

交通流シミュレーションモデルの開発と事例分析

片 山 直 登

1 はじめに

交通量の増大に伴い、都市部の交差点やその周辺部を中心に、交通渋滞が慢性的に発生している。交通渋滞は、個々の走行時間や費用の増大を招くのみならず、大気汚染や騒音など環境への影響も大きく、全体として大きな社会的損失を生じさせている。このような交通渋滞の対策を適切に計画するためには、交通状況をなんらかの形で再現し、様々な状況について分析を行う必要がある。

交通状況を再現し、分析するモデルは、対象とする区域の規模によって、いくつかに分類される。対象区域が都市全体や複数都市を含む広域にわたる場合には、交通量配分モデルとよばれる静的・マクロ的な非線形最適化モデル¹⁾が用いられる。対象区域が合流地点や道路区間のような限られた区域の場合には、ミクロ的・解析的な追従モデル^{2,3)}などが用いられる。一方、都市中心部や交差点を中心とする区域に対しては、シミュレーションモデル^{4,5,6,7,8,9)}が最も有効である。

現在までに、各所で数多くの交通シミュレーションモデルが開発され、解析が行われている。また、最近では、交通シミュレーションモデルを検証するためのデータセットが話題¹⁰⁾となっており、モデルの妥当性をいかに検証するかが課題となっている。しかし、従来の研究の多くでは、シミュレーション結果と現実の観測結果を比較した妥当性の検証が行われていないか、検証の結果が公表されていない。

一方、シミュレーションのための専用言語が数多く提供されはじめている。SLAM II¹¹⁾は、離散型・連続型共用のシミュレーション言語であり、ものの流れをネットワークモデルとして表現できるため、多数の車両が同時に移動するような交通シミュレーションに適用しやすい言語である。

本論文では、都市中心部を対象としたシミュレーションモデルの開発を行い、SLAM

II 言語を用いてシミュレーションプログラムを開発する。次に、実際に観測を実施し、得られた観測データを用いて、シミュレーション解析を行う。さらに、観測結果とシミュレーション結果を比較・検討することによって、シミュレーションモデルの妥当性を検証する。

2 交通流シミュレーションモデル

交通流シミュレーションモデルでは、車両の走行方法、交差点の右左折・直進方法など多くの車両挙動をモデル化しなければならない。しかし、これらの挙動を厳密に取り入れるとモデルが複雑化・巨大化するために、適切なモデル化が必要である。ここでは、本シミュレーションモデルで前提とする車両挙動を説明する。

(1) 到着

車両は、ある決められた確率分布に従って、モデル外部よりモデルの端末道路区間に到着する。端末道路区間が複数車線をもつ場合には、各車線毎に独立した確率分布に従って、車両が到着する。

(2) 基本走行

1台の車両の占有する領域を1メッシュとし、交差点間である道路区間内を車両の存在する領域に対応するメッシュに分割する。各車両は、メッシュ単位で離散的に道路区間内を移動する。図1に示すように、隣接する進行方向のメッシュ内に他の車両が存在しなければ、車両は隣接メッシュに移動する。隣接する進行方向のメッシュ内に他の車両が存在すれば、このメッシュに移動することができず、隣接メッシュが空くまで当該メッシュで待機する。

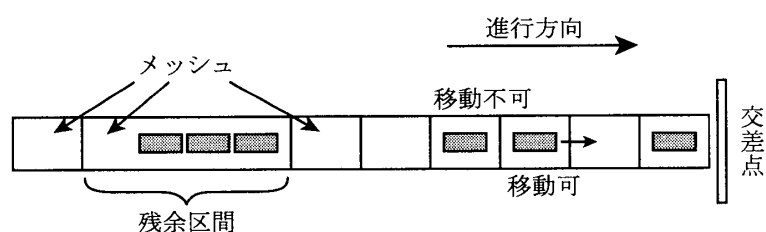


図1 基本走行

図1に示すように、1道路区間長が大きな場合には、交差点の手前の決められた一定区間と最後尾の1台分を1メッシュとして取り扱い、残余区間は全体で1メッシュとして処理する。

(3) 停車・発進

メッシュ間の移動に要する時間値は、信号や渋滞によって車両が停止した場合と、車両が走行状態である通常走行の場合の2種類とする。

(4) 信号サイクル

信号毎に与えられた信号サイクルに従って、信号は青、右折専用、赤のように変化する。便宜上、黄色は青と赤に分割する。

(5) 車線変更

図2に示すように、道路区間上の各車線には、隣接する交差点手前の右折・左折・直進車線に従って、それぞれ右折・左折・直進を行う車両のみが走行する。また、1道路区間内の車線変更は考慮しない。

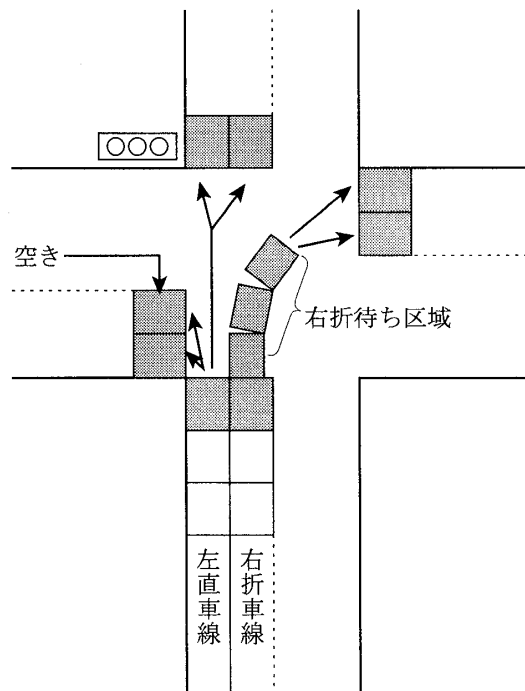


図2 交差点

(6) 左折・直進

図2に示すように、左折または直進するため交差点に到着した車両は、交差点直後の進行予定車線の最後尾にある1メッシュに空きがある場合に、信号に従って左折また直進を行う。交差点直後の進行予定車線の1メッシュに空きがない場合は、メッシュが空いている車線を選択する。すべての車線に空きがない場合は、交差点手前で待機する。

車線が左折・直進兼用車線の場合には、各車両の左折・直進は決められた確率に従って行う。

(7) 右折

右折するため交差点に到着した車両は、信号に従って、図2に示すように交差点内の右折待ち区域に対応する決められた数のメッシュに移動する。信号が青で、対向車が無い、すなわち対向車線の交差点に隣接する一定数のメッシュが空いている場合に右折可

能とする。信号が右折専用信号の場合には、そのまま右折可能とする。

ただし、交差点直後の進行予定車線の最後尾に1メッシュの空きがある場合に限り、右折を行う。空きがない場合は、メッシュが空いている車線を選択し右折する。すべての車線に空きがない場合は、そのまま待機する。

交差点内で待機したまま信号が赤になった場合、交差点内のメッシュに存在する車両は、この時点で右折を完了する。

(8) 交差点通過後の車線選択

交差点直後に車両が走行する車線は、決められた確率によって選択されるものとする。

以上の車両挙動の前提には、現実的でないものもいくつか存在する。これらの多くは、モデルを簡略化するために設定したものである。ここで、前提の中の主なものについて検討しておく。

実際の移動時間は、交通状況や車両速度などによって様々に変化する。本モデルでは、移動時間は停止時と通常走行時の2通りのみとしている。しかし、モデルから結果として得られる移動時間は、この2通りだけの時間値ではなく、2通りの時間値と各メッシュにおける待ち時間の合計時間となり、交通状況に対応した様々な時間値を取ることができる。

交差点付近と最後尾の1メッシュを除き、残余区間を1メッシュとして扱っている。交差点付近以外を1メッシュとしても、交差点による遅れは、過不足なくそのまま再現できる。一般に、交差点を中心とした事例を対象とする場合には、車両の所要時間の遅れは主に交差点部に起因するものであり、交差点部以外の要因による遅れは比較的小さいものと考えられる。

車両は交差点直後に車線を選択するだけで、その後の車線変更を考慮していない。これも先程と同様に、対象とするモデルが交差点を中心とする場合には、比較的、影響は少ないと考えられる。

交差点直後の車線の選択は、決められた確率に従って行うのみであり、本モデルでは各車両毎に目的地を設定していない。このため、混雑状況に応じた経路の変更を考慮することはできない。しかし、比較的限られた区域を対象とする場合には、経路の変更はあまり行われなれないと思われる。

3 SLAM II を用いたモデル化

シミュレーション言語である SLAM II 言語を用いて、交通流シミュレーションモデルを作成する。モデルの主な構成は次のようになる。

- ・変数の初期化、リソースとゲートの宣言
- ・各道路区間・車線内の車両の移動処理

- ・ 交差点における車両の左折・直進処理と交差点通過後の車線選択
- ・ 交差点における車両の右折処理と交差点通過後の車線選択
- ・ 信号処理
- ・ 右折許可処理
- ・ 統計処理

1 道路区間・1車線の車両処理ユニットの大きな流れを図3に示す。実際のモデルでは、このユニットが多数存在してネットワークを構成し、信号や交差点を通して相互に干渉することになる。

次に、SLAM II のネットワークモデル図を用いて、主な処理を説明する。

(1) 車両発生と基本走行

図4のように、CREATE ノードを用いて、決められた確率分布に従って車両を発生させる。

1 メッシュには、1 リソースを持つ AWAIT ノードを対応させる。AWAIT ノードはリソースをもつ待ち行列である。図4に示すように、車両は AWAIT(k) を通過後に、1 つ手前のメッシュに対応する AWAIT(k-1) のリソースを解放し、AWAIT(k-1) に後続車両の進入を許可する。この操作によって、同一のメッシュ内に複数の車両が存在することを防ぎ、先行車両が移動した後の後続車両の移動を可能にする。

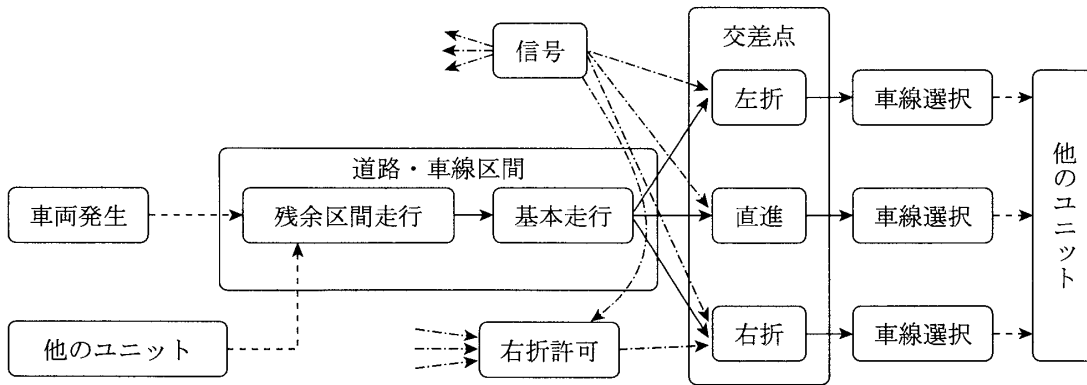


図3 車線の車両処理ユニット

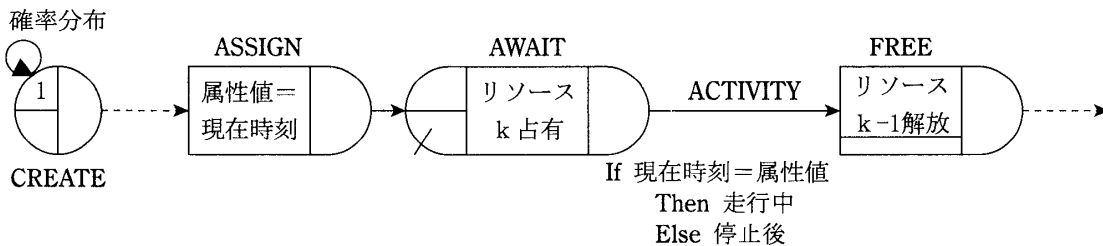


図4 車両発生と基本走行

AWAIT ノードに到着した時刻を車両の属性値に記録し、この AWAIT ノードから移動するとき、現在時刻とこの属性値を比較する。これらの値が一致すれば、遅れなくメッシュを通過、すなわち通常走行と判断する。一致しなければ（現在時刻 > 属性値であれば）、先行メッシュに車両が存在するなどのために、このメッシュで停止したと判断する。この比較結果によって、メッシュ間の移動時間を決定する。

(2) 残余区間

交差点手前の一定区間と最後尾以外の残余区間は、全体で1メッシュとして処理する。図5に示すように、残余区間に収容可能な車両数分の容量をもつ AWAIT ノード、並列 ACITIVITY、QUEUE ノードを準備する。並列 ACITIVITY には、この区間の通常走行に要する移動時間を付加しておく。1台の車両が QUEUE ノードを通過し、先行メッシュに移動すると、1リソースを解放し、新たに AWAIT ノードへ1台の進入を許可する。もちろん、収容可能台数分のリソースが利用可能であるため、残余区間内に存在する車両台数が収容可能台数以内であれば、リソースの解放にかかわらず後続車両はこの区間へ進入が可能である。



図5 残余区間の1メッシュ化

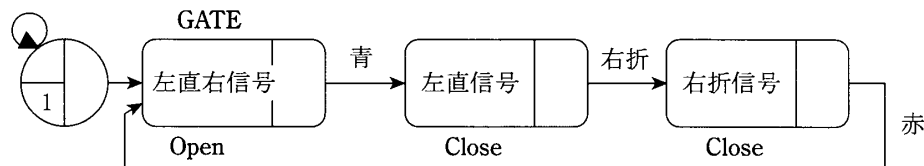


図6 信号ゲート

(3) 信号ゲート

右折、直進、左折信号毎にゲートを設定し、図6に示すように、時刻によって信号の切り替えを行う。

(4) 車両の左折と直進

車両の左折と直進は、交差点到着時の信号ゲート、および交差点直後のメッシュ内に存在する車両の有無に従って行われる。信号ゲートが Open (青) で、交差点直後のメッシュ内に車両が存在しなければ、左折・直進を行う。そうでなければ当該メッシュで待機する。車両の存在は変数 XX で確認する。

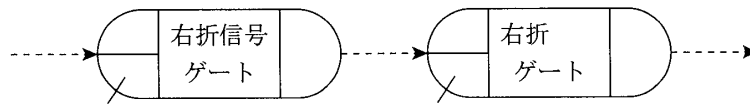


図7 車両の右折

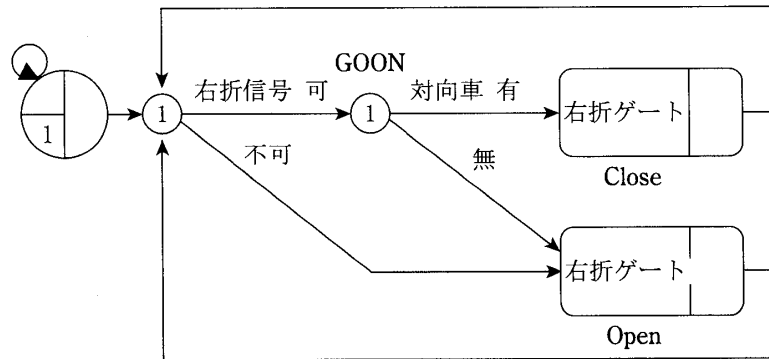


図8 右折ゲート

(5) 右折ゲートと車両の右折

右折処理は、左折・直進に比べて少し複雑である。図7に示すように、右折車両は右折信号ゲートと右折ゲートの2つのゲートによって処理する。

図8に示すように、右折ゲートでは、右折信号と対向車の有無によって、そのOpenとCloseを決定する。車両の存在は変数XXで確認する。信号が右折可の場合には、対向車が有れば右折を許可せず、対向車が無ければ右折を許可する。信号が右折不可の場合には、右折信号によって交差点に進出し、待機している間に信号が赤に変わったことを意味するので、右折を許可する。

4 シミュレーション・データ

現実の交通ネットワークを対象として、開発したシミュレーションモデルを用いて、シミュレーションプログラムを開発する。さらに、シミュレーションを実施するためのデータを实地観測によって収集する。

対象とする区域は、図9に示す石川県金沢市の中心部とする。この区間には、周辺部地域からの流入車両が集中するために、市内でも最も渋滞が問題となっている区域であり、交通渋滞対策が要望される区域である。

この区域には、4ヶ所の交差点、7ヶ所の外部地域からの流入道路区間、7ヶ所の外部地域への流出道路区間、および8ヶ所の内部道路区間が含まれている。信号は交差点毎に存在し、4ヶ所の合計15個である。実際には、交差点以外の場所にも信号は存在す

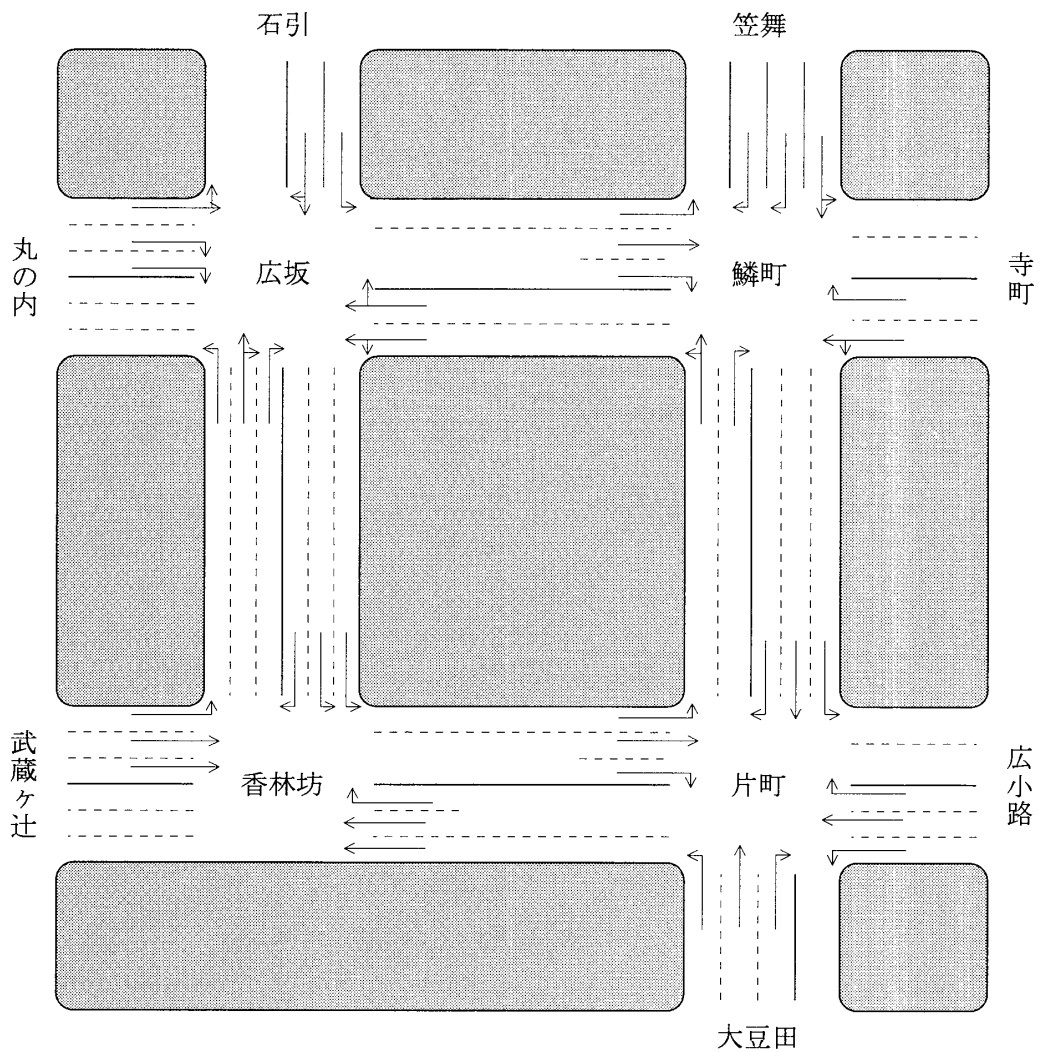


図9 シミュレーション対象区域

るが、主な渋滞の原因は交差点部に起因すると考えられるため、ここでは省略する。対象区域には、右折レーンを含めると、54車線が存在する。

開発したプログラムは大規模なものとなり、コメント文を含めると約3400行になる。使用した統計変数は14個、QUEUEとAWAITに対するリソースは314個、ゲートは53個である。

平成7年1月5日～7日の各日午後5時～6時に実地観測を行い、シミュレーションに使用するデータを収集した。観測から得られた外部地域から各交差点へ流入する車両の平均到着間隔を表1から表4に示す。また、各交差点の信号時間を表5から表8に示す。

その他の主な前提と数値を示しておく。各車両は、表1から表4に示した平均到着間隔をもつ指数分布に従って到着する。各車両のメッシュ間の移動時間は、停止時で1.22秒(20km相当)、非停止時で0.44秒(60km相当)とする。基本走行として扱うメッシュ

表1 平均到着間隔(片町交差点)(秒)

大豆田			広小路		
右折	直進	左折	右折	直進	左折
27.7	16.7	33.3	22.5	4.0	9.0

表2 平均到着間隔(鱗町交差点)(秒)

寺町		笠舞		
右折	直・左	右折1	右折2	直・左
45.0	9.0	22.5	25.7	12.0

表3 平均到着間隔(広坂交差点)(秒)

石引		丸の内		
右・直	左折	右折1	右折2	直・左
16.4	45.0	22.5	18.0	6.0

表4 平均到着間隔(香林坊交差点)(秒)

武蔵ヶ辻		
左折	直進1	直進2
5.8	7.8	12.9

表5 信号時間(片町交差点)(秒)

大豆田	鱗町	広小路	香林坊
青 20	青 20	赤 65	赤 65
右折10	右折10		
赤 120	赤 120	青 70	青 70
		右折15	右折15

表6 信号時間(鱗町交差点)(秒)

片町	笠舞	寺町	広坂
青 25	青 25	赤 35	赤 35
右折10	右折10		
赤 65	赤 65	青 55	青 55
		右折10	右折10

表7 信号時間(広坂交差点)(秒)

香林坊	石引	鱗町	丸の内
青 60	青 30	赤 70	赤 70
右折10	赤 105		
赤 65		青 55	青 65
		赤 10	

表8 信号時間(香林坊交差点)(秒)

広坂	片町	武蔵ヶ辻
左折40	右折40	赤 70
右折30	赤 30	
赤 80	青 80	青 80

は、各車線毎に交差点の手前6台分とする。交差点内の右折待ち区域は3メッシュとする。各残余区間の移動時間は100m当たり6.00秒(60km/相当)とする。

5 シミュレーション結果と検証

前節で示したデータを用いて、ワークステーション SONY NEWS NWS-1460を使用して、シミュレーションを10回実施し、シミュレーション結果を観測した。シミュレーション時間は各3000秒とし、定常状態を観測するために1000秒から統計データを収集した。モデルの構造上から、直接、待ち台数を測定できないため、リトルの公式を用いて、各交差点における平均待ち時間と平均到着率から平均待ち台数を算出した。

シミュレーション結果から求めた交差点別・車線別の平均待ち台数とその標準偏差を図に示す。同時に、実際の観測結果から求めた平均待ち台数とその標準偏差も併記する。これらは、平均値+標準偏差、平均値、平均値-標準偏差の3点表示グラフを用いて表し、左側がシミュレーション結果、右側が観測結果である。片町交差点の結果を図10に、鱗町交差点の結果を図11に、広坂交差点の結果を図12に、香林坊交差点の結果を図13に

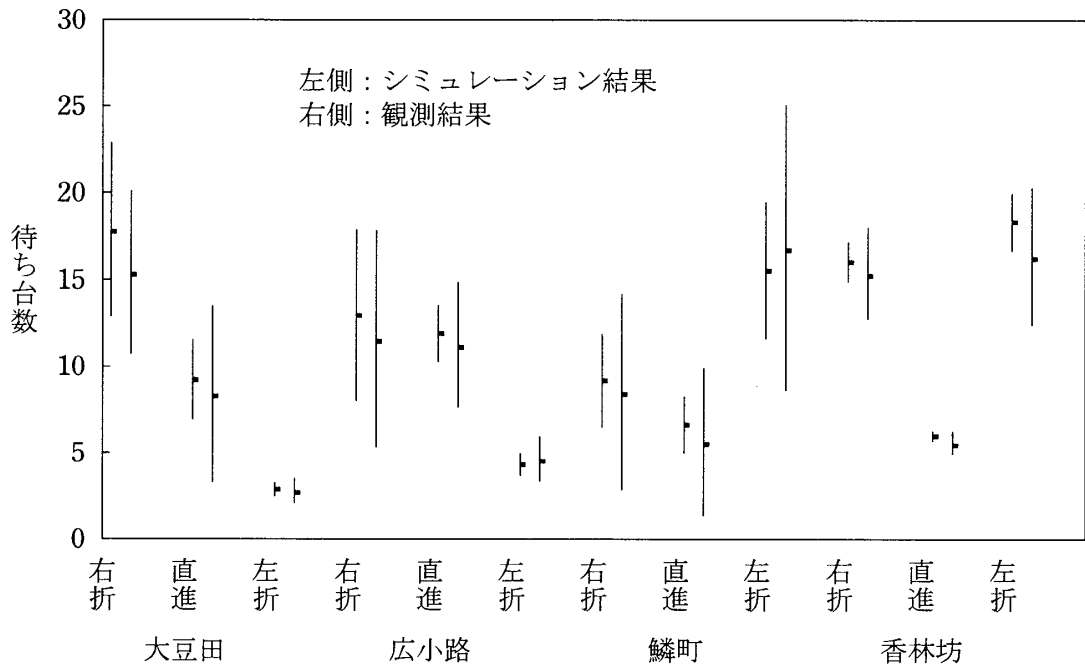


図10 片町交差点

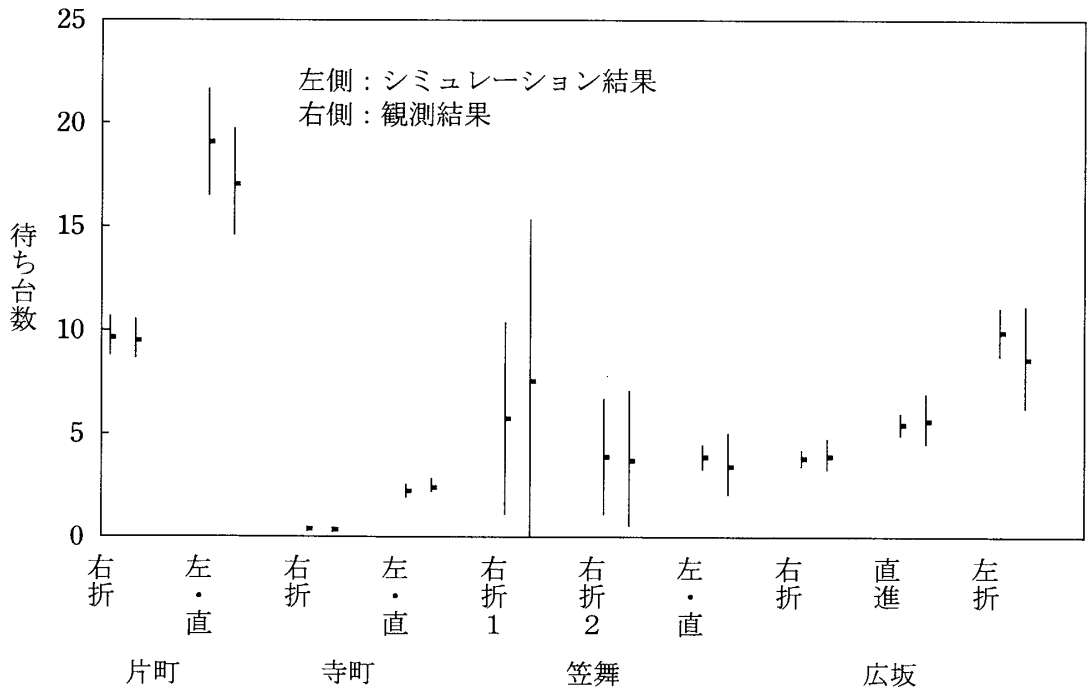


図11 鱗町交差点

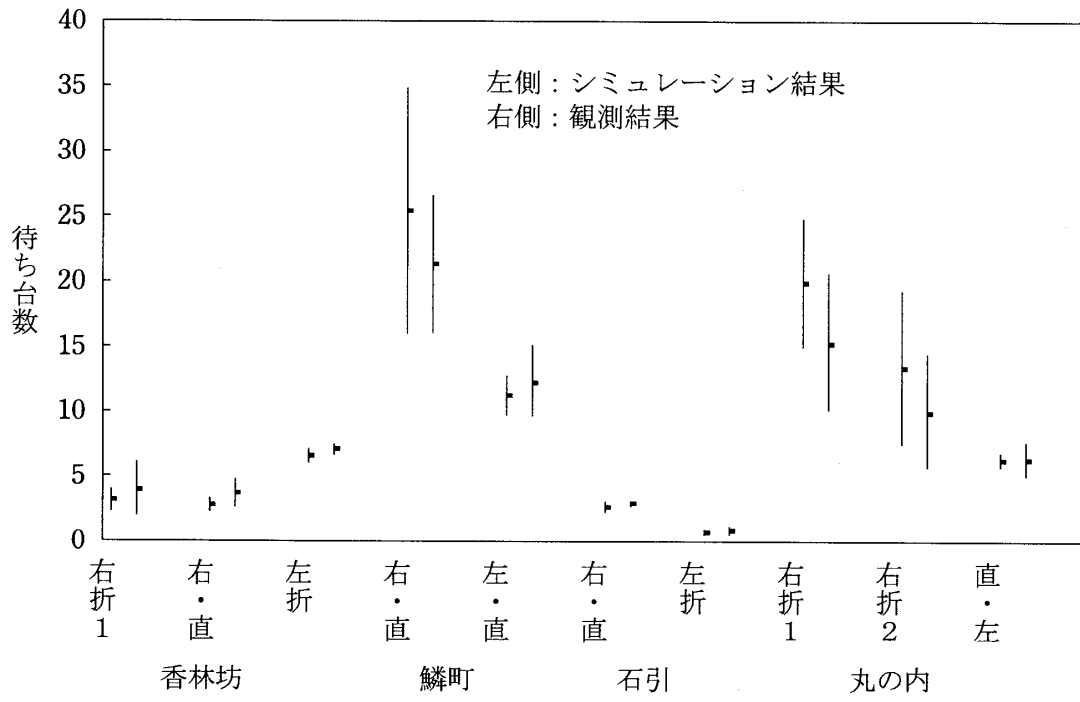


図12 広坂交差点

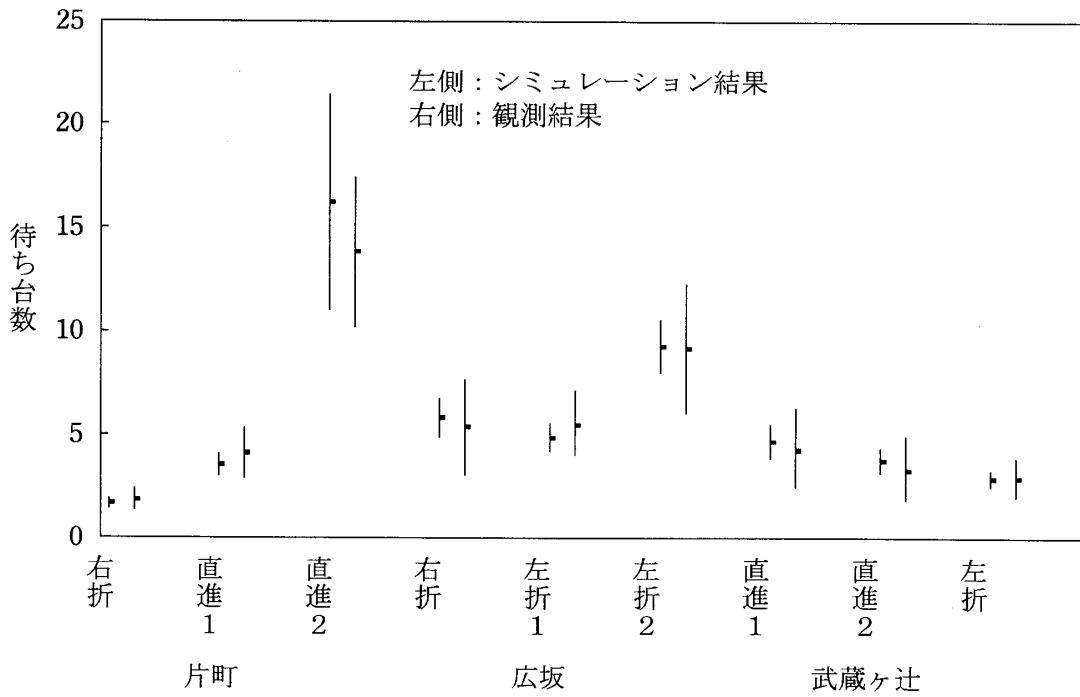


図13 香林坊交差点

表9 シミュレーション結果と観測結果の平均待ち台数の差と誤差率(台)

	片町交差点				鱗町交差点			
	大豆田	広小路	鱗町	香林坊	片町	寺町	笠舞	広坂
シミュレーション	29.69	29.08	32.16	40.36	28.52	2.48	13.70	19.19
観測値	26.42	27.47	31.81	37.53	26.44	2.74	15.65	18.52
差	3.27	1.61	0.35	2.83	2.08	-0.26	-1.95	0.67
誤差率(%)	11.01	5.54	1.09	7.01	7.29	-10.48	-14.23	3.49
	広坂交差点				香林坊交差点			
	香林坊	鱗町	石引	丸の内	片町	広坂	武蔵ヶ辻	
シミュレーション	-12.22	36.60	3.75	39.36	21.02	19.74	10.78	
観測値	14.52	34.48	4.18	31.68	19.48	19.49	10.70	
差	-2.30	2.12	-0.43	7.68	1.54	0.25	0.08	
誤差率(%)	-18.82	5.79	-11.47	19.51	7.33	1.27	0.74	

示す。さらに、各交差点別のシミュレーション結果と観測結果の平均待ち台数、その差と誤差率を表9に示す。

シミュレーション結果と観測結果の平均待ち台数とその標準偏差を用いて、危険率1%で、分散の検定と平均値の差の検定を行った。分散の検定では、すべての交差点・車線において、分散に差があるとはいえなかった。さらに、平均値の差の検定でも、すべての交差点・車線において、分散に差があるとはいえなかった。

図10から図13を検討すると、ほとんどすべての交差点・車線で、シミュレーション結果と観測結果は、ほぼ一致している。さらに、待ち台数の変化・ばらつきを表す標準偏差は、シミュレーション結果の方が全体的に少し小さくなる傾向がみられるが、ほとんどの個所でほぼ同じような値になっている。表9からも分かるように、最も大きな差異が見られたのは広坂交差点であり、最大20%の差がみられた。図12を見ると、特に、鱗町の右折・直進車線、丸の内の右折車線に差がみられるため、この区間を再検討する必要があると思われる。

検定の結果も考慮すれば、全体として、このシミュレーションモデルは現実の交通状況をほぼ再現でき、妥当なシミュレーションモデルであると考えられる。

シミュレーションモデルの妥当性を検討したので、交通量(平均到着率)が変化した場合のシミュレーションを実施した。非混雑時と混雑時の交通状況を再現するために、観測により測定した平均到着率を、ここでは一律に、±30%の範囲内で変化させた。現実には、平均到着率は一律に変化するわけではないので、厳密な分析を行いたい場合には、様々な状況における平均到着率を観測し、そのデータを利用すれば良い。

平均到着率を±30%の範囲内で変化させた場合の内部道路区間のシミュレーション結果を図14に示す。また、平均到着率の変化と内部道路区間の総待ち台数の関係を図15に示す。これらの結果から、特に平均到着率が30%増加した場合には、総待ち台数が急激に増加し、特に片町交差点を中心とする4方向の車線が共に急激に増加していることが

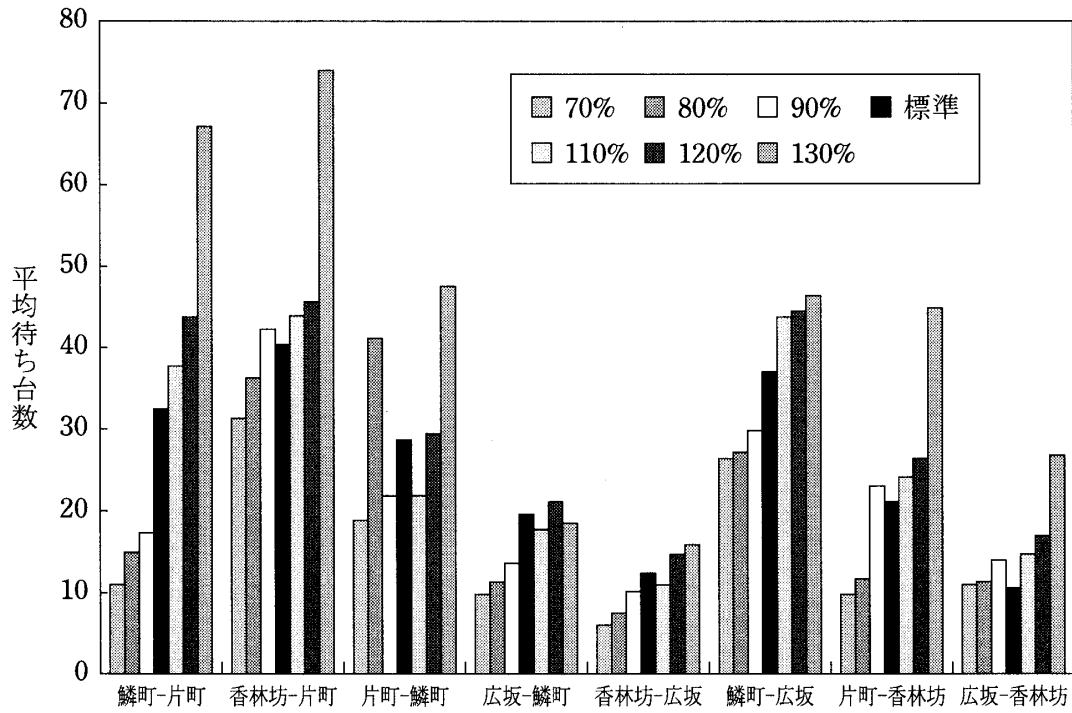


図14 平均到着率と平均待ち台数

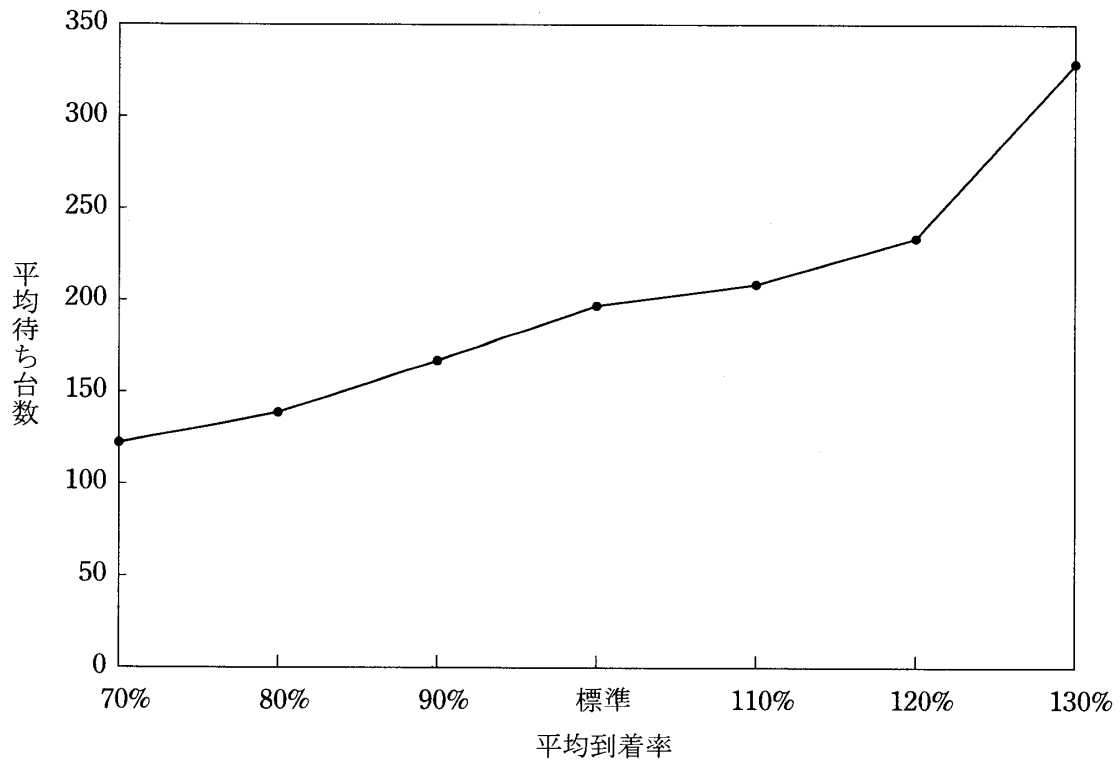


図15 平均到着率と平均待ち台数

分かる。このことは、30%程度増加した交通量がこの区域の飽和値に近づき、この飽和の原因となる区間は香林坊-片町-鱒町交差点間であると考えられる。

6 おわりに

本論文では、都市中心部を対象としたシミュレーションモデルの開発を行い、実際に観測したデータを用いて、シミュレーション解析を行った。さらに、観測によって得られた結果とシミュレーションによって得られた結果を比較検討することによって、シミュレーションモデルの妥当性を検証した。したがって、様々な状況を設定してシミュレーションを行えば、対象区域の様々な交通分析を行うことが可能になる。さらに、例えば、バス専用レーンやリバーシブルレーンなどの様々な渋滞対策の効果も、比較的容易に分析することができることになる。

本モデルではモデル化やプログラム化する際に多くの前提を置いているが、より実際的な前提をモデルに取り入れて、モデルを改善することが課題として残っている。これらの中には、例えば、車両の到着分布の一般化、2値の移動速度の連続化や、途中の信号機の考慮などのように、モデルに容易に取り入れることができるものも多い。一方、車線変更のように概念的にはモデル化できるが、実際のプログラム化が複雑になる割に改善による効果が比較的少ないと思われるものもある。さらに、区間の非メッシュ・連続化や各車両が経路を動的に選択するような、直接、モデルに取り入れることが比較的難しいと思われるものも存在する。

今回、事例の対象とした区域のシミュレーションプログラムは3000行を越えるものであった。もちろん、さらに大きな区域を対象としたり、新たな処理を加えることは物理的に可能である。しかし、この場合に最も問題となるのは、開発したプログラムではSLAM II 言語のラベル名、リソース名やゲート名を自動的に生成することができない点である。さらに大規模なモデルを分析するためには、これらラベル名などを自動的に生成したり、交通ネットワークを直接、SLAM II プログラムに自動変換するソフトウェアを開発する必要がある。

参考文献

- 1) LeBlanc, L. J., Morlok, K. M. and Pierskalla, W. P.: An Efficient Approach to Solving the Road Network Equilibrium Traffic Assignment Problem, Transportation Research, Vol.9, 309-318, 1975.
- 2) 卷上 安爾, 楠 喜税, 中島 益雄: 高速道路のトンネル内交通流シミュレーションに関する基礎的研究, 土木学会論文集, IV-10, No.401, 119-128, 1989.
- 3) 松本 健次郎 他: 織り込み区間長評価のための交通シミュレーションモデルの開発, IV-

- 16, No.440, 61-69, 1992.
- 4) 深田 清明, 川村 隆治, 吉田 禎雄: 交通流再現シミュレーションモデルの開発, 交通工学研究発表会論文集, No.11, 1-4, 1991.
 - 5) 丸山 勝: 交通流再現シミュレーションモデルによる渋滞に関する検討, 交通工学, Vol.27, No.1, 55-58, 1992.
 - 6) 飯田 恭敬, 藤井 聡, 内田 敬: 道路網における経路選択を考慮した動的交通流シミュレーション, IV-31, No.536, 37-47, 1996.
 - 7) 井上 博司: 連続流体モデルによる混雑したネットワーク交通流の動的シミュレーション手法, IV-36, No.569, 85-94, 1997.
 - 8) 浜島 鉦一郎: 交通流シミュレーションシステム, オペレーションズ・リサーチ, Vol.35, No.2, 102-106, 1990.
 - 9) 清水 貴弘: 金沢中心部の交通シミュレーションモデル, 金沢工業大学卒業論文, 1995.
 - 10) 赤羽 弘和 他: 交通シミュレーションモデルの実用化に向けての課題, 土木計画学研究・講演集, Vol.20, No.1, 521-528, 1997.
 - 11) 森戸 晋, 中野一夫, 相沢りえ子: SLAM II によるシステム・シミュレーション入門, 共立出版, 1993.