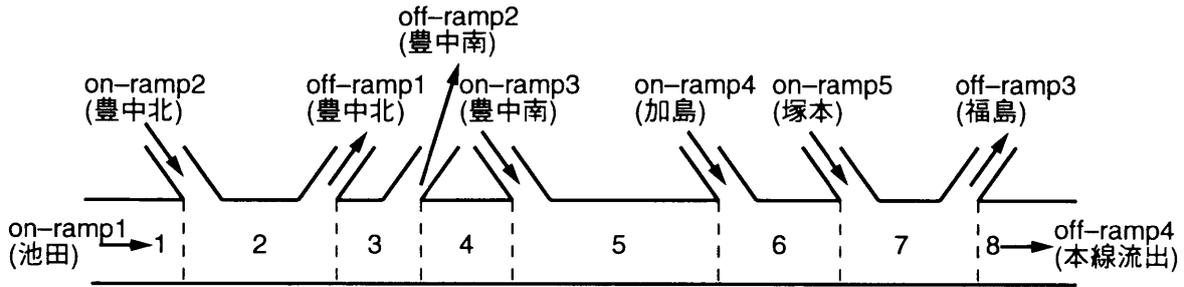


図-6.3 応用計算に用いた対象路線図

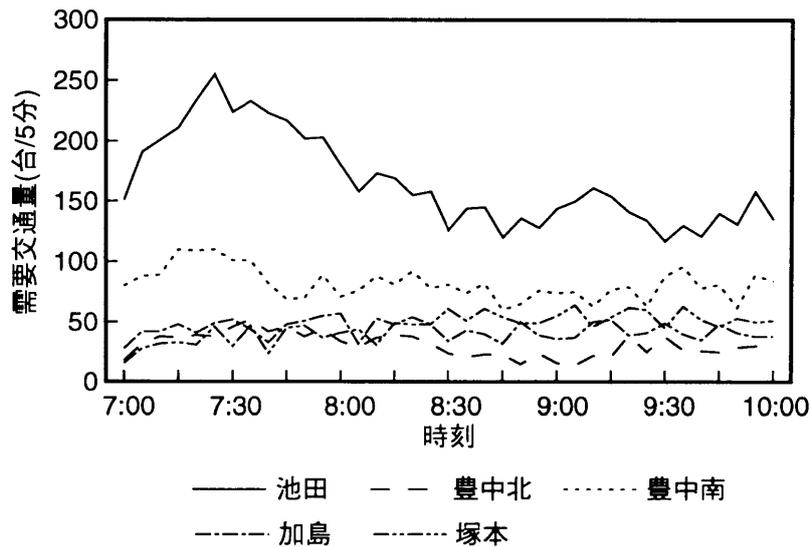


図-6.4 本線区間上の交通量の時間変動

6.4 応用事例

提案する動的ランプ制御手法の基本LPモデルとファジィLPモデルを実際の観測データに応用する。応用計算での対象路線は、図-6.3に示した阪神高速道路池田線り方向であり、この路線はオンランプ数が5、オフランプ数が3および本線流出から構成され、本線区間は図に示したように8つの小区間に分割される。なお本応用事例においては、豊中南オンランプは鳥田口と名神口を合わせたものとした。都市高速道路へ流入する需要交通量としては、昭和59年5月24日の7:00から10:00までの朝のピーク時間帯の3時間の間に5分間隔ごとに観測された流入交通量の実績データを用いた。これらのデータを用いて、提案した動的ランプ制御モデルを応用してどのような制御効果が得られるかを計算する。

需要交通量の時間変動を図-6.4に示すが、池田オンランプからの需要交通量が最も多く、7:00から徐々に増加し、7:30あたりでピークとなり、その後減少傾向となる。また豊中北および豊中南オンランプにおける需要交通量もなだらかなピークを形成した後減少傾向となり、池田オンランプにおける需要交通量とはほぼ同じような傾向を見せていることがわかる。一方加島および塚本

表-6.1 オンランプの最大可能流入交通量および待ち台数上限値

オンランプ	最大可能流入交通量(台/5分)	流入待ち台数上限値(台/5分)
池田	380	0
豊中北	100	66
豊中南	200	416
加島	100	180
塚本	100	250

オンランプにおける需要交通量については、ピークを見せるような傾向はなく、ほぼ一定値で推移している。

本線上の交通容量は、各本線区間で380台/5分とし、各オンランプにおける最大可能流入交通量および流入待ち台数の上限値を、各ランプの形状等を考慮して表-6.1のように設定した。池田オンランプにおいては、需要交通量が最も多いことや路線の形状から判断して、本線上流部と見なし、流入制御は行わないこととした。したがって、表中の最大可能流入交通量は交通容量と等しく、また流入待ち台数の上限値が0台/5分となっている。

OD間推移確率の推定には、流出交通量および所要時間のデータがさらに必要であるが、本応用事例では、本線区間交通量の観測値から各オフランプにおける流出交通量を算出し、それを流出交通量の予測値として用いた。また所要時間は、観測されている本線区間交通量の値を用いて、以下に示すBPR関数から各区間ごとの所要時間を求め、この各区間ごとの所要時間をもとに時間差を考慮してOD間の所要時間を算出した。

$$\pi_k(t) = \pi_{0k} \left\{ 1 + 0.15 \left(\frac{v_k(t)}{c_k} \right)^4 \right\} \quad (6.31)$$

ここで、初期所要時間 π_{0k} は区間を時速60km/hで走行したときの所要時間とし、OD間の所要時間は次式をオフランプが位置する区間まで順次計算することにより算出した。

$$\tau_{ik}(t) = \tau_{ik^-}(t) \left(t - \text{int} \left[\frac{\sum_{k^-} \pi_k(t)}{u} \right] \right) + \pi_k(t) \quad (6.32)$$

ここで、 k^- は本線区間 k の上流に位置する区間を意味する。

OD間推移確率の推定値の一例を図-6.5に示す。この図は、池田オンランプから流入した車両がどのオフランプへ到着するかの割合を示したものであるが、池田オンランプから流入し、本線を通過するODペア1-4のトリップが最も多いことがわかる。

6.4.1 基本LPモデルの応用例

動的ランプ制御の基本LPモデルを応用して、上述した阪神高速道路を対象に動的ランプ制御を計算機により実行した。

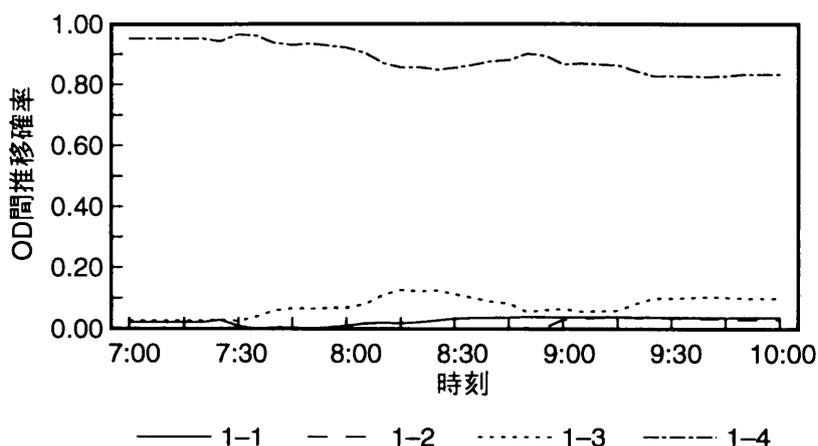


図-6.5 推定されたOD間推移確率の時間変動(池田オンランプ分)

表-6.2 基本LPモデルによる制御結果

全時間の総走行台キロ(台km)		112718
全時間の待ち時間(分)		28875
オンランプ別総待ち時間(分)	池田	0
	豊中北	0
	豊中南	238
	加島	9531
	塚本	19106

表-6.2に基本LPモデルを用いたランプ制御の結果を示す。この表から、ランプ制御による流入待ち車両は、制御を行わない池田オンランプを除いて対象ネットワークの最も上流に位置する豊中北においては発生せず、逆に最も下流に位置する塚本オンランプで待ち車両が最も多く発生していることがわかり、下流へ行くほど流入待ち時間が増加していることがわかる。これは、本研究での目的関数が総走行台キロ最大化であり、この関数型によって長距離のトリップほど優先的に都市高速道路を利用させるようにし、都市高速道路の本来的機能を損なうことなくランプ制御を行うという考え方を反映した結果となっている。

図-6.6に都市高速道路本線上の各区間の交通量の時間変動を示してある。本線区間の交通容量が380台/5分であり、一部の区間、特に区間7で交通容量に達してはいるが、いずれも交通容量の値を超えておらず、ランプ制御によって渋滞の発生を防いでいることがわかる。

一般的な傾向としては、需要交通量と同様に7:30頃にピークとなり、その後減少するという傾向を示しており、特に8:45以降にはどの区間も交通容量よりもかなり少ない交通量しか流れておらず、円滑な交通流が得られていることがわかる。

塚本オンランプにおける需要交通量、許容流入交通量および流入待ち台数の時間変動を図-6.7に示す。この図から7:10あたりから流入制御による待ち車両が発生し、8:00頃には流入待ち台数

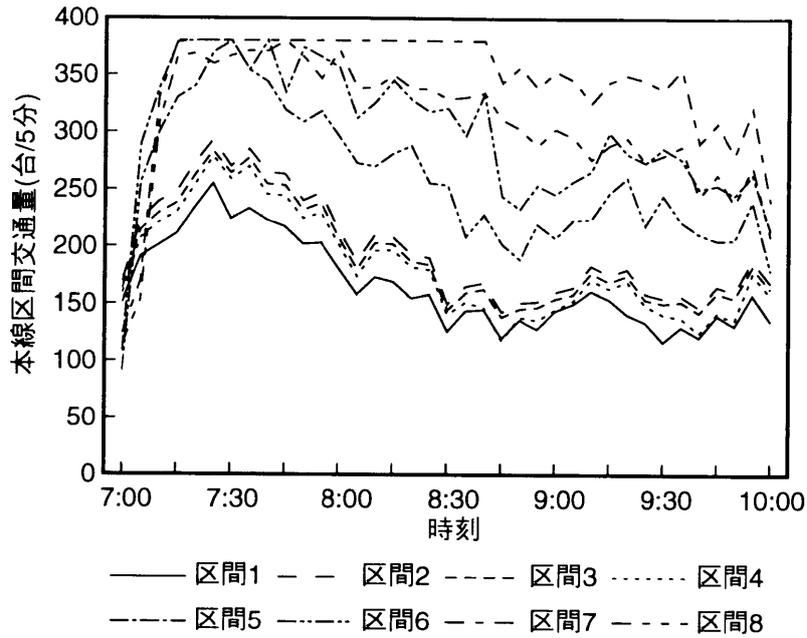


図-6.6 本線区間交通量の時間変動

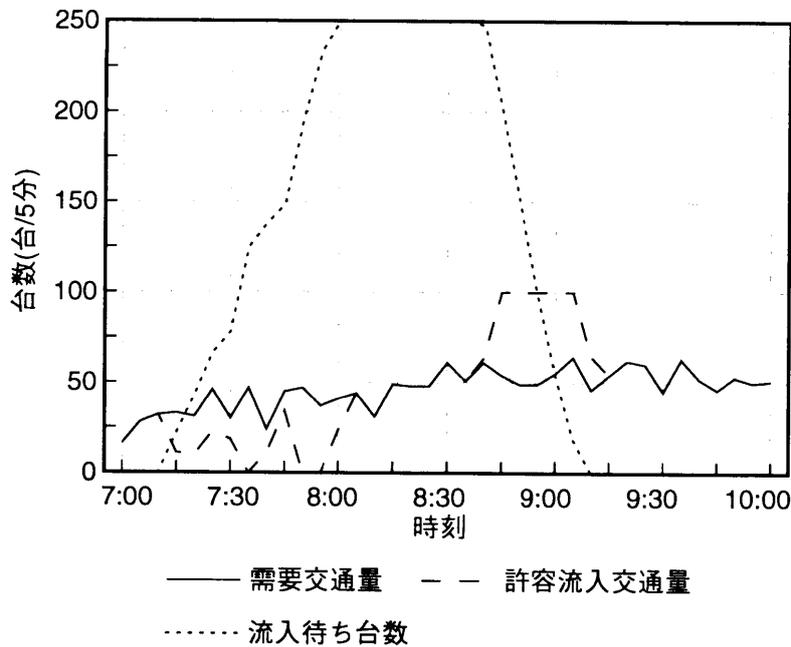


図-6.7 塚本オンランプにおける交通制御状況

の上限値である250台/5分に達し、8:40頃から待ち台数が減少し出し、9:10あたりで流入制御による待ち行列が解消していることがわかる。流入待ち車両による待ち行列は、発生してから上限値に達するまでに約50分ほどかかり、上限値からは約30ほどで全ての待ち行列が解消しており、待ち行列の増減は、延伸する場合よりも解消する場合の方が早くなっている。需要交通量と許容流

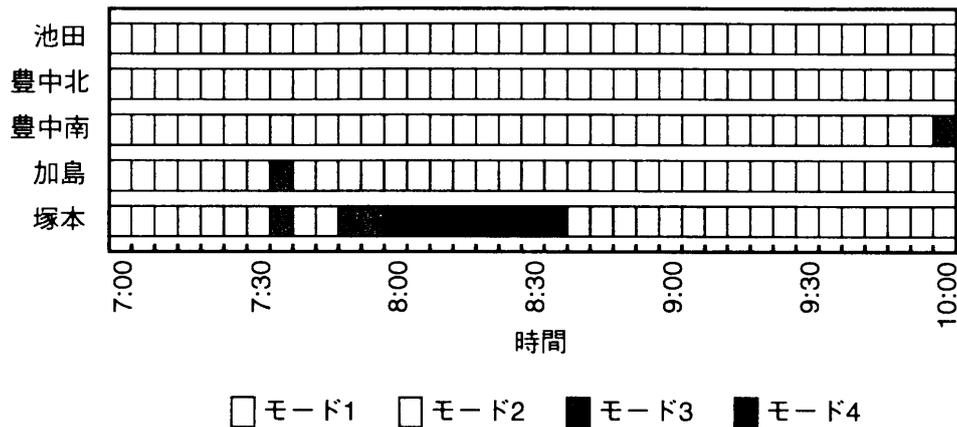


図-6.8 基本LPモデルにおける制御モード

入交通量を見比べてみると、待ち行列の発生し出す7:10頃より流入制限が始まり、8:10頃まで流入制限が行われ、その後需要交通量と等しい交通量を流入させ、流入待ち台数が減少し出す8:40頃から需要交通量以上の交通量を流入させていることがわかる。しかしながら許容流入交通量が8:45頃より、最大可能流入交通量の値に達してしまい、それ以上の流入は抑制されていることがわかる。

図-6.8に各ランプにおける制御の状況を示してある。図中、各モードは以下のような制御状態である。

- モード1 : オンランプにおける流入制御は全く行わず、需要交通量をそのまま流入させる
- モード2 : 需要交通量の一部を流入させる
- モード3 : 車両を全く流入させない
- モード4 : オンランプにおける流入待ち台数の上限値を超えた分の流入待ち車両を強制的に流入させる

この図より、対象路線の下流側3オンランプにおいてモード1以外の何らかの流入制限が行われていることがわかる。特に下流側へ行くほど流入制限が大きくなり、加島オンランプおよび塚本オンランプで完全封鎖状態となっていることがあることがわかる。さらに対象路線最下流に位置する塚本オンランプにおいては、流入待ち車両が流入待ち台数の上限値に達し、モード4が実行されていることがわかる。

以上のことから、提案した基本LPモデルによって、本線上の交通量を交通容量以下に保ちながら、流入待ち台数の上限値や、最大可能流入交通量による制約条件などを有効に働かせながら、オンランプによる流入制御が効果的に行われていることが示された。

6.4.2 ファジィLPモデルの応用例

提案したファジィLPモデルを阪神高速道路に適用するに際し、ファジィ制約に対するメンバシップ関数を表-6.3の値を用いて設定した。目的関数に対しては、基本LPモデルにおける目的関数値

表-6.3 メンバシップ関数における d_m の値

	case-1	case-2	case-3
目的関数	20%	20%	20%
本線区間容量(台/5分)	10	20	40
流入待ち台数上限値(台/5分)	10	10	10

表-6.4 ファジィLPモデルによる制御結果

		case-1	case-2	case-3
全時間の総走行台キロ(台 km)		112723	112727	112726
全時間の待ち時間(分)		26521	24925	20807
オンランプ別総待ち時間(分)	池田	0	0	0
	豊中北	0	0	0
	豊中南	232	226	214
	加島	8075	6907	5288
	塚本	18214	17793	15305

の20%の値をあいまいさの幅とし、本線区間容量および流入待ち台数上限値については、表にあるように3つのcaseごとに値を設定した。

表-6.4にファジィLPモデルによるランプ制御結果を示す。全般的には、基本LPモデルと同様な傾向を示しており、対象路線下流側のオンランプほど流入待ち車両による待ち時間の値が大きいことがわかる。各caseごとの値を比べてみると、全時間の総走行台キロの値はcaseごとに大きな差はなく、全時間の待ち時間はcase-3, case-2, case-1というあいまいさの程度が大きい順に小さくなっている。各ランプにおける待ち時間もcase-3の値が最も小さく、逆にcase-1の値が最も大きくなっていることがわかる。これらは、交通容量のあいまいさの程度を直接的に反映した結果であると考えられる。

図-6.9に一例として、本線区間7における各caseごとの区間交通量を示してある。ファジィLPモデルによって、交通容量である380台/5分を各モデルともわずかながら上回った交通量が流れていることがわかる。これは、本モデルによるファジィ制約によって、交通容量に対する制約条件の意味が、だいたい交通容量以下であるという意味になったためである。しかしながらその超過した交通量は大きくなく、現実的な値であると考えられる。caseごとには、あいまいさの程度の大きなcase-3の場合が超過した交通量が最も大きいですが、交通容量以下の交通量になる時間も最も早くなっていることがわかる。

図-6.10および図-6.11にはそれぞれ、塚本オンランプにおける各caseごとの許容流入交通量と流入待ち台数の時間変動を示してある。流入交通量は、各caseとも7:10あたりから制限されだし、case-1およびcase-2は8:05, case-3は8:10頃に需要交通量と許容流入交通量の値が等しくなる。その後、需要交通量を上回る交通量の流入が始まるが、特にcase-3の場合が最も早く最大可能流入

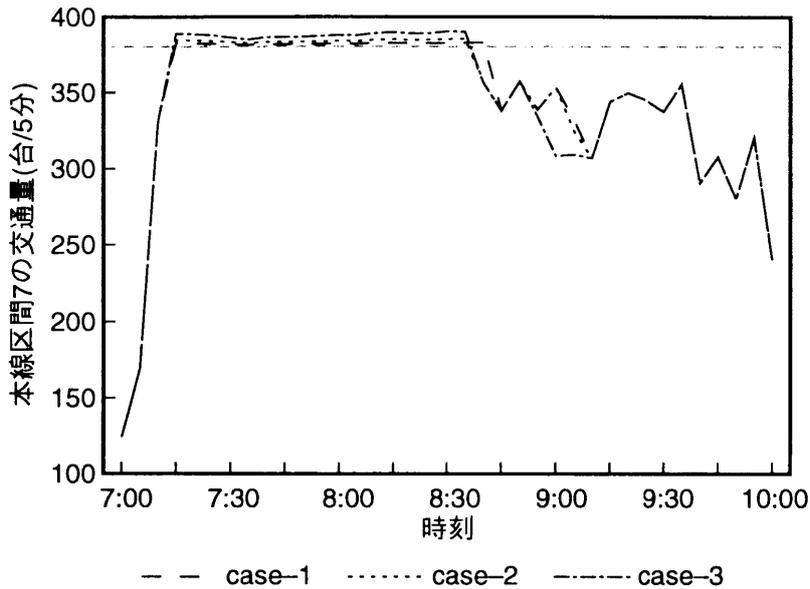


図-6.9 本線区間7における交通量の時間変動

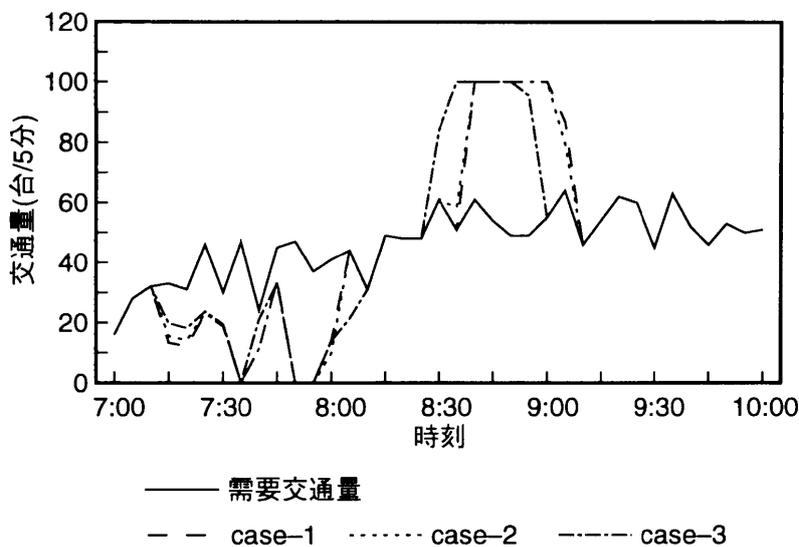


図-6.10 需要交通量と許容流入交通量の時間変動(塚本オンランプ)

交通量の値に達し、また最大可能流入交通量以下の流入交通量になるのも case-3 の場合が最も早い。さらに需要交通量と許容流入交通量の値が等しくなるのも case-3, case-2 および case-1 の順になっており、全般的に case-3 での流入を促進する制御の傾向が、他の case に比較し強いことがわかる。同様に流入待ち車両台数を見ても、case-3 での発生状況が最も緩慢であり、逆に解消するのは最も早い。続いて case-2, case-1 の順になっており、設定したあいまいさの程度を直接的に反映した結果となっていることがわかる。

図-6.12 に塚本オンランプにおける交通制御状況を示してある。各 case において、塚本オンラ

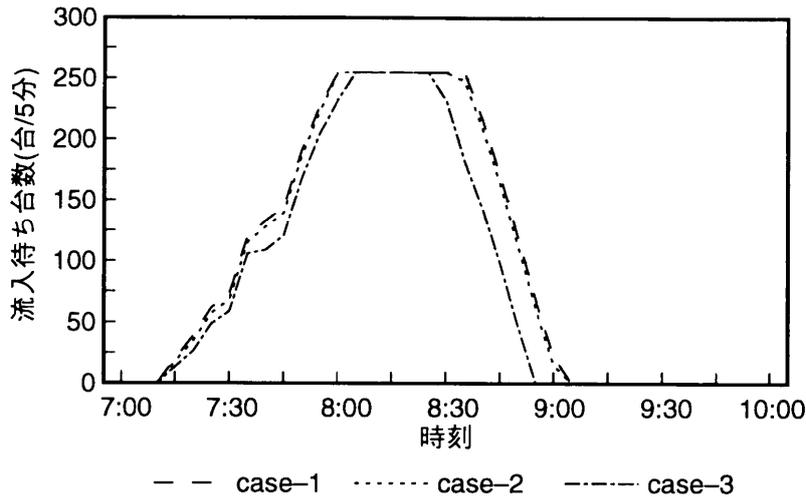


図-6.11 各 case ごとの流入待ち車両台数の時間変動(塚本オンランプ)

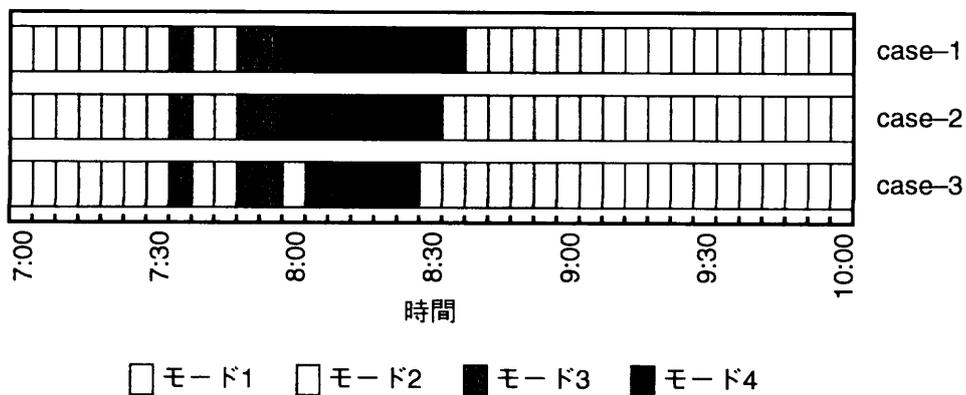


図-6.12 塚本オンランプにおける交通制御状況

ンプでは流入待ち台数が上限値に達し、強制流入させなければならなくなるモード4が実行されていることがわかる。また完全封鎖状態であるモード3も実行されている。これらの流入制限は、やはり case-3, case-2, case-1 の順で厳しくなっていることがわかる。

6.4.3 基本LPモデルとファジィLPモデルの応用例の比較

本線上交通容量および流入待ち台数の上限値を、一定値の確定的制約条件として与えた基本LPモデルと、それら制約を交通現象のあいまいさを考慮してファジィ数として与えたファジィLPモデルの応用例の違いを比較する。

全時間の総走行台キロは、ファジィLPモデルの場合のほうが全ての case において基本モデルにおける値よりも大きくなっている。全時間の流入待ち時間の値はファジィLPモデルにおける制御の場合の方が小さくなっており、ファジィLPモデルの制御の特徴を表している。流入制限は、両モデルとも7:10頃より始まり、8:10頃には需要交通量と流入交通量が等しくなっているが、その

後許容流入交通量が需要交通量よりも大きくなった後、それら両者の値が等しくなるのはファジィLPモデルの方が若干早い。また流入待ち行列の発生状況や解消の状況においても、ファジィLPモデルの方が流入制限が緩やかであり、本線区間上の交通量が交通容量に達している時間もファジィLPモデルの方が短く、特にあいまいさの程度が最も大きなcase-3の場合が短いことがわかる。

以上のことから交通流のあいまいさを考慮したファジィLPモデルによる動的ランプ制御結果の方が、基本LPモデルにおける制御結果よりも流入制限が緩やかになることがわかり、この場合においても渋滞を発生させることなく、また周辺一般道路に流入待ち車両が影響を及ぼすことなく、有効にランプ流入制御が行えることがわかった。

6.5 まとめ

本章では、これまでに提案したネットワーク上の観測交通量に基づく動的OD交通量の推定手法を用いた都市高速道路における動的ランプ制御手法について提案した。動的OD交通量の推定手法は、都市高速道路におけるトリップのランプ間の動的な推移確率を推定する際に用いられ、動的OD交通量の推定手法をランプ制御手法に導入することによって、都市高速道路上における交通流の時間変動はもちろん、時間的・空間的な分布を考慮したランプ制御が可能となった。

動的ランプ制御手法は、本線上の交通量が交通容量以下になるように流入交通量を制御する手法であり、本研究ではLP(Linear Programming)問題として制御モデルを構築した。本章第2節においては、都市高速道路の動的ランプ制御手法を基本LP問題として定式化した。ここでは、交通流の時間的・空間的な分布を考慮した本線区間上の交通量に関する制約条件、オンランプ部における流入待ち車両の上限の制約条件を考え、また最大可能流入交通量や非制御時の流入交通量に関する制約を与えた。目的関数としては、都市高速道路の本来機能を考慮して、総走行台キロ最大化を採用し、これらをLP問題として定式化した。

続いて第3節において、交通現象のあいまいさを考慮するために、動的ランプ制御手法をファジィLP問題として定式化できることを示した。ファジィLP問題は、ファジィ目標とファジィ制約から構成されるLP問題であり、本研究では本線区間交通量および流入待ち車両の待ち台数上限値に関する制約条件をファジィ制約とした。すなわち、本線区間交通量はだいたい交通容量以下であるという制約条件と、流入待ち台数はだいたい設定した上限値以下であるという制約条件であり、交通現象のあいまいさを考慮したモデルであると言える。

第4節においては、提案した動的ランプ制御モデルを実際に阪神高速道路のデータを用いて応用し、提案したモデルの有用性や妥当性を検証した。その結果、以下の知見が得られた。

(1) 本研究で提案した基本LPモデルおよびファジィLPモデルによる都市高速道路の動的ランプ制御は、本線上の交通量を設定した交通容量以下に保ち、渋滞を防ぎ、円滑な交通流を確保するのに有用なモデルであることがわかった。またオンランプ部における流入待ち台数の上限値の制約条件が有効に働き、流入待ち車両が周辺一般街路へ影響を及ぼすことなく流入制御が行えることがわかった。

(2) ファジィLPモデルにおいては、あいまいさの程度の違いによってcase-1, case-2, case-3の3つの場合においてそれぞれ応用した。この結果、あいまいさの程度が大きなcase-3における制御

結果が、全時間帯における総走行台キロの値や各ランプにおける総待ち時間の値から判断し、最も優れていることがわかった。また許容流入交通量や流入待ち台数の時間変動から、case-3における流入制御は、他のcaseに比べて車両の流入を促進する傾向が強い制御であることがわかった。車両の流入を促進させながらもcase-3における制御の結果は、本線区間上における交通量が交通容量に達した時間も、他の2つのcaseに比べて短いことがわかった。しかしながら、case-3はあいまいさの程度が最も大きく、そのため本線区間上の交通量が交通容量を超える値は多少ではあるが、他のcaseに比べて大きな値であった。

(3) 本研究では、都市高速道路の本来の機能を考慮して、目的関数としては総走行台キロ最大化を採用した。この目的関数により、長距離トリップを優先的に流入させるような制御が可能となる。しかしながら、本応用事例に用いた阪神高速道路の路線においては、本線下流部から流出するトリップが最も多く、かつその本線流出と各ランプ間の距離がそれぞれのランプで大きく異なり、その結果本線流出とオンランプの距離が短い下流側に位置するオンランプにおいて、流入待ち車両が集中して発生した。特に最下流に位置する塚本オンランプでの流入待ち車両の発生状況が顕著で、流入待ち車両の上限值に達することがあった。

今後の課題としては、次のようなことが挙げられる。

(4) 本研究では応用したネットワークが、本線一本からなる各OD間で経路が一つであるネットワークであり、動的OD交通量の推定手法としては第4章で提案した動的OD交通量の推定手法を用いて応用を行った。現実的なネットワークとしては、各OD間で複数経路が存在するようなネットワークも数多く存在するため、第5章で提案した多経路ネットワーク上における動的OD交通量の推定モデルを用いたランプ制御手法の応用を今後行う必要がある。

(5) ファジィLP制御手法により、通常のLP制御手法よりも優れた制御結果が得られることがわかったが、その結果はファジィ制約におけるメンバシップ関数の与え方を直接的に反映していた。したがって今後は、交通容量や流入待ち車両の上限值にどれほどのあいまいさを持たせることができるかを、実際の現象を分析しながら検討していく必要がある。

(6) 本応用事例ではOD交通量の推定に際し、観測された交通量をデータとして与えた。しかしながら実際にランプ制御が行われた場合には、需要交通量がそのままネットワークへ流入するわけではなく、一部は流入制限を受けることになり、したがってランプ間の交通需要とランプ間の交通量は異なったものとなってくる。OD間推移確率は、ランプ制御が行われていない状態の交通量観測値から求められるものであり、制御が行われた交通状態からの観測値を用いたOD間推移確率の推定値は、需要交通量の本来のOD間推移確率ではない。したがって、ランプ制御が行われた状態でのOD間推移確率の推定手法を、今後研究していく必要がある。

参考文献

- 1) Matsui, H. and Matsumoto, Y. : Traffic control of urban expressway with real-time estimation of dynamic O-D flows, *Third Annual World Congress on Intelligent Transport Systems*, #249, 1996
- 2) Matsui, H. and Matsumoto, Y. : Real-time traffic control of urban expressways under unsteady state conditions, *4th World Congress on Intelligent Transport Systems*, #483, 1997
- 3) 大島健志：首都高速道路の交通管制システム-システム60, 交通工学, Vol. 20, pp. 59-64, 1985
- 4) 大島健志：首都高速道路の道路交通管理の現状と課題, 交通工学, Vol. 22, pp. 55-62, 1987
- 5) 阪神高速道路公団, 交通工学研究会：阪神高速道路の交通管制に関する調査研究報告書, 1986
- 6) 本多中二, 大里有生：ファジィ工学入門, 海文堂出版, 1989
- 7) 坂和正敏：ファジィ理論の基礎と応用, 森北出版, 1989
- 8) Wattleworth, J. A. : Peak-period analysis and control of a freeway system, *Highway Research Record*, No. 157, pp. 1-10, 1967
- 9) 佐佐木綱, 明神証：都市高速道路網における流入車制御理論, 交通工学, Vol. 3, No. 3, pp. 8-16, 1968
- 10) 明神証, 坂本破魔雄, 岩本俊輔：流入待ち行列を考慮したLP制御, 交通工学, Vol. 10, No. 4, pp. 15-23, 1975
- 11) Yuan, L. S. and Kreer, J. B. : Adjustment of freeway ramp metering rates to balance entrance ramp queue, *Transportation Research*, No. 5, pp. 127-133, 1971.
- 12) Wang, J. J. and May, A. D. : Computer model for optimal freeway on-ramp control, *Highway Research Record*, No. 469, pp. 16-25, 1973
- 13) Chen, C. I., Cruz, J. B. and Paquet, J. G. : Entrance ramp control for travel-rate maximization in expressway, *Transportation Research*, Vol. 8, pp. 503-508, 1974
- 14) 松井寛, 藤田素弘, 堀尾朋宏：交通量の空間的分布を考慮したファジィLP制御, 土木計画学研究・論文集, No. 10, pp. 95-102, 1992
- 15) Bellman, R. E. and Zadeh, L. A. : Decision making in a fuzzy environment, *Management Science*, Vol. 17, pp. 141-164, 1970

第7章 結論

道路ネットワーク上における車両の動きは、その主体が意志を持った人によって行われていることから、自然界における物理法則や確率的な事象によって全てが記述できるものではなく、その動きを正確に捉えることは非常に困難であると考えられる。しかしながら現在、道路ネットワーク上では車両感知器やAVI装置などによる交通状況の観測が普及してきたことから、この観測値に含まれる情報を有効に活用し、車両の動きを正確に推定可能な手法の開発が望まれている。

あるゾーンからあるゾーンまでのトリップの量を示すOD交通量は、長期交通計画はもとより、現状の交通流の円滑化をはかるための交通運用にも欠かすことのできない情報であり、交通需要の変動を反映したOD交通量を推定するための手法の確立が期待されている。そのような背景のもと、本研究では道路ネットワーク上で観測されるスクリーンラインの断面交通量、リンク交通量および所要時間などの交通観測値を用いて、定常的な日常交通状況下以外の交通状況下における交通需要の変動を考慮したOD交通量の推定手法の開発を主眼に研究を進めてきた。以下、各章の内容を要約するとともに全体的な総括を行い、本研究の結論とする。

第1章においては、交通需要の変動を考慮したOD交通量推定手法の開発の必要性を示した。また交通計画におけるOD交通量の位置付けおよび観測交通量に基づくOD交通量の推定研究の概要について述べた。

第2章においては、交通需要の日変動、特に休日における交通需要の変動を考慮した交通計画に不可欠である休日OD交通量を推定するための手法について述べた。この手法においては、従来より整備の進んでいる平日OD交通量のデータを有効に活用し、休日交通に関する最小限の情報を用いて休日OD交通量を推定することを主眼とした。休日交通に関する情報としては、入手しやすい休日におけるスクリーンライン断面交通量の値を用いた。はじめに京阪神都市圏地域において実際に調査されたデータを用いて、休日OD交通量と平日OD交通量およびゾーン間距離との関係を分析した。休日OD交通量は平日OD交通量と同様にゾーン間距離が大きくなるほど減少し、平日に対する休日のOD間トリップの発生比率は、ゾーン間距離が大きくなるほど高くなることが明らかにされた。この分析結果をもとに休日OD交通量を平日OD交通量およびゾーン間距離を用いて表すモデルを構築した。続いて休日OD交通量の推定手法を、2つの方法論により展開した。一つは、モデルにより表される休日のスクリーンライン断面交通量と観測された休日のスクリーンライン断面交通量との残差平方和が最小になるように休日OD交通量を推定する方法であり、一つは観測された休日のスクリーンライン断面交通量と一致する断面交通量を生じるODパターンのうちで、同時生起確率が最大になるODパターンを休日OD交通のODパターンの推定値とする方法であった。これら両手法を京阪神都市圏地域において異なる大きさの2つのゾーンングにおいて実際に適用計算を行い、各手法の妥当性および有用性について検証した。その結果、休日OD交通量を表すモデルにゾーン間距離を組み込むことで推定結果が安定し、両手法に

において妥当な推定値が得られ、十分実用的であることが明らかになった。

第3章においては、交通需要の各時間帯における変動に着目し、OD交通量の推定手法に新たに時間軸を導入した時間帯別OD交通量の推定手法について述べた。ここで扱った時間帯別OD交通量は、これまで1日単位で扱われてきたものを1時間単位で扱ったものであり、モデルの基本的な枠組みは単位時間内の交通現象の定常性を仮定した静的な枠組みであった。この手法の目的とするところは、これまでに整備されている日単位のOD交通量や日単位のOD間旅行時間の情報を有効に活用し、交通量の時間変動に関する最小限の情報をもとに時間帯別OD交通量を精度良く推定することであった。OD交通量の時間変動に関する情報は、第2章と同様にスクリーンライン断面交通量のデータとし、このスクリーンライン断面交通量の時間帯ごとのデータを用いて時間帯別OD交通量を推定するための手法を展開した。この場合も第2章と同様に、モデルにより表される時間帯別のスクリーンライン断面交通量と観測時間帯別スクリーンライン断面交通量との残差平方和が最小になるように時間帯別OD交通量を推定する方法と、観測時間帯別スクリーンライン断面交通量と一致するスクリーンライン断面交通量を生じるODパターンのうちで、同時生起確率が最大になるODパターンを時間帯別OD交通量のODパターンの推定値とする方法の2つの方法論によって時間帯別OD交通量の推定手法を展開した。特に、残差平方和最小化手法に基づく推定手法の場合には、OD間のトリップが発生してからスクリーンラインを横断するまでの時間差を考慮したモデル化を行い、さらにスクリーンラインを横断する方向を考慮したモデル化も同時に行った。これら両手法を、豊田市周辺地域において実際に適用計算を行った。その結果、本適用事例で対象とした7時台から18時台の両端の時間帯を除いて、両モデルともに十分妥当な推定結果が得られることが示された。対象時間帯両端の時間帯における推定結果の精度の低下は、残差平方和最小化手法に基づくモデルの場合においては、そのモデルの特性より、対象時間帯前後の時間帯のデータを用いた推定によって改善されると考えられる。同時生起確率最大化手法に基づくモデルの場合においては、朝夕のピーク時間帯における発生点からスクリーンラインを横断するまでの時間差によって、時間帯別スクリーンライン断面交通量を補正することで推定結果は改善されると考えられる。

第4章においては、より短い時間間隔における交通需要の時間変動に着目したOD交通量の推定手法について述べた。この手法においては、第3章で仮定していた推定単位時間内における交通現象の定常性を仮定せず、同じ単位時間内においても車両の旅行時間は時間変動すると考え、交通現象を動的に扱った。本章で対象とするネットワークは、単独の信号交差点、高速道路のジャンクション、高速道路部分区間および信号交差点が直列に配置された一般街路部分ネットワークなどの各OD間に存在する経路が一つに限定されるようなネットワークであり、この場合には経路が限定されるためにドライバーの経路選択行動を考慮する必要がなかった。したがって動的OD交通量は、対象とするネットワークの境界における観測値、すなわち流入交通量および流出交通量の観測値を用いて推定される。はじめに、その流出入交通量観測値間の動的な関係をOD交通量を介して定式化できることを示し、その観測交通量間の動的な関係式を用いて動的OD交通量の推定問題が定式化できることを示した。推定問題は各OD間の旅行時間が同一で一定の場合と、各OD間で旅行時間が異なりかつ時間変動する場合のそれぞれの場合において定式化し、両者の

場合における推定問題の解法を示した。本手法の特徴としては、旅行時間の時間変動を考慮していること、OD間推移確率に関する等式および不等式制約条件を満たした推定値が得られることおよび提案した再帰的なアルゴリズムによりオンラインでの適用が可能であることなどが挙げられる。続いて提案した動的OD交通量の推定手法をシミュレーションデータを用いて検証し、その結果OD間の旅行時間が一定で同一の場合においても時間的に変動する場合においても十分な精度を有した推定結果が得られることが明らかになった。またOD間推移確率が傾向的に変動する場合や観測値に誤差が含まれた場合の適用計算結果から、本推定手法の妥当性が示された。

第5章においては、各OD間に複数の経路が存在するようなネットワークを対象とした、動的OD交通量の推定手法について述べた。この場合には第4章における推定手法とは異なり、ネットワーク境界における交通量観測値、すなわち流出入交通量の観測値のみからではOD交通量を推定することはできず、ネットワーク内の交通量観測値、すなわちリンク交通量の観測値が必要であった。リンク交通量観測値の値にはドライバーの経路選択行動が反映されており、この情報と仮定したドライバーの経路選択行動から各OD間の交通量を推定することになる。本章ではドライバーの経路選択行動に確率配分原理を仮定した場合と、利用者均衡原理を仮定した場合の2つの場合についてそれぞれ考えた。はじめに流入交通量とリンク交通量の動的な関係を経路選択率を含めOD交通量を介して定式化できることを示し、続いて流入交通量と流出交通量の動的な関係を同様に、経路選択率を含めOD交通量を介して定式化できることを示した。この両者の関係から、ある経路選択率のもとでの動的OD交通量の推定問題が定式化されることを示したが、この推定問題における経路選択行動に確率配分を仮定した場合には、この問題のみから動的OD交通量が推定可能であることを示した。ただし経路選択行動を規定するために、事前に配分パラメータの設定が必要であった。続いてドライバーの経路選択行動に利用者均衡原理を仮定した場合の動的OD交通量の推定問題を構築したが、この問題は先に定式化した交通量観測値間の動的な関係式からなる、ある経路選択率下の動的OD交通量の推定問題と、利用者均衡配分問題との2レベル最適化問題として定式化されることを示した。ドライバーの経路選択行動に確率配分原理を仮定した場合の動的OD交通量の推定問題は、この2レベル問題の上位問題と同様であり、この問題の解法をはじめに示した。続いてOD間推移確率に関する不等式制約条件に対するラグランジュ乗数の更新方法を提案し、さらに下位問題も含めた2レベル最適化問題の解法に、その実用性を考慮してヒューリスティックな方法を用いた解法を示した。これらドライバーの経路選択行動に対する仮定が異なる2つの推定手法をシミュレーションデータを用いて検証した結果、両手法から十分妥当な推定値が得られることが明らかになった。特に利用者均衡原理を仮定した場合の適用計算は、ドライバーの経路選択行動が利用者均衡原理に従わない場合やOD間推移確率が時間的に変動する場合および観測地点が異なる場合などについても行い、その結果本手法の有用性が明らかになった。

第6章においては、第4章および第5章において提案した手法によって得られる動的OD交通量を利用した交通運用の具体例として、都市高速道路の動的ランプ制御手法について述べた。はじめに動的ランプ制御手法をLP問題として定式化できることを示した。都市高速道路の本来の機能の一つに、長距離トリップを有効に処理し、都心部における通過交通を排除することによって、都心部一般街路の交通流の円滑化をはかるといった機能が挙げられることから、本研究では目的関数

として利用台数最大化ではなく、総走行台キロ最大化を採用した。制約条件の中で最も重要となる本線上の区間交通量が交通容量以下であるという制約に関しては、交通流の時間的な分布および空間的な分布を考慮するために、動的OD交通量の推定値から得られるOD間推移確率を用いた制約条件を構築した。この交通流の時間的・空間的分布は制御単位時間ごとの区間通過率を用いることにより表現されるが、区間通過率は制御単位時間ごとのOD間推移確率の推定値を用いて求められることを示した。この制約条件により、制御インターバル以前に都市高速道路へ流入した車両の本線上での残留が表現可能となった。さらにオンランプ部における流入待ち車両が一般街路交通流に影響を及ぼすことが無いように待ち台数の上限値に関する制約を設け、他に最大可能流入交通量、非制御時流入交通量などの制約条件を設けた。続いて交通現象のあいまいさを考慮可能なように、制約条件値をファジィ数として与えたファジィLP問題として動的ランプ制御手法を定式化した。本線区間上で交通渋滞を引き起こす時点の交通量は、その時の交通状況や路面状況、天候などによって変化すると考えられ、また一般街路交通流に影響を及ぼすことになるオンランプ部における流入待ち車両の台数も、待ち行列の状態や一般街路交通流の状態によって変化すると考えられ、これらあいまいな交通現象に関する制約値をここではファジィ数として与えた。このファジィ目標とファジィ制約から構成されるファジィLP問題は、通常のLP問題に変換でき、通常の解法を用いて解けることを示した。通常のLP問題およびファジィLP問題として定式化された動的ランプ制御手法を用いて阪神高速道路において適用計算を行い、その結果提案した両制御手法によって本線区間上の渋滞の発生を効果的に防ぐことができることが明らかになり、特にファジィLP問題によるランプ制御手法の制御結果が優れていることが示された。

以上のように本研究では、道路ネットワーク上で観測されている交通状況に関するデータを用いて、日変動や時間変動などの交通需要の変動を考慮したOD交通量の推定手法について述べてきた。提案した各手法においては、それぞれの特徴を生かしながら、日変動や時間変動などの交通需要の変動をうまく捉えながら妥当なOD交通量の推定値を得ることができることが示された。またその推定値を用いた交通運用の具体例として、都市高速道路における動的ランプ制御手法について提案し、この制御手法によって交通流の円滑化がはかられることが明らかになった。

最後に、慢性的な混雑状況を生みだしている道路交通の現況が直ちに改善されるような有効な施策は未だ見あたらないが、本研究における交通需要の変動を考慮したOD交通量の推定手法が、今後の道路交通状況の改善に役立つことを確信する。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多くの方々から貴重なご指導、ご鞭撻、ご協力をいただきました。

名古屋工業大学松井寛教授には、筆者の学部、大学院時代を通し、さらにこれまでの間、終始ご指導とご鞭撻を賜った。先生には、筆者が本テーマに沿って研究への道を歩む契機を与えていただくとともに、幾度となく研究の壁にぶつかり挫折しそうになるところを、先生の幅広く深い見識と研究に対する先進的かつ独創的な発想にいつも支えられた。こうした先生の厳しく、そして暖かなご指導なくしては、本研究をまとめることはできなかったと思われる。ここに、深甚なる謝意を表します。名古屋工業大学山本幸司教授には、暖かなご指導と時には厳しい激励を賜った。研究が行き詰まっているところを、先生の率直なご助言により助けられ、本論文の審査にあたっては、貴重なご示唆をいただきました。ここに、深く謝意を表します。また本論文の審査にあたり、名古屋工業大学長尾正志教授、名古屋工業大学堀越哲美教授からは、有用なご助言ならびにご示唆をいただきました。名古屋工業大学社会開発工学科の諸先生方からも多くのご助言をいただくとともに、学部、大学院時代を通して筆者の研究者としての礎を築いていただいた。ここに、心から感謝の意を表します。

名城大学栗本讓教授には、筆者が名城大学勤務以来、日頃からご指導、ご鞭撻を賜るとともに、筆者の研究環境に常にご配慮をいただきました。先生の大局的で的確な視点にいつも感銘を受け、公私ともに先生の豊かな人間性に触れることができたのは、筆者の大きな幸せであり、ここに心から謝意を表します。名城大学高橋政稔教授には、暖かなご指導とご援助を賜った。筆者が研究に疲れているところを、ユーモアがあり、そして義を何よりも重んじる先生のお人柄に接することにより、幾度となく助けられた。ここに、心から謝意を表します。

豊田工業高等専門学校荻野弘教授、豊田工業高等専門学校野田宏治助教授、名古屋工業大学藤田素弘助教授には、日頃からご指導、ご助言をいただきました。先生方には、研究に対するご指導のみならず、時には良き先輩として、未熟な筆者の心の支えになっていただいた。ここに、厚く御礼申し上げます。名古屋交通問題研究会ならびに交通ネットワーク研究会では、興味深い発表や熱心な討議を聞くことができ、筆者にとって良い勉強の場であり、多くの刺激をもたらしてくれました。両研究会の方々に厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行においては、名城大学理工学部土木工学科の学生、名古屋工業大学社会開発工学科の卒業生のご協力をいただきました。名城大学理工学部土木工学科の諸先生方においては、本研究の遂行に対してご理解をいただきました。ここに心から感謝申し上げます。

最後に、本研究はここに述べることのできなかった多くの方々の直接、間接のご支援に支えられてこそ完成し得たことを銘記し、ここに厚く御礼申し上げます。