

交通運用策評価のための
街路網交通シミュレーションモデルの開発

**A Network Simulation Model for
Evaluation of Traffic Management**

東京大学学位論文

1996年9月

堀口良太

交通運用策評価のための街路網交通 シミュレーションモデルの開発

A Network Simulation Model for Evaluation of Traffic Management

< 目次 >

第 1 章	はじめに	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	静的なインパクト評価手法の問題	3
1.3	交通運用策評価用のシミュレーション	5
1.4	本研究の目的と方針	7
1.5	論文の構成	9
第 2 章	交通シミュレーションの動向	10
2.1	著名なシミュレーションモデル	10
2.1.1	CONTRAM	10
2.1.2	SATURN	12
2.1.3	TRAF-NETSIM	12
2.1.4	東大生研モデル (DESCモデル)・改良東大生研モデル	13
2.1.5	DYTAM-I	14
2.1.6	INTEGRATION	14
2.1.7	DYNASMART	15
2.1.8	FHWAのリアルタイムシミュレーションモデル	15

2.1.9	日産交通流シミュレータ	16
2.1.10	SOUND	16
2.1.11	SOUND一般街路版	17
2.1.12	AVENUE	17
2.2	交通流のモデリング	18
2.2.1	クラス1 (流体 - 密度管理なし)	18
2.2.2	クラス2 (流体 - 密度管理あり)	19
2.2.3	クラス3 (離散 - 密度管理なし)	20
2.2.4	クラス4 (離散 - 密度管理あり) : リストタイプ	20
2.2.5	クラス4 (離散 - 密度管理あり) : 追従タイプ	20
2.2.6	クラス4 (離散 - 密度管理あり) : ハイブリッドタイプ	21
2.2.7	各シミュレーションモデルでの交通現象の取り扱い	21
2.3	経路選択挙動のモデリング	25
2.3.1	経験利用者層のモデル化	25
2.3.2	情報利用者層のモデル化	26
第3章	街路網交通シミュレーション システム : AVENUE	27
3.1	シミュレーションモデルの概要	27
3.2	ハイブリッドブロック密度法	30
3.2.1	ブロック密度法	30
3.2.2	ハイブリッドブロック密度法	33
3.2.3	レーン選択・交通規制・信号交差点などのモデル化	34
3.2.4	マルチスキャンハイブリッドブロック密度法	38
3.3	経路選択モデル	41
3.3.1	交通の発生・集中	41
3.3.2	経路の列挙	41
3.3.3	経路の表現	42
3.3.4	経路の選択	43
3.3.5	経路コストの質が経路選択挙動に与える影響	44
3.4	オブジェクト指向による交通モデルの記述	50
3.4.1	ノード・リンク (Node, Link)	51
3.4.2	経路・ターン・ターン端点 (Path, Turn, Turn-End)	51
3.4.3	レーン (Lane)	52

3.4.4	ブロック・フロー・フロー整流器 (Block, Flow, Flow-Regulator)	52
3.4.5	車両・ドライバー (Vehicle, Driver)	52
3.4.6	信号制御機・信号灯器 (Signal-Controller, Signal-Light)	53
3.5	システムの概要	54
第4章	モデルの理論的検証	56
4.1	リンク下流端での飽和交通流率の検証	56
4.1.1	シミュレーションの設定 (検証1-1, 1-2)	56
4.1.2	シミュレーション結果 (検証1-1, 1-2)	57
4.2	リンク上の密度分布計算の検証	59
4.2.1	シミュレーションの設定 (検証2-1, 2-2)	59
4.2.2	シミュレーション結果 (検証2-1, 2-2)	60
4.3	渋滞の上流リンクへの延伸の検証	63
4.3.1	シミュレーションの設定 (検証3-1, 3-2, 3-3, 3-4)	63
4.3.2	シミュレーション結果 (検証3-1, 3-2, 3-3, 3-4)	64
4.4	非飽和信号交差点での平均遅れの検証	67
4.4.1	シミュレーションの設定 (検証4-1, 4-2)	67
4.4.2	シミュレーション結果 (検証4-1, 4-2)	67
4.5	対向直進交通による右折容量の逡減	70
4.5.1	シミュレーションの設定 (検証5-1, 5-2, 5-3, 5-4)	70
4.5.2	シミュレーション結果 (検証5-1, 5-2, 5-3, 5-4)	70
4.6	経路選択モデルの検証	74
4.6.1	シミュレーションの設定 (検証6-1, 6-2, 6-3, 6-4)	74
4.6.2	シミュレーション結果 (検証6-1, 6-2, 6-3, 6-4)	75
4.7	理論的検証のまとめ	81
第5章	モデルの実証的検証と適用例	82
5.1	錦糸町における実証的検証	82
5.1.1	交通概況と入力データ (錦糸町)	82
5.1.2	検証結果 (錦糸町)	84
5.2	金沢駅前地区における検証	89
5.2.1	現況の交通状況と入力データ (金沢駅前)	89

5.2.2	現況再現シミュレーションの結果（金沢駅前）	92
5.2.3	駅前広場改修案のインパクト評価への適用	96
5.2.4	金沢駅前のシミュレーションでの問題点	98
5.3	トヨタ自動車本社周辺地区における実証的検証	100
5.3.1	豊田市ネットワークでの交通概況	100
5.3.2	シミュレーションデータの作成	101
5.3.3	現況再現シミュレーションの結果（豊田市ネットワーク）	103
5.3.4	豊田市ネットワークの検証での問題	111
5.4	交通運用策評価への適用例	112
5.4.1	地下駐車場出入口の設置位置の検討	112
5.4.2	大規模集客施設への誘導案の検討	114
第6章	結論と今後の課題	117
6.1	結論	117
6.2	シミュレーションによる交通運用策の評価における諸問題	120
6.2.1	交差点の交通量調査	120
6.2.2	評価に用いられる指標の観測	120
6.2.3	ネットワーク・信号データの入手	121
6.2.4	OD交通量の推定	121
6.2.5	経路選択行動の分析・モデル化	122
6.2.6	シミュレーションパラメータの調整	122
6.3	交通シミュレーションの展望	123
参考文献		125

第1章 はじめに

1.1 研究の背景と目的

「交通工学は問題解決型の学問だ」といった研究者がいる。人間という、必ずしも決定論的ではない多数の因子が相互に影響しあう社会システムでは、その状態を事前に予測することは非常に困難である。交通工学もその例外ではなく、高速道路や街路での混雑が発生してから、そのメカニズムを探ることで学問として発展してきた。

しかし現実の社会において、その問題を解決しようとする大きな労力を必要とする。ある問題の原因が道路構造にあるとわかったとしても、それを改善するためには用地買収や都市計画決定の変更など、多くの費用と時間がかかる問題が付随する。できることならば計画段階から問題を予測・評価し、建設する前に対策を講じることが望ましい。

我が国においては高度成長期以降、激増した交通需要に対応するため道路施設の拡充がなされてきた。オイルショック以降の安定成長期になると資金面での制約や、環境保全、安全確保といった制約から、より効率的な移動を可能にするための交通施設を計画する、いわゆる交通計画についてしばしば言及されるようになった¹。

交通計画は国土全体や都市圏の交通網整備といった大きな視点から、トップダウン的に計画を詳細化していくものであるが、一応の水準で全国的に道路網が整備された近年では、再開発やニュータウン開発のような地区レベルの開発に伴う交通計画（関連交通計画²）の重要性が高まっている。このような大規模開発は、都市計画では考慮されていなかったところに新たな交通を発生させ、既存の交通施設にさらなる負担を強いることも多く、交通に与えるインパクトは大きい。より一層の交通の円滑化を目指すべく、関連交通計画では信号制御やレーン構成、各種の交通規制、駐車場出入口の配置といった、交通運用策までを包含して計画されなければならない。

本研究が主眼とするのも、この地区レベルの交通運用策のインパクト評価である。ここでは交通運用策を交通計画の下流工程として位置づけ、「**与えられた交通需要を円滑に移動させるための、交通施設の設置・改善に関する施策**」と考える。

交通運用策はボトルネック対策やピーク時の混雑緩和といった、空間的・時間的により詳細な問題に適用され、渋滞の延伸・解消や代替経路への交通の流出といった動的な現象を評価する必要がある。「大規模開発地区関連交通計画検討マニュアル³」に示されるような、交通量配分と交差点飽和度・リンク混雑度による評価を基本とした静的な手法をこのような交通運用策評価にまで適用するには、信頼度・感度の面からも後述するような限界がある。

一方では、近年の急激な交通需要の増加に伴い、交通渋滞は慢性化の様相を見せており、それによる経済的損失は東京都内だけでも年間8億円以上ともいわれている⁴。また生活環境や自然環境への市民の関心の高まり、インパクトフィーの徴収による整備資金運用の提唱⁵、大規模災害を想定した防災計画⁶、ITS*（高度情報交通システム）のような新しい技術の登場⁷といったさまざまな場面から、交通運用策評価手法に対する期待・要望が大きく膨らんでいる。

このような背景から、シミュレーションによるインパクト評価が注目を浴びている。交通工学におけるシミュレーションには、古くは1960年代よりモンテカルロ法による信号交差点や高速道路合流部の平均待ち時間を求めるようなもの⁸や圧縮性流体モデルを用いた高速道路の渋滞現象を再現するもの⁹などの研究がなされてきた。道路ネットワークを対象とした交通シミュレーションモデルの研究は1970年代の終わり頃より始められ、今日では交通流や経路選択行動などのさまざまな交通現象に対する分析・研究が蓄積されたことで、また計算機技術の発達も手伝い、道路ネットワークを対象としたより複雑・大規模なシミュレーションモデルを構築することが可能となっている。

以上の認識に基づき、本研究では地区交通計画や交通運用策のインパクト評価を支援するシミュレーションシステムを構築し、実用化することを目的とする。次節以降では、インパクト評価に際しての従来の静的な手法の限界と、交通シミュレーションによるアプローチの利点、およびそれに求められる機能について述べる。

*) ITS : Intelligent Transport Systems

1.2 静的なインパクト評価手法の問題

静的インパクト評価手法を地区レベルでの交通運用策の評価にまで適用した場合の問題点について考える．一般的な作業のフローは

- 1) 現在の交通状況を調査分析する，
- 2) 将来の交通需要を推定する，
- 3) 対象ネットワークに交通量を配分する，
- 4) 将来の交通状況を分析し，現況と比較する，
- 5) 問題がある場合は適切な交通運用策を適用し，同様の作業を繰り返す，

といったものである．図1-1は「大規模開発...」での作業フローの一部を示しており，実業務における評価作業もおおよそ同様のプロセスからなることがわかる．このうち2)での将来需要の推定は，原単位法など幾つかの手法が用いられるが，これを正確に予測することは一つの研究分野をなしており，また本研究のスコープからはずれるので，ここではその問題点を議論しない．

通常1)と4)の段階では，交通状況は断面交通量調査や交差点方面別通過交通量調査をもとにした，リンク混雑度や交差点飽和度を指標として分析される．しかしながら，両者とも供給側の上限として与えられるリンク容量や交差点容量に対する交通需要の割合を意味するものであり*，どちらも定義より1.0以上の値を取りうる

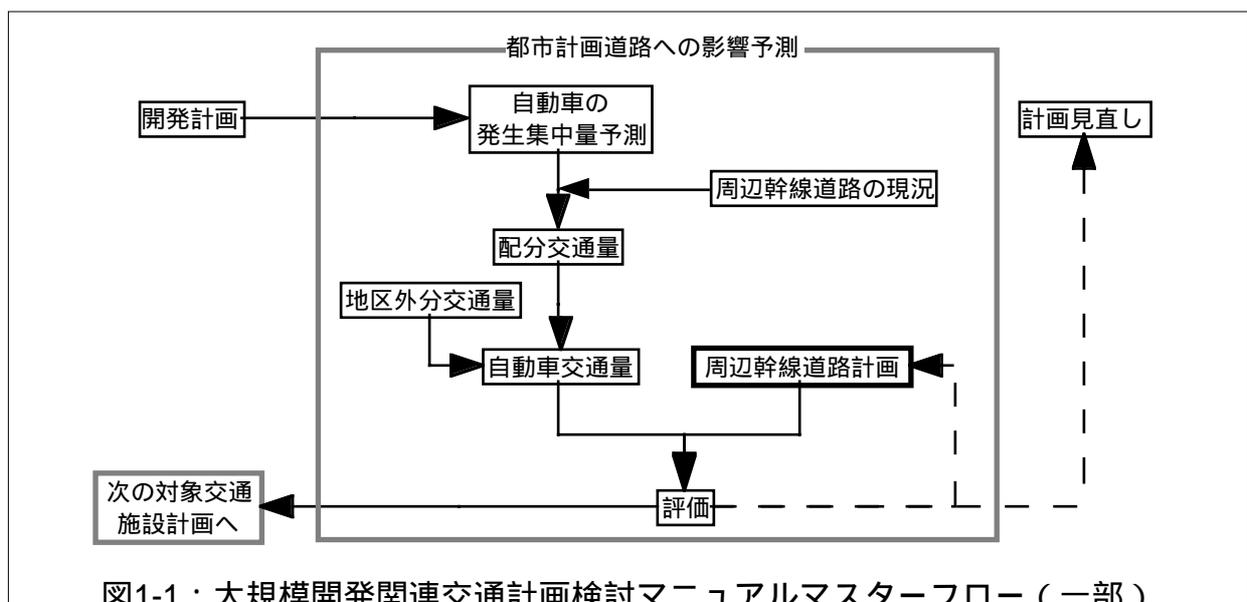


図1-1：大規模開発関連交通計画検討マニュアルマスターフロー（一部）

*) そもそもリンク混雑度は12時間交通量で評価され，そのリンクのサービス水準を表す指標であり，交差点飽和度は信号スプリットの設計に用いられる指標である．

が、過飽和の交通状況の分析に用いることには無理がある。つまり、容量以上の交通量が通過することは実際にはできないため、1.0以上の値を観測することはあり得ないので、**何らかの運用策を適用しても指標には反映されず、正しい評価ができないことも考えられるからである。**

さらに問題とされるのは、**両者とも静的な指標であるため、渋滞の成長や解消のような交通状況の動的な変化を読みとることができないことである。**とくに交差点が近接する都市部では、一つの交差点の渋滞が容易に他の交差点の交通状況に影響を与えるので、飽和度からはボトルネック交差点の特定が困難である。また信号の系統制御やエリア制御のような運用策の影響を反映することもできない。

また3)の道路ネットワークへの交通量配分についても静的な配分手法が用いられていることが問題点としてあげられる。静的な配分では各経路に対し、利用者均衡概念に基づく選択確率や、分析から得られた分担率などにしたがって、機械的に交通需要を割り付けるため、渋滞の成長や解消のような交通状況の動的な変化を再現することはできない*。またそれらの変化に伴うドライバーの意志決定の変更などは考慮されないため、**交通状況の改善を目指した情報提供や案内誘導といった、近年注目を集めているトピックに対しては適用できない。**

以上のような理由から、静的な評価手法にかわって運用策を評価・検討することができる交通シミュレーションが強く求められるようになった。交通シミュレーションにも、単独交差点や駐車場内部のシミュレーションといった対象を限定したものや、単なる配分計算をおこなうようなものまで、数多くの研究開発がなされてきたが、なかでも道路ネットワーク上の交通に汎用的に適用できる動的なモデルに対する期待が大きい。この汎用的な交通シミュレーションモデルに求められている機能を次節において考察する。

*) 渋滞の延伸を考慮した静的配分手法の研究もあるが、実務においては一般的ではない。配分手法については第2章で改めて考察する。

1.3 交通運用策評価用のシミュレーション

動的なシミュレーションによる評価にはさまざまな利点がある。一つは交通状況をより直接的に表す指標を求めることができることである。混雑度や飽和度のような数値を示されるよりも、シミュレーションから得られる渋滞長や旅行時間、信号による停止回数などの指標で示された方が、計画者にとっても、また周辺住民のような専門家以外の人々にとっても、混雑の程度を理解することが容易である。さらに適当な交通モデルを仮定することで、渋滞の延伸やドライバーの経路選択、信号制御、交通規制、右折車両や路上駐車の影響といったさまざまな事象を取り込むことができることも利点の一つである。

それでは交通運用策評価のためのシミュレーションにはどのような機能が必要とされるであろうか。

まず第一に「**適切な密度管理をおこない、過飽和流を再現することができる交通流モデルをもつ**」ことである。都市部の交通は一般に過飽和状態であり、交差点間の距離も短いため、互いの交通状況は密接に影響しあっている。したがって密度管理が正しくおこなわれていないと、渋滞の延伸・解消が正しく再現されず、結果として全体の交通状況の再現性も低下する。

第二に「**ドライバーの経路選択行動を考慮している**」ことがあげられる。ネットワークでは通常1つのODペア*に対して複数の経路が存在し、ドライバーは交通状況に応じてそのうちの1つを選択する。シミュレーションにおいても、交通運用策の事前事後では選択する経路が異なると考えられるため、この経路選択行動を内生化することが求められる。とくに情報提供の影響評価を想定する場合、このことは不可欠である。

第三は「**道路ネットワークを詳細にモデル化している**」ことである。各種の交通運用策の評価に汎用的に適用できるためには、ネットワークを構成するリンクやノードだけでなく、レーンや信号、バス停や横断歩道といった詳細な交通施設まで表現する必要がある。

第四は「**個々の車両挙動の影響を再現できる**」ことである。都市部では、一台の車両の交差点での右折待ちやレーン変更、あるいは路上駐車といった些細な挙動が、全体の交通状況に大きく影響することもありうる。また実際の交通運用策では、このような些細な挙動の原因となるものを改良するというケースも多い。シミュレー

*) Origin-Destinationの略。起終点ペア。

シヨンで事前事後の影響を評価するには、このような個々の車両の影響も考慮しなくてはならない。

第五は「**各種の交通規制を表現することができる**」ということである。交通運用策には右折禁止、バス専用レーンなど、さまざまな交通規制を組み合わせる適用することが多い。詳細な交通施設を表現するだけでなく、このような規制を組み込むことも必要とされる。

また実用化を考えた場合「**システムとして洗練された環境を提供する**」ことが求められる。とくに研究ベースで開発されたシミュレーションシステムでは、プログラムが統合されていなかったり、データの入出力作業が煩雑だったりすることが多い。実務での利用者は必ずしもコンピュータの専門家であるわけではないので、操作性のよいシステムを構築することが必要である。

さらに実用に際しては、システム化の段階で想定していなかったような要望が頻繁に発生する。これらの要望に容易に対処できるように、交通をモデル化する時点で「**拡張性・柔軟性を意識している**」ことも重要な点である。

近年、交通運用策のインパクト評価を目的としたシミュレーションシステムの開発が盛んであるが、これらのすべての要求を満たすものは少ない。このことが筆者らに新たなシミュレーションシステムを開発させるに至った直接の動機である。

1.4 本研究の目的と方針

これまでも道路ネットワークを対象とした汎用的なシミュレーションモデルが数多く開発されている。しかし交通運用策評価への適用を考えた場合、それらのうちのほとんどに、過飽和流の再現が正しくない、経路選択を考慮していない、道路ネットワークの表現が十分でないなど、何らかの問題が指摘される。また実用システムとして考えた場合、プログラムが統合された環境になっていない、データ入力に大きな労力を要する、などシステムとして未熟なものがほとんどである。

そのため本研究では、前節でのシミュレーションへの要求を満たすような**街路網の交通シミュレーションシステム AVENUE** (an Advanced & Visual Evaluator for road Networks in Urban arEas) を**新たに開発し、実用化を目指す**ことを目的とする。AVENUEの開発は以下に示される方針に従って行われた。

- 1) **時間変動するOD交通量***を入力とし、動的に変化する都市部の交通状況を再現する。OD交通量を直接観測することは一般には大きな労力を必要とするため、何らかの手法で推定することが求められるが、このことについては本研究では扱わず、OD交通量は外生的に与えられるものとしている。
- 2) ネットワーク規模は最大で100個程度の交差点からなる数キロ四方の範囲を想定しており**、**この範囲を詳細にモデル化できるものとする**。すなわち信号交差点やレーンなど、道路交通を構成する要素をできる限り直接的に表現するように努めるものである。
- 3) 交通流モデルとして**ハイブリッドブロック密度法**を提唱し、過飽和流の再現に対応する。この手法は連続流体表現による密度管理をおこなうと同時に、離散個別車両の移動もおこなうものであり、両者の長所を併せ持つものである。
- 4) 交通状況に応じた**ドライバーの経路選択行動を組み込む**。また複数の利用者層別に経路選択挙動を設定することも考慮する。これにより、例えば情報端末を搭載する車両とそうでない車両、施設来場車両と一般の通過車両といったような、さまざまな状況に応じたシミュレーションが可能である。
- 5) **オブジェクト指向プログラミング環境でシステム開発をおこなう**。実用段階では、その業務に特有の規制や機能を組み込むことが要求されることが多い。

*) この場合は四段階推定法でのようなゾーン間のOD交通量ではなく、ネットワークの端点間のOD交通量を意味する。

***) この上限はモデルやアルゴリズムの能力から来るものではなく、交通運用策が適用される開発地区や街区は、せいぜいこの程度の規模であることが多いという経験的な理由と、シミュレーションに必要なデータを得ることができる規模の、現状での上限であるという認識によるものである。

はじめからこのような特殊な要望を全て考慮して、シミュレーションを開発するのは困難であるため、柔軟性・拡張性に富むシステムを構築できるオブジェクト指向プログラミング環境を採用し、各種の要望を取り込むことを容易にする。

- 6) GUI*で操作性を向上させる。これはプログラム開発者以外の人々が操作することを容易にすると同時に、最近のアプリケーションプログラムの常識でもあり、とくにデータ入力段階での省力化には欠かせない。また周辺住民への対策効果の説明といった、専門家以外の人へのプレゼンテーションを想定し、**アニメーション機能**を持たせる。図1-2にAVENUEの画面イメージを示す。

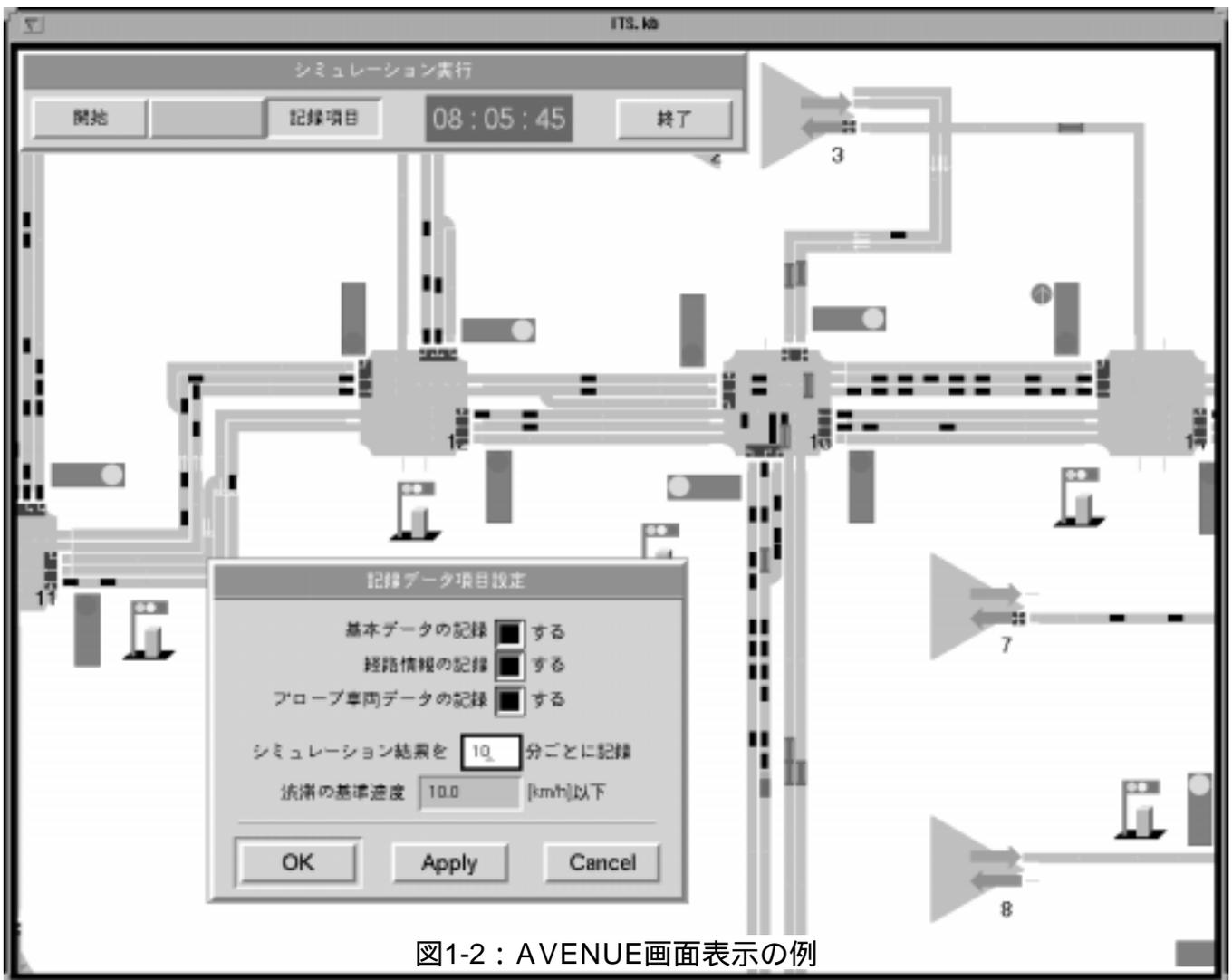


図1-2：AVENUE画面表示の例

*) GUI：グラフィックユーザインターフェース

1.5 論文の構成

本論文の構成を以下に述べる．

ここまでの第1章では，本研究の背景と目的について示した．

第2章では，これまでに開発されたネットワークを対象とした国内外のシミュレーションモデルを紹介し，交通流のモデル化，経路選択行動のモデル化，などの観点から，それらを分類・分析した上で，交通のモデリングの動向について論ずる．

第3章では，本研究で開発したAVENUEの交通モデルの概念とロジックを紹介する．とくに交通流モデルであるハイブリッドブロック密度法と，経路選択モデルについて，詳しく述べる．

第4章では，AVENUEの理論的検証を簡単なネットワークを使っておこなった結果を報告する．理論的検証は，リンク下流端の飽和交通流率，リンク上の密度分布計算，渋滞の上流リンクへの延伸，非飽和信号交差点での平均遅れ，対向直進交通による右折容量の逓減，および2経路における経路選択挙動，の6項目について行った．

第5章では，実用化を想定し，実際のネットワークのデータを用いた実証的な検証例を紹介する．実証的検証は，まず経路選択の余地のない錦糸町と金沢駅前におけるネットワークを用いて行われ，その後経路選択の余地のある豊田市ネットワークにおいて行われた．またインパクト評価の応用例として，地下駐車場の出入口設置位置の検討と大規模集客施設への誘導案の検討について述べる．

第6章はまとめとして，この研究を通して得られた成果と，新たに明らかにされた問題について議論する．

第2章 交通シミュレーションの動向

交通流理論・交通配分理論の確立と、計算機処理能力の向上に伴い、交通インパクト評価を目的としたさまざまなシミュレーションモデルが開発されるようになった。本章では国内外の著名なシミュレーションモデルを紹介するとともに、ネットワーク上の交通状況を再現する際に重要となる交通流と経路選択挙動のモデリング手法について、それらのモデルの考察をおこない、本研究が目的とする汎用的なインパクト評価に適したモデリング手法について議論する。

2.1 著名なシミュレーションモデル

交通流理論および交通配分理論が確立されたのを受け、1970年代より交通シミュレーションの研究が盛んに行われるようになった。当初は単一交差点を対象としたものや、静的配分手法を拡張したような単純なモデルが開発されるが、1970年代後半にネットワーク上の混雑時の交通状況を扱うCONTRAM、SATURNが開発されるに至り、統合的な交通運用策の評価が可能となった¹⁰。

本節では交通運用策評価を目的とした国内外のシミュレーションモデルについて、多くの実績があるもの、および最近活発に研究開発が行われているものを簡単に紹介する。紹介に当たっては、まず1970年代末に開発された、CONTRAM、SATURN、NETSIMといった、第1世代とでもいふべきネットワークシミュレーションモデルを取り上げ、つぎにATMS*やADIS**、DRGS***などの評価を意識した、1980年代後半～1990年代の新たなモデルを取り上げる。

2.1.1 CONTRAM

CONTRAM (CONTinuous TRaffic Assignment Model) は1978年に英国TRRL (現

*) Advanced Traffic Management Systems : 高度交通管理システム

***) Advanced Driver Information Systems : 高度交通情報提供システム

****) Dynamic Route Guidance System : 動的経路誘導システム

TRL : Transport Research Laboratory) において、交通運用策の中長期的な効果の評価を目的として開発されたモデルである¹¹。

ネットワークはリンクとノードで表現され、レーンの概念はない。信号はサイクル、スプリット、オフセットの基本的なパラメータで与えられ、各リンク下流端での青時間のスケジュールが求められる。ネットワークへの交通需要は5～30分の時間間隔ごとに与えられる。各時間間隔では、パケットと呼ぶODペアごとに10台程度の車両をまとめたものを単位として、等間隔で出発させる。各パケットは最短時間経路に配分され、通過したリンクと時刻が記録される。パケットが通過する度にリンクでの遅れ時間が改訂される。次のパケットは改訂されたリンクの遅れ時間をもとに、同様に最短経路に配分される。

CONTRAMは動的な利用者均衡状態の再現を目的としており、各パケットがネットワークに流入する際に、その時点での最短経路を選択し、その経路上のリンクコストを改訂していく。次のパケットは新たに改訂されたリンクコストをもとに経路選択を行うわけだが、この計算をシミュレーションの対象時間帯において1回行っただけでは、当然均衡状態となっていないため、数回繰り返して行うことで、収束状態を求めるものである。2回目以降の繰り返しの際は、前回の計算が終了した状態を初期値とし、各パケットが流入する際には前回に通った経路からそのパケットの分の交通量を差し引いて、リンクコストを改定した後、改めて最短経路を選択するという手順が追加される。このような手続きで交通状態が収束するという理論的保証はないものの、経験的には数回～10回程度の繰り返しで収束するといわれている。

CONTRAMは次のSATURNとともに、交通シミュレーションの先駆的なモデルとして広く応用されており、実際の運用策評価への適用例も報告されている¹²。また、突発事象発生時の交通状況予測 (CONTRAM-I) や動的経路誘導の効果予測 (RGCONTRAM) など目的に応じて改良されたモデルも利用されている¹³。最新バージョンであるCONTRAM 5¹⁴では信号パラメータの最適化機能を持つTRANSYT¹⁵とリンクする機能が付加されている¹⁶。

しかしながら、リンク交通量や遅れの評価を時間間隔ごとに平滑化しておこなうため、パケット単位で見ると遅れ時間が正しく計算されなかったり、渋滞時の密度管理が十分に行われていないため、渋滞の延伸が正確に再現されないなど¹⁷、過飽和交通流の再現性に問題が残されている。また、信号のない合流部において幾何構造から決定される合流比を自由に設定できないという問題も指摘されている。

2.1.2 SATURN

SATURN (Simulation and Assignment of Traffic in Urban Road Networks) は平面交差点における信号制御，右左折禁止などの交通規制の影響評価などを目的として，1979年に英国Leeds大学で発表されたモデルである¹⁸¹⁹。

ネットワークはリンクとノードで構成され，交差点近傍はレーンのイメージを持つ。シミュレーション対象時間は15～30分程度の間隔に分割され，各時間帯ごとにOD交通量を与える。SATURNではすべての信号交差点のサイクル長を共通としており，SATSIMと呼ぶモジュールで時間間隔ごとに1サイクル分だけの定常状態をシミュレーションし，時間間隔全体の交通状態を推定する。すなわち，交通量は流体近似され，各リンクへの到着が1信号サイクルの間のINパターンとして入力される。リンク下流端ではINパターンに応じて車群の拡散を考慮したARRIVEパターンが生成され，交通容量から求められるACCEPTパターンにマスキングされて，リンク流出交通量のOUTパターンが計算される。捌け残った交通量は停止線部に待ち行列を形成する。このOUTパターンや待ち行列は次の単位時間でのフローの状態に影響するので，このような手続きを繰り返し，OUTパターンが収束した時点で，1サイクルでの定常的なフローパターンを得るものである。

SATURNもCONTRAM同様，動的な利用者均衡状態を再現することを目指している。SATASSと呼ぶ経路選択モデルはSATSIMで得られた交通量 - 遅れの関係を利用し，利用者均衡配分を行う*。配分結果から得られる経路選択情報はSATSIMにフィードバックされ，均衡状態に収束するまでシミュレーションを繰り返す。各時間間隔ごとの計算は独立に行われ，捌け残った交通量は次の時間間隔に追加の交通需要として受け渡される。SATURNの場合もCONTRAM同様，収束する理論的保証はないものの，経験的には数回～10回程度の繰り返しでよいとされている。

ただし以前の時間間隔において捌け残った交通量がすでに決定された経路に固定されてしまうこと²⁰や，過飽和時の密度管理が十分でないため，渋滞の延伸・解消が正しく再現されないという問題などがしばしば指摘される²¹。

2.1.3 TRAF-NETSIM

NETSIM (Network Simulation Model) は1970年代初頭に米国FHWA (Federal Highway Administration) によって開発されたモデルである。現在は交通シミュレー

*) SATURNでは確率的均衡配分も実現している。

シミュレーションの統合システムであるTRAF²²の一部を構成し、TRAF-NETSIMと呼ばれている²³。

ネットワークはノードとリンクで構成され、リンクはレーンのイメージを持つ。交通流の表現は車両1台ごとの挙動を微視的・確率的に再現するもので、各車両には車種のカテゴリ、加速度などの車両性能、ドライバーの行動類型（受動的、ノーマル、能動的）、希望速度などの多数のパラメータが設定され、リンク上を追従走行する。そのほかにも交差点でのギャップ待ちやレーン変更の判断などの挙動についても多くのパラメータが用意されており、車両挙動の柔軟なモデル化が可能である。

しかしながら、NETSIMでは各車両は目的地の情報を持っておらず、リンクごとに設定された右左折分流率に従って、次に流入するリンクを決定している。したがって、交通状況に応じた経路選択を自身で行うことはできないため、面的な交通運用策を評価することは困難である。

2.1.4 東大生研モデル（DESCモデル）・改良東大生研モデル

我が国においても、東大生研において信号制御の評価を目的としたネットワークシミュレーションモデル、DESCモデルが1984年に発表されている^{24,25}。DESCモデルでは、交通は流体近似され、リンクに設定された交通量 - 密度関数と交通量保存則をもとに、ブロック密度法と呼ぶ手法で密度管理を行っている*。

しかしながらDESCもNETSIM同様、交差点での右左折分流率で交通状態をコントロールする、経路選択機能を持たないモデルであったため、その後桑原らによって経路選択機能を内包した改良東大生研モデルが開発され²⁶、首都高速道路のシミュレーションに適用された。これは流体近似された交通量の目的地別の構成比を保存しながら、ブロック密度法の計算を行うもので、分岐点において一定時間ごとに改訂される最短経路情報に従って経路選択を行わせるものである。

改良東大生研モデルは経路選択モデルと交通流再現モデルを交互に繰り返し実行させ、動的な均衡状態を再現することを目的としている点では、近年のシミュレーションモデルと共通しているが、交通の流体近似を基本としているため、経路選択行動の結果を保持するために多大なメモリと計算時間を必要とすることが実用上の問題として挙げられている²⁷。

*）DESCモデルでは交通量 - 密度曲線を二等辺三角形で簡略化表現しているため、厳密には理論どおりに渋滞状況を再現できない。

2.1.5 DYTAM-I

DYTAM-I (DYnamic Traffic Assignment Model - I) は我が国の科学警察研究所によって1976年に開発された、比較的広範囲の道路網での交通運用策評価のためのシミュレーションモデルである^{28,29}。交通は流体近似され、30分程度に設定された時間間隔ごとにDialのアルゴリズムに従って確率均衡配分されるものである。すなわち交通量は一旦ネットワークに仮配分され、その際にリンク容量を超えて配分された交通量については、それをOD交通量ごとに上流リンクに差し戻すことによって過飽和状態を再現している。

DYTAM-Iの場合、SATURNに見られたような、以前の時間間隔において捌け残った交通量がすでに決定された経路に固定されてしまう問題は解決されている。しかしながら、交通流の計算を時間間隔内でまとめて行うように簡略化しているため、信号制御のような比較的短い時間間隔でのモデル化を必要とするようなものについてはその影響を表現することができない。また、過飽和交通の差し戻しの計算の際のOD交通量の評価に順番が存在するため、流れにくいODペアと流れやすいODペアが生じてしまうことも問題とされる。

2.1.6 INTEGRATION

INTEGRATIONはカナダQueen's大学のVan AerdeとWaterloo大学のYagarらによって1988年に開発された、高速道路と一般街路を統合してシミュレーションを行うモデルである³⁰。一般街路の信号制御と高速道路のランプ流入制限などの運用策を同時に一つのモデルで評価できるだけでなく、情報端末搭載車への情報提供なども評価することができる。

道路ネットワークはノードとリンクから構成され、レーンのイメージはない。交通流のモデリングは車両を一台ずつ表現するミクロモデルであるが、追従ではなく待ち行列によって交通状況を再現するものである。各車両には目的地が設定されており、決められた出発時刻にネットワークに流入する。リンクは流入率、流出率、および車両密度の属性を持ち、リンク上の車両のスタック (Link Data Stack)、流出可能な車両のスタック (Departure Stack) を扱う。リンクに流入した車両はLink Data Stackにいれられ、現在のリンクの車両密度から求められる旅行時間を用いて、次のリンクに流出することができる時刻 (Next Scheduled Departure Time : NSDT) が設定される。シミュレーション時刻が車両のNSDTをこえると、その車両はDe-

parture Stackに移され，リンク容量，信号現示，下流側の待ち行列，などの状態をもとに流出できるかどうかの判断がなされる．リンク容量は交通が渋滞しているかどうかによって変化する．このような計算手法で，CONTRAMやSATURNで指摘されるような渋滞時の密度管理の問題は解消される．

INTEGRATIONでは，現在のリンク旅行時間情報をもとに一定時間ごとに最短時間経路が更新され，各車両は常に目的地への最短経路を選択することで，動的な均衡状態を再現する．最新のバージョンでは，交通状況にかかわらず決まった経路を選択するもの，日常の交通状況より予測される旅行時間（Time of Day）に従って経路選択するもの，システム最適の規範に従って経路選択するものなど，複数の道路利用者層を扱うことができるようになっている³¹．

2.1.7 DYNASMART

DYNASMART（DYnamic Network Assignment Simulation Model for Advanced Road Telematics）は1992年に米国Texas大学のMahmassaniらによって，交通情報提供の効果を評価するために開発されたモデルである³²．

DYNASMARTでは車両は1台ごとに扱われ，各車両はリンク上を設定された速度-密度曲線に従って走行する．ただしリンクからの流出は容量の制約を受ける．また動的に最短経路を選択するものや，中央による制御を受けてシステム最適となるように経路を選択するものなど，幾つかの異なる経路選択挙動を示す利用者層を扱うことができる³³．

2.1.8 FHWAのリアルタイムシミュレーションモデル（FHWAモデル）

米国FHWAでは1993年にリアルタイム性を重視したシミュレーションモデルを開発した³⁴．このモデルは予測される交通需要と適用される交通運用策をもちいて，将来の交通状況を瞬時に予測しようとするもので，計算アルゴリズムの並列計算機への適用性なども議論されている³⁵．

FHWAモデルは高速道路と一般道の複合ネットワークを対象としており，必要に応じてマクロモデル（Macroparticle Simulation Model：MPSM），拡張マクロモデル（Modified MPSM：M-MPSM）およびマイクロモデル（MICRO）の3種類の交通流モデルを組み合わせることができる．MPSMは高速道路のモデリングに適用され，複数の車両をまとめたmacroparticleを移動させるものである．Macroparticleの時間

ごとの位置は、そのmacroparticleが存在する区間に設定された速度 - 密度曲線をもとに計算される。次のM-MPSMは、もう少し詳細なモデル化が必要となる、ある程度混雑した高速道路や郊外道路などに適用される。このモデルではmacroparticleによる移動はそのままであるが、レーンごとに平均速度が計算され、必要に応じたレーン変更がモデル化されている。3つ目のMICROはより混雑の激しい市街路に適用されるモデルで、車両追従式と、車線変更のためのロジックからなる。

シミュレーション結果の即時性を求めるモデルであるため、経路選択モデルについてはあまり込み入ったモデル化を行っていないが、交通情報を利用して最短経路を常に選択する車両と、あらかじめ決められた経路を走行する車両のそれぞれを設定することができる。

2.1.9 日産交通流シミュレータ

日産自動車ではNETSIMをベースに交通流予測シミュレーションシステムを開発し³⁶、実ネットワークでの交通運用策の評価を行っている³⁷。NETSIMに対する主な拡張部分は、日本の交通事情を考慮して、路上駐車の影響を評価できるようにしたことなどである。また非常に面倒なNETSIMのデータ入力作業にGUIを提供するなど、使い勝手の点でも改良を施している³⁸。

2.1.10 SOUND

SOUNDは東大生研において開発された、過飽和状態の都市内高速道路を対象としたモデルである³⁹。車両は一台ずつ表現され、設定された車頭間隔 - 速度曲線によって、各時刻でのリンク上の位置が計算される。この手法により、ボトルネック容量の違いによる渋滞状況の違いなども正確に再現することができる。

またSOUNDは現在の旅行時間情報に従って、各車両が分岐点において確率的経路選択を行う、動的均衡配分を実現しており、首都高速道路の交通状況の分析に適用されている。最近の研究では、旅行時間を予測するモデルを組み込み、予測時間情報の提供効果の評価を行った報告⁴⁰がある。

ただしSOUNDは高速道路を対象としているため、詳細な車両の挙動は考慮されず、レーン変更や信号交差点などのモデル化は省略されている。

2.1.11 SOUND一般街路版

上述のSOUNDモデルを広域の一般街路まで含めた統合ネットワークに適用するために、拡張を施したモデルである。大規模なネットワークを扱うことを想定しており、車両移動のロジックを待ち行列によって表現し、計算コストを軽減している⁴¹。さらに街路上の交通状況を再現するために、右折専用車線の効果や、車線の閉塞による後続車両のブロッキングなどの現象を考慮している。

しかしながら、詳細なレーン構成のモデル化はなされていない、信号パラメータは陽に表現されずリンクの方向別の容量として与えるなど、計算コストを軽減するためにネットワークの表現は簡略化されているため、本研究が目的とするきめ細かい交通運用策の評価には不向きである。

2.1.12 AVENUE

AVENUE (an Advanced & Visual Evaluator for road Networks in Urban arEas) は本研究において開発された、都市街路の交通運用策の評価を目的としたモデルである⁴²。モデルの詳細については第3章で述べるが、過飽和状態を考慮したハイブリッドブロック密度法という手法で交通流を再現し、交通状況に応じた経路選択挙動のモデルを内包している。また、レーン、信号、バス停など、市街路の交通状況に影響する施設を明示的にモデル化すると同時に、各種交通規制、バス専用レーン、リバーシブルレーンなど詳細な交通運用策を設定することが可能である。

2.2 交通流のモデリング

それではまず、交通流モデリングの観点からシミュレーションモデルを考察する。交通流モデルは大別して、車両をまとめて移動させる流体モデルと、1～数台の車両を個別に移動させる離散モデルがある。一般に、流体モデルには計算コストの面で、離散モデルには交通現象のモデリング能力の面で、それぞれ利点がある。ここでは表2-1に示すように、まずシミュレーションモデルを流体モデルと離散モデルに区別し、さらにそれぞれについてリンク上の密度管理を行っているものといないもののクラス1～4に分類する。

第1章で述べたように、交通運用策評価に汎用的に適用できるためには、渋滞時の密度管理が正しく行われており、かつ各種の交通制御・交通規制の影響をモデル化することが可能でなければならない。その点からいって、離散モデルで密度管理を行っているクラス4のみが、その能力を持つものであり、事実、近年開発された交通運用策評価用のモデルはすべてこのクラスに属している。ここではさらに、クラス4に属するモデルを、リンク上の待ち行列をリストとして扱うもの（リストタイプ）、車両移動のロジックが追従によるもの（追従タイプ）、交通量 - 密度曲線のようなマクロな指標を利用しているもの（ハイブリッドタイプ）の3つに分類する。

以下において、それぞれのクラスおよびタイプの特徴を密度管理、計算コスト、モデリング能力の高さといった観点から議論する。

表2-1：交通流表現手法の分類

		リンク上の密度管理	
		なし	あり
交通流表現	流体モデル	クラス1	クラス2
	離散モデル	クラス3	クラス4 <div style="border: 1px dashed black; padding: 2px;"> リストタイプ 追従タイプ ハイブリッドタイプ </div>

2.2.1 クラス1（流体 - 密度管理なし）

このクラスには、リンクの流入、流出に対して容量の制約を設け、捌け残り交通量を渋滞として扱うタイプが多い。リンク上の捌け残り交通量には上限値が与えら

れており、これにより渋滞の延伸を、限られた精度ながら、再現することができる。前出のモデルではSATURNが、他にもTRANSYTなどがこのクラスに属する。

このクラスの特徴は、リンク上の車両移動を考えず、交通量の移動計算を非常に簡略化しているため、計算コストが節約され、より大規模なネットワークに適用できる利点を持つことである。

しかしながら、単に捌け残り交通量の上限値を与えているだけで、渋滞時の密度管理をモデルに明示的に記述していないため、「のろのろ動く」渋滞の再現性が十分ではない。これは信号待ちなどで交通が完全に停止するような滞留の再現性ではそれほど問題とならないが、高速道路での容量ボトルネックを先頭とする渋滞の再現性には、致命的な問題となる。一般街路においても駐車車両や工事などで車線が閉塞される場合、同様の「のろのろ動く」渋滞が発生するため、詳細な交通運用策評価をこのようなモデルで行うことは困難である。

また、車両一台一台を判別できないため、経路選択挙動をモデル化したり、交通規制を表現することなどが困難となることである。とくに経路選択モデルを組み込むためには、リンク上の交通のODごとの成分比率を保存するなどの工夫が必要であり、多大なメモリと計算量を必要とするなど、その利点を相殺してしまう。

2.2.2 クラス2（流体 - 密度管理あり）

このクラスのモデルは交通流を流体として扱い、リンク上の交通状況に応じて交通密度の上限値を変化させるものである。リンクまたはリンクを分割した短い区間において、交通量 - 密度曲線などのマクロな指標に従ってその間の流量を計算し、密度を改訂していく方式が多い。前出の東大生研モデル・改良東大生研モデル、DYTAM-Iのほか、飯田らのBOXモデル⁴³などがこのタイプに当てはまる。

このクラスの特徴は、計算コストが少なくすむことだけではなく、非飽和と過飽和のどちらの交通状況の取り扱いについてもモデルに記述されており、渋滞の延伸・解消が理論どおりに再現できることである。とくに、計算の単位時間間隔やリンクの分割単位を細かく取れば、発進波や停止波のような疎密波の伝播といった、非定常的な現象まで再現することができるため、信号制御方式のきめ細かな評価が可能である。また、後述するクラス4の追従タイプと比べ、交通流を記述するマクロな指標のパラメータが観測しやすいことなども利点として挙げられる。

しかしながら、依然として車両の一台一台を区別して扱うことができないので、クラス1同様、各種の交通運用策評価に汎用的に適用するには、そのモデリング能

力において問題が指摘される。

2.2.3 クラス3（離散 - 密度管理なし）

このクラスは、目的地などの属性を持った車両（群）を扱い、リンク上の待ち行列を存在台数の上限が設けられたFIFO*のリストで表現するものである。しかしながら車両移動計算の簡略化のため、リンク上の交通状況と存在台数の上限との関連はつけられておらず、そのためクラス1と同様、渋滞の再現能力に問題が指摘される。元来、このようなモデル化は計算機による制約が大きかった時代に、経路選択行動を組み込むために採用されたため、交通流の再現能力を犠牲にした感がある。前出のモデルではCONTRAMやSOUND一般街路版がこのクラスに相当する。

2.2.4 クラス4（離散 - 密度管理あり）：リストタイプ

このクラスはリンク上の車両をクラス3同様のFIFOリスト形式で扱うものである。クラス3との違いは、リンク上の交通状況と存在台数の上限との関連がつけられ、渋滞の延伸状況を理論値通りに再現できるように改善されている、いわばクラス2を自然な形で離散モデルに拡張していることである。これにより計算コストでの優位性を保ったまま、交通流の再現性やモデリング上の問題点を解決している。前出のモデルの中ではINTEGRATIONがこのクラスに属する。

しかしながらリンク内部での車両移動を考慮していないため、信号などによる発進波・停止波の伝播が表現されず、過飽和リンク上の交通に対する信号オフセットの影響のような、より詳細な現象が再現できなかつたり、車両のリンク上での位置が直接わからないため、感知器やビーコンの再現情報の設置位置による違いなどを表現することが難しい、などの問題が残される。

2.2.5 クラス4（離散 - 密度管理あり）：追従タイプ

このタイプは、車両の速度・加速度を前方を走行する車両との間隔と相対速度などから求める車両追従式によって、一台ずつリンク上を走行させるものである。前出のモデルの中では、NETSIMと日産交通流シミュレータおよびFHWAモデルのMICROがこのタイプである。このタイプの特徴は、疎密波の伝播を含む非定常的な現

*) FIFO : First-In First-Out

象も詳細に再現できるだけでなく、車線変更や交差点でのギャップ待ち、交通規制の車両の動きへの影響といった、さまざまな交通現象を微視的にモデル化し、組み込むことができるなど、モデリング能力の柔軟性が非常に高いことである。

しかしながら、実用面から考えると必ずしも最善のアプローチであるとはいえない。追従走行や車線変更のモデルは、多くのミクロなパラメータで特徴づけられるが、ある程度の規模の道路ネットワークを対象とした場合、それらの汎用的な値を観測によって得ることは困難である。そのため、結局マクロな指標よりパラメータを推定して与えていることがほとんどで、モデルの能力が十分に発揮できない。また実際の交通状況を再現するようにパラメータを調整するには、モデルに対する専門的な知識を要することも、実用上の問題と考えられる。

2.2.6 クラス4（離散 - 密度管理あり）：ハイブリッドタイプ

ハイブリッドタイプは実用上の観点から、これまでのタイプのそれぞれの利点を持つようにモデル化を行ったものである。すなわち車両は1台ずつ属性が与えられ、ミクロに表現されるが、その移動に関してはマクロな密度管理を行い、交通流理論に従うようにしたものである。DYNASMART、FHWAモデルのMPSM、M-MPSM、およびSOUNDなどは、車両（群）をリンク上で走行させているが、そのロジックにはマクロな指標である車頭距離 - 速度曲線や密度 - 速度曲線を用いている。またAVENUEは東大生研モデルなどで採用されたブロック密度法に、離散的な車両を扱うミクロな側面での拡張を加えたハイブリッドブロック密度法で車両を移動させている。

このタイプの特徴として、リンク上の車両移動まで考慮した厳密な密度管理を行っていることや、各種交通現象に対するモデリング能力の高さだけではなく、追従タイプのモデルと比較してパラメータの設定が容易であるという、取り扱い上の利点も挙げられる。

2.2.7 各シミュレーションモデルでの交通現象の取り扱い

以上は各シミュレーションモデルを大まかに分類し、それぞれの長所、短所を述べたものだが、交通現象や交通規制の詳細なモデル化については、各モデルによって対応の仕方が異なる。ここでは一般街路への適用を想定した次の項目について比較を行う。表2-1はその結果をまとめたものである。各モデルは最初の3文字で、ま

た各項目は下線部のキーワードで示す．表中の \square は対応可能， \square は一部（条件付きで）対応可能， \times は対応不可，無印は不明である．

- 1) **交通状況に応じたドライバーの経路選択機能を持っているか？**…次節で詳しく述べるが，道路ネットワーク上の交通現象を扱う際には必要不可欠な機能である．経路選択機能を持たないモデルは交通運用策の評価に汎用的に適用できない．
- 2) **渋滞時の密度管理が交通流理論どおりになされているか？**…この密度管理が理論どおりになされていない場合は，すでに述べたように完全に停止していない渋滞の再現性に問題があるということである．
- 3) **リンク上での信号などによる疎密波の伝播まで再現しているか？**…これもすでに述べたように，渋滞時の信号オフセットの影響の再現性などに関係する性質である．
- 4) **任意の位置の感知器やビーコンのデータが再現できるか？**…この性質はこれらの機器を利用して，交通状況に対応した動的な信号制御最適化をおこなうアルゴリズムを評価したい場合には重要である．一般に待ち行列を用いたモデルでは，車両のリンク上の位置と速度が陽に表現されていないため，このような機能を持たせるためには間接的にこれらの量を計算する必要がある．
- 5) **交差点での右折容量が対向直進交通量によって変化するか？**…町中では，右折待ちの車両が後続車両の障害となっている場面がよく見かけられる．街路を対象としたシミュレーションの場合，この現象をモデル化することは必須である．SOUNDは高速道路を対象としているため，この現象を考慮していない．SOUND一般街路版は方向別に流出の容量を設定しているが，動的に変化させる機能が不足している．
- 6) **自由流での車群の拡散を考慮しているか？**…車群の拡散を考慮し，より実際の状況に近い交通流を再現することは，交差点での確率的な遅れをより正確に推定できるなどの利点を生む．SATURNではINパターンとARRIVEパターンでこの現象を考慮している．AVENUEではこの現象は考慮されていないが，比較的短いリンクで構成される，しかも過飽和状態であることが多い日本の都市部の街路ネットワークを対象とした場合，交通流は信号で整流されてしまうため，この性質の重要度はそれほど大きくないと考えられる．
- 7) **大型車などの車種の違いによる影響を考慮しているか？**…大型車交通

が大きな割合を占める日本の交通事情では、これらが与える影響をモデル化する必要がある。NETSIMでは車両の大きさや性能などの属性を指定して、その影響を追従挙動に反映させている。AVENUEでは乗用車換算係数を車両に与え、流量を計算する際に大型車の影響を考慮している。

- 8) **非飽和時の信号による確率遅れ**を表現しているか?...これは動的な最適信号制御の機能を組み込む際に、必要不可欠なものである。例えばSOUND一般街路版のような、信号を直接表現せずに、リンクの飽和交通流率にスプリットを乗じて表現しているモデルでは、信号交差点における確率遅れを正確に表現できない。
- 9) **任意のパターンの信号現示**を設定できるか?...街路においては、より効率的な信号制御を行うために、右折専用現示、常時左折可などのさまざまなパターンの現示が設定されている。シミュレーションにおいてもこのような任意のパターンの現示を表現できることが求められる。
- 10) **レーン構成**を考慮しているか?...レーン構成は交通運用策の重要な因子の1つであり、街路のシミュレーションではこれをモデル化することは必須である。SATURNでは交差点近傍のみレーン構成を考慮している。またDESCやSOUND一般街路版では本線のレーン構成は考慮されないが、右折専用ポケットだけは例外的に考慮している。
- 11) **交通状況に応じたレーン変更**を考慮しているか?...レーンを考慮している以上、ドライバーの判断に応じて適切なレーンを走行するようなモデルを組み込む必要がある。FHWAモデルでは、レーン変更が可能な隣接レーンとの速度差が一定以上になると、そちらへ移動するようなロジックが組み込まれている。AVENUEでは路上駐車車両や右折待ち車両などの前方の停止車両を回避したり、信号待ち滞留長の偏りを均一化するために車線変更をモデル化している。
- 12) **レーンごとの交通規制**を表現できるか?...交通運用策においては、右折禁止のような進行方向に対する規制だけでなく、バス専用レーン、HOVレーンなど車種に対する、レーンごとの規制を考慮することがある。シミュレーションにおいてもこのような規制をレーンごとに設定できなければならない。
- 13) **リンク上の路上駐車**による容量低下を表現できるか?...日本の交通事情では、路上駐車が容量低下の原因として指摘されることが多い。シ

ミュレーションにおいても、リンク上の任意の位置の容量低下を表現できることが求められるが、リストを用いてリンク上の車両を扱うモデルの場合はリンク途中の容量を変化させることはできないので、この現象を考慮することは困難である。

- 14) **歩行者の影響を表現できるか?**...総合的な交通運用策では、歩行者が自動車交通に与える影響に言及することも多い。NETSIMでは歩行者交通のデータを入力し、交差点での歩行者による遅れを直接表現している。AVENUEでは歩行者交通量に応じて、リンクの方向別の飽和交通流率を動的に変化させることで、これに対応している。

表2-2：各シミュレーションモデルでの交通現象の表現能力の比較

	CON	SAT	NET	DESC	DYT	INT	DYN	FHW	SOU	SO街	AVE
1 経路選択			×	×							
2 渋滞時	×	×								×	
3 疎密波	×	×			×	×				×	
4 車両の位置	×	×		×	×					×	
5 右折容量									×	×	
6 車群の拡散	×			×	×	×	×		×	×	×
7 車種の違い		×		×	×				×	×	
8 確率遅れ					×				×	×	
9 信号現示	×				×	×			×	×	
10 レーン構成	×				×	×	×		×		
11 レーン変更	×	×		×	×	×	×		×	×	
12 交通規制	×	×		×	×	×	×		×		
13 路上駐車	×	×			×	×			×	×	
14 歩行者	×	×		×	×				×		

2.3 経路選択挙動のモデリング

ネットワークを扱う交通シミュレーションでは時間的にも空間的にも非定常な交通状態を再現する必要があるため、渋滞や待ち行列を考慮しない従来の静的な交通量配分手法では対処できず、動的な交通量配分の枠組みが必要となる。これまでも多くの研究者によって動的配分問題が扱われてきたが、松井⁴⁴はそれらを動的システム最適化配分と動的利用者均衡配分に分類し、前者は高速道路の動的流入制限のような最適制御問題としての応用に向いているとしている。

一方、後者はその理論的な定式化が困難であることから、研究が遅れているといわれている。動的利用者均衡問題は、一般に

- 1) 利用者が日常の経験などから旅行時間を予測して、常に終点までの最短経路を選択する場合
- 2) 利用者が現時点での瞬間の交通状況に基づいて、常に終点までの最短経路を選択する場合

に区別される。とくに2)は「リアクティブ動的均衡配分」「動的利用者最適配分」とも呼ばれ、Wie⁴⁵やBoyce⁴⁶によって、その解法が報告されている。また桑原⁴⁷は実際の渋滞の延伸状況を扱ったアルゴリズムについて研究している。

ネットワークを扱う交通シミュレーションでは、「ドライバーが知覚するコストを最小にする」という動的利用者均衡問題の枠組みとの相性が良いため、多くのモデルがこの問題を近似的に扱っている。SATURNやCONTRAMのような初期のモデルでは、中長期的な交通運用策の評価において均衡状態の交通パターンを再現するため、1)の立場に基づいた経路選択挙動が考慮されていたが、近年では、旅行時間情報盤やラジオ・カーナビなどによる情報提供が普及しつつあり、それらの短期的な効果を評価する必要性から、2)の経路選択挙動をモデル化したものが一般的になってきている。本節では、1)の挙動を経験利用者層、2)の挙動を情報利用者層として、それぞれの挙動のモデル化について議論する。

2.3.1 経験利用者層のモデル化

利用者均衡状態を動的に再現することを目的としているCONTRAMでは、すでに述べたとおり、一旦すべてのパケットを配分し終わった後、その時点でのリンクコストを初期値としてもう一度最初からパケットを配分するという手順を何度か繰り返す。またSATURNにおいても、シミュレーション時間帯を分割した時間間隔ごと

にフローパターンを求めるモデルと配分モデルを交互に実行し、定常状態を求める手法で、利用者均衡状態を近似的に求めようとしている。

どちらのモデル化についても、理論的に収束することの証明は困難であるが、経験的に数回～10数回の繰り返しで定常状態に収束するといわれている。しかしながら、アルゴリズムが人間の行動原理と全く関連づけられておらず、収束させるための便宜的なものでしかないため、求められた結果が意味を持つものかどうかについては疑問がある。

これに対し、利用者が日常の交通行動において過去の経験から学習していく過程をモデル化し、シミュレーションに取り込む研究が、近年になって見られるようになった（たとえばHorowitz⁴⁸、Mahmassaniら⁴⁹など）。しかしながらこれらの研究は、学習モデルを構築することに主眼がおかれており、交通モデルについては簡略化されたものが採用されている。

2.3.2 情報利用者層のモデル化

ADISやATMSによって交通状況を短期的かつ動的に改善するような運用策を評価するためには、ネットワーク全体の交通状態を把握し、情報の収集・分配を行う中央処理装置のような存在を仮定する必要がある⁵⁰。INTEGRATIONやSOUNDをはじめとする近年のモデルは、すべてこのような仮定に基づき、ネットワーク上のドライバーは提供された情報に基づいて経路選択を行うようなモデル化をしている。

INTEGRATIONではこのような情報利用者層だけではなく、シミュレーションと配分の繰り返しで得られた日常の（TOD：Time of Day）旅行時間をもとに経路選択を行う経験利用者層を同時に扱うことができる。ただし、TOD旅行時間を求めるプロセスは別に実行され、シミュレーションでは外生的に与えられる。

SOUNDでは旅行時間情報をネットワーク上のドライバーに直接与えるだけでなく、現況の交通状態をもとに近い将来の交通状態を推定するシミュレーションを行った後、その予測旅行時間情報を提供した場合の効果についても、評価が可能である⁵¹。

AVENUEでは対象とするネットワークの規模を数キロ四方と仮定しているため、各ドライバーはネットワーク流入時にのみ与えられた情報に従って経路を選択しているが、可変情報表示盤やビーコンのような機器を考慮して、ユーザが指定する任意のリンクにおいて、任意の利用者層に対して情報を提供することができる機能を備えている。

第3章 街路網交通シミュレーションシステム：AVENUE

第2章までの議論をふまえて、筆者らはAVENUE (an Advanced & Visual Evaluator for road Networks in Urban arEas) と呼ぶ、街路網を対象とした新たな交通シミュレーションシステムを開発した。AVENUEの最初のバージョンは1993年に発表され⁵²、幾つかの改良の後、現在はAVENUE Ver. 2となっている⁵³。以下において、AVENUEに用いられているシミュレーションモデルの概要と、交通流モデル・経路選択モデルの概念、およびシステムの概要について述べる。

3.1 シミュレーションモデルの概要

シミュレーションモデルの概要を図3-1に示す。シミュレーションモデルは幾つかのモジュールから成り立っており、とくにその中でネットワーク上の交通流の再現にかかわるモジュールをまとめて、ネットワーク交通モデルとよんでいる。

データ入力モジュールに対する、モデルへの基本的な入力項目は

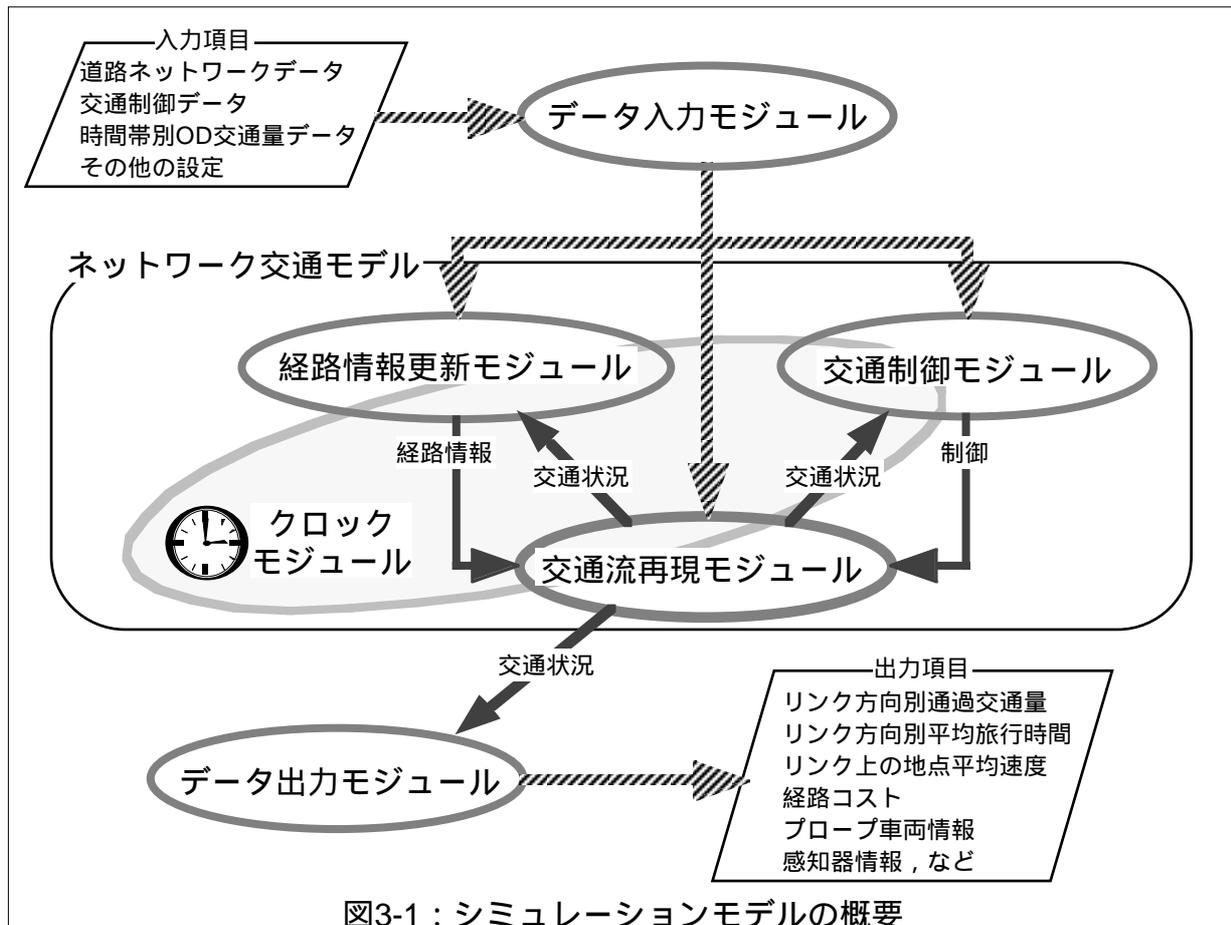
- 1) ネットワークデータ
- 2) 交通制御データ
- 3) 時間帯別OD交通量データ

の3種類である。

ネットワークデータには、ノードとリンクの接続関係だけではなく、飽和交通流率や自由旅行速度などの交通流に関する情報、レーン数、右左折専用レーンポケットの長さ、進行方向規制といったレーン構成に関する情報も含まれる。

信号データにはサイクルとスプリットだけでなくオフセット情報も含まれ、系統制御やエリア制御を表現できるようになっている。また信号現示も右折専用青矢印など、ユーザが任意の信号現示を指定できるようになっている。

時間帯別OD交通量データにはユーザが指定した一定時間ごとの、目的地別の発生交通量を与える。ここではODペアはパーソントリップ調査でのようなゾーン間の



ODペアではなく，ネットワークの端点のペアを意味する．OD交通量は車両タイプ別，旅行目的別など，利用者層ごとに設定することができる．

ネットワーク交通モデルは，次の4つのモジュールから構成される．

- 1) クロックモジュール
- 2) 交通流再現モジュール
- 3) 経路情報更新モジュール
- 4) 交通流制御モジュール

交通モデルはタイムスキニング方式で構築されている．スキャン時間はクロックモジュールが管理し，その他のモジュールの挙動のタイミングを管理する．スキャンインタバルの長さは任意だが，通常1秒にとられる．

交通流再現モジュールには，後述するハイブリッドブロック密度法を用いた交通流モデルと，ドライバーごとの経路選択行動を記述した経路選択モデルが含まれ，スキャンインタバルごとに交通状況を再現する．

経路情報更新モジュールはシミュレーション開始時に必要な経路を生成し，ユーザが指定した時間ごとに経路コストを更新する．経路コストは，距離，旅行時間，

右左折回数などの関数として表現され、各利用者層ごとに異なった設定が可能である。

交通制御モジュールは決められたタイミングで交通流を制御するもので、信号制御や通行規制の時間指定、駐車場ゲートの開閉などの機能が含まれる。

出力データモジュールは、再現されたネットワーク上の交通状況を観測し、必要なデータを集計・加工して、一定時間ごとに出力するものである。基本的な出力項目は、

- 1) リンクの方向別流出交通量
- 2) リンクの方向別平均旅行時間
- 3) リンク上の一定区間ごと*の地点平均速度
- 4) 経路コスト
- 5) プローブ車両**の区間所要時間
- 6) 感知器情報

などである。リンクでの平均遅れや平均停止回数などのデータは、これらの基本出力データから2次的に求める。

*) 実際は後述するブロックごとの平均速度。

***) 本シミュレーションモデルでの用語で、指定された経路を走行し、リンクごとの所要時間を計測する車両。実際の走行調査車両に相当するもの。

3.2 ハイブリッドブロック密度法

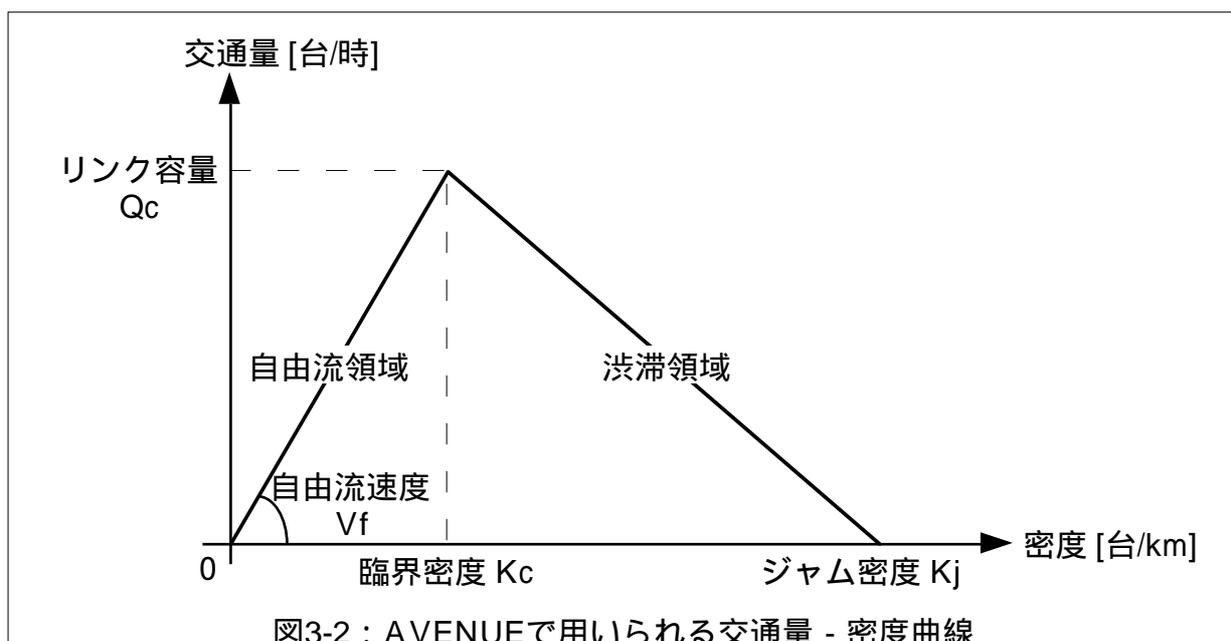
ハイブリッドブロック密度法は本研究において提唱された，AVENUEの交通流モデルである．これはDESCモデル⁵⁴や東大生研モデル⁵⁵で用いられたブロック密度法を基本としている．しかしながら，ブロック密度法は離散車両を考慮しないマクロモデルであり，経路選択や交通規制などを扱うことが困難であるため，ハイブリッドモデル*に拡張したものが本手法である．

ここではまずブロック密度法概念について説明し，ついでハイブリッドブロック密度法への拡張⁵⁶，またこの拡張により可能になった交通規制や信号制御の記述方法⁵⁷について述べる．さらに計算量を軽減するための改良を施したマルチスキャンハイブリッドブロック密度法⁵⁸についても説明する．

3.2.1 ブロック密度法

ブロック密度法はスキャンインタバルごとにリンク上の交通密度を改訂する手法である．密度の改訂は流量保存則と交通量 - 密度 (Q-K) 曲線に基づいているため，疎密波の伝播を含めた過飽和状態の交通流を再現することができる．

この手法ではリンクに交通容量 Q_c ，ジャム密度 K_j ，および自由流速度 V_f ，で決定される図3-2のような三角関数形のQ-K曲線が設定され，臨界密度 K_c が求められてい

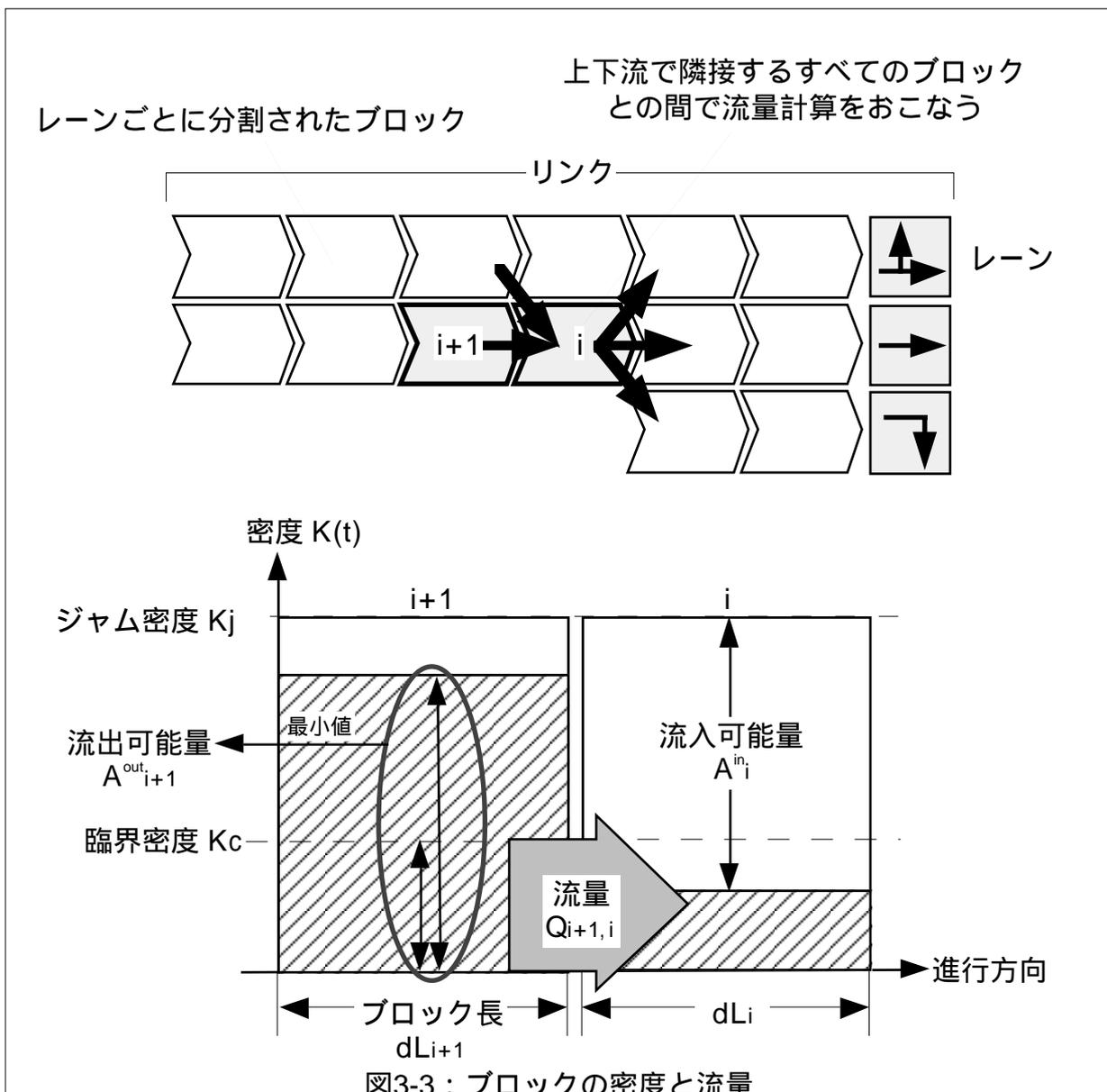


*) 第2章を参照．

る．リンクは一定の単位距離 d_L で区切られたブロックという単位に分割される．単位距離 d_L はスキャンインタバル dt の間に自由流速度 V_f で進む距離に等しい．

図3-3はリンクとブロックの位置関係とブロック密度法で用いられる諸量の関係を示したものである．ひとつのブロックはレーンをまたがっても，レーンごとに分割されていてもよく，上流と下流で隣接するブロックの間で交通量をやりとりする．とくにレーンごとに分割された場合には，あるブロックは斜め上流／斜め下流に位置するものも含め，すべての隣接するブロックとの間で交通量の移動の計算をおこなう．以下では一つのブロックに着目し，それに隣接するブロックとの間の交通量の移動の計算について説明する．

ブロックにはリンク下流端から $i = 1, 2, \dots$ と添字がつけられる．またリンクの臨



界密度とジャム密度に対応したブロック臨界密度 K_{Ci} とブロックジャム密度 K_{ji} が与えられる。このとき、ある時刻 t におけるブロック密度の改訂は次式(1)～(4)で示される。

$$A_i^{out}(t) = \min(K_{Ci}, K_i(t)) \frac{dL_i}{dt_i} \quad (1)$$

$$A_i^{in}(t) = \begin{cases} (K_{ji} - K_i(t)) \frac{dL_i}{dt_i} & , \text{ if } K_i(t) \notin K_{Ci} \\ \frac{K_{Ci}(K_{ji} - K_i(t))}{K_{ji} - K_{Ci}} \frac{dL_i}{dt_i} & , \text{ if } K_{Ci} < K_i(t) \notin K_{ji} \end{cases} \quad (2)$$

$$Q_{i+1,i}(t) = \min(A_{i+1}^{out}(t), A_i^{in}(t)) \quad (3)$$

$$K_i(t+dt_i) = K_i(t)dL_i - Q_{i,i-1}(t)dt_i + Q_{i+1,i}(t)dt_i \quad (4)$$

ここで i はブロックを表す添字で、 $A_{out_i}(t)$ と $A_{in_i}(t)$ はそれぞれ時刻 t における単位時間当たりの流出可能量と流入可能量を、 K_{Ci} と K_{ji} は臨界密度とジャム密度を、 $K_i(t)$ は時刻 t におけるブロック内車両密度を、また $Q_{i+1,i}(t)$ は時刻 t における $i+1$ から i への単位時間当たりの流量を表している。

式(1)～(4)は実際には次のようなアルゴリズムとして記述される。まず時刻 t においてブロックの流出可能量と流入可能量が求められる。流出可能量は式(1)において、現在のブロック内の車両台数と最大流量の最小値として表されている。一方、式(2)で表される流入可能量は、ブロックの状態が自由流領域にあれば、ブロック内の空き容量に等しく、渋滞領域であれば Q - K 曲線の渋滞側の直線から定まる流量となる。

全てのブロックについて流出可能量と流入可能量が計算された後、式(3)によって隣接するブロック間の流量が計算される。流量は上流ブロックの流出可能量と下流ブロックの流入可能量の最小値として表される。この流量を用いて次の時刻でのブロック内車両密度を式(4)によって改訂する。式(4)は交通量の保存則を表している。

上述のアルゴリズムはリンク上の密度管理に関するものだが、これをネットワーク上の密度管理に自然に拡張することができる。なぜならば、式(1)～(4)にはブロックを下流側から順にスキャンするといったような制約がなく、1スキャン前の状態を用いて、一旦移動させる交通量を計算してからブロックの密度を改訂するので、ループを含むネットワークに適用した場合でも、どこを最下流のリンクとするかという問題が生じないからである。

3.2.2 ハイブリッドブロック密度法

前節のブロック密度法では、ブロック間を移動する流量が連続値として算出される。しかしながら、交通を流体近似したままでは経路選択や交通規制のモデル化に不利であるため、同時に離散車両を移動させるように拡張したハイブリッドブロック密度法を提唱する。

拡張の基本的な考え方は、ブロック密度法で求められた流量を切り上げた整数に等しい台数の車両を、上流ブロックから下流ブロックに移動させるものであるが、その際に生じる誤差を補正交通量として保存しておき、次のスキャン以降で優先的に移動させるというもので、数スキャンを通して連続量と離散量の整合性を確保するものである。

離散車両の移動量は次式において求められる。まず、ブロック間の車両移動量 $M_{i+1,i}(t)$ を、ブロック間流量を切り上げて求める。

$$M_{i+1,i}(t) = \text{RoundUp}(Q_{i+1,i}(t)dt_i) \quad (5)$$

ただし、 $\text{RoundUp}()$ は切り上げ整数化の関数

同時に各ブロックでの交通密度の整合性を保つために、切り上げによって増加した小数点以下の補正交通量 $E_{i+1,i}(t)$ を次式(6)で求める。

$$E_{i+1,i}(t) = M_{i+1,i}(t) - Q_{i+1,i}(t)dt_i \quad (6)$$

ただし、前スキャンに生じた補正交通量は離散車両の移動に優先して処理されるため、離散車両の移動台数を求める式(5)(6)は1スキャン前の補正交通量を考慮した形で記述されなければならない。したがってそれぞれ次式(5')(6')におきかえられる。

$$M_{i+1,i}(t) = \text{RoundUp}(\max(0, Q_{i+1,i}(t)dt_i - E_{i+1,i}(t-1))) \quad (5')$$

$$E_{i+1,i}(t) = M_{i+1,i}(t) + E_{i+1,i}(t-1) - Q_{i+1,i}(t)dt_i \quad (6')$$

また、車両に乗用車換算係数の情報を持たせ、流量計算と密度の改訂に利用することで、大型車などの影響を考慮することもできるようになる。

理解のために、図3-4にハイブリッドブロック密度法による車両移動計算の例を示す。図の左半分に連続量の密度の変化と流量の移動が、右半分にブロック内の離散車両の移動の様子が描かれている。初期状態 $t = t_0$ では上流端のブロック $i+1$ に

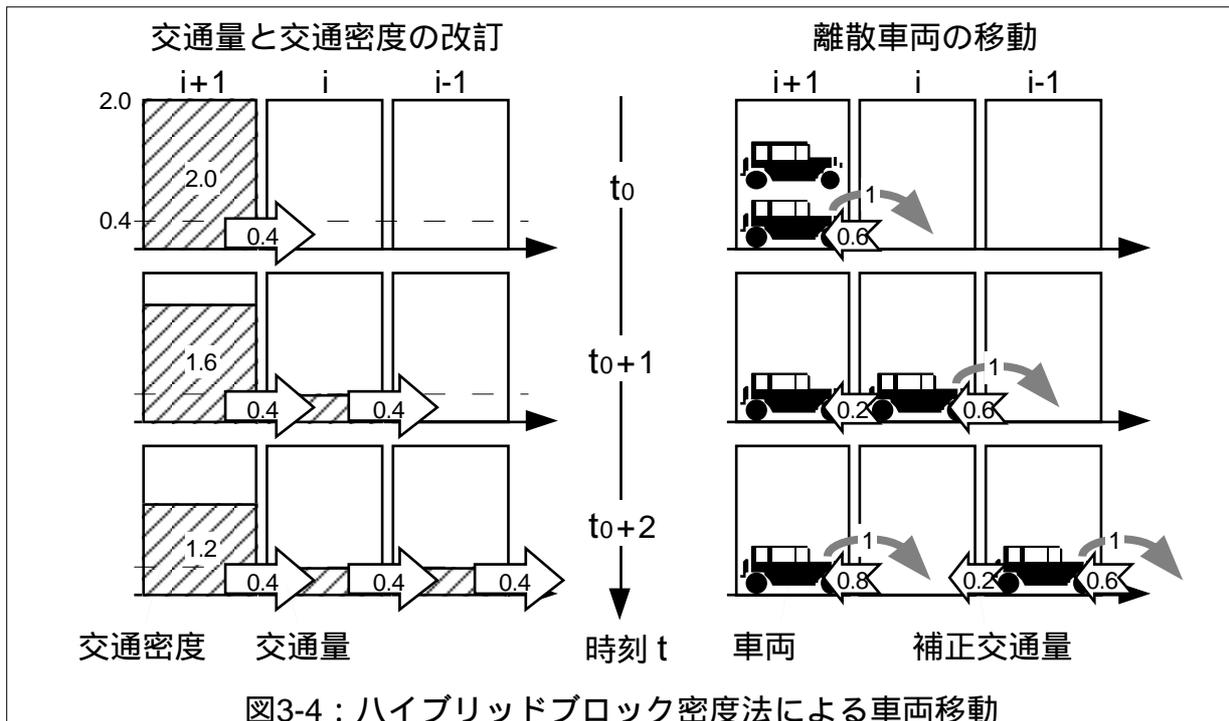


図3-4：ハイブリッドブロック密度法による車両移動

2台の車両が存在し，次スキャン以降でリンク容量で下流方向に流れていく．リンク容量から求められるブロック間の最大流量は，0.4 [台/秒] としてある．

最初のスキャンでは $i+1$ と i の間の移動台数は

$$M_{i+1, i}(t_0) = \text{RoundUp}(\max(0, 0.4)) = 1 \text{ [台]}$$

となり，先頭の車両が下流ブロック i に移動するが，その際に

$$E_{i+1, i}(t_0) = 1 - 0.4 = 0.6 \text{ [台]}$$

の補正交通量が生じる．次のスキャン t_0+1 ではこの補正交通量を優先して移動させなければならないので， $i+1$ と i の間の移動台数は

$$\text{RoundUp}(\max(0, 0.4 - 0.6)) = 0 \text{ [台]}$$

となるため2台目の車両は移動できず，もとのブロックに残る．このときの補正交通量は

$$E_{i+1, i}(t_0+1) = 0 + 0.6 - 0.4 = 0.2 \text{ [台]}$$

となる．

以下，同様の計算をおこなって車両を移動させることで，数スキャンにわたって連続量と離散量の整合性が保たれるのがわかる．

3.2.3 レーン選択・交通規制・信号交差点などのモデル化

ハイブリッドブロック密度法の導入によって，車両の属性情報を利用してさまざま

まな交通制御，交通規制をモデルに組み込むことが可能になる．また，レーンごとにブロックに分割し，直上流／直下流の方向だけでなく斜め上流／斜め下流のブロック間の移動も考慮することができる．

ここではドライバーのレーン選択やレーン変更*などの挙動，交差点での信号による制御や右折車両のギャップ待ちなどを例として説明する．

1) レーン選択

ブロックには車両流入時の規制に関する情報を属性として記述することができる．あるブロックがその上流ブロックから車両を移動させてくる際に，その車両の属性と流入時の規制情報とを参照し，規制対象となる車両については流入させないことで，さまざまなレーンに対する規制を表現することができる．

図3-5はレーンの進行方向規制を実現している例である．各ブロックには，それが属するレーンの進行方向規制に基づいて，同じような進行方向規制の情報が記述されている．一方，後述の経路選択モデルにより，リンク下流の交差点での各車両の進行方向がすでに決定されているので，各ブロックはその進行方向規制と車両の進行方向が適合するもののみ移動させることで，各車両は適切なレーン上を走行することになる．

同様の規制は車種や特定の利用者層に対して設定することができる．これにより，バスレーンや，駐車場入庫待ち車両専用のバッファレーンなどが実現できる．

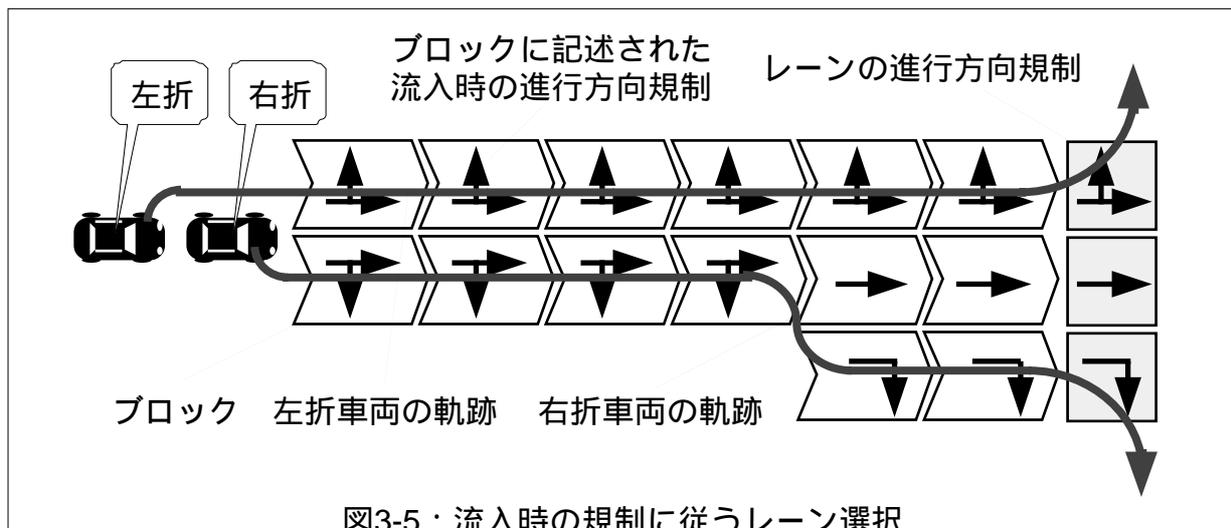


図3-5：流入時の規制に従うレーン選択

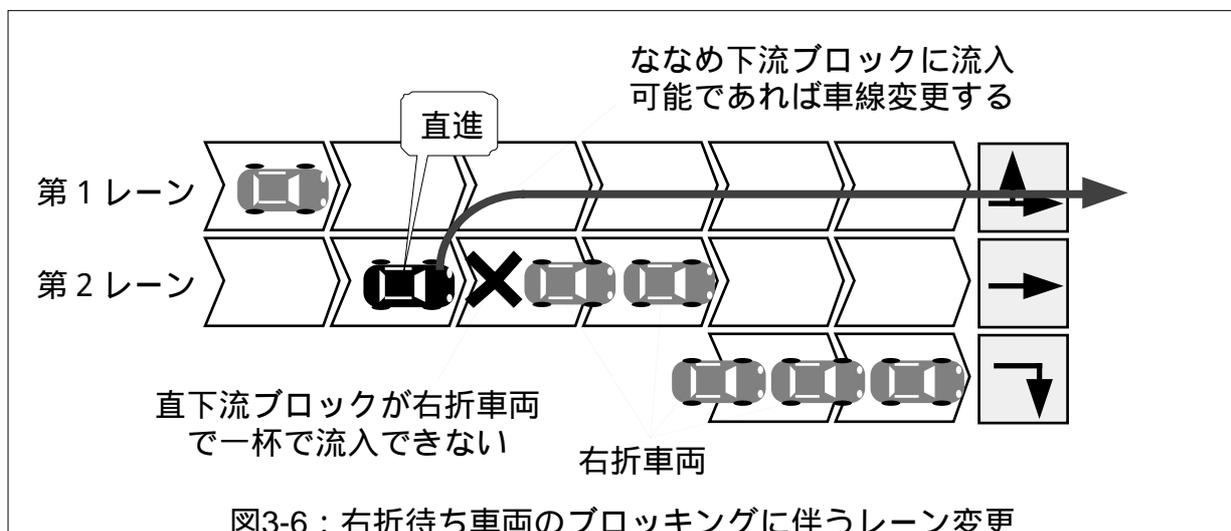
*) ここではドライバーがリンク流入時に，下流交差点での進行方向や交通規制に従って目的とするレーンを選択することをレーン選択，リンク上を走行しているときに交通状況に応じてレーンを変更することをレーン変更と呼んでいる．

2) レーン変更

町中では右折専用ポケットから溢れた車両が後続の直進車両の走行の障害となるケースがよく見られる。ハイブリッドブロック密度法ではこのような現象もモデル化することができる。

図3-6は右折車両のブロッキングにより、直進車がレーン変更するケースを示している。ハイブリッドブロック密度法では、まず直下流方向への車両移動が斜め方向の移動に優先して計算される。このとき第2レーンに進入した直進車両は右折車両で一杯になっているブロックの手前で、これ以上直下流方向に進行できなくなるので、斜め下流のブロックに流出しようとする。斜め下流のブロックで直上流ブロックからの流入がなければ、その直進車両を受け入れる余裕がまだあるので、結果として直進車両は第1レーンに移動する。第1レーンの通行量が多ければ、このような斜め下流方向への移動ができる機会が少なくなり、第2レーンでの待ち行列が長くなる。

同様の仕組みで、路上駐車や道路工事による容量低下をモデル化することも可能である。



3) 信号による交通制御

ブロック流入時だけでなく、流出時の規制情報を記述することで、さまざまな機能をモデルに与えることができる。

図3-7には信号交差点での交通流の制御をモデル化したものを図示してある。リンク下流端のブロックには車両の進行方向にたいする流出のパーミッションの情報が

与えられ、信号現示に従って動的に変更される。信号現示が青の場合は全ての方向の流出が許可されているので、どの車両もブロックから流出することができるが、右折専用の青矢印のような現示のときは、右折車両のみがそのブロックから流出できる。

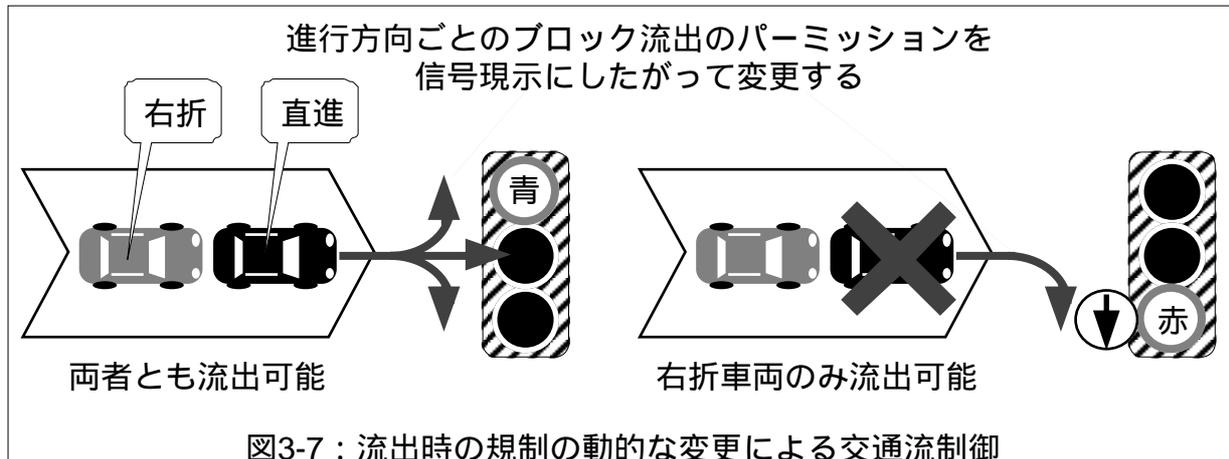


図3-7：流出時の規制の動的な変更による交通流制御

4) 対向直進交通による右折容量の逓減

交差点での右折容量は対向直進交通の影響を受けて逓減する。交通工学研究会による次式(7)は、右折専用現示のない場合の右折専用車線において、対向直進交通の到着をランダムと仮定したときの、右折車両がそのギャップを利用して流れる容量を計算するものである⁵⁹。

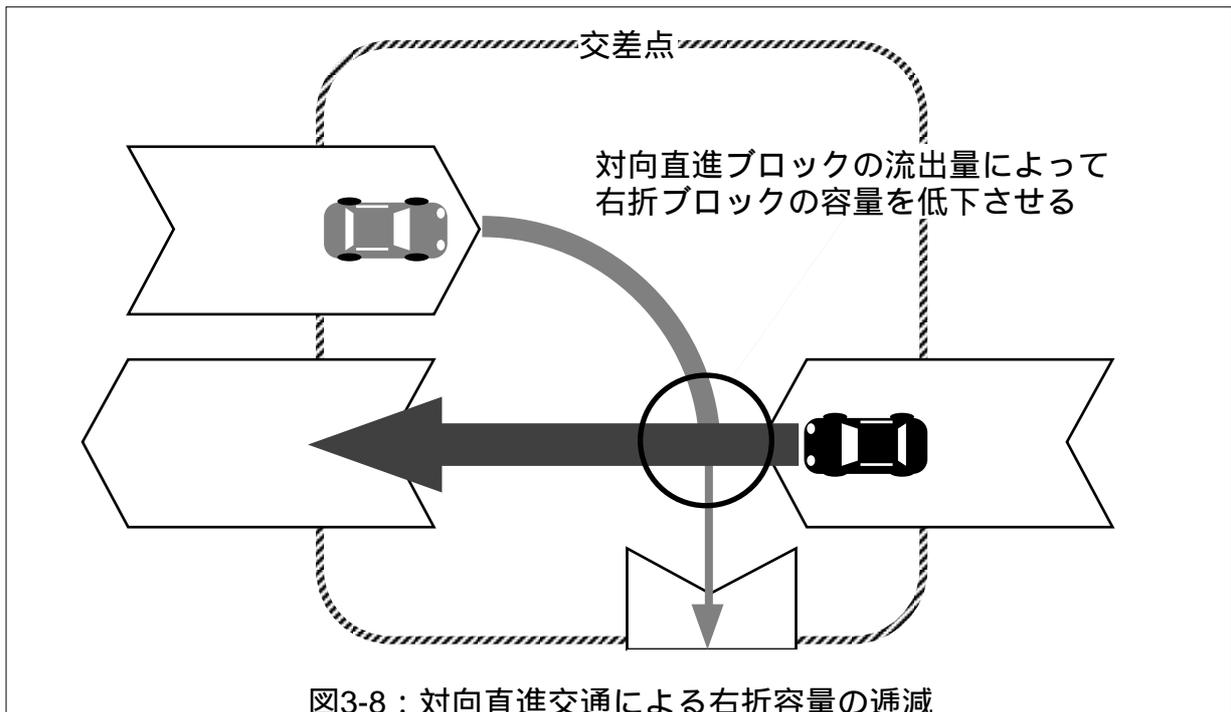
$$S_R = 1800 \frac{f(SG - qC)}{S - q} \frac{1}{C} + K \frac{3600}{C} \quad [\text{台/時}] \quad (7)$$

ここで、 S_R は右折専用車線の交通容量、 S と q は対向直進流入部の飽和交通流率および対向直進交通量、 C と G はサイクル長および有効青時間、 K は信号現示が変わるときに捌ける右折車の台数、 f は表3-1に示される対向直進交通量 q にしたがう右折車のギャップアクセプタンス確率である。中間の値は補間して求める。

表3-1：右折車両のギャップアクセプタンス確率

q [台/時]	0	200	400	600	800	1000	1000超
f	1.00	0.81	0.65	0.54	0.45	0.37	0.00

ハイブリッドブロック密度法では交差点部の右折ブロックの流出容量に、対向直進ブロックの流出量によって決められる逓減率を乗じている(図3-8)。逓減率には、対向直進の1スキャンでの流出量を1時間当たりの交通量に換算し、表3-1から得る



ギャップアクセプタンス確率 f の値を用いている。これにより、対向直進交通量が増加すると、右折しにくくなる現象をモデル化することができる。

3.2.4 マルチスキャンハイブリッドブロック密度法

ここまでのハイブリッドブロック密度法の説明では、ブロックの長さは一定長に固定されていた。このアルゴリズムの計算量は明らかにブロック数に比例するので、ブロック長が一定であれば、すなわちリンクの総延長に比例する。スキャンインタバルを大きくとればブロック長も長くなるため、ブロック数が減少して計算量が軽減されるが、信号交差点でのモデル化を考えると、数秒のスキャンインタバルでも流出量が正確に再現されず、精度の面で大きな問題が生じる。

信号現示を考えるとスキャンインタバルは1秒程度が望ましい。この程度だとブロック長はおおよそ10~20m*となる。しかしながら、ハイブリッドブロック密度法では車両が存在していないブロックも計算対象となるため、ネットワークを短いブロックで細かく分割すると、計算効率が悪くなる。

そこで計算量を軽減するために、流量の再現性の精度が要求されるリンク下流端のブロックは短いスキャンインタバルで、それ以外のあまり精度を要求されない区間では長いスキャンインタバルのブロックを配置する、マルチスキャンハイブリッ

*）単位距離は、リンクの自由流速度を36km/時とすると10m，72km/時とすると20mになる。

ドブロック密度法を提案する．すなわち，図3-9に示されるように，スキャンインタバルをリンク下流端ブロックでは1秒とし，上流に向かうにつれ徐々に整数倍していくものである．実用上はスキャンインタバルを2倍ずつ長くしていき，最大2～16秒という適当な上限を決めてある．

このような設定に応じて，密度改訂の計算アルゴリズムも変更される．すなわち各ブロック*i*は時刻*t*がそのスキャンインタバル dt_i の倍数となるときだけ，式(1)の流出可能量計算と式(2)の流入可能量計算の対象となる．それぞれの値は次に計算されるまで変数に保持される．さらに各ブロック*i*は時刻*t*がそのスキャンインタバル dt_i の倍数となるときだけ，式(3)による上流ブロックからの流入量計算の対象となる．このとき求められた流入量を用いて，自らの密度を改訂する．また，上流ブロックの密度と変数に保持していた流出可能量から，この流入量を差し引いておく．またリンクとリンクが接続する境界では，1秒スキャンのブロックが長いブロックの上流になるため，1秒ごとに上流ブロックが下流ブロックに交通量を「押し込む」ような例外的処理をおこなう必要がある．

このようなアルゴリズムにおいても，長いスキャンのブロックでは密度分布が平滑化されるものの，以前と同様に設定された交通量 - 密度曲線に基づく密度管理が可能である．計算量は，一定長で分割した場合と比べてブロック数が減少するだけでなく，毎スキャンにおいて全てのブロックを計算対象とする必要がなくなるため，大幅に軽減される．具体的な例では，第5章で紹介する豊田市ネットワークでのモデル検証に適用したところ，ノード数84，リンク数193，リンク総延長73kmという条件で，ブロック数が20%に，1スキャンあたりの計算量が15%にまで軽減された．また実際のシミュレーション実行時間も1/4程度に短縮された．



ただしブロックの分割を粗くすることによる弊害も予測される．リンクの接続部分では1秒ごとに上流リンクの下流端ブロックが下流リンクの上流端ブロックに車両を押し込むのに対し，そこから車両が流出するのは，さらに下流のブロックのスキャンインタバルごととなる．そのため，たとえばリンク上流端ブロックのスキャンインタバルが16秒の場合，車両がそのブロックに流入してくるタイミングによっては，本来16秒かかって下流ブロックに流出するはずのところを，1秒滞在しただけで流出してしまうことも考えられる．このように車両の旅行時間が各リンクを越えるごとに，最大で（上流端ブロックのスキャンインタバル-1）秒短縮される可能性がある．

3.3 経路選択モデル

AVENUEの初期の経路選択モデルは、旅行時間情報をもとに一定時間ごとに最短経路を探索し、全ての車両をall-or-nothingでその経路に配分する簡単なものだった。しかしながら、このようなモデル化は現実のドライバーの挙動とかけ離れており、多数の経路が含まれるネットワーク上の交通状況を再現することが困難であった。また全てのドライバーの挙動が同じであるため、さまざまなネットワーク利用者層を扱う必要がある情報提供効果の予測や案内誘導方式の検討といったインパクト評価には適用できなかった。

このため、現在の AVENUE は確率的経路選択挙動を取り込み、複数の利用者層を設定することができるように改良を施した。以下では改良された経路選択モデルについて述べる。

3.3.1 交通の発生・集中

時間帯別OD交通量データは、各発生点ごとに目的地別の発生交通量として与えられる。発生交通の時間変動到着パターンはランダム到着を仮定し、1秒ごとの到着台数が計算される。発生した車両は、ネットワーク端点から流出するリンクの最上流ブロックに「押し込ま」れ、ネットワーク上を移動していく。

目的地の端点に到達した車両は、ネットワークから「取り出さ」れ消滅する。現段階ではリンク途中での交通の発生や消滅は考慮されていないので、このようなリンクは途中で分割して、新たに発生・集中ノードを接続する必要がある。

3.3.2 経路の列挙

AVENUEではシミュレーション実行前に、各ODペアについて選択候補となるすべての実用的な経路が列挙される。ネットワーク上での確率的配分ではDialのアルゴリズムを利用するケースが多いが、実用的な経路に配分されない状況も発生するため、AVENUEでは採用しなかった。

現在のバージョンではリンク長に基づいて、Dialのアルゴリズムにおける efficient path を初期経路として用意している。また k 番目経路探索アルゴリズム⁶⁰を用いた外部プログラムを利用することも可能である。実際のシステムでは実用性を考慮して、ユーザ指定の経路を追加・削除することもできる。これは距離だけを基準とし

て探索しても、そのなかには必ずしもとりうるすべての経路が含まれていない可能性もあるためである。ネットワークの規模が大きくなるにつれ、ユーザが経路を確認・修正するのに要する労力も大きくなるが、現実的にはたかだか100交差点程度の規模のネットワークへの適用を想定しているため、操作性のよいインターフェースを用意すれば、大きな問題にはならないと思われる*。

3.3.3 経路の表現

経路の探索は、図3-10に示されるようなリンク - ターングラフ上でおこなわれる。これは道路ネットワークを表現するノード - リンクグラフにおいて、リンクを点に縮退させ、そのリンクから進行することができる別のリンクへの枝をターンとしたものである。

ターンには左折 / 直進 / 右折 / Uターンのラベルが付けられる**。これはノード - リンクグラフでは、右折禁止やUターン禁止のような進行方向規制を陽に表現することができず、経路探索アルゴリズムだけでこの規制を考慮することが困難であるためである。また実際のネットワークでは同じリンクでも直進と右折とでは所要

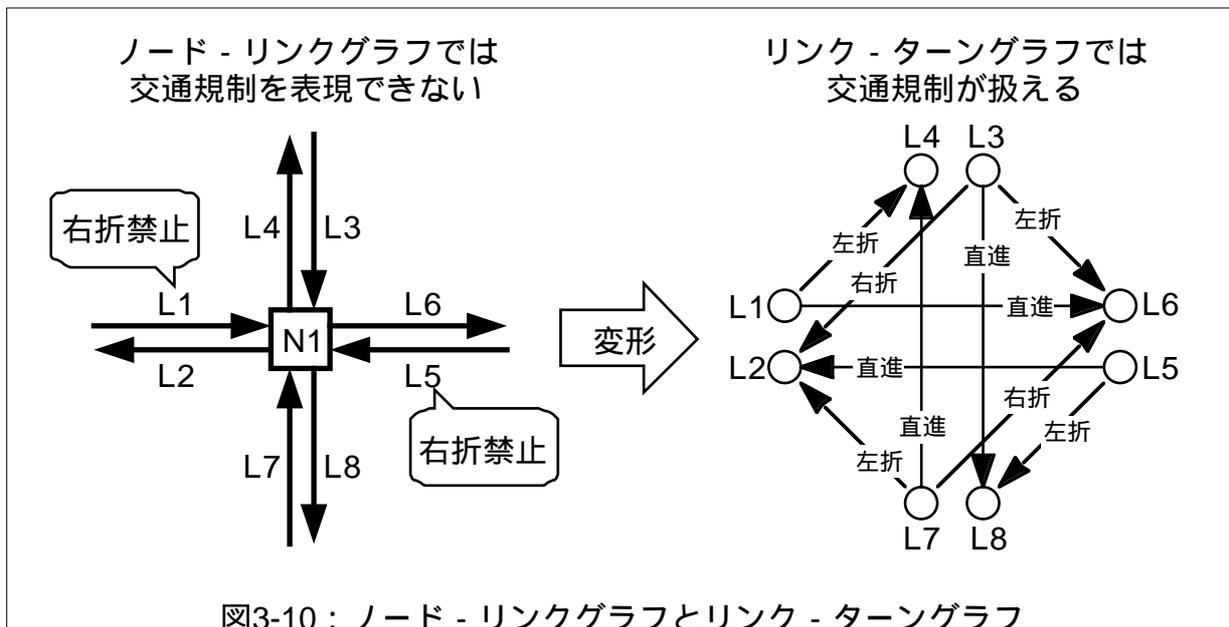


図3-10: ノード - リンクグラフとリンク - ターングラフ

時間が異なる場合もあり、このような状況もノード - リンクグラフでは表現するこ

*) しかしながら、選択候補となるすべての経路を列挙したという保証は依然として得られていないため、シミュレーション実行時に efficient path を一定時間ごとに探索し、新たな経路が見つければ選択候補として追加するというオプションも用意されている。

***) ターンのラベリングは道路ネットワークの幾何構造から読みとられる。デフォルトではUターンとなる枝は除去される。

とができない。リンク - ターングラフではターンにコストを持たせることができるので、より実地的な経路選択が可能である。

同様の試みに、リンク - ノードグラフにおいて、ノード部分をダミーリンクとダミーノードに分解し、進行方向ごとの規制や旅行時間を表現するものがあるが⁶¹、経路探索時に考慮しなければならないノード数が大幅に増えるため、あまり実地的ではない。

リンク - ターングラフ上で探索された経路は、ターンのリストとして表現される。したがって経路が決定されると、自動的に各リンク下流端での進行方向も決定され、前出のレーン選択のモデル化のところで述べたように、適切なレーンを選択することができる。

3.3.4 経路の選択

本モデルではネットワーク利用者層をまず

- 1) 経路固定層
- 2) 経路選択層

の2つのグループに大別する。

経路固定層に属する車両は、交通状況にかかわらずユーザが指定した経路を通る。これは路線バスや、案内誘導に従う車両などを表現したものである。またシミュレーションで再現される旅行時間を測定するプローブ車両もこのグループに属する。

経路選択層は経路コストをもとに経路を選択する。経路選択挙動は次式(8)に示されるロジットモデルとして表現されている。

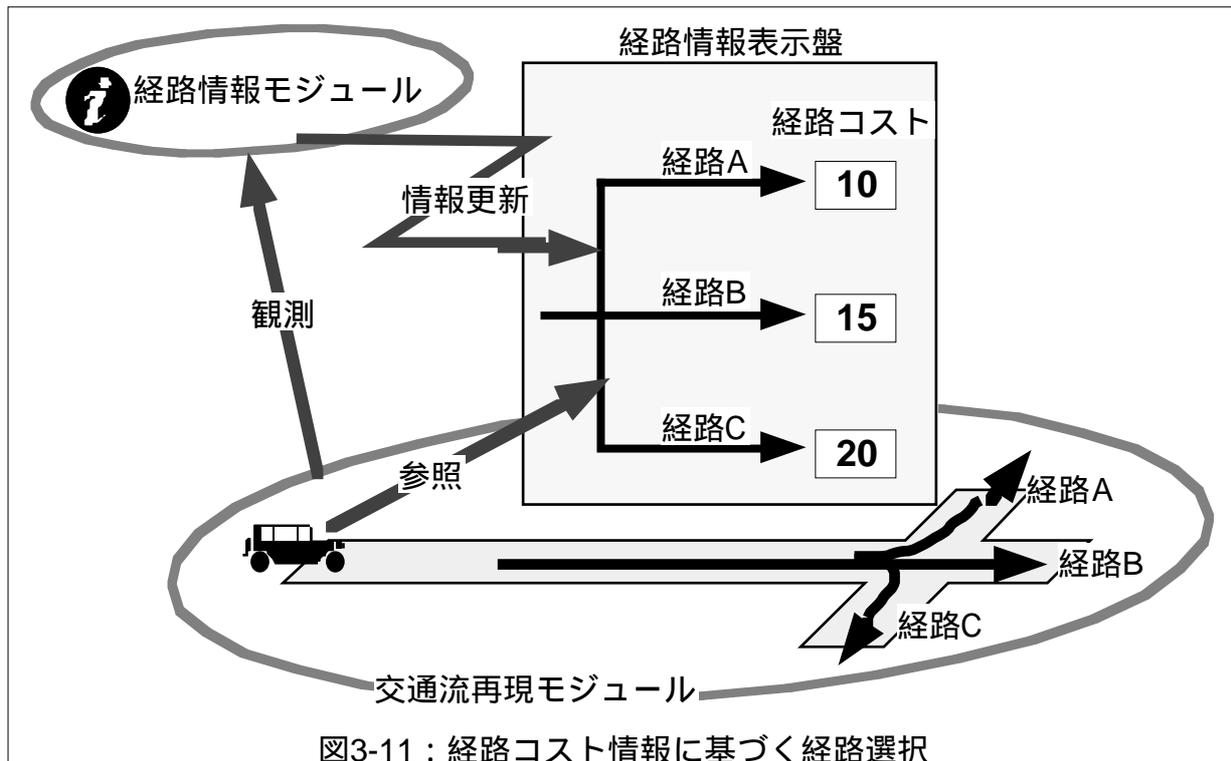
ここで、 r と s はそれぞれ起点と終点を表す添字で、 P_{ij}^{rs} は j 番目利用者層の i 番目

$$P_{ij}^{rs} = \frac{\exp(-\alpha_j c_{ij}^{rs})}{\sum_k \exp(-\alpha_j c_{kj}^{rs})} \quad (8)$$

経路の選択確率、 c_{ij}^{rs} は j 番目利用者層に対する i 番目経路のコスト、 α_j は j 番目利用者層のコストに対する感度パラメータである。すなわち $\alpha_j = \infty$ とすれば必ず最短経路を選択し、 $\alpha_j = 0.0$ とすればすべての経路を等確率で選択する。

経路選択層には旅行目的や経路選択挙動に応じて、異なった経路コスト関数、感度パラメータを持った複数の利用者層を設定することができる。コスト関数は経路長、旅行時間、右左折回数などの関数として表現される。

AVENUEでは経路選択モデルは、交通流再現モジュールと経路情報更新モジュール



ルの中に分けられて埋め込まれる．図3-11は経路選択のモデル化を模式化したものである．リンクには目的地ごと，利用者層ごとの経路コスト情報を格納した情報表示盤のような属性*が定義されている．経路情報更新モジュールは交通流再現モジュールによるネットワーク上の交通状況を観測し，一定時間ごとにリンクの情報表示盤の内容を更新する．車両はリンク流入時に自分の目的地と属する利用者層に応じた経路コスト情報を参照し，式（8）に従って経路を選択する．

3.3.5 経路コストの質が経路選択挙動に与える影響

前述の経路選択挙動のモデル化は，与えられた経路コストに基づいて，式（8）に従って経路選択をするというものだが，経路コストの内容によってモデルの挙動が大きく異なる．

第2章でも述べたように，しばしば言及される利用者均衡状態は，ドライバーが実際経験する旅行時間を基準に経路選択を行った結果であるが，将来の交通状況を完全に予測する必要があるため，シミュレーションのような動的な配分手法では取り扱いが困難であるうえ，そのような将来の情報を利用することができるという仮

*) 現在のところすべてのリンクで定義されているわけではなく，ネットワークの端点から流入するリンクでのみ定義されている．したがって経路選択はネットワーク流入時にのみおこなうようになっている．その他のリンクにはオプションとして設定することが可能である．

定に不自然さが指摘される。

本モデルでは現在の旅行時間をコストとした，リアクティブな動的均衡配分を仮定している．これはシミュレーションでの取り扱いが容易であるのに加え，可変情報表示盤やVICS，ATISなどの新たな情報提供の枠組みが近年整備が進められていることから，さまざまな要求に応えうるモデルである．

図3-12に示されるネットワークを用いて，両者の挙動の違いを理論値で確認する．ネットワークは2経路からなり，自由速度で通過した場合3分の時間差がある．与えられた需要に対して，リンク0～2は十分な容量を持っているが，リンク3はボトルネックとなる．簡単のためロジットのパラメータはとし，渋滞時のボトルネックでの合流比は1：1とする．

図3-13*は実際にドライバーが経験する旅行時間をコストとして経路選択を行った場合のリンク1とリンク2のそれぞれの累積通過交通量とリンク旅行時間のグラフである．当初は旅行時間の短い経路1をすべての車両が選択するが，21分経過した時点で両者の将来の旅行時間が等しくなるため，両経路に交通は等分されるようになる．経路コストも21分を経過してからは両経路とも等しく増加していき，利用者

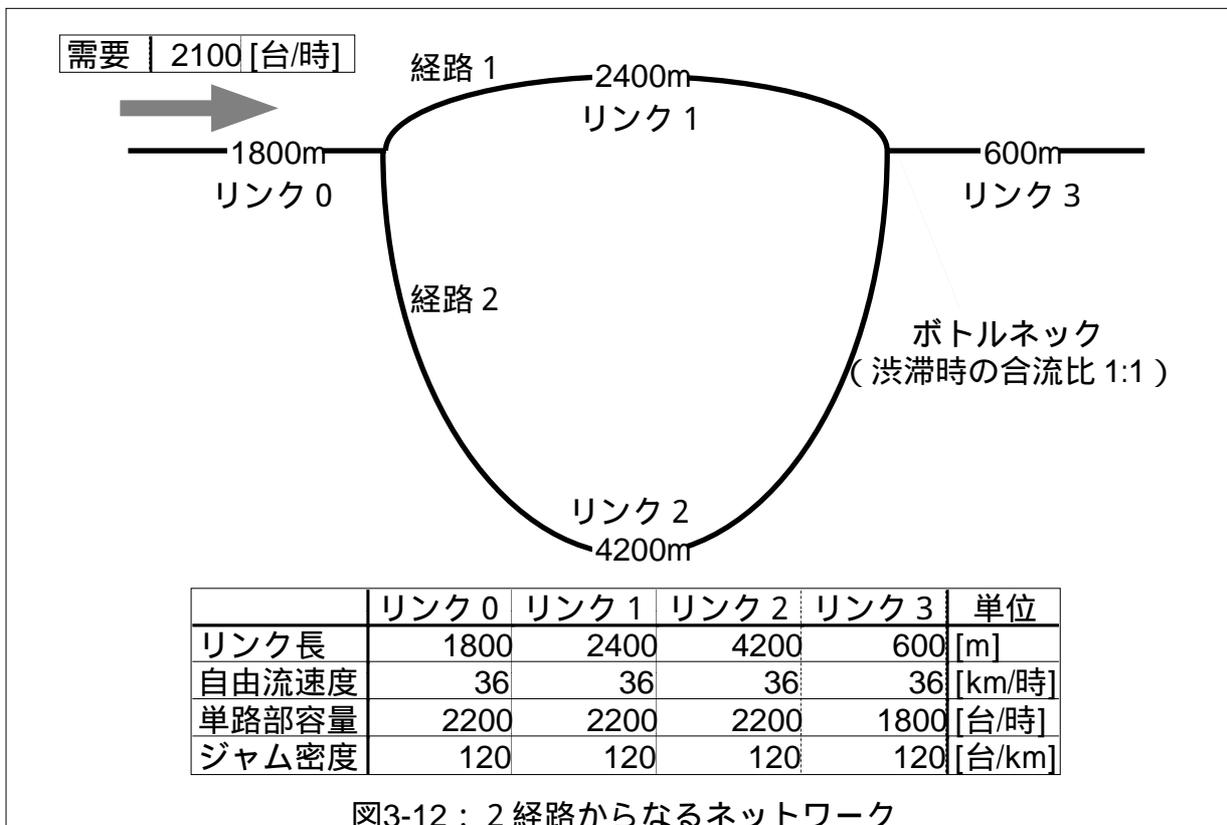


図3-12：2経路からなるネットワーク

*) 実際はリンク3の上流端からの渋滞が延伸して，ある時点から各リンクの流入の流率が小さくなるが，簡単のために省略した．

均衡状態になることを示す。

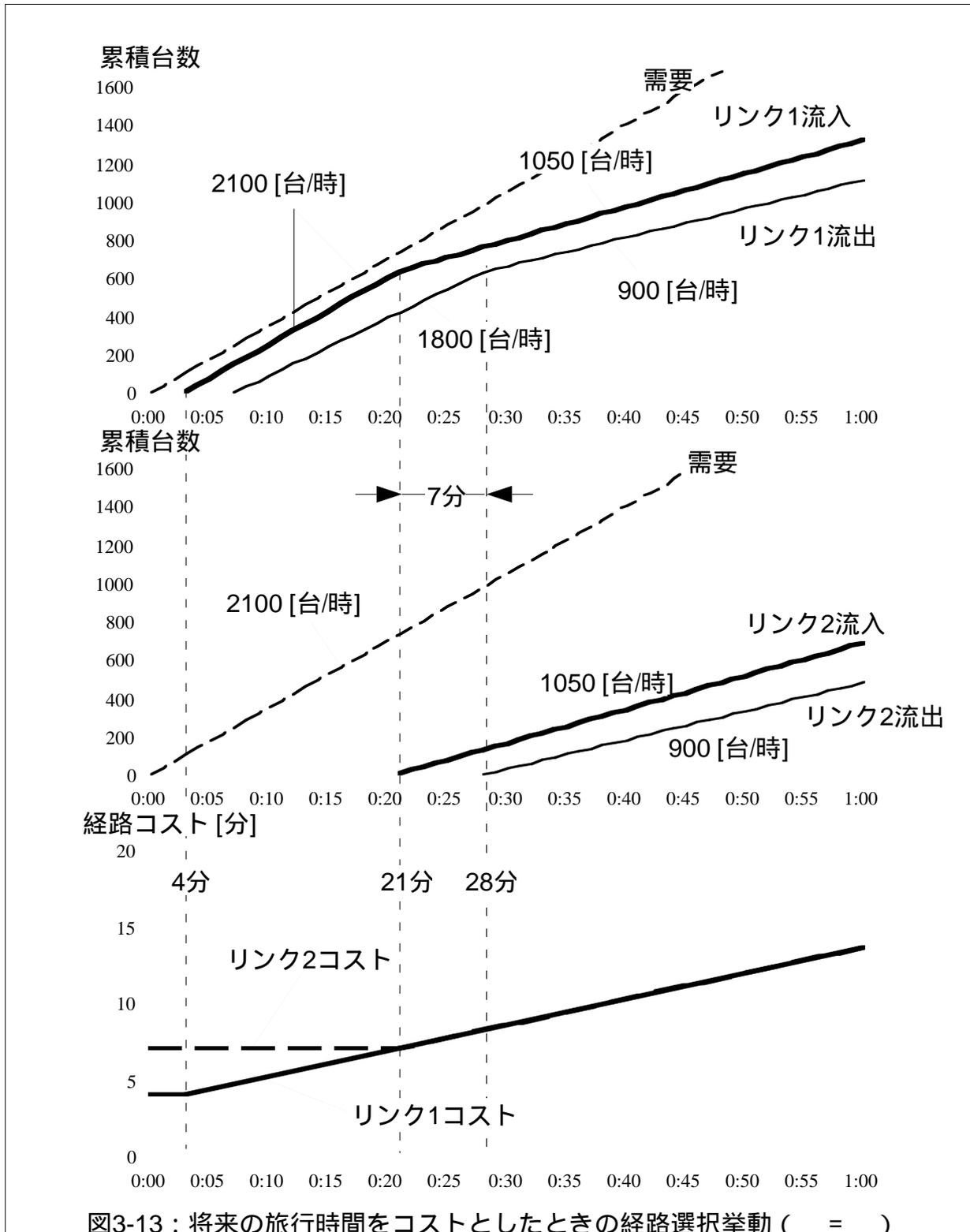
一方，図3-14*は現在の旅行時間をコストとして経路選択するときの，同様のグラフであるが，この場合は21分を経過した時点でも，その瞬間のリンク1の旅行時間は7分より短く，依然としてすべての車両は経路1を選択する．28分を経過して初めて，両経路の旅行時間は等しくなるが，次の瞬間にはすでにリンク1に流入してしまっただけ「余分な」車両があるため，リンク1の旅行時間が7分を超えてしまう．そのため利用者均衡の場合のように交通は等分されず，28分から後はすべての車両が経路2を選択するようになる．初めてリンク2に流入した交通が流出するまでの間，リンク2の旅行時間は7分のみであるが，その間もリンク1の旅行時間は増加し続けるため，両者の旅行時間差も広がっていく．リンク2から交通が流出し始める35分後からも，合流比を1：1と仮定しているのだからそれぞれの流出交通量の流率は等しく，旅行時間差は縮まらない．結局，リンク1とリンク2の旅行時間が逆転するのは，「余分に」リンク1に流入してしまっただけ車両がすべて流出して，リンク1上に車両が存在しなくなった38分後となる．以下，同様の状況が繰り返され，結果としてリンク1とリンク2を選択する交通量は周期的に振動する．この振動の周期は，経路の距離の差や需要のボトルネック容量に対する超過の程度によって変化する．

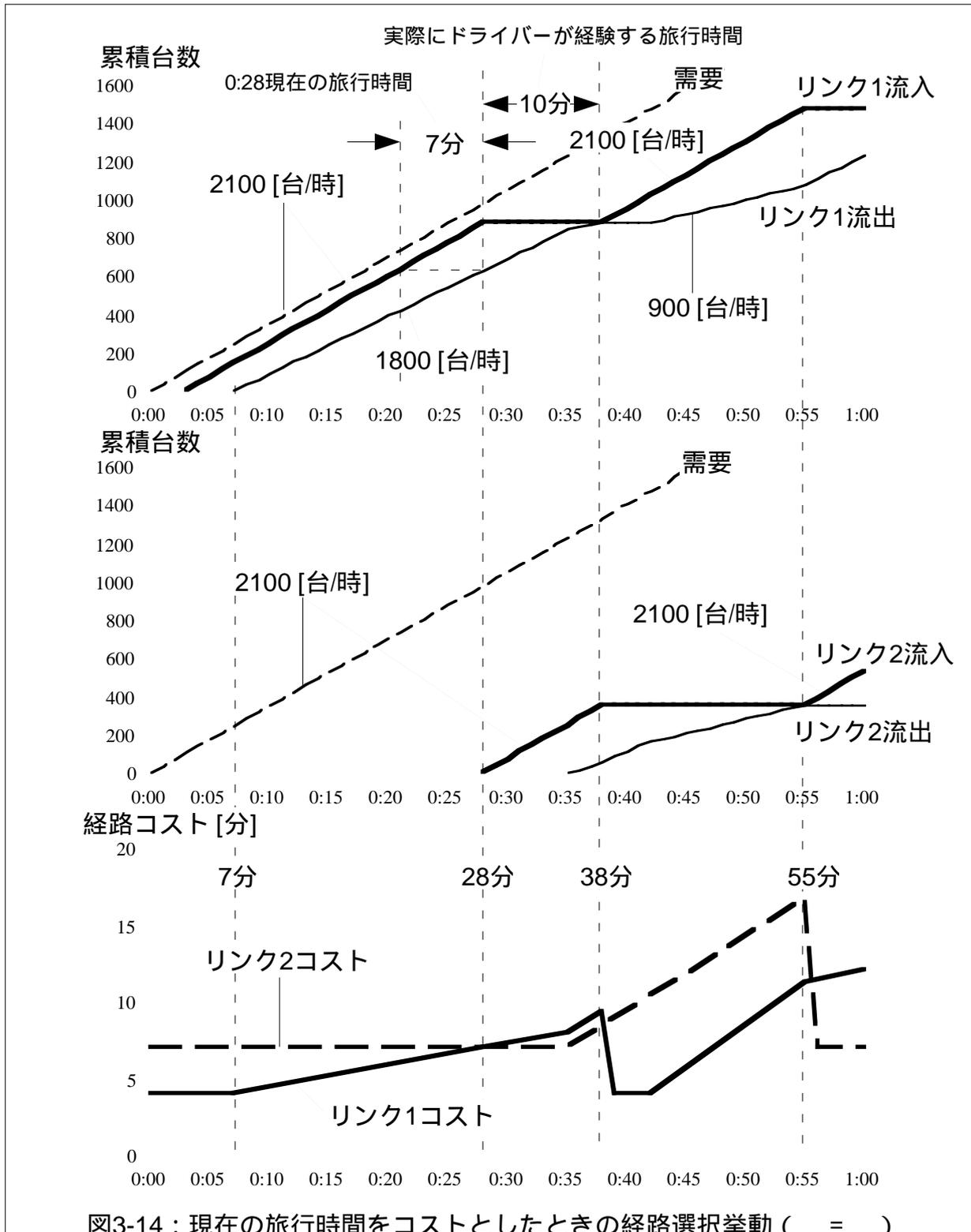
現在の旅行時間をもとに経路選択を行う場合，ドライバーが実際に経験する旅行時間は，渋滞の成長過程では現在のものより長くなり，逆に解消過程では短くなる．同様の現象が首都高速道路などで観測されており⁶²，この仮定が現実的であることを裏付けている．

本モデルではロジット式の確率選択を仮定しているが，感度パラメータ θ が大きい場合はここで示した $\theta = 1$ の挙動に近づき， θ が小さくなるにつれ長い振動周期を示すようになる．また，経路コストを一定の間隔で更新しているが，上記の理論的な挙動を再現するためには，この更新間隔をリンクの旅行時間に比べて十分短くする必要がある．仮に更新間隔を長くすると，現在の旅行時間が短い経路に「余分に」流入する交通量が多くなってしまいうため，旅行時間が再び逆転するまでの時間が長くなり，振動の周期が増加する割合が増えると考えられる．逆に十分短い更新間隔をさらに短くしても，モデルの示す挙動はかわらない．一般に街路では，交通は1～2分程度のサイクル長の信号で制御されるため，**数10秒～1分程度の更新間隔で十分短いといえる**．またリンクの旅行時間として，直前に通過した車両の旅行時間を採ると信号現示のタイミングによって大幅に変化してしまうので，更新間隔の

*）こちらも図3-13と同様に，渋滞の延伸の影響は省略した．

間に通過した車両の旅行時間の平均値をリンク旅行時間としている。



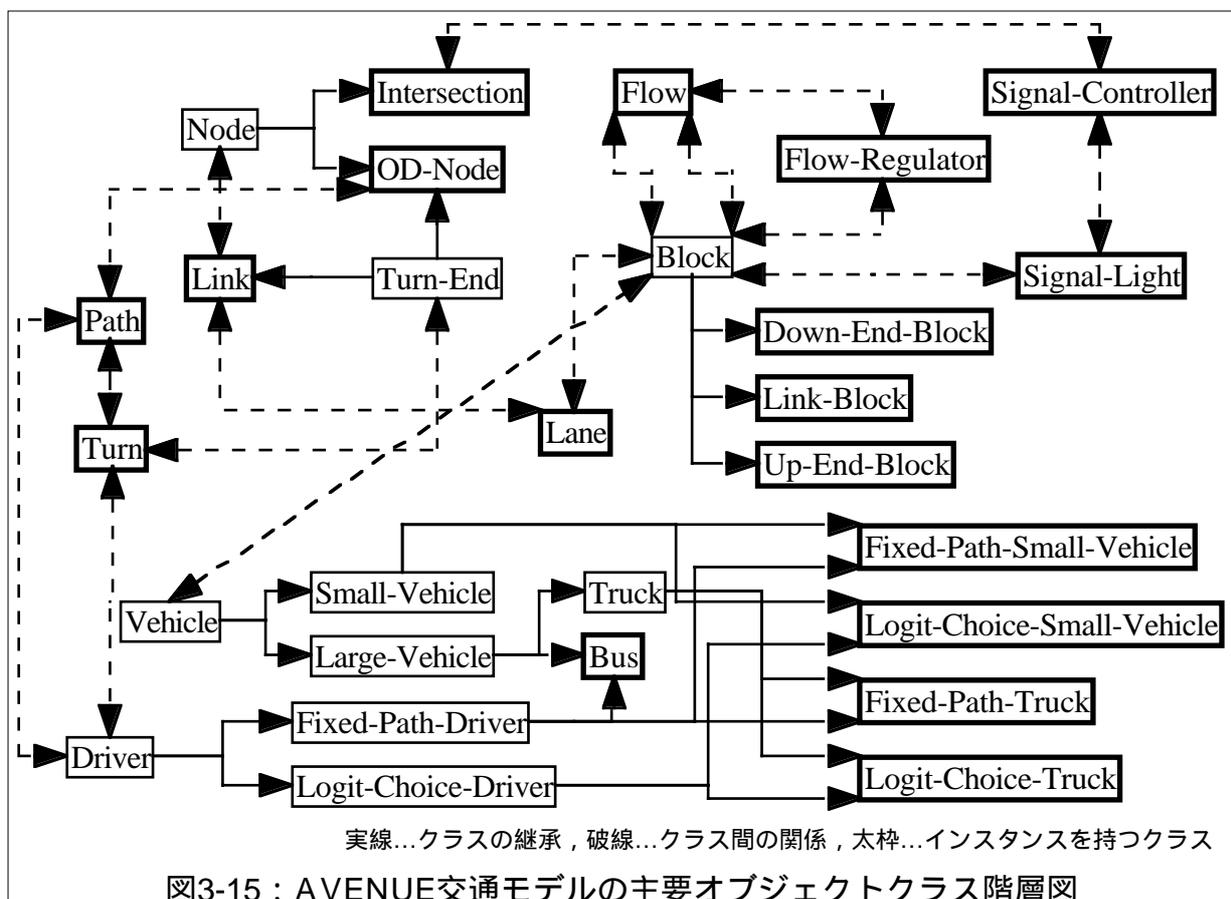


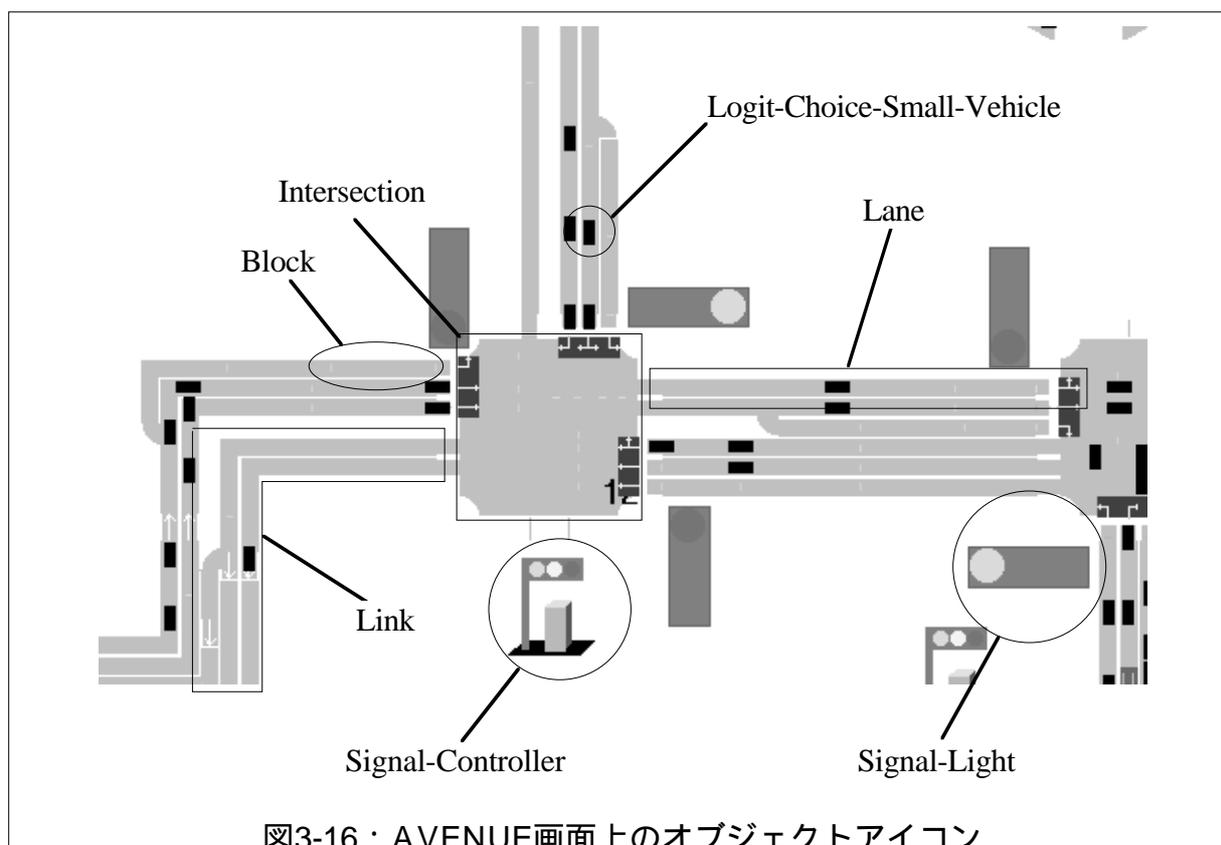
3.4 オブジェクト指向による交通モデルの記述

オブジェクト指向プログラミングはその記述力の柔軟性，メンテナンスや拡張の容易さなどから，近年では主流になりつつあるプログラム開発の方法論である．クラス継承，カプセル化，ポリモーフィズムといった，オブジェクト指向プログラミングで用いられる基本的な概念についてはここでは紹介しないが，数多くの入門書，解説書が出版されているので，別途参照されたい．参考文献に著名なオブジェクト指向開発論の解説書をあげておく⁶³⁶⁴．

図3-15にAVENUEのネットワーク交通モデルを構成する主要なオブジェクトクラスの階層図を示す．実線の矢印はクラス階層の継承を表し，点線の矢印はクラス間に定義された関係を意味している．関係名や関係の基数は省略した．太い枠で囲まれているクラスはインスタンスオブジェクトを持つクラスである．また，AVENUEの画面にアイコンとして表示されるオブジェクトを図3-16に例示しておく．

以下では，各主要クラスの属性，機能などについて概説する．





3.4.1 ノード・リンク (Node, Link)

道路ネットワークをグラフ表現したときの点と有向枝は、それぞれノードとリンクとしてクラス定義される。

ノードはそれに流出入するリンクとの関係を持つ。ノードのサブクラスには交差点 (Intersection) とODノード (OD-Node) の2つが定義される。ODノードはネットワーク端点やセントロイド、駐車場などの交通が発生・集中するノードで、交通量の発生パターンを属性として持つ。

リンクは上流ノードと下流ノードとの関係を持ち、長さ、レーン数、右左折専用ポケット長、容量、停止線部飽和交通流率、自由流速度、ジャム密度などの属性を持つ。また後述するレーンとの関係も記述される。

リンクとODノードは次に述べるターン端点のサブクラスでもある。これはリンク・ターングラフに変形したときに、どちらもターンの始点・終点になりうるためである。

3.4.2 経路・ターン・ターン端点 (Path, Turn, Turn-End)

AVENUEの交通モデルでは経路がオブジェクトとして作成される。経路はターンのリストとして表現され、その起終点となるODノードと関係を持つ。

ターンとターン端点はリンク - ターングラフにおける枝と点に相当する。ターンはその始点と終点になるターン端点と関係を持ち、ターン方向のラベルを属性として持つ。ターン端点はノード - リンクグラフでのODノードとリンクに対応する。

3.4.3 レーン (Lane)

レーンは実際の道路上での車線と同じもので、右左折専用ポケットも一つのレーンオブジェクトとして表現される。レーンはそれが属するリンクおよびそのレーン上のブロックとの関係を持ち、長さや車線規制に関する情報の属性を持つ。

3.4.4 ブロック・フロー・フロー整流器 (Block, Flow, Flow-Regulator)

ブロックはハイブリッドブロック密度法の計算をおこなう主体となるオブジェクトである。その属性には計算で用いられるスキャンインタバル、ブロック長、ブロック臨界密度、ブロックジャム密度といったパラメータに関するもの、ブロック内車両密度のような状態量、ブロックに存在する車両のリストなどが定義される。

あるブロックの上流と下流ブロックの間にはフローオブジェクトが生成され、隣接するブロックどうしはフローを仲介して関係づけられる。フローには直上流 / 直下流か、斜め上流 / 斜め下流といったラベルが属性として与えられ、車線変更の挙動の再現に利用される。またブロック間交通量や補正交通量もフローの属性として表現される。

フロー整流器は、あるフローの状態を観測し、制御の対象となるブロックの流出容量を調整するオブジェクトである。対向直進交通による右折容量の低下や無信号交差点での合流、織り込み区間の合流などはこのオブジェクトを用いて表現する。

3.4.5 車両・ドライバー (Vehicle, Driver)

車両は目的地の情報を持ち、ブロック間を移動することでネットワーク上を流れるオブジェクトである。サブクラスには小型車両 (Small-Vehicle) と大型車両 (Large-Vehicle) があり、さらに大型車両はトラック (Truck) とバス (Bus) に分か

れる。車両の属性には、出発地、出発時間、目的地、車種、乗用車換算係数などが定義されている。

ドライバーは経路選択をおこなうためのオブジェクトで、経路選択基準によって固定経路ドライバー（Fixed-Path-Driver）と確率選択ドライバー（Logit-Choice-Driver）にわけられる。それぞれのドライバーがコストや経路選択基準に関する情報を持ち、選択した経路に関係づけられている。

実際にインスタンスを生成するクラスは車両とドライバーからの多重継承を受けしており、確率選択乗用車（Logit-Choice-Small-Vehicle）や固定経路乗用車（Fixed-Path-Small-Vehicle）など細分化されている。

3.4.6 信号制御機・信号灯器（Signal-Controller, Signal-Light）

信号制御機はそれが設置される交差点、およびその交差点に流入するリンクの下流端に設置される信号灯器との関係を持つ。信号制御機の属性にはサイクル長、絶対オフセット、相対オフセットの基準交差点のほか、信号現示（Signal-Phase）オブジェクトのリストも定義される。この中にある信号現示の種類に従って、スプリット時間ごとに信号灯器の表示を変更する。

信号灯器は交通流を制御する断面をふくむ位置にあるブロックと関係を持つ。自信の表示状態が信号制御機によって変更されると、それに従ってブロックの流出方向のパーミッションを変更する。

3.5 システムの概要

AVENUEのプログラムプラットフォームには、米Gensym社のG2⁶⁵という市販の汎用エキスパートシステムツールを採用している。これは通常のプロダクションルールによる知識表現だけでなく、オブジェクト指向プログラミング環境を備えており、またPascal風の手続き型言語による記述も可能である。さらに非常に洗練されたGUIを簡単に構築する環境も提供されている。これにより、効率的なプログラム開発が可能になるだけでなく、アルゴリズムのプロトタイプを事前に作成し、細かな仕様を決定していくプロトタイプング手法を適用することができるようになる。実際、本研究でのシミュレーションシステム開発において、エキスパートシステムのルールによる推論の機能はほとんど用いることはなく、専らGUI構築ツールとしてこのG2というシステムを用いている。

しかしながら、FORTRANやC言語、C++といったコンパイラ言語でシステムを開発するのに比べて、エキスパートシステムという「重い」システムがアプリケーションのベースにあるため、実行効率が犠牲にされるというトレードオフも存在する。本研究では開発に割かれた期間や人数での制約から、開発効率を重視したため*、シミュレーションの実行時間が実時間よりも「かなり」遅くなる場合もある**。

システム構成の概要を図3-17に示す。システムの中核をなすのはG2が稼働するUNIXワークステーション、またはWindows-NTワークステーションである。

シミュレーションデータの入力補助装置として、ディジタイザを使った道路の座標入力システム***やデジタル道路地図のデータを利用したシステムなどが考えられる。レーン構成やリンク容量などの足りないデータは、GUIを通してシステム上で入力する。またデータファイルからの一括入力も可能である。

シミュレーションの出力結果はファイルに記録される。現在のシステム構成ではこれをコンピュータネットワークを通してパソコンに転送し、ワープロや表計算ソフトを用いて報告書などのドキュメント作成をおこなっている。

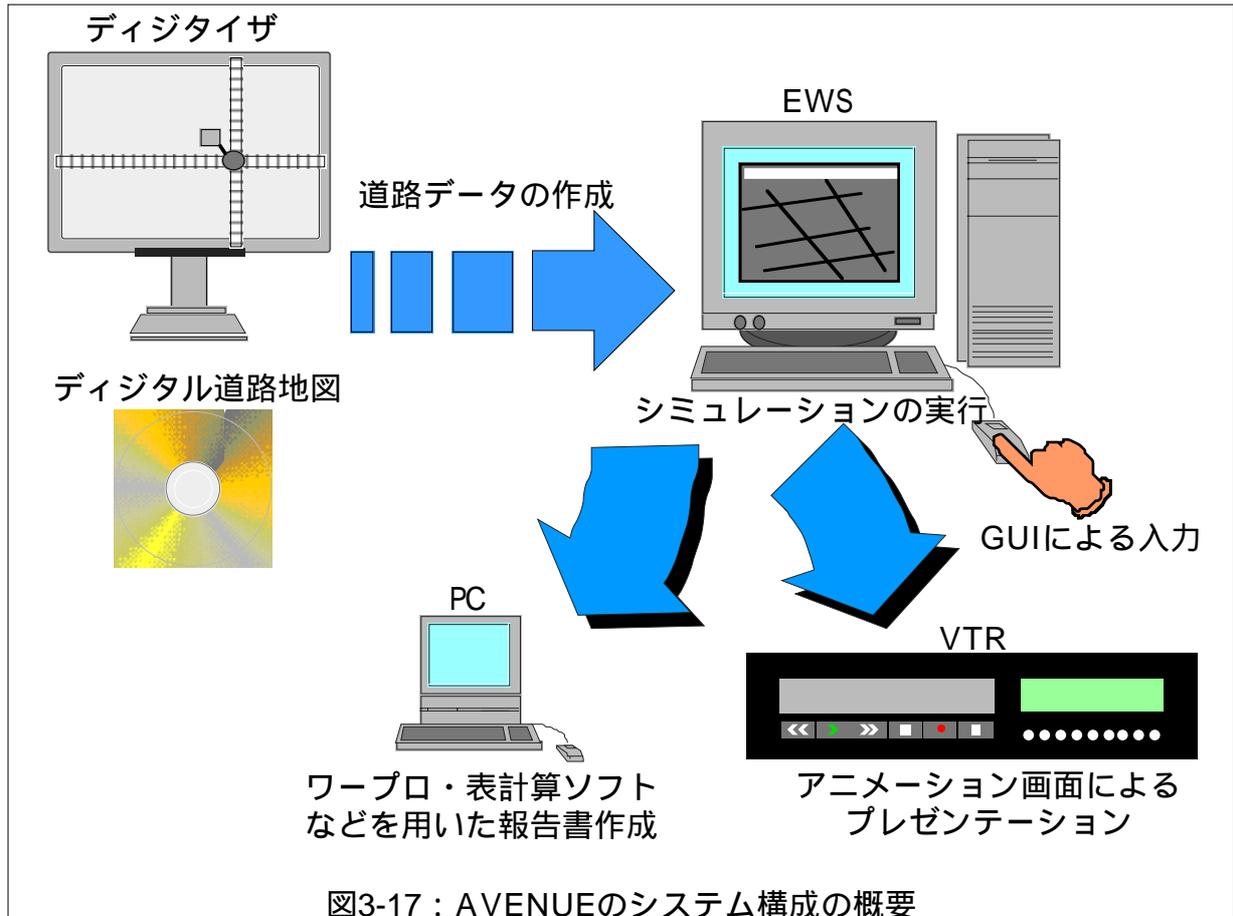
さらにシミュレーション中の交通状況をアニメーション表示することが可能なので、これをダウンコンバータを通してVTRに録画し、プレゼンテーション用の資料としている。ただし実効速度が遅い場合はビデオコントローラを用いて、数秒に1

*）このような高度なGUIをもつシステムの開発でも、3人月の労力を要しただけだった。

**）もちろん作動する環境によって異なるが、第5章で紹介する豊田市ネットワークを例にとると、SUN SPARC Station 2 上で3時間のシミュレーションにおよそ15時間を要した。

***）千葉工業大学の赤羽研究室でプロトタイプが制作された。

コマの割合でコマ取り録画している。



第4章 モデルの理論的検証

本章では、第3章で述べたAVENUEのネットワーク交通モデルの基本的な挙動を、簡単なネットワークに適用して確認すると同時に、理論値と比較してその性能を考察する。検証実験は、1)リンク下流端での飽和交通流率が正しく再現されているか、2)リンク上の密度分布の変化の様子が設定されたQ-K曲線に従ったものになっているか、3)リンクをこえて上流側に渋滞が正しい速度で延伸するか、4)信号交差点での遅れ時間が表現されているか、5)対向直進交通によって右折容量が低下するか、6)経路情報に従って確率的に経路選択をおこなっているか、の6つの項目についておこなっている。以下にそれぞれの検証実験について述べる。

4.1 リンク下流端での飽和交通流率の検証

シミュレーションモデルの基本的な性能として、まず設定された飽和交通流率でリンクから交通量が流出していることを保証する必要がある。簡単なネットワークを用いて、この検証をおこなった。

4.1.1 シミュレーションの設定（検証1-1，1-2）

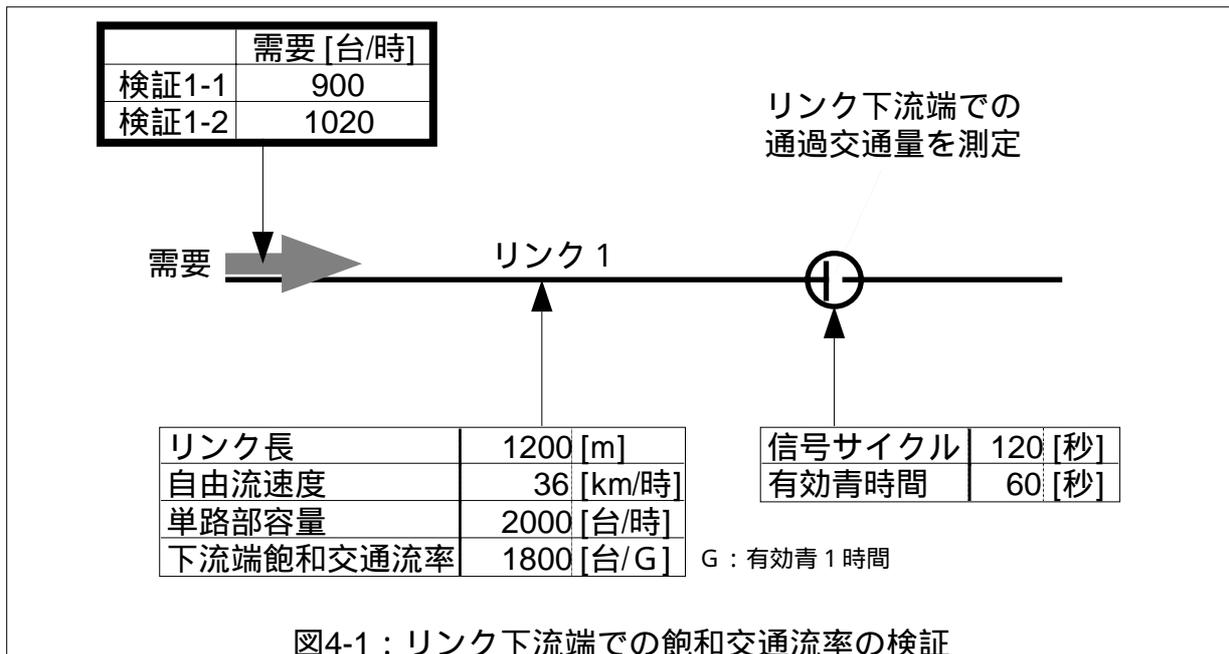
図4-1に示されるネットワークは観測の対象となる1本のリンク（リンク1）と、その下流の信号交差点から構成されている。リンク1の下流端の飽和交通流率には1800 [台/有効青1時間] が設定されているが、信号交差点により

$$1800 \cdot 60 / 120 = 900 \text{ [台/時]}$$

の容量となる。

このネットワークに対して、与える交通需要を変えて2通りの検証実験をおこなう。シミュレーションは1分ごとにリンクの流出交通量を記録し、交通量累積図から得られる理論値と交通量累積図を用いて比較する。なお、到着のランダム性を排除し、一様到着に近づけるため、需要は1分ごとに与えている。

検証1-1では900 [台/時] の需要を与える。飽和交通流率が正しく再現されていれば、リンク1の下流端の容量は需要に等しいため渋滞は発生しない。すなわち累積図に



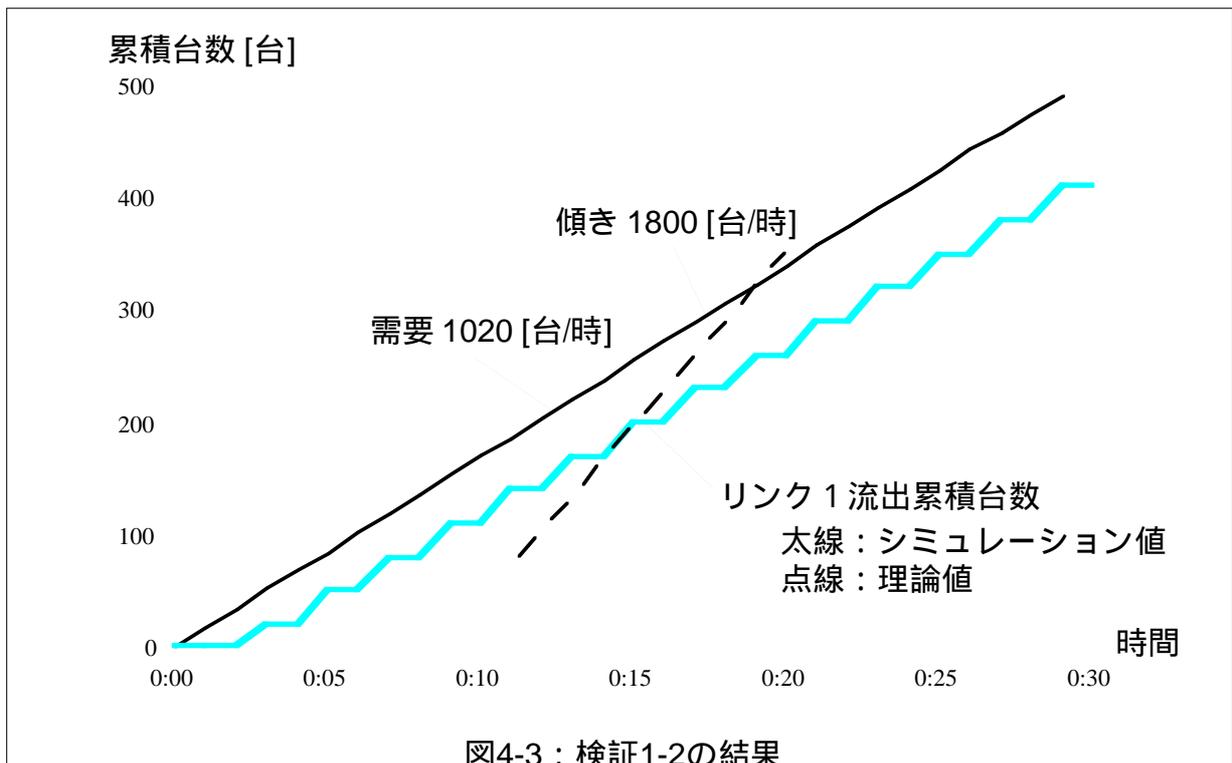
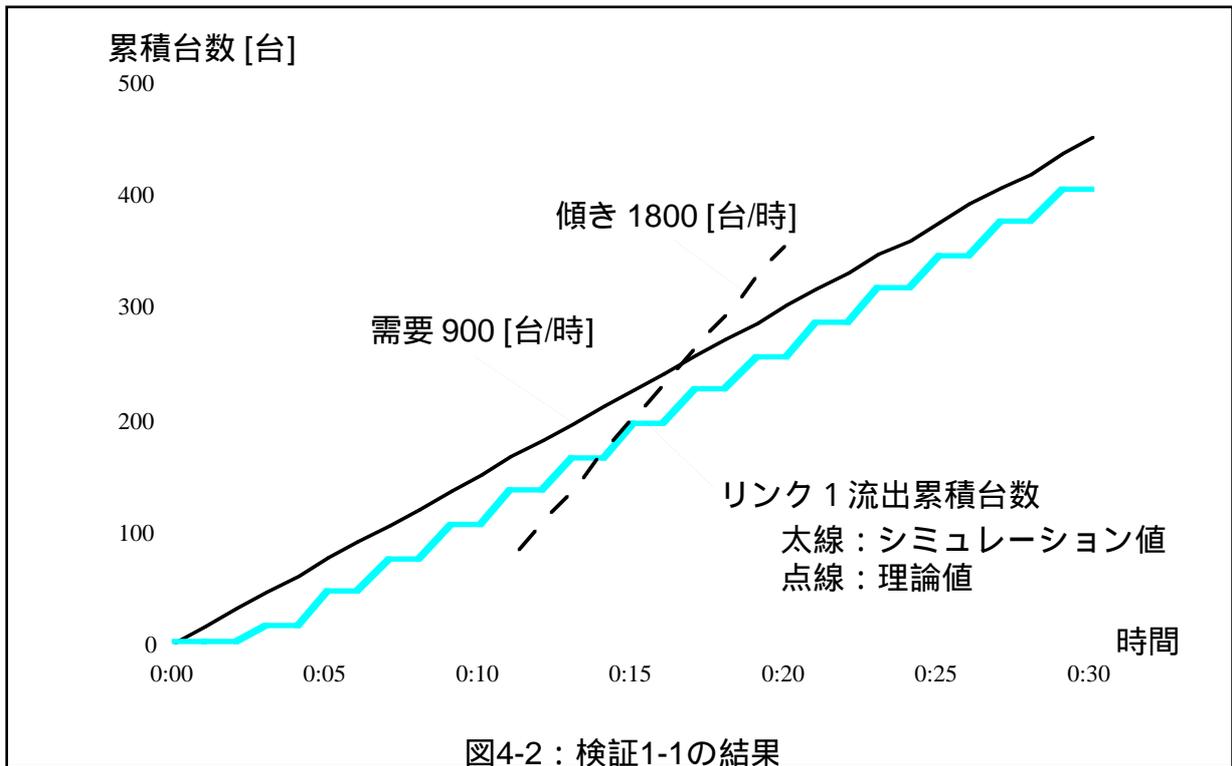
において、リンク流入の累積の傾きとリンク流出の平均の傾きが等しくならなければならない。

検証1-2ではリンク 1 の下流端の容量よりも大きい 1020 [台/時] の需要を与えている。ここでは設定した飽和交通流率以上の値で交通量が流出していないかどうかを確認する。

4.1.2 シミュレーション結果（検証1-1，1-2）

図4-2は検証1-1の結果を示した累積図である。青現示と赤現示が1分ごとに繰り返されるので、リンク 1 の流出量は階段状になっているが、青現示の間に流出しているときの傾きは1800 [台/時] となっており、飽和交通流率が正しく再現されていることがわかる。さらに流出累積台数の平均的な傾きは需要の傾き 900 [台/時] と等しいので、信号制御が正しく行われていることがわかる。

図4-3は同様に検証1-2の結果を示している。ここでもシミュレーション結果は交通量累積図から得られる理論値と一致しており、与えられた飽和交通流率以上の値で流出していないことがわかる。

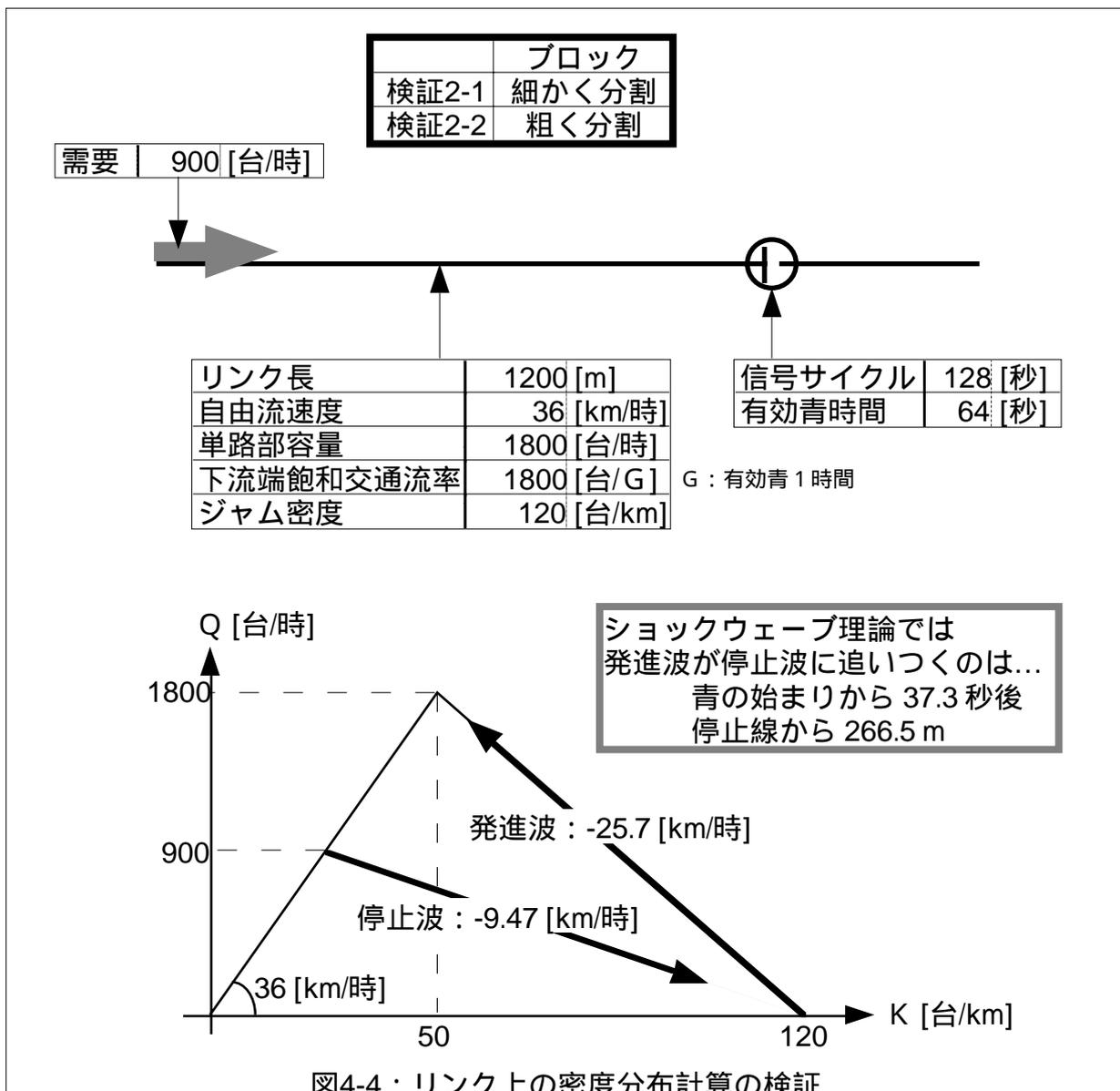


4.2 リンク上の密度分布計算の検証

ブロック密度法による交通密度の改訂が、設定されたQ-K曲線に従っているかどうか、リンク上の密度分布の変化を観測し、停止波と発進波の速度をショックウェーブ理論から得られる理論値と比較することで検証する。

4.2.1 シミュレーションの設定（検証2-1，2-2）

図4-4に示される、信号交差点を含むネットワークにおいて検証実験をおこなった。需要は信号交差点部の容量よりも小さく設定されているので、1回の信号サイクル

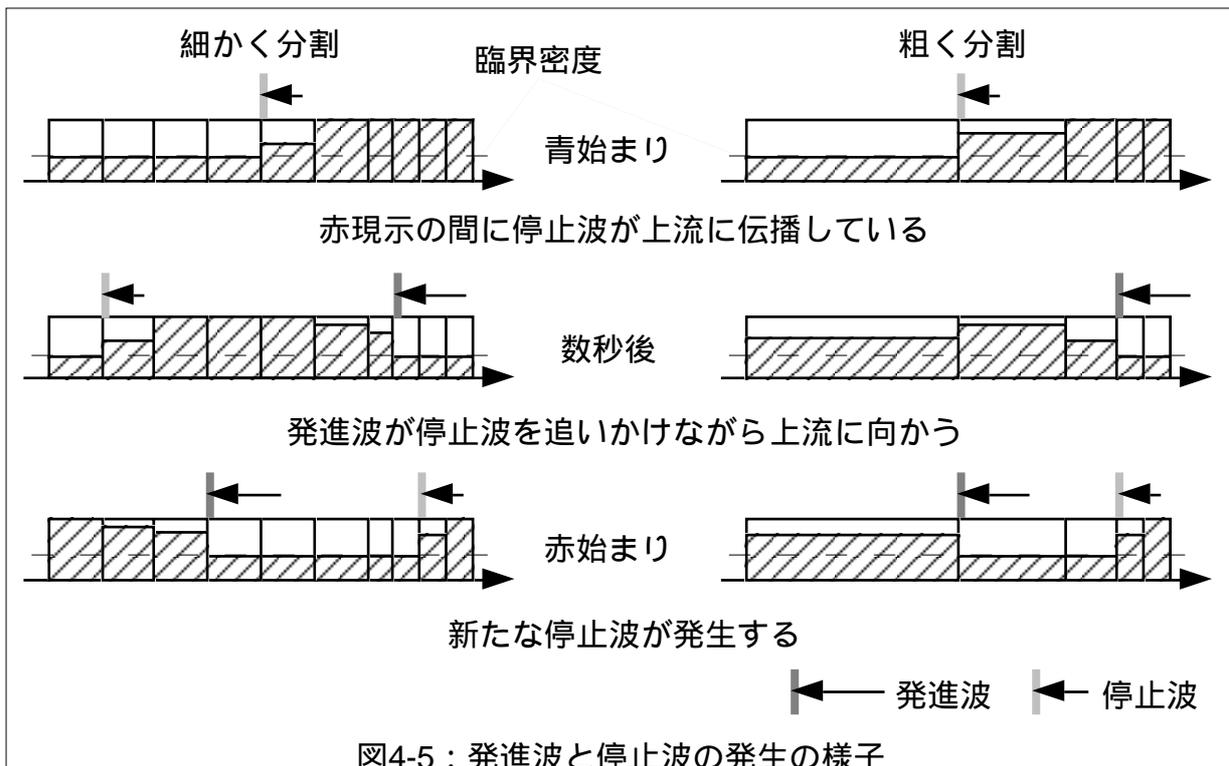


のうちに、停止波が発進波に追いつかれて消滅するという現象を繰り返す。

設定されたQ-K曲線より求められる停止波と発進波の伝播速度の理論値は、それぞれ -9.47 [km/時] および -25.7 [km/時] であり、発進波が停止波に追いつくのは、青現示が始まってから 37.3 秒後で、停止線から 266.5m の位置であると計算される。

実験はブロックを最大 2 秒スキンの短いブロックで細かく分割した場合（検証 2-1）と、マルチスキンハイブリッドブロック密度法によって最大 16 秒スキンの長いブロックを混在させて粗く分割した場合（検証 2-2）の 2 通りについておこなった。

シミュレーションではリンク上の各ブロック内の密度を 16 秒ごとに記録し、発進波・停止波の伝播速度を確かめる。便宜上、発進波の速度は、ブロック内の車両密度が過飽和状態から変化して臨界密度を下回った時刻に、そのブロックの最後尾にウェーブが達したものと観測する。同様に停止波の速度は、ブロック内の車両密度が非飽和状態から変化して臨界密度を超えた時刻に、そのブロックの先頭にウェーブが達したものとする（図4-5）

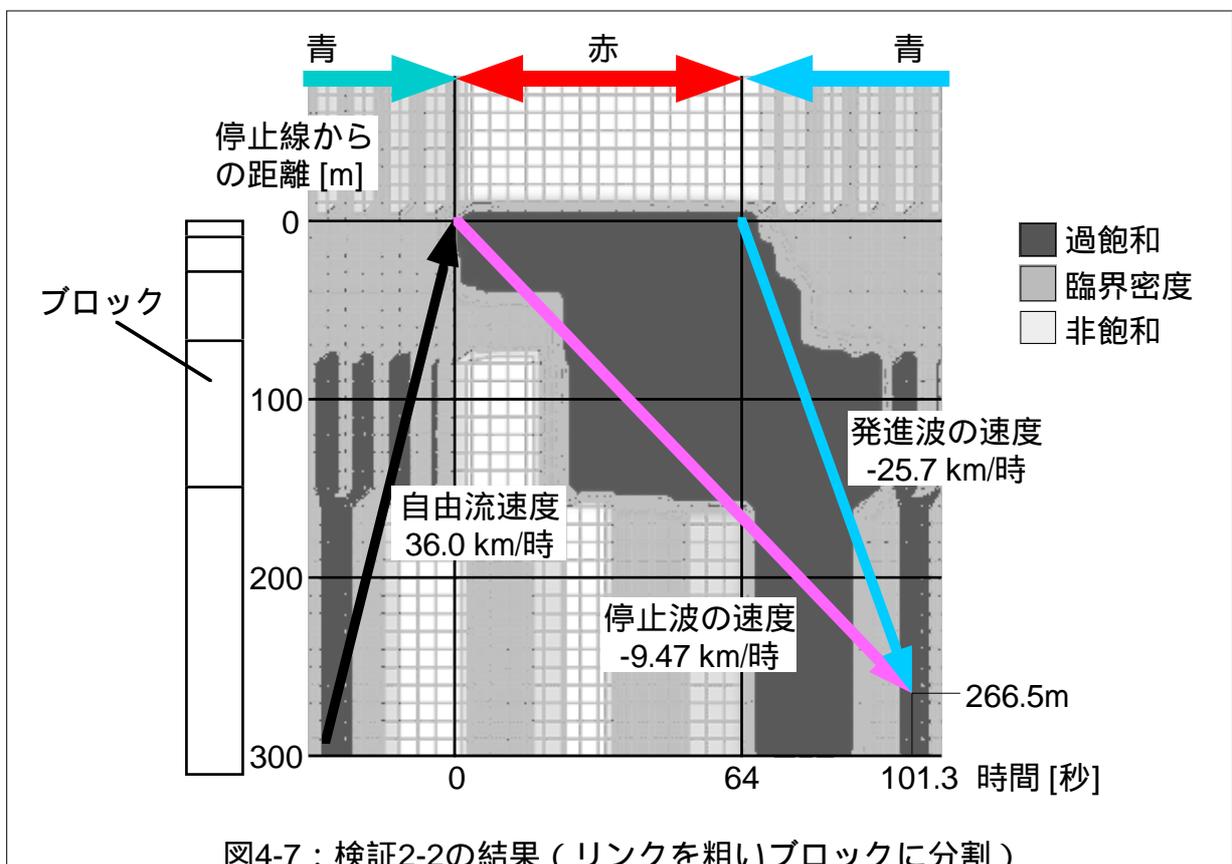
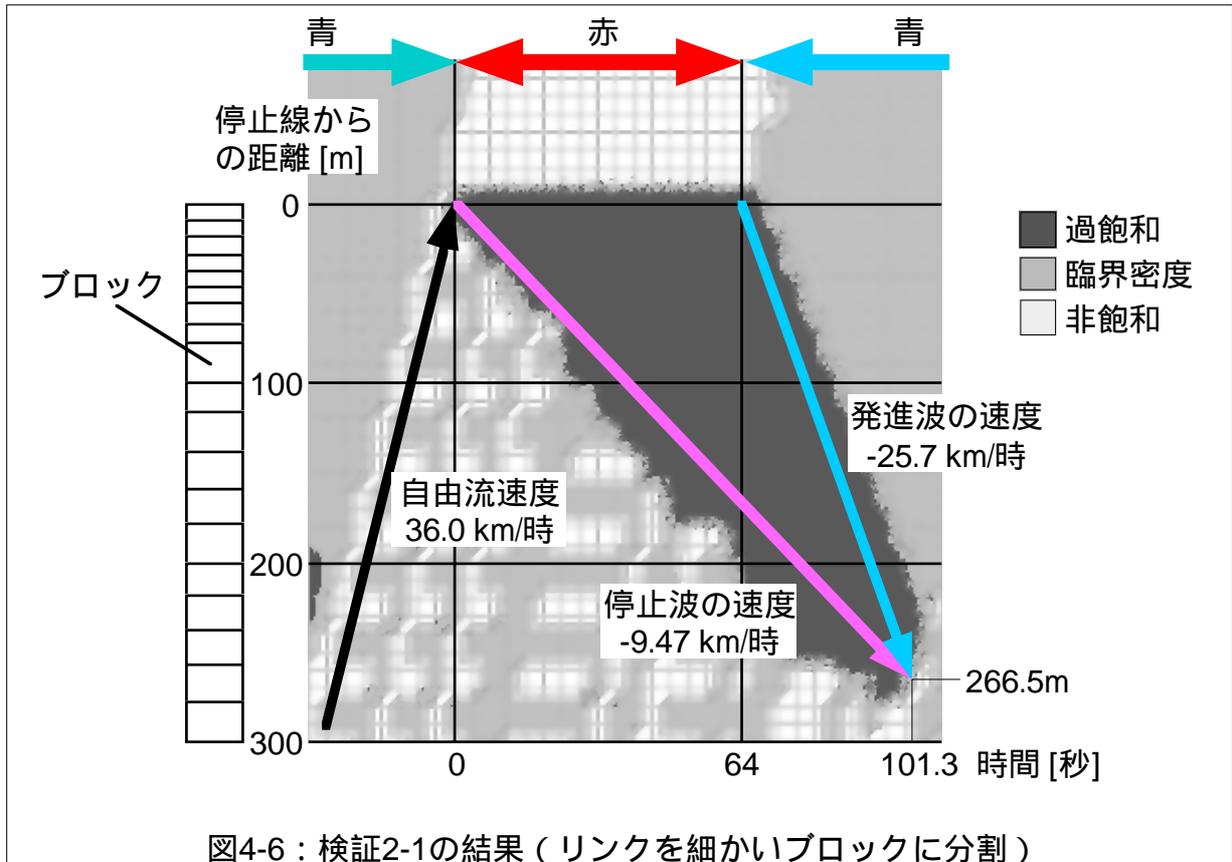


4.2.2 シミュレーション結果（検証2-1，2-2）

図4-6および図4-7に，それぞれ検証2-1と2-2の結果を示す．図は縦軸にリンク上の停止線からの距離を，横軸に時間をとったもので，1サイクルにおけるリンク上の密度分布を色分けしたものである．色が濃い区間ほど密度が高いことを意味しており，臨界密度の区間はちょうど中間の濃度の色で表されている．赤現示の始まった時点から停止波が上流に向かって伝播していき，同様に青現示が始まった時点から発進波が発生している．また参考のため，密度分布図の左にリンク上のブロックの位置と，ショックウェーブ理論により求められる停止波と発進波の軌跡を書き加えてある．

図4-6の細かく分割した場合には，理論値による停止波と発進波の軌跡で形成される三角形領域とシミュレーション結果の密度の高い区間の分布形がほぼ一致しており，設定されたQ-K曲線に従う密度管理がなされていることがわかる．シミュレーションの停止波の軌跡が若干理論値と一致しないのは，上流からの車両の到着がランダムなので，直線にならないためである．

図4-7の粗く分割した場合には，スキャンインタバルが長いブロックで密度が平滑化されてしまうため，シミュレーション結果のウェーブ軌跡を細かく追うことができない．しかしながら理論値による発進波が停止波に追いついた時点で，密度の高い区間が解消されていることから，この場合もある程度の再現性を確保しているといえる．



4.3 渋滞の上流リンクへの延伸の検証

シミュレーションにおいては、リンク上でQ-K曲線に従った密度管理がなされているだけではなく、渋滞の延伸・解消がリンクをこえて上流側に伝播しなければならない。本節ではこれについての検証をおこなう。

4.3.1 シミュレーションの設定（検証3-1，3-2，3-3，3-4）

図4-8でしめされるネットワークにおいて、ボトルネック容量より大きい交通需要を与え、各リンクの流入・流出交通量を1分ごとに記録する。ボトルネックのリンク2下流端から渋滞が延伸し、リンク2流入量、さらにはリンク1の流入交通量がボトルネック容量まで低下することを確認する。また、各リンク流入端で容量が低

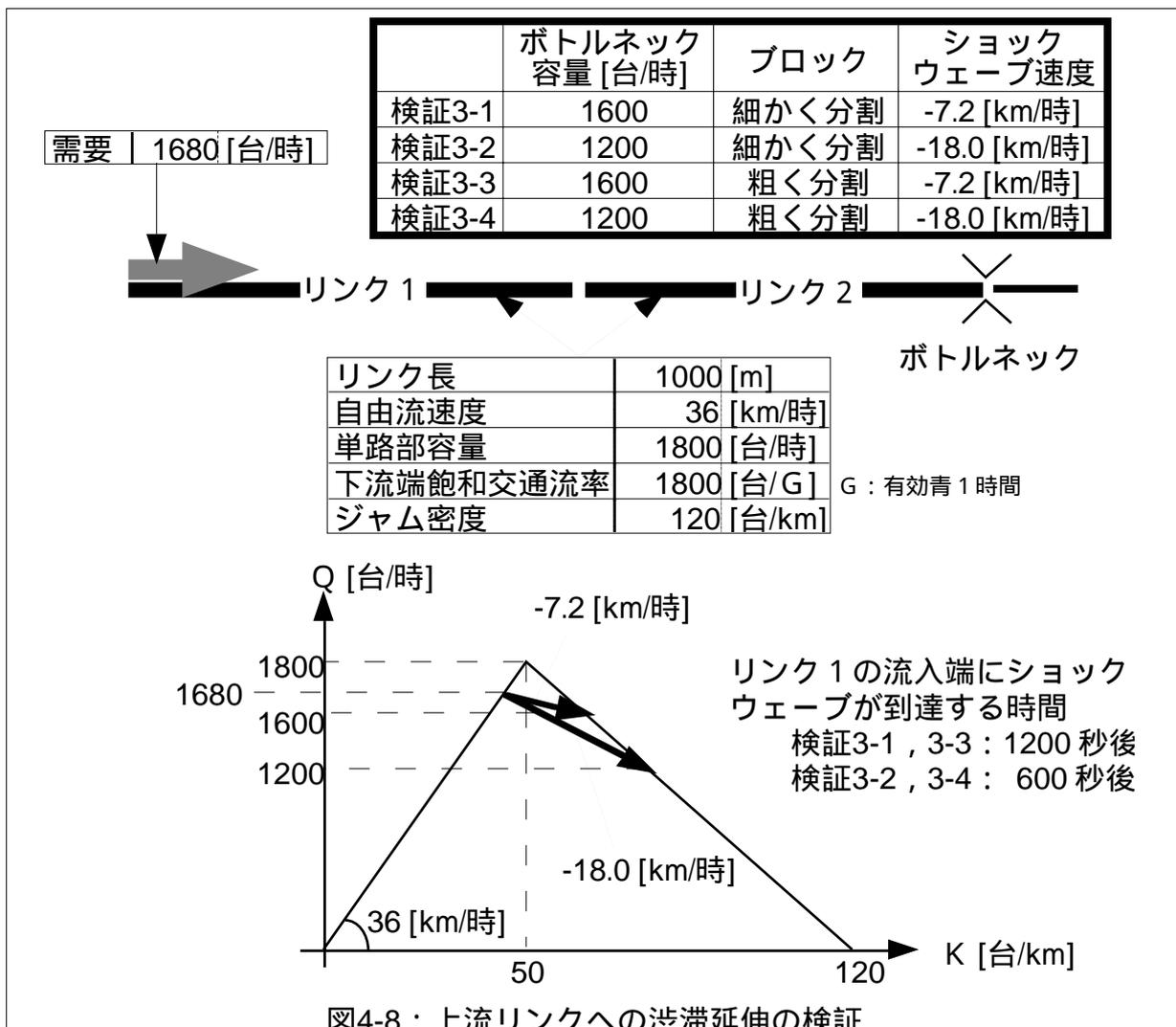


図4-8：上流リンクへの渋滞延伸の検証

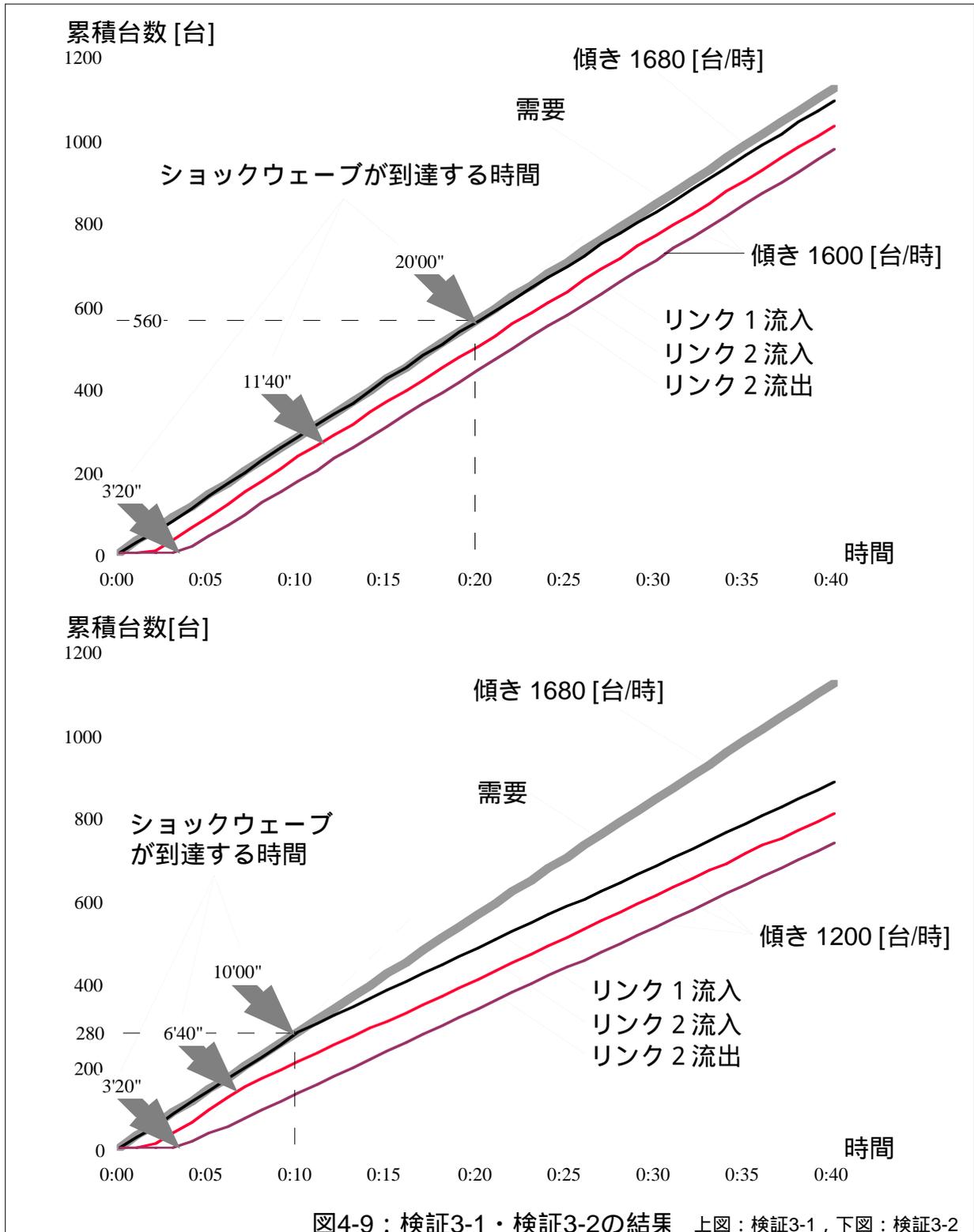
下する時刻とショックウェーブが到達する時刻が一致するかについても確認する。

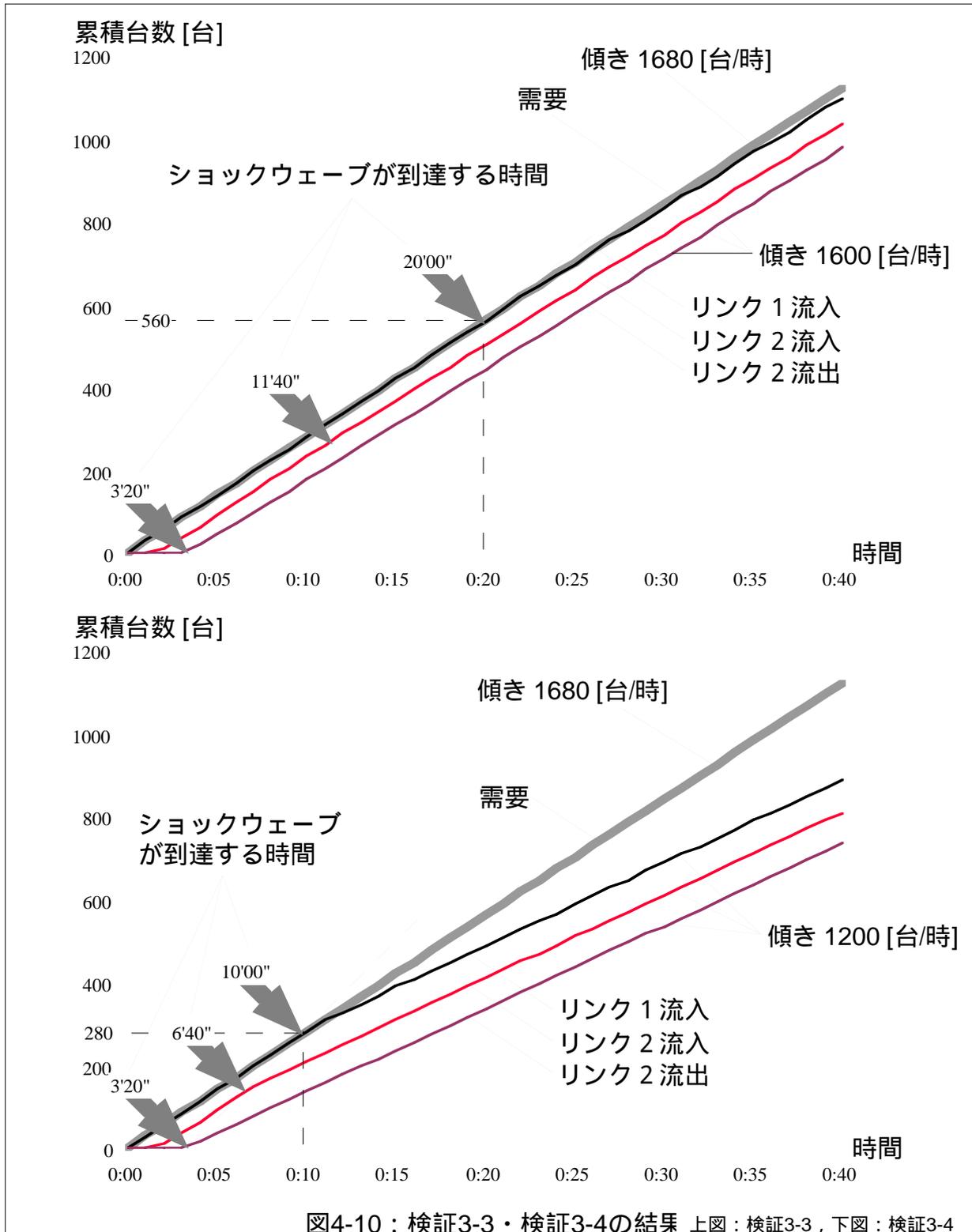
実験はボトルネック容量を変えておこない、ブロックへの分割のしかたが、最大2秒スキャンまでの細かい場合と、最大16秒スキャンまでの粗い場合とで、渋滞の延伸状況が異なるかについても調べる。ショックウェーブ理論より、ボトルネック容量が1600 [台/時]である設定3-1, 3-2では、ショックウェーブが-7.2 [km/時]の速度で上流に伝播し、最初に需要が与えられてから700秒後にリンク2上流端に、1200秒後にリンク1上流端に到達すると計算される。同様の計算より、ボトルネック容量が1200 [台/時]の設定3-2, 3-4ではショックウェーブ速度は-18.0 [km/時]で、400秒後にリンク2上流端に、600秒後にリンク1上流端に到達する。

4.3.2 シミュレーション結果 (検証3-1, 3-2, 3-3, 3-4)

図4-9は検証3-1および3-2の、ブロックへの分割が細かい場合の実験結果である。上のグラフでしめされる検証3-1では、ショックウェーブ理論による計算の通り、リンク2の流入累積の線は700秒後の0:11'40"で、またリンク1の流入累積の線は1200秒後の0:20で需要の流率から低下し、ボトルネックであるリンク2の流出の線と平行になる。また、交通流が最初にリンク2下流端に到達する0:3'20"と、それぞれのショックウェーブが到達した時点を結ぶと直線となり、一定の理論速度でリンクを超えて渋滞が延伸していくことが確認される。

図4-10は検証3-3および3-4の、ブロックの分割が粗い場合の実験結果である。この場合のグラフも、ブロックが細かい場合と同じ結果を示しており、渋滞の延伸状況の再現はブロックの分割の仕方を変えてもかわらず、理論値に等しいことを示している。





4.4 非飽和信号交差点での平均遅れの検証

街路においては遅れの大部分は過飽和の信号交差点で発生する．この場合の遅れは飽和交通流率の検証と渋滞延伸の検証より，交通量累積図から得られる理論値と等しくなることがわかる．しかしながら町中には非飽和状態の信号交差点もあるので，この場合の遅れの再現性もトリップ全体での旅行時間の再現性に影響する．本節ではWebsterによる平均遅れの式⁶⁶と比較して検証をおこなう．Websterの式はシミュレーションにより求められた実験式で，次式(9)で表される．

$$d = \frac{c(1-l)^2}{2(1-lx)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0.65 \left(\frac{c}{q^2}\right)^{1/3} x^{2.51} \quad (9)$$

ここで， d は流入交通量1台あたりの平均遅れ時間[秒]， c はサイクル長[秒]， l はスプリット， q は流入交通量[台/秒]， s は飽和交通流率[台/秒]， x は q/s であらわされる正規化交通量×スプリットである．

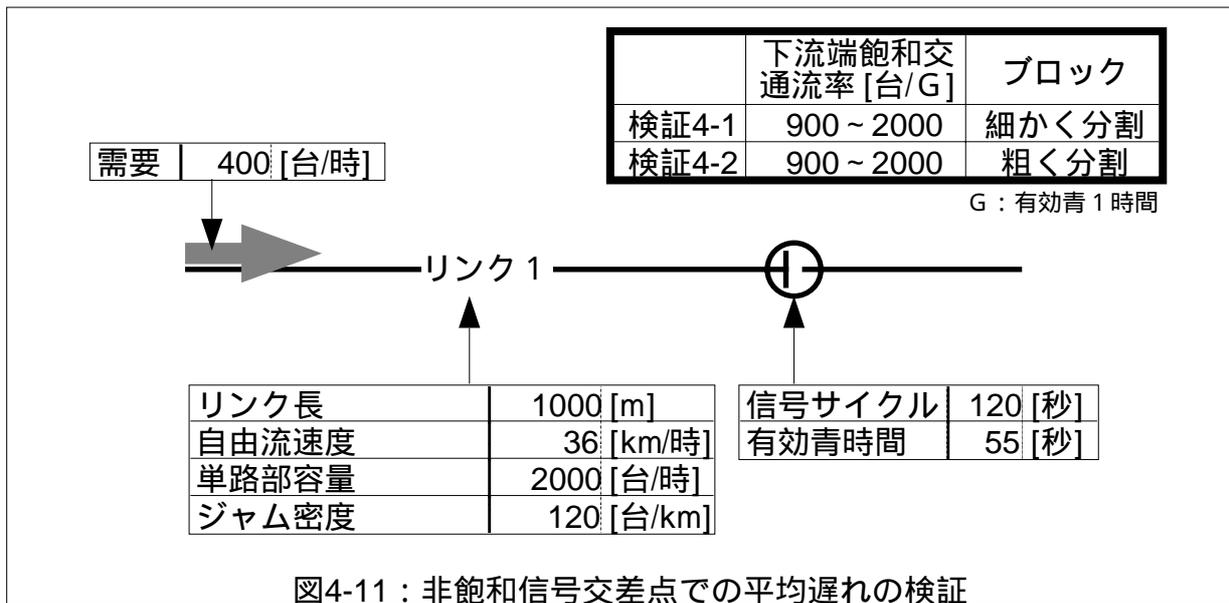
式(9)の第1項は一様到着の場合の遅れを示し，第2項はランダム到着での平均遅れ時間に相当する．第3項はシミュレーションによる修正項である． x が1に近づくとつれ，理論値は無限大になるため，近飽和状態での適用には注意を要する．

4.4.1 シミュレーションの設定(検証4-1, 4-2)

図4-11に示されるネットワークで，車両ごとの遅れ時間を記録し平均を求める．到着需要は1時間単位で指定しており，その間はランダム到着とする．ブロックの分割が最大2秒スキャンまでの細かい場合と，最大16秒スキャンまでの粗い場合とで，遅れにどのように影響するか，飽和交通流率を変化させることで交差点での飽和度を変え，Websterの式による平均遅れと比較する．

4.4.2 シミュレーション結果(検証4-1, 4-2)

図4-12は検証4-1でのブロックの分割が細かい場合の結果である．グラフの縦軸は遅れ時間を，横軸は交差点での飽和度であり，参考に飽和交通流率を付記している．グラフ中の点はシミュレーション値の平均遅れを表している．シミュレーション値は10サイクルにわたって観測した車両の遅れを平均したものである．また，点線は

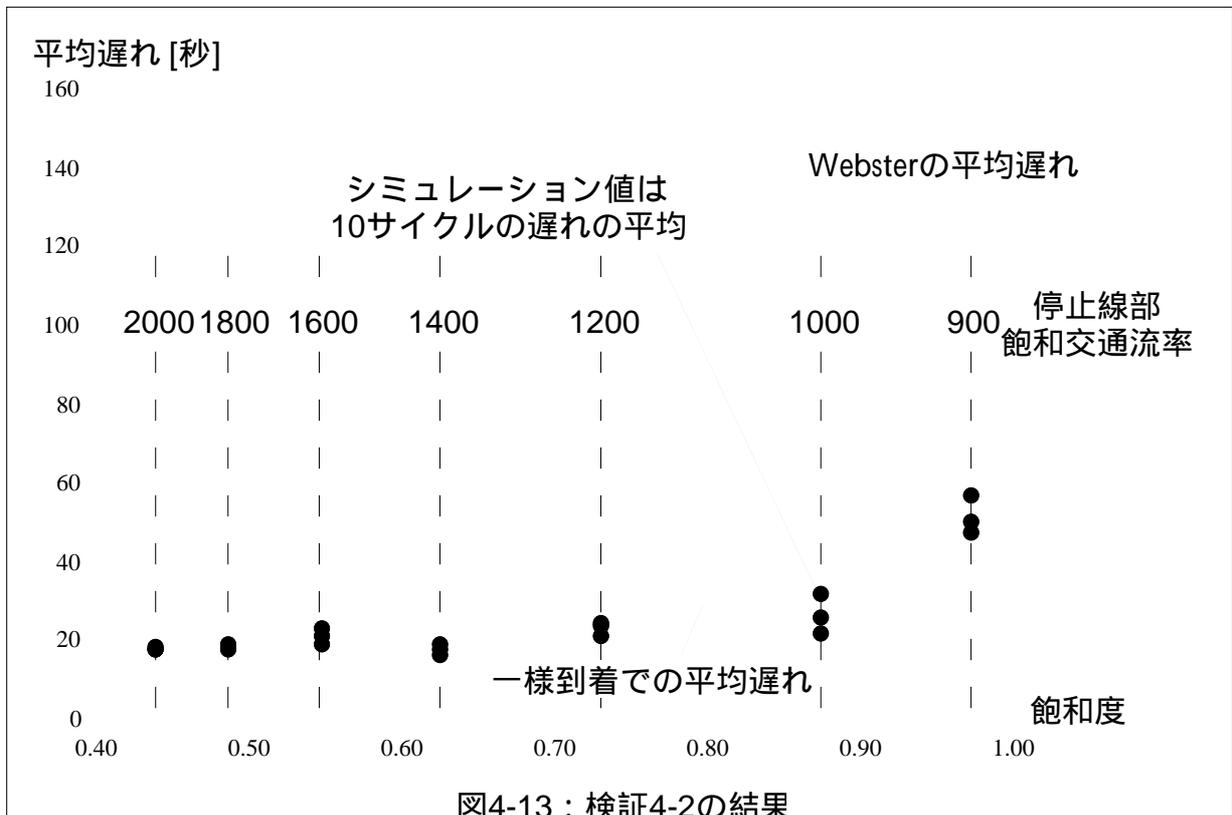
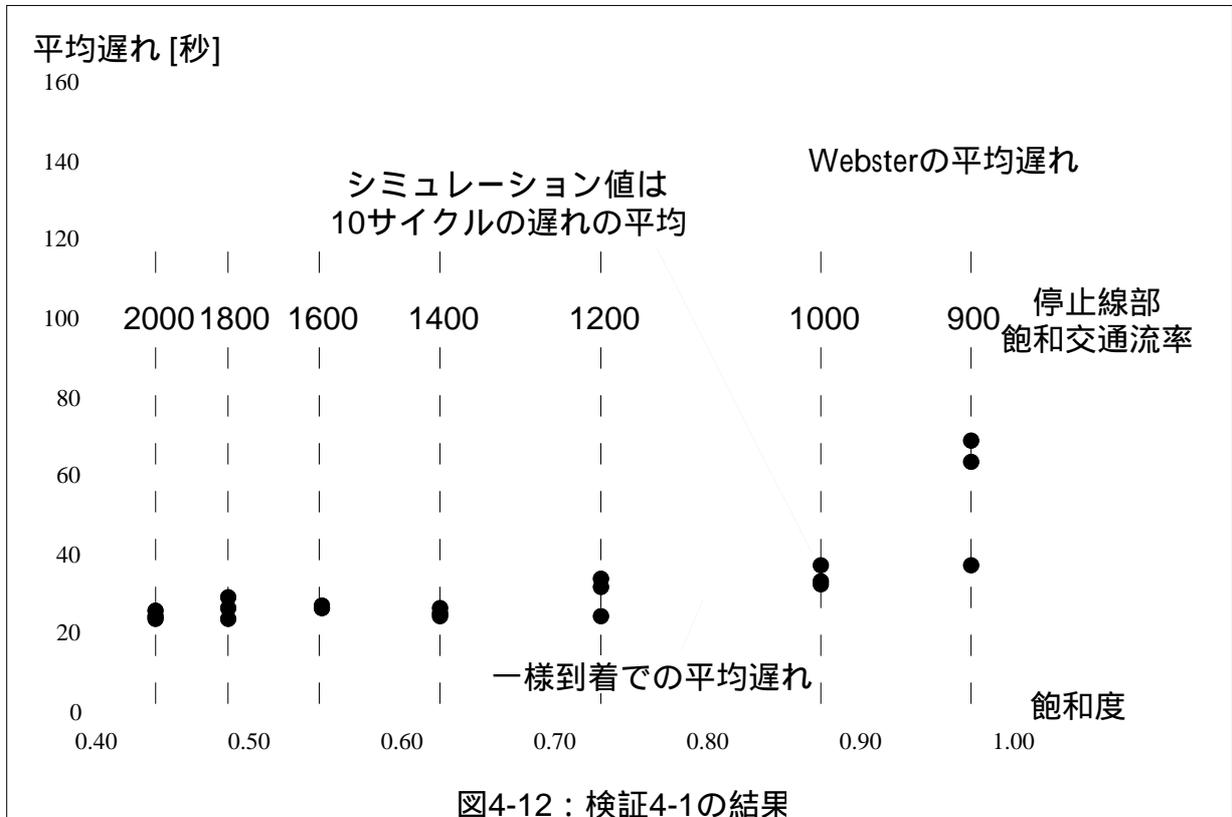


一様到着の場合の遅れ（Websterの式の第1項），実線はランダム到着の場合の遅れを意味している．

この場合は，シミュレーション値はランダム到着と一様到着の理論値の間に分布する．ランダム到着の遅れと一致しない理由としては，システムで使用しているランダム関数が疑似ランダム関数であるため，到着パターンが仮定と異なる可能性があることや，たとえ1秒間に数台の車両が到着しても，ブロックに1秒に流入できる交通量が0.556 [台/秒]（= 2000 [台/時]）に制限されるので，ランダム性がならされてしまうためと考えられる．また，Websterの式は無限に観測を続けた場合の平均遅れと考えられ，近飽和状態では無限大に近づくため，シミュレーションによる数回の実験ではそれを下回ることはやむをえない．

図4-13は検証4-2でのブロックの分割が粗い場合の結果である．この場合は，シミュレーションでの遅れは一様到着の遅れに近くに分布する．これはリンクの上流端でブロックのスキャンインターバル（=ブロックの長さ）が16秒まで長くなっており，上流でのランダム到着が16秒ごとにまとめられ，一様到着に近づいてしまうためである．また飽和度が小さい場合には理論値を下回ることもあるが，これは最上流のブロックに車両が流入するタイミングで，その車両の旅行時間が数秒から10数秒程度短くなってしまいうため，遅れが少なくなったものと考えられる．

*) たとえば16秒スキャンのブロックに15秒目に流入した車両は，次の16秒目にはその下流ブロックに流出していくため，ここで15秒旅行時間が短縮される．自由流状態ではリンクの最上流ブロックで，最大（そのブロックのスキャンインターバル - 1）秒の旅行時間の短縮が発生する．



4.5 対向直進交通による右折容量の逓減

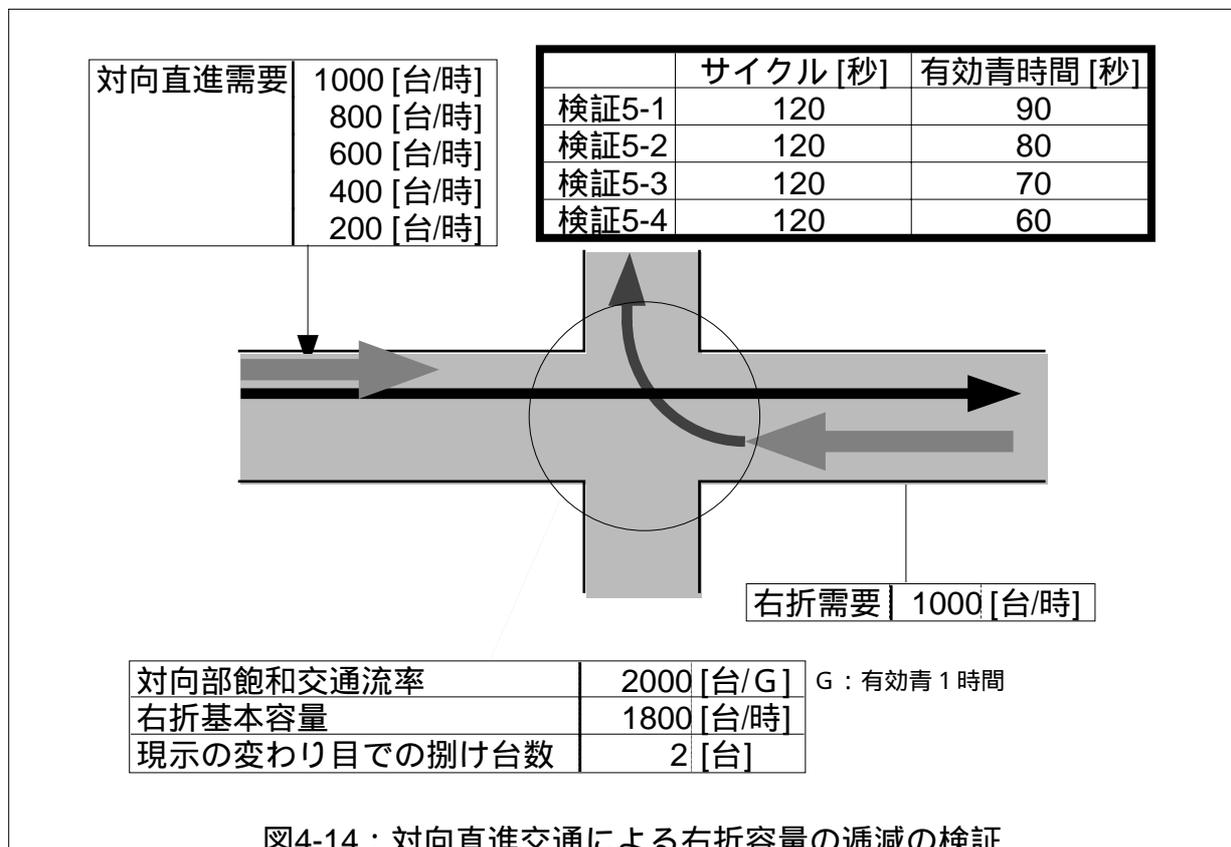
街路においては右折車両が対向直進交通のギャップを待っているため、渋滞の原因となっている状態が頻繁に見られる。本節では、この場合の右折容量の逓減が再現されるかについての検証をおこなう。

4.5.1 シミュレーションの設定（検証5-1，5-2，5-3，5-4）

図4-14に示される単独信号交差点において、スプリットを変化させてシミュレーションをおこなう。各ケースでは対向直進交通量をさまざまな値に設定し、右折容量がどのように変化するかを確認する。また理論値として第3章での式(7)を用い、比較をおこなった。

4.5.2 シミュレーション結果（検証5-1，5-2，5-3，5-4）

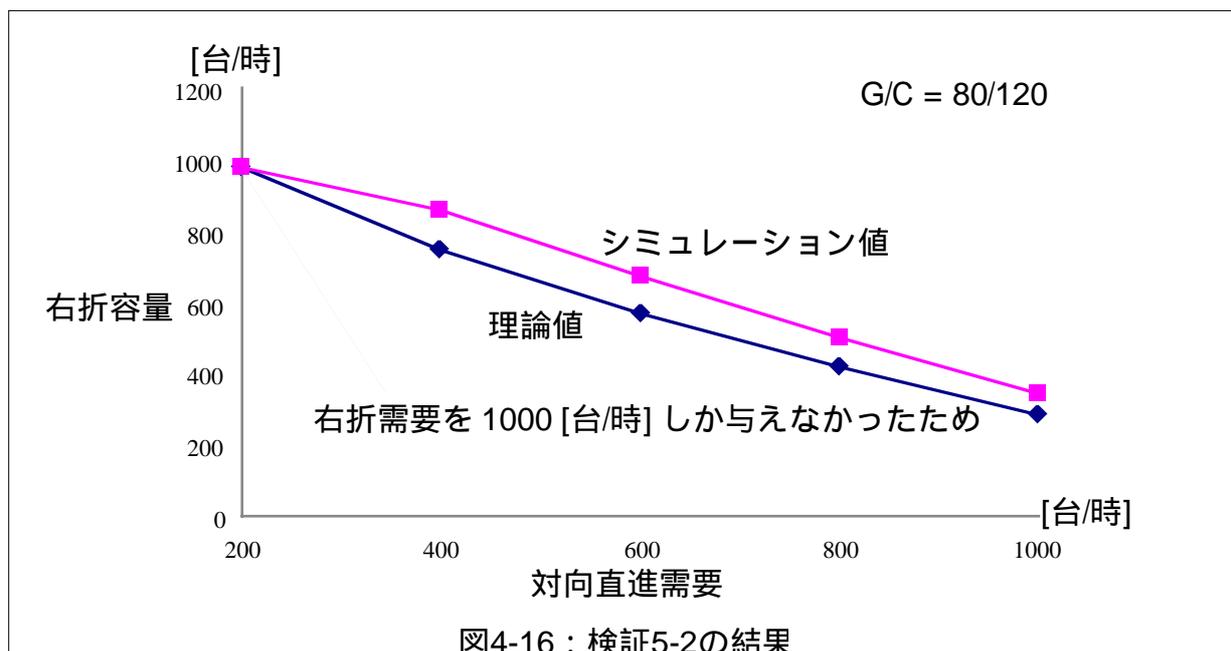
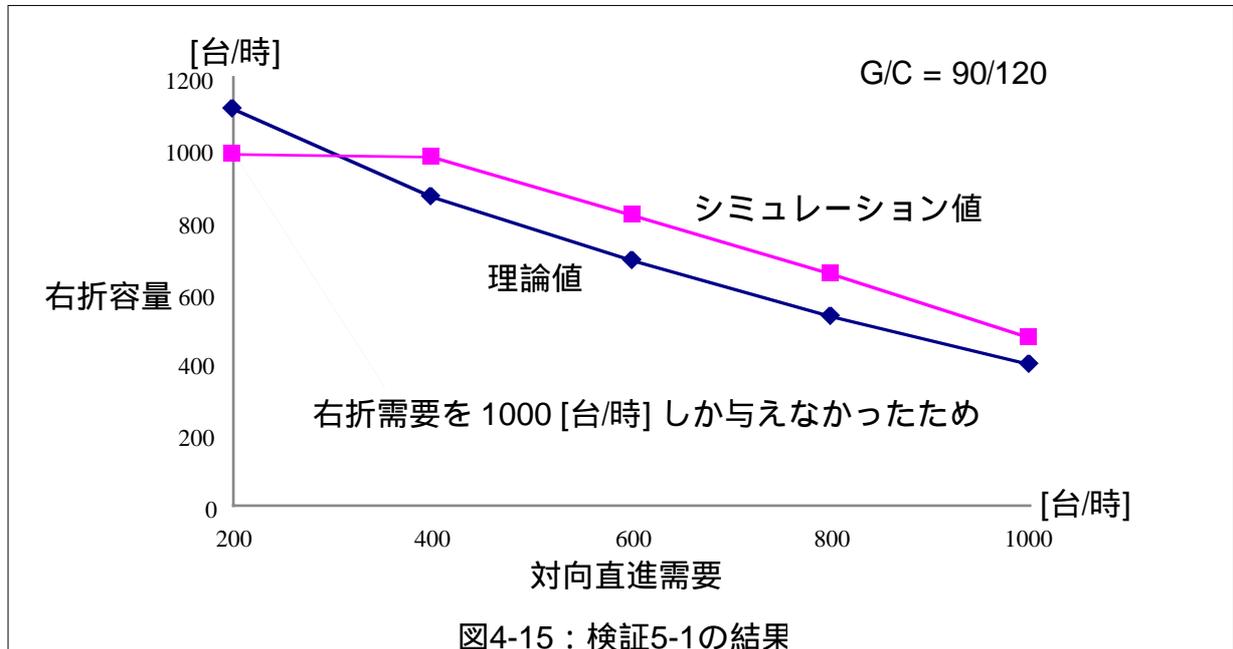
図4-15～4-18は、それぞれスプリットの設定が90/120，80/120，70/120および

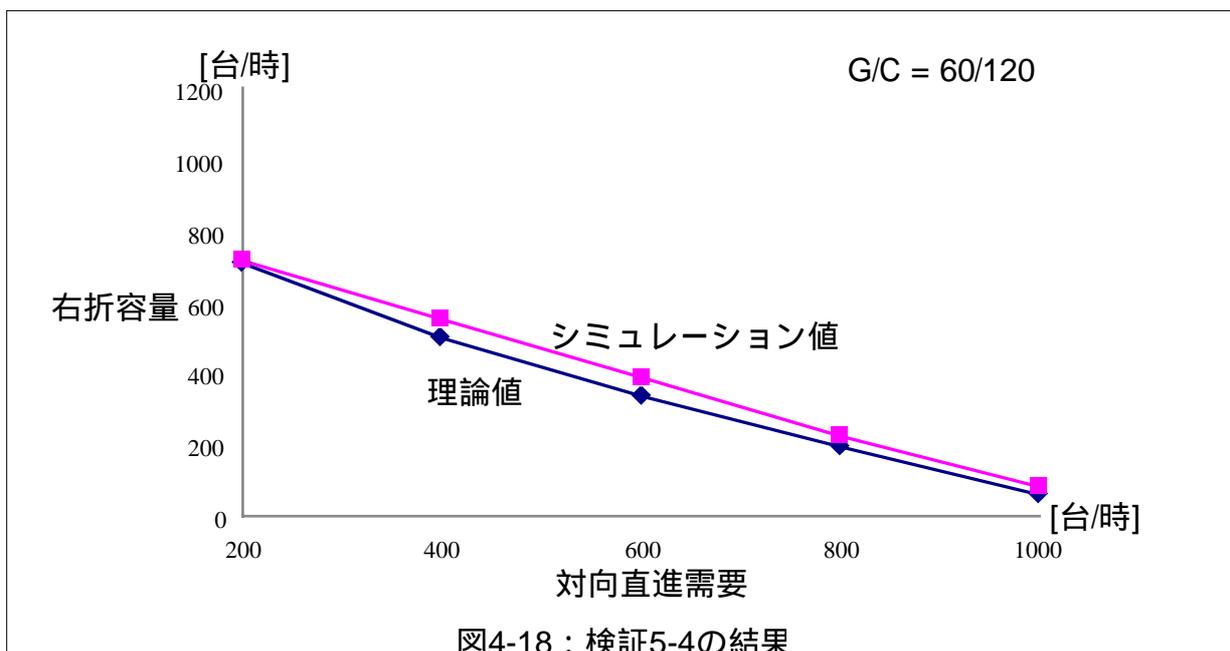
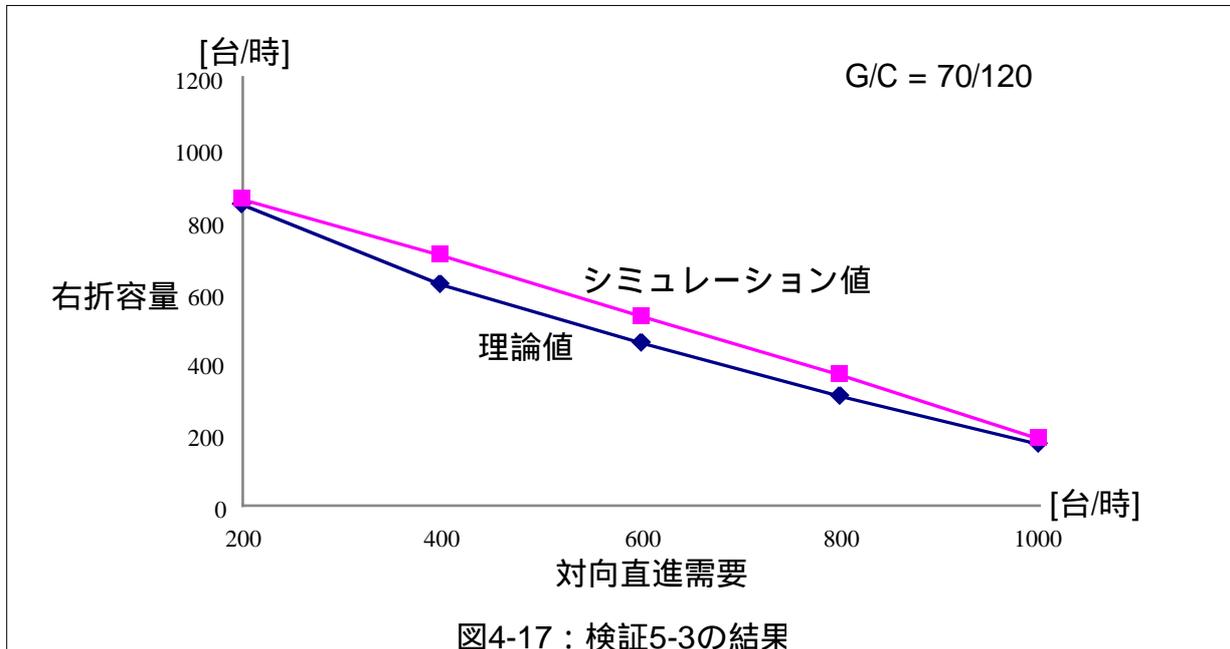


60/120 の場合の結果である。縦軸には右折容量を、横軸には対向直進需要をとっている。どの場合においても、対向直進の需要が小さい場合（200 [台/時]）は比較的よく一致しているが*、そのほかの場合はわずかに理論値より大きい値となっている。これは次ような理由によると思われる。自由流状態での対向直進ブロックの1秒あたりの流出量を見ると、ハイブリッドブロック密度法ではほとんどが飽和流状態（= 2000 [台/時]）となってしまう**。このため対向直進ブロックからの1秒あたりの流出量を1時間あたりに換算して、その値に応じて右折の飽和流率を逡減させているシミュレーションモデルでは、右折ブロックの容量が0になってしまい、その中間程度の容量で流れないため、1時間全体では必ずしも1時間あたりの対向直進交通量に応じた逡減量と一致しないためである。しかしながら、対向直進交通量が増加すると右折容量が低下する現象は再現されており、モデルが意図した挙動は確認することができた。

*) 図4-15, 4-16ではシミュレーション値が小さくなっているが、これは右折の需要を1000 [台/時]しか元々与えていないので、これ以上にはならなかったため。

**) わずかに車群がとぎれたときに、捌けのこりの交通量が移動するだけである。





4.6 経路選択モデルの検証

第3章に述べたように、本モデルでは与えられた経路コストに基づいてロジット式の確率選択をおこなう経路選択モデルを仮定している。すなわち、経路コストには現在の旅行時間が与えられ、また1～数分の間隔で経路情報が更新されることを仮定しているため、いわゆるリアクティブな動的均衡配分を再現するものである。ここでは第3章で用いた簡単な2経路からなるネットワークを用い、シミュレーションによる経路選択の結果を確認するとともに、 $\tau = 0.001$ の場合のリアクティブ均衡配分と比較し、考察を加える。

4.6.1 シミュレーションの設定（検証6-1，6-2，6-3，6-4）

図4-19に示される2経路からなるネットワークで、実験をおこなった。与えられ

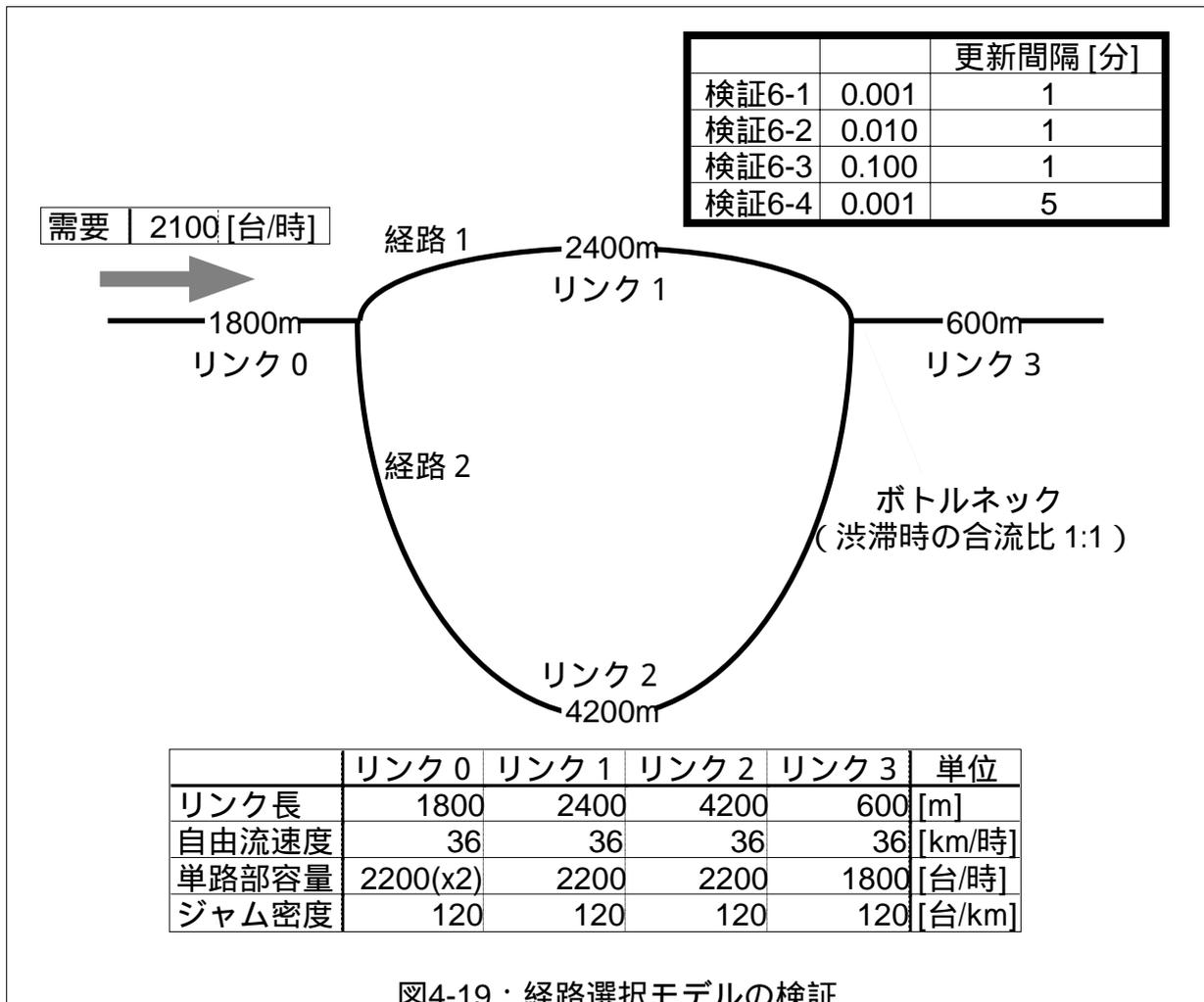


図4-19：経路選択モデルの検証

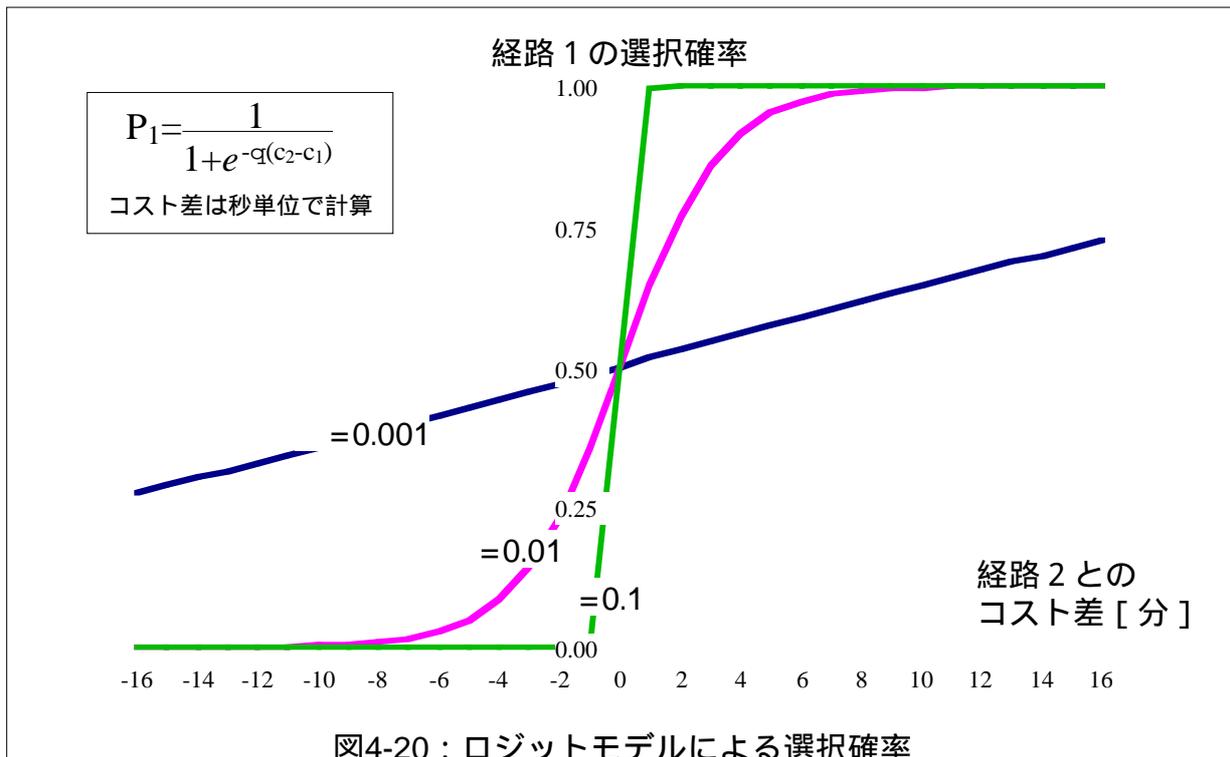


図4-20：ロジットモデルによる選択確率

た需要に対し、リンク0～2は十分な容量を持つが、リンク3上流端での合流部でボトルネックとなる。なお、ここではネットワーク流入時に経路を選択し、リンク上では経路を変更しないため、一方の経路の渋滞がリンク0まで伸びた場合でも、もう一方の経路を選択する交通を阻害しないように、リンク0は2レーンの構成にしている。

検証6-1～6-3ではロジットモデルの感度パラメータを変化させている。パラメータの違いによる選択確率を図4-20に示す。このネットワークでの2経路のコスト差は数分～十数分と予測されるので、 $\alpha = 0.001$ ではあまりコスト差に反応せず、 $\alpha = 0.1$ になると非常に敏感に反応する設定になっていることがわかる。

検証6-4では経路コストの更新間隔の影響を調べるために、検証6-2と同じ $\alpha = 0.01$ で、経路コストの更新間隔を5分に設定した。経路コストはその瞬間の経路上のリンク平均旅行時間の和として表現されており、実際にその車両が通過するのに要する時間とは異なる。

4.6.2 シミュレーション結果（検証6-1，6-2，6-3，6-4）

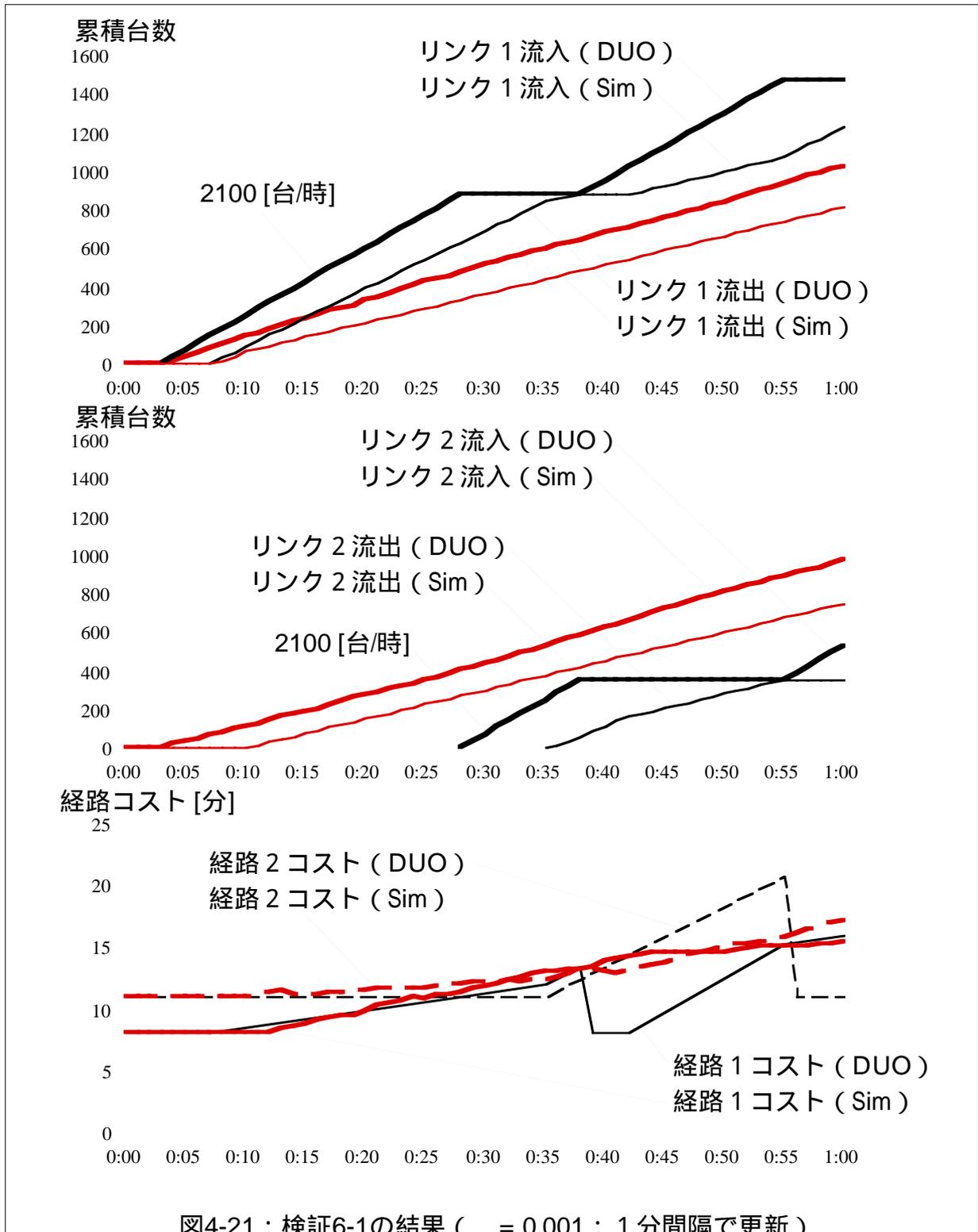
図4-21～図4-23に $\alpha = 0.001 \sim 0.1$ のそれぞれの場合のシミュレーション結果を示す。経路コストの更新間隔は1分である。各図中のグラフはそれぞれリンク1とリンク2

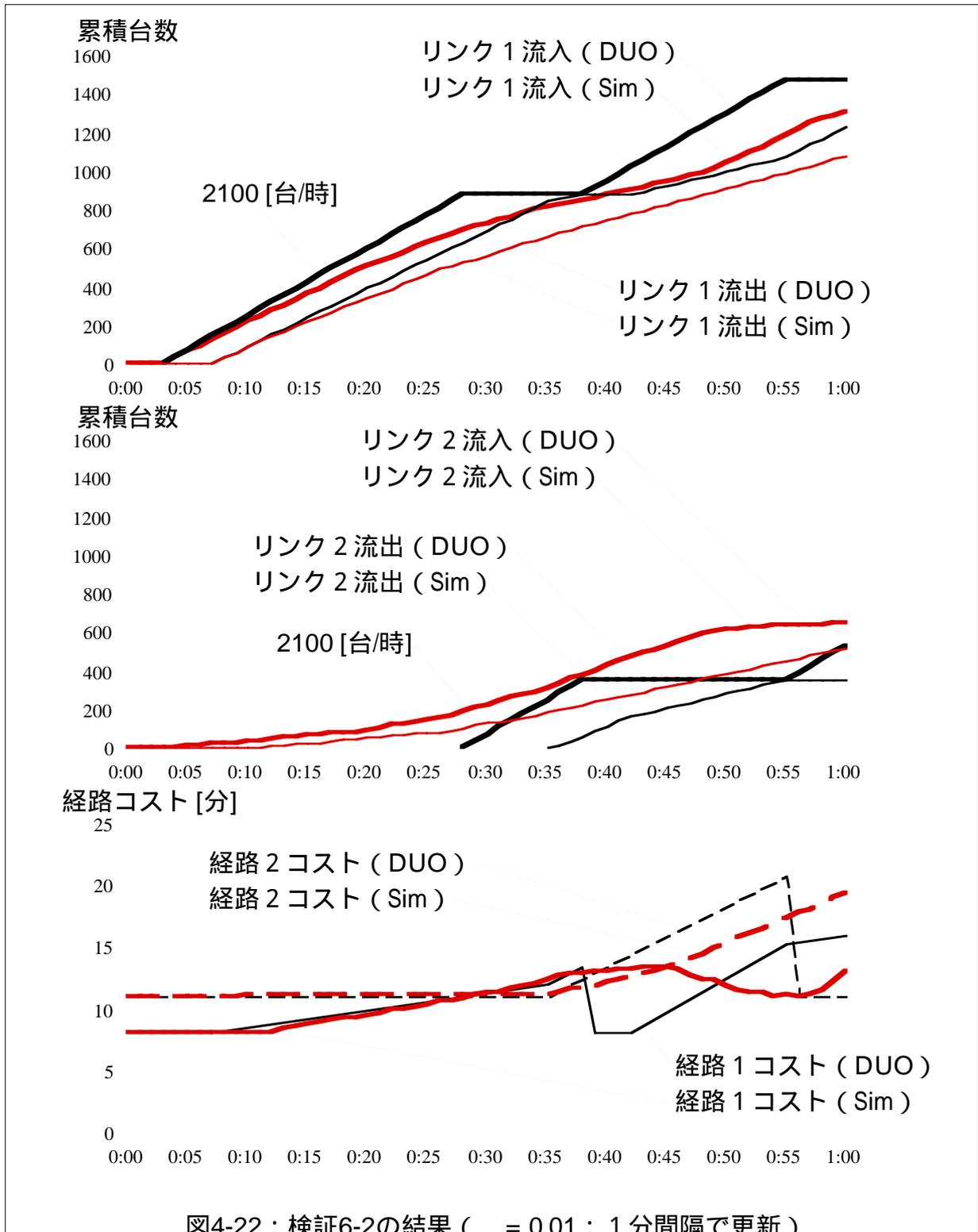
の流出入累積交通量，および各経路のコストを表している．シミュレーション結果は (Sim) で，リアクティブ均衡配分の理論値は (DUO) で示してある．

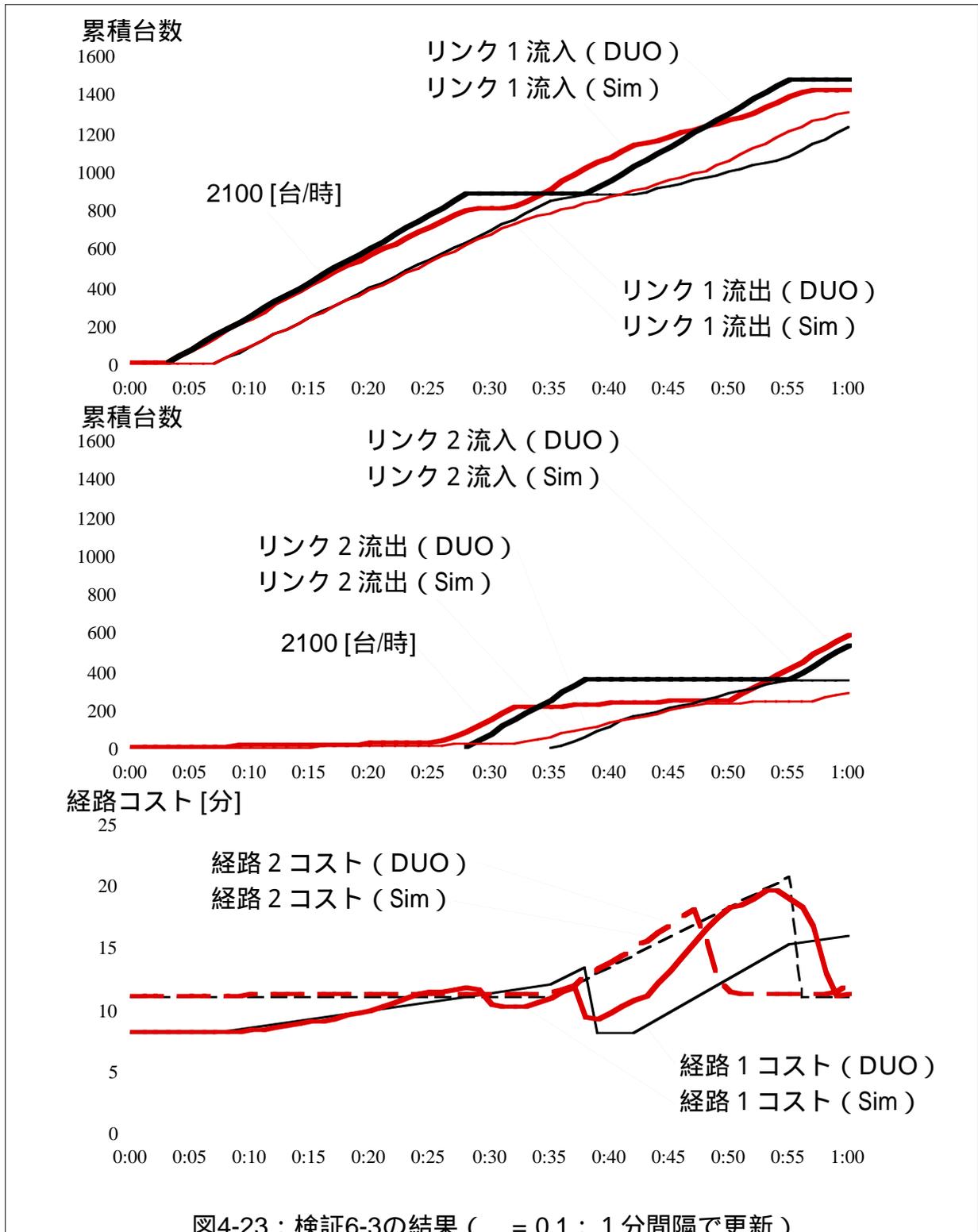
コスト差に対して感度の低い $\alpha = 0.001$ の場合は，図4-21に見られるように，最初からほぼ等確率で両方の経路を選択し，経路交通量の振動も見られない． $\alpha = 0.01$ になると，理論値が示すような振動が図4-22のシミュレーション結果にも認められるが，選択挙動が確率的なので，その振動は緩やかで周期も長い．

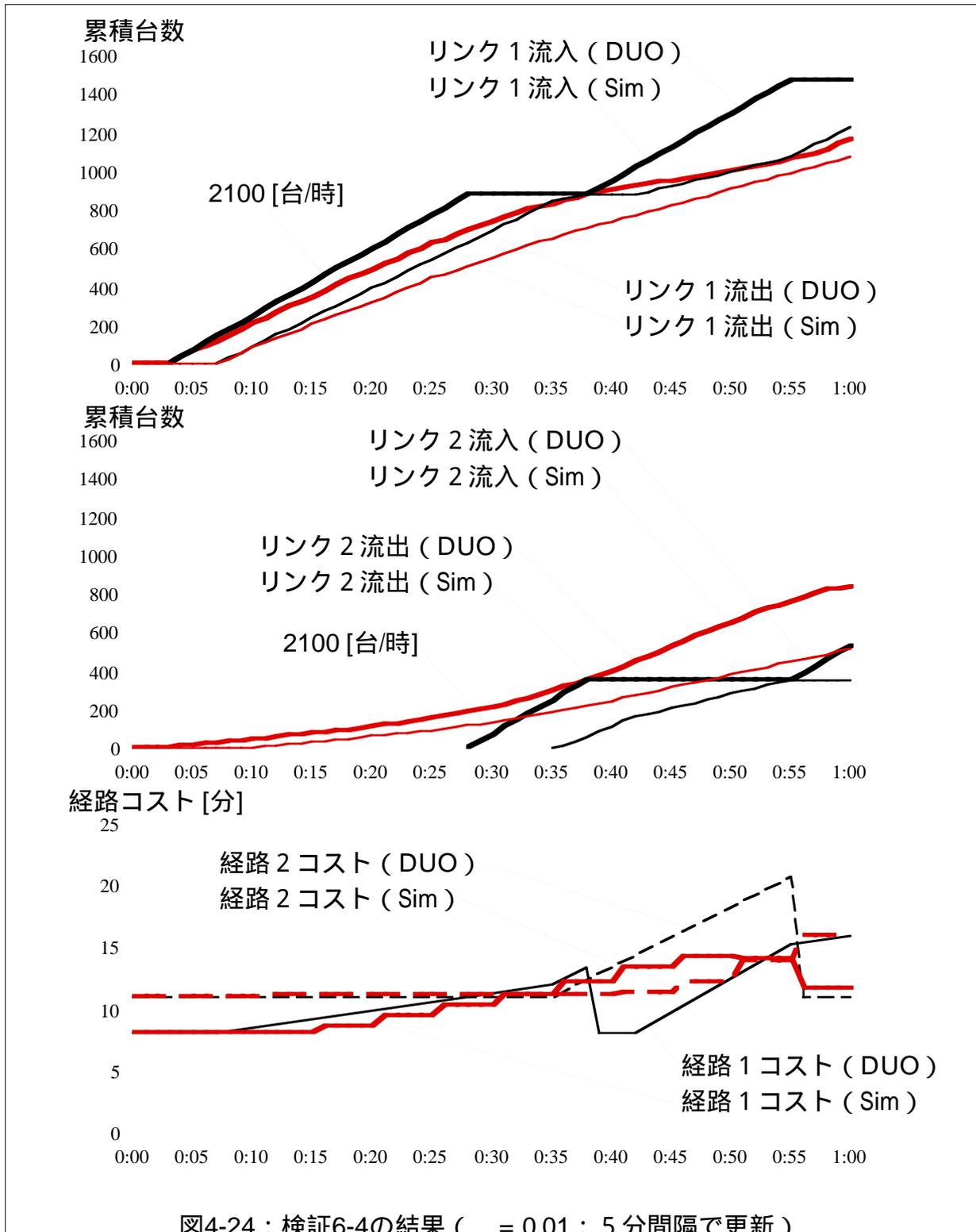
一方， $\alpha = 0.1$ になると $\alpha = 0.001$ の場合のようにコスト差に敏感に反応するが，図4-23に見られるように，シミュレーション結果は理論値よりも早い時点で振動し始め，その周期もわずかに短くなっている．これは理論値では，現時点の直前に旅行を終えた車両の旅行時間を経路コストとしているのに対し，シミュレーションでは，現時点での経路上のリンクの平均旅行時間の総和を経路コストとしているため，両者の変動の様子が異なるためである．

図4-24は $\alpha = 0.01$ でコストの更新間隔を5分とした場合のシミュレーション結果である．図4-22と比較すると，振動の周期がわずかに長くなっており，その分コストの小さい方の経路に余分に流入する交通が多くなっている．このため振動の幅も大きくなってしまう．









4.7 理論的検証のまとめ

以上の6つの検証実験を通して，AVENUEの交通モデルの挙動は次のようにまとめられる．

ハイブリッドブロック密度法による交通流の再現性については，交通量累積図やショックウェーブ理論などから予測される交通状況を再現する能力を持つ．

交通流の再現性はブロックの分割が粗くなっても，さほど結果が変わらない．非飽和交差点での遅れがわずかに小さくなるが，全体の再現性に寄与する部分は大きくないと考えられる．

対向直進による右折容量の低下は，一般的なギャップアクセプタンスモデルから得られる容量低下を若干上回る．しかしながら，信号によって制御される街路網の交通では，青現示が始まった直後の飽和流がとぎれるまでは通常は右折できないのだが，この点は考慮されているので，対向直進交通が増加すると右折容量は低下する．

経路選択モデルの挙動は利用者均衡における定常状態とは異なり，経路交通量の振動が見られる．これは本モデルが仮定しているリアクティブ均衡配分の理論的考察からも予測されることである．与える経路コストが現在の瞬間のリンク旅行時間の総和であるため，リアクティブ均衡配分の理論的な挙動とはわずかに一致しないが，傾向としては同じように振動する．振動の周期はロジットモデルの感度パラメータの値が小さいほど長くなる．利用者均衡の状態に近づけるには，実際にかかる旅行時間を予測して，経路コストとして与えることが必要になる．

第5章 モデルの実証的検証と適用例

第4章では簡単なネットワークを用いて、AVENUEのネットワーク交通モデルの基本的な挙動についての検証をおこなった。本章では実際の道路ネットワークのデータを用いてシミュレーションをおこない、どの程度交通状況を再現することができるか、実証的検証をおこなった結果について述べる。また本システムはすでに幾つかの交通検討業務で実用化されており、そのうちの幾つかをインパクト評価への応用例として紹介する。

実ネットワークへの適用に当たっては、ドライバーの経路選択挙動を分析することが比較的困難であるので、まず経路選択の余地のないネットワークを用いて実証的検証をおこなった。ここでは東京の錦糸町における国道14号線のネットワークでの検証例、および金沢駅前周辺道路における検証例について紹介する。また金沢駅前のケースでは、駅前広場の改修に伴うインパクト評価を行っている。

次に経路選択モデルを含んだ実証的検証をおこなうために、豊田市におけるトヨタ自動車本社地区周辺の3km四方の地域におけるネットワークに適用した例について述べる。

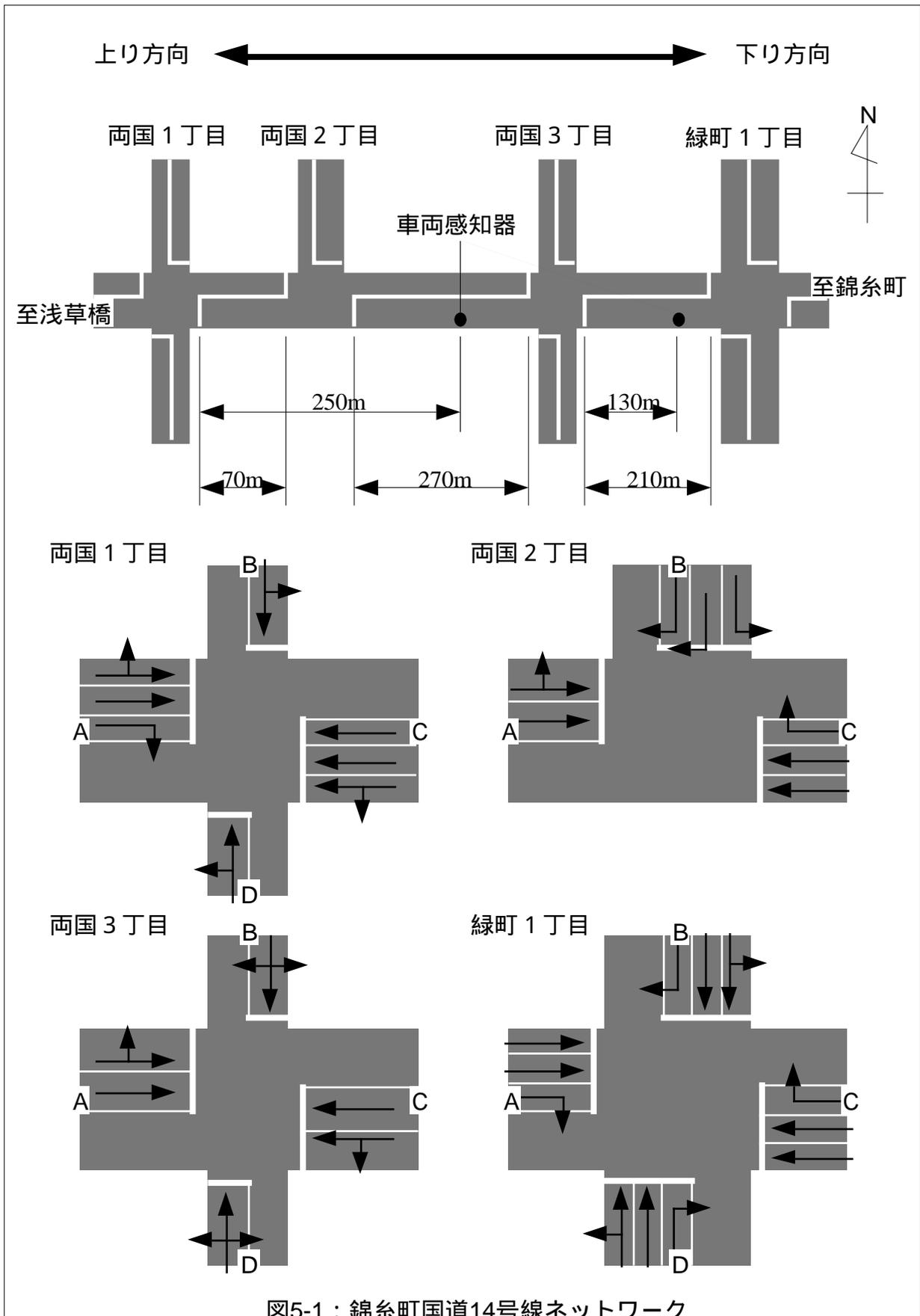
さらに実業務におけるインパクト評価の例として、地下駐車場出入口の設置位置の検討と大規模集客施設への誘導計画の検討について紹介する。

5.1 錦糸町における実証的検証

東京都立大学を中心として、まず経路選択の余地のない東京錦糸町周辺のネットワークを用いて、実証的検証をAVENUEを開発した直後におこなった。詳しくは参考文献⁶⁷⁶⁸を参照されたいが、以下に概要を紹介する。

5.1.1 交通概況と入力データ（錦糸町）

図5-1はこの検証での対象ネットワークである、東京錦糸町の国道14号線における緑町1丁目交差点から両国1丁目交差点までの、およそ600mの区間をしめしている。ネットワークは4つの信号交差点を含み、系統制御されている。



この区間では東西方向の交通量が大きく、朝のピーク時には上り方向の渋滞が、対象ネットワークの範囲外にある両国橋を先頭に発生している。このため、シミュレーションにおいては渋滞が対象ネットワーク内に到達してきた時点で、両国1丁目Aの流出の容量を低下させる機能を追加している。また昼間のオフピーク時においても、緑町1丁目を先頭に若干の渋滞が認められる。

このネットワークにおいて、朝ピーク時を含む8:00~10:00と昼間の比較的混雑の少ない12:00~14:00に各交差点での信号サイクルごとの通過交通量が計測されている。とくに錦糸町方面から流入する上り方向の交通についてはナンバープレートマッチングをおこない、詳細なODデータと旅行時間がわかっている。その他のODペアについては交差点での観測された右左折率にあうように、適当に交通量を割り振っている。同時に信号現示調査もおこなわれ、サイクル、スプリット、オフセットがわかっている。リンクの飽和交通流率については、幾何形状より妥当と思われる値を用いている。

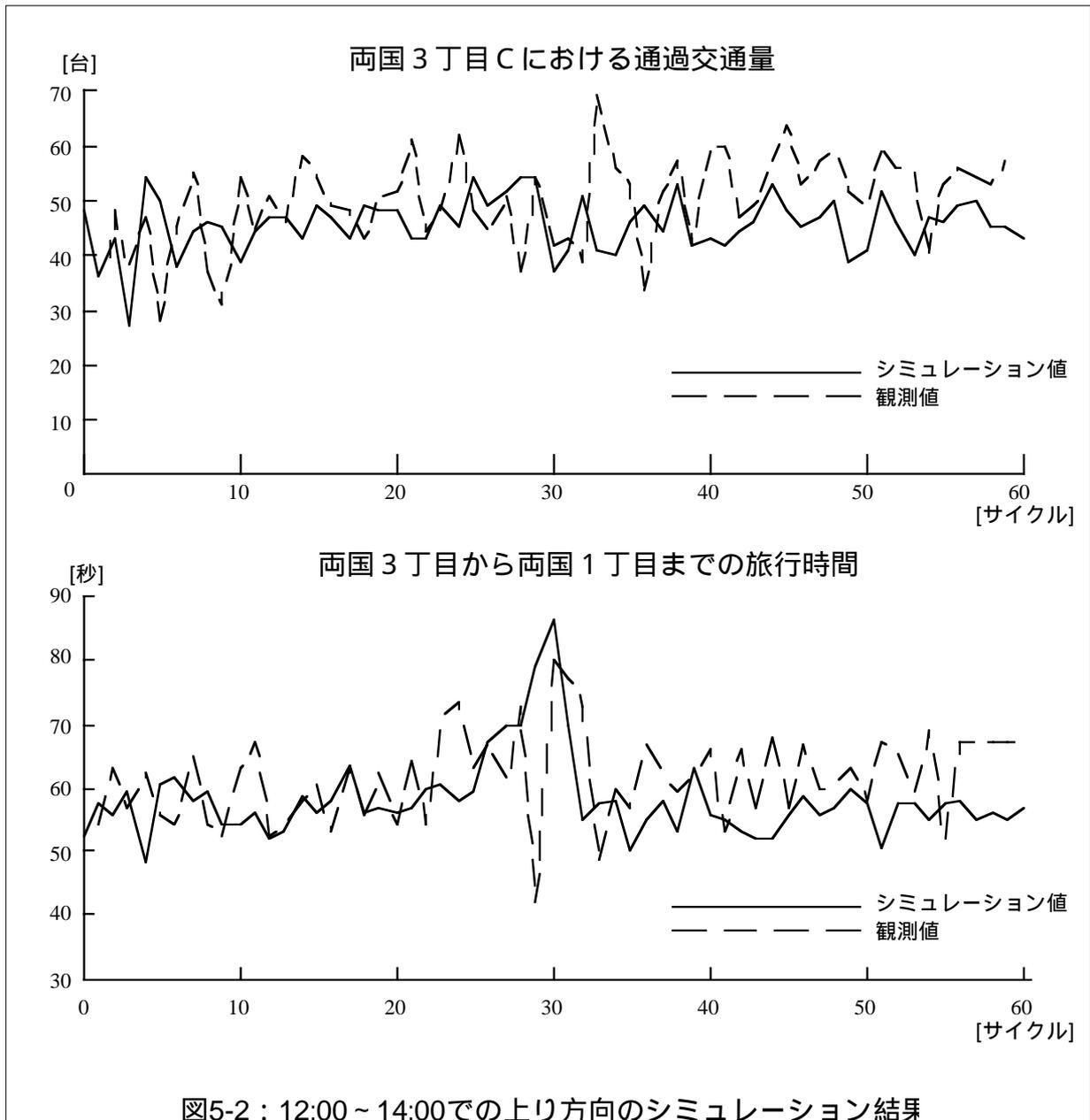
5.1.2 検証結果（錦糸町）

シミュレーションの対象時間は調査の時間帯と同じとした。シミュレーションでは各交差点での東西方向の断面交通量を計測し、観測値と比較している。また上り方向の交通について、旅行時間を比較している。

はじめに比較的交通量の少ない12:00~14:00の時間帯について考察する。図5-2の上のグラフは両国3丁目Cにおける1信号サイクル(=120秒)あたりの通過交通量を観測値とシミュレーション値で比較したものである。シミュレーション前半は比較的観測値をよく再現しているが、後半になると下回っている。その他のデータより、これは実際にはボトルネックとなっていない下流の両国2丁目Cにおいて、シミュレーションでは若干の渋滞が発生したため、その上流交差点の通過交通量が低下したものであると判明している。同様の現象は8:00~10:00のシミュレーションでも見られるため、後ほど考察を加える。

図5-2の下側のグラフは両国3丁目から両国1丁目までの平均所要時間を比較したものである。こちらもシミュレーションで渋滞が発生する以前の前半では、観測値をよく再現しているが、後半は渋滞が原因で観測値を下回る。

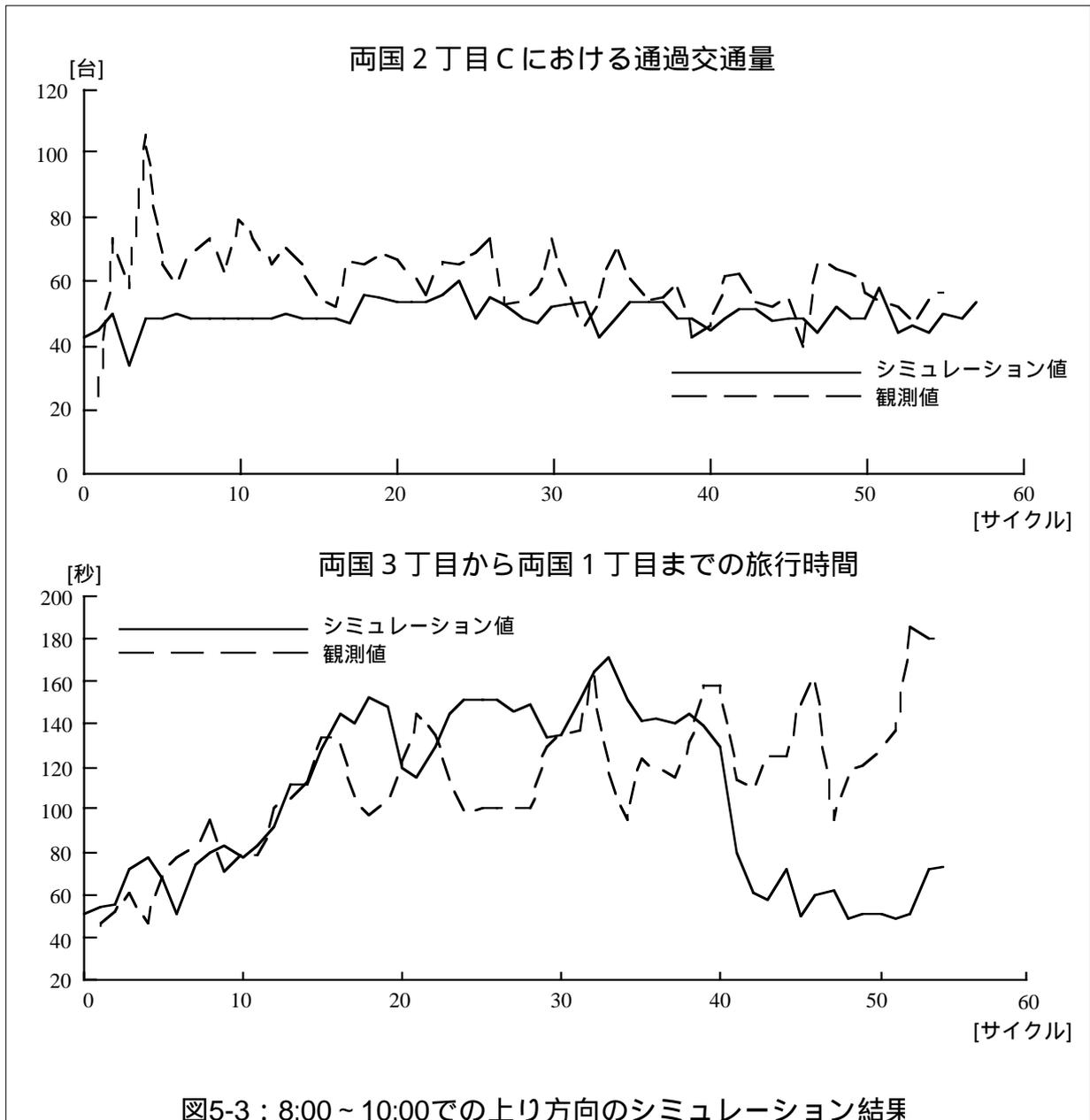
しかしながら、全体としては非飽和時については問題が少なく、交通状況をよく再現しているといえる。

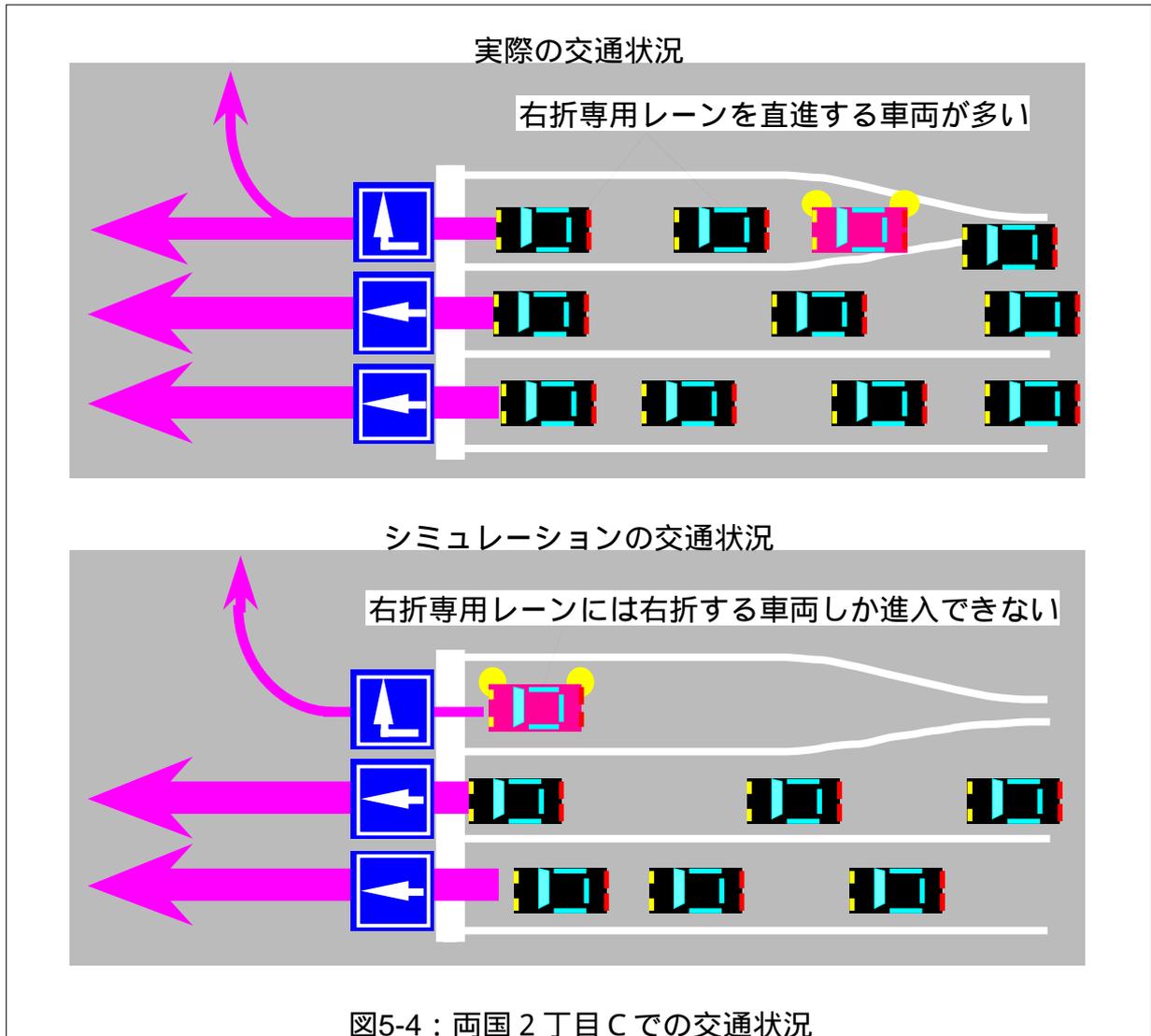


次に過飽和状態である 8:00 ~ 10:00 の時間帯のシミュレーション結果について考察する。図5-3の上のグラフは、非飽和時のシミュレーションでも問題になった両国 2 丁目 C の 1 サイクル (= 130 秒) あたりの通過交通量の比較である。観測値に比べ、シミュレーション値は低いレベルで押さえられているように見える。観測値の通過交通量は設定した飽和交通流率を大幅に上回る流率で流出しており、実際の流出時の交通状況とシミュレーションでの設定が異なっていると推測される。その後のビデオなどによる確認で、図5-4に示されるように、両国 2 丁目 C での実際の交通は右折専用レーンを通り直進していく車両数がかなりの数に上り、シミュレーションでの 2 レーン分の飽和交通流率をうわまわって流出していることが判明した。

図5-3の下で示される旅行時間の比較についても同様で、実際よりもひどい渋滞が両国 2 丁目を先頭に発生するため、シミュレーション値が大幅に下回っている。

過飽和状態でのシミュレーションでは、交通状況の実態にあわせたシミュレーションの設定が必要であり、わずかの問題が結果に大きく影響してくる。今回の検証はシステムを開発した直後で、実用化の初期段階であったため、プログラムにも幾つかの不良箇所が指摘されていた。まだこの段階では過飽和時の再現性は十分であるとはいえ、更なる改良と実証的検証が求められた。





5.2 金沢駅前地区における検証

錦糸町での検証において指摘された問題を改善した後、同様の経路選択の余地のない金沢駅前地区の道路ネットワークを用いて検証をおこなった。以下において、その概要を述べる。またこのケースでは駅前広場の改修に伴う交通インパクト評価をおこなっているため、同時に紹介する。

5.2.1 現況の交通状況と入力データ（金沢駅前）

図5-5に検証の対象とするネットワークを示す。ネットワークの範囲は駅前を南北に通過する道路（駅前道路）の約500mの区間であり、バスターミナル、タクシープール、2つのバス停、および6つの交差点が含まれる。各交差点にはA～Fまでの記号がつけられている。E以外は信号交差点で、系統制御されている。

この地域では駅前道路を南北に通過する交通量が多いため、渋滞が発生している。図5-6に対象地区の写真をしめす。写真は昼のオフピーク時に撮影されたため、道路はさほど混雑していないが、バス停に多くのバスが停車していることがわかる。

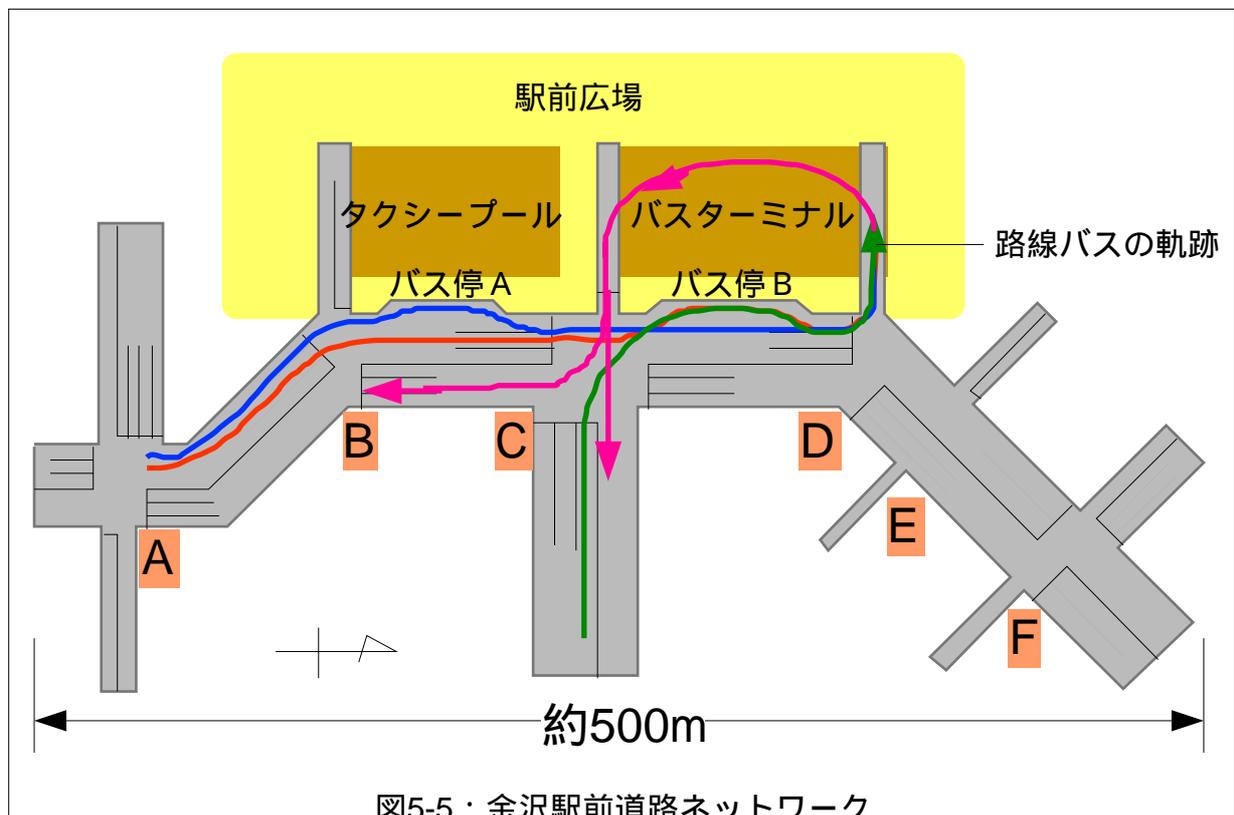




図5-6：金沢駅前周辺の写真

この地域の渋滞の原因は単純ではなく、信号交差点が近接している、バス交通量が多い、レーン構成が不適切である、などの幾つかの要因が重なり合っていると思われる。したがってある一つの交差点というよりはむしろこの区間全体がボトルネックとなっているといえる。とくにバス交通については、図5-5に路線バスの軌跡を記したように、ABいずれかのバス停で停止した後、バスターミナルにはいるために数回のレーン変更をする必要があり、後続車両に影響を及ぼしている。また、ピーク時には1時間で150台以上のバスがこの地区に流入してくるため、しばしばバス停からあふれて停車するバスが発生し、駅前道路の交通を阻害する。くわえて、同数のバスが交差点Cのバスターミナル出口から出発するため、東方向（図では下方向）から流入して右折する交通の障害となっている。

道路交通以外の問題点としては、駅前広場からバス停Bに向かう歩行者動線が、バスターミナル出口で分断されており、サービスレベルが低下していることがあげられる。後述する駅前広場の改修案では、この点を改善することが考慮されている。

シミュレーションは朝ピーク時を含む7:50～9:10の時間帯を対象とした。OD交通量はナンバープレートマッチングから得られたものを用いており、10分ごとに与えている。図5-7に8:00～9:00の交通流量図をしめす。流線の太さから駅前道路のA～Fの間を通過する交通量が多いことがわかる。

信号パラメータについては、調査時に観測されたサイクル、スプリット、オフ

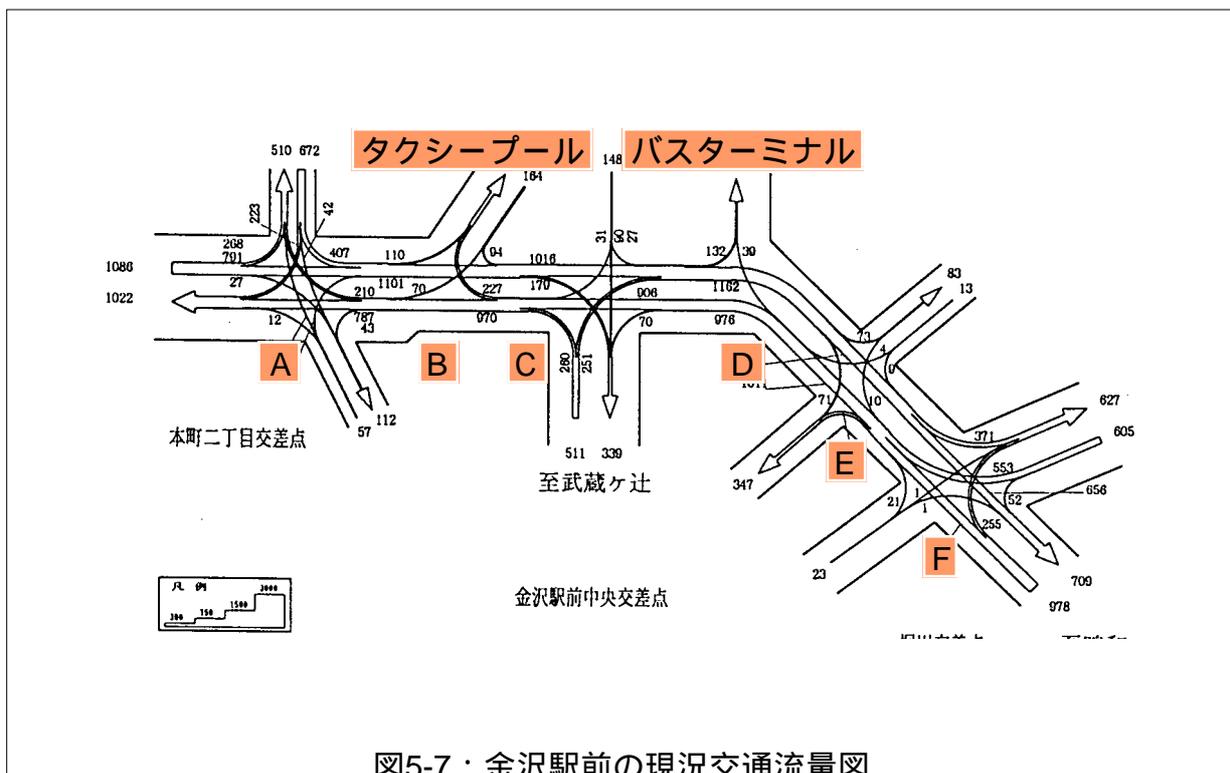


図5-7：金沢駅前の現況交通流量図

セットをもちいている。またリンクの飽和交通流率については、幾何構造より妥当と思われる範囲から幾つかの値を設定し、シミュレーションを繰り返しおこなって最も再現性のよいものを採用した。

5.2.2 現況再現シミュレーションの結果（金沢駅前）

シミュレーションの結果を渋滞長と旅行時間を観測値と比較することで、現況再現性を検証する。同時にシミュレーション画面をビデオに撮影し、全体の再現状況を確認できるようにした。図5-8にシミュレーション実行時の画面を示す。

このケースではバスの動きを再現するために、バス停とバスレーンの機能を付加した。すなわちネットワークに流入したバスは、バスレーン上を走行し、バス停で適当な時間停車した後、再びバスレーンを走行してバスターミナルに向かうように

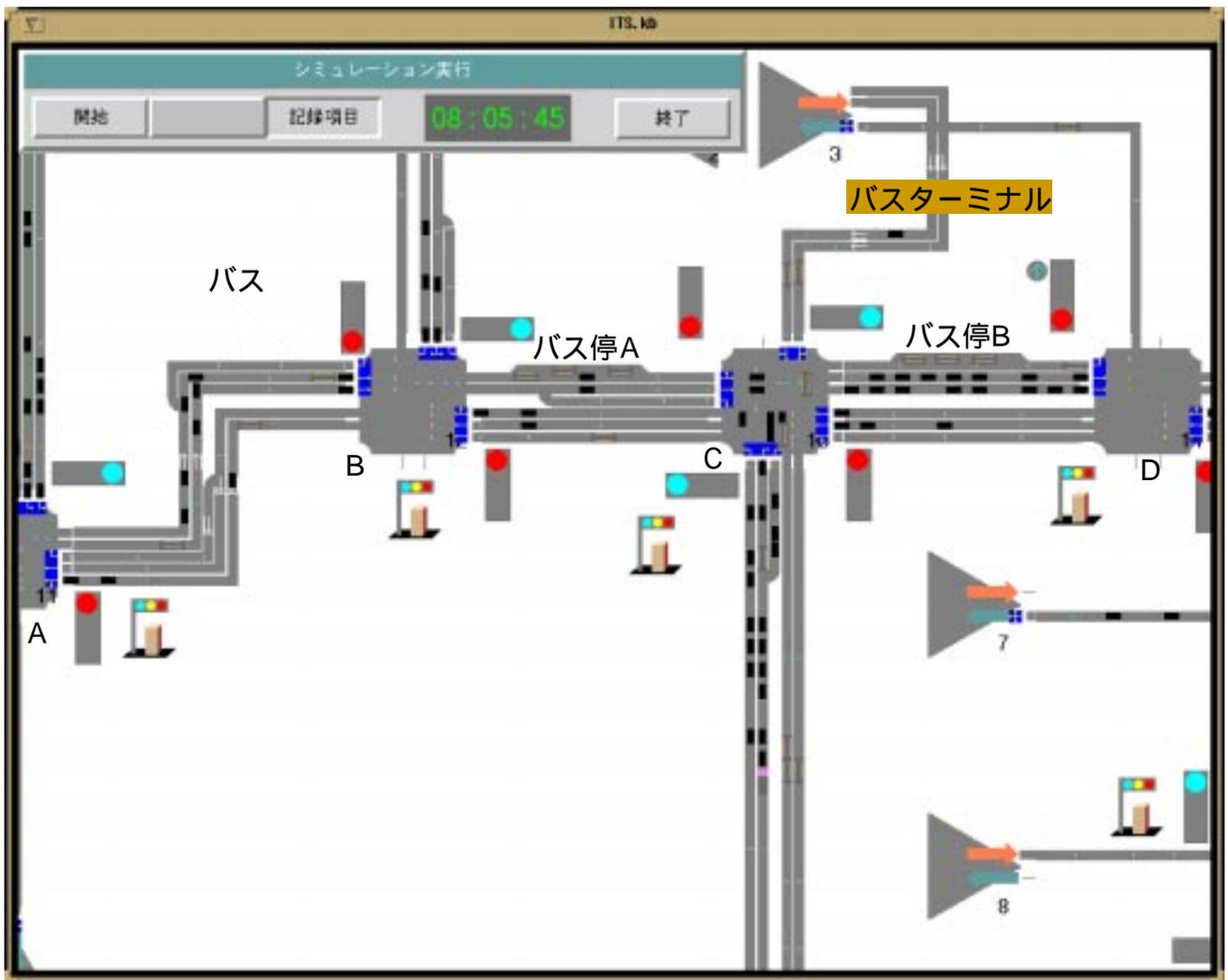
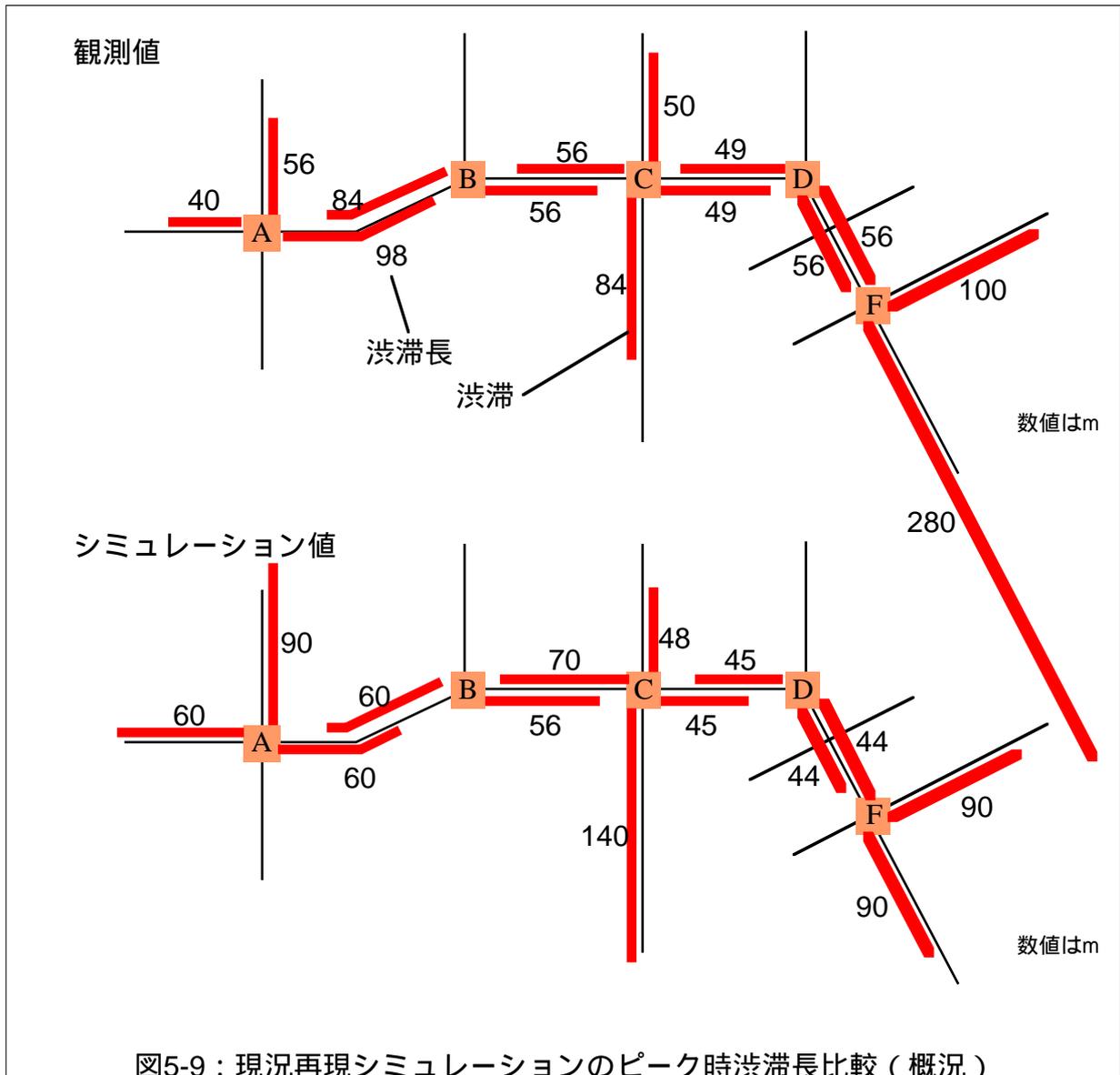


図5-8：金沢駅前現況再現のシミュレーション画面

している。シミュレーション結果をアニメーションで確認すると、しばしばバス停が一杯になり、新たに到着したバスが手前で停車してしまうため、後続車両を阻害している状態が再現されていた。

図5-9は8:00～9:00のピーク時における平均渋滞長の比較である。観測値は目視によるものであり、一方シミュレーションでは10分間の地点平均速度が10[km/時]以下となった区間の長さを求めている。図からわかるようにA～Fの間の駅前道路は両方向とも渋滞が観測されており、シミュレーションでも同様の状態が再現されている。ネットワーク端点から流入するリンクについては、渋滞長が正確に再現されていないが、これは各端点からの需要の発生パターンが、交差点A～Fの通過交通量で代用されており、正確に与えられていないためと考えられる。

渋滞長の比較からは駅前道路が全面的に混雑している状況が読みとれるが、シミュレーションが渋滞を過度に再現している可能性を否定することができない。そこで図5-10に、駅前道路区間における旅行時間を比較したものを示す。図は縦軸に実際の旅行時間を、横軸に出発した時刻をとっている。上のグラフが交差点A～Fの方向の、下のグラフが交差点F～Aの方向の旅行時間である。シミュレーション値は5分間ごとに発生した車両の旅行時間を平均したものであるが、観測値は測定車両による一回の走行に要した時間を示している。したがって信号待ちなどによる観測値に含まれるばらつきは大きく、直接比較することは難しい。しかしながら、ピーク時間帯を通して混雑状況はあまり変わらないと考えて観測値の平均をとると、シミュレーション値はその近くで変動しており、比較的よく交通状況を再現していると考えられる。



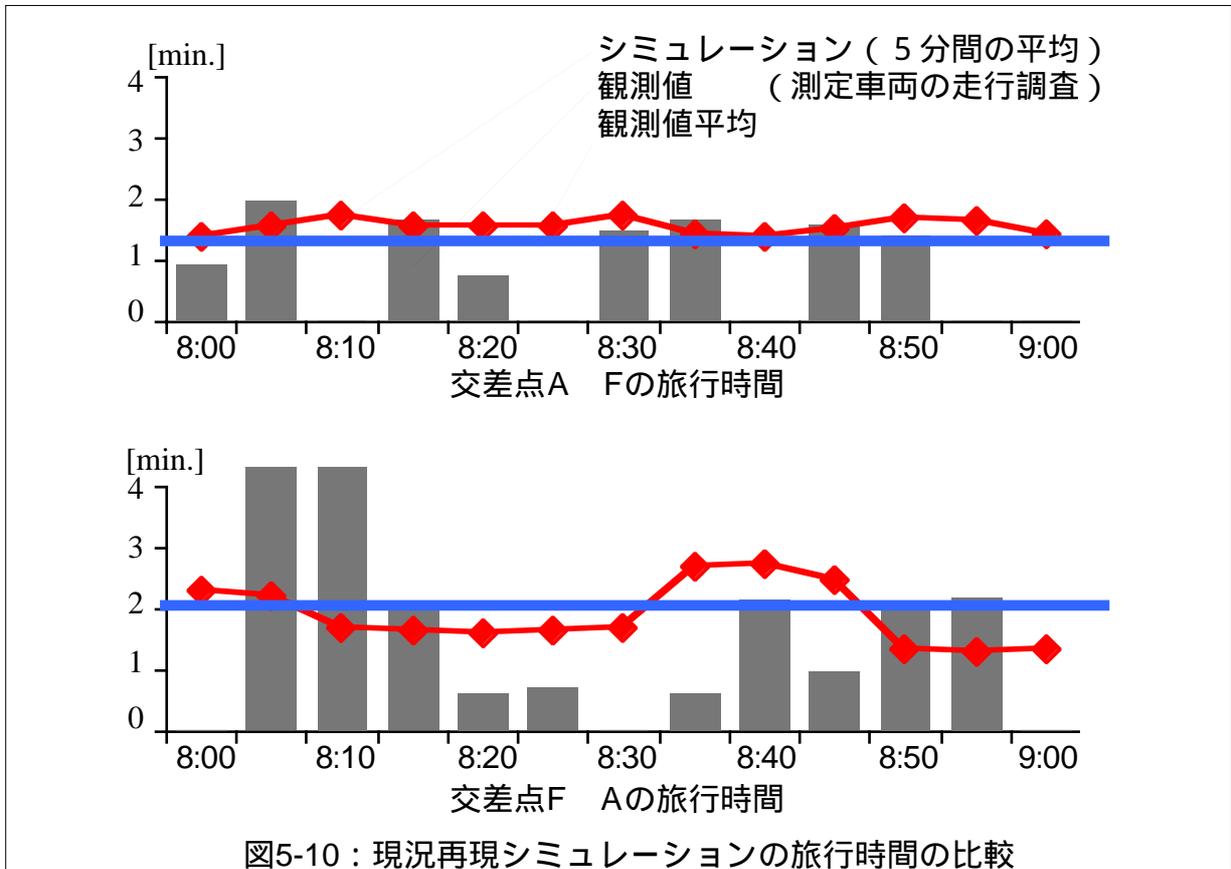


図5-10：現況再現シミュレーションの旅行時間の比較

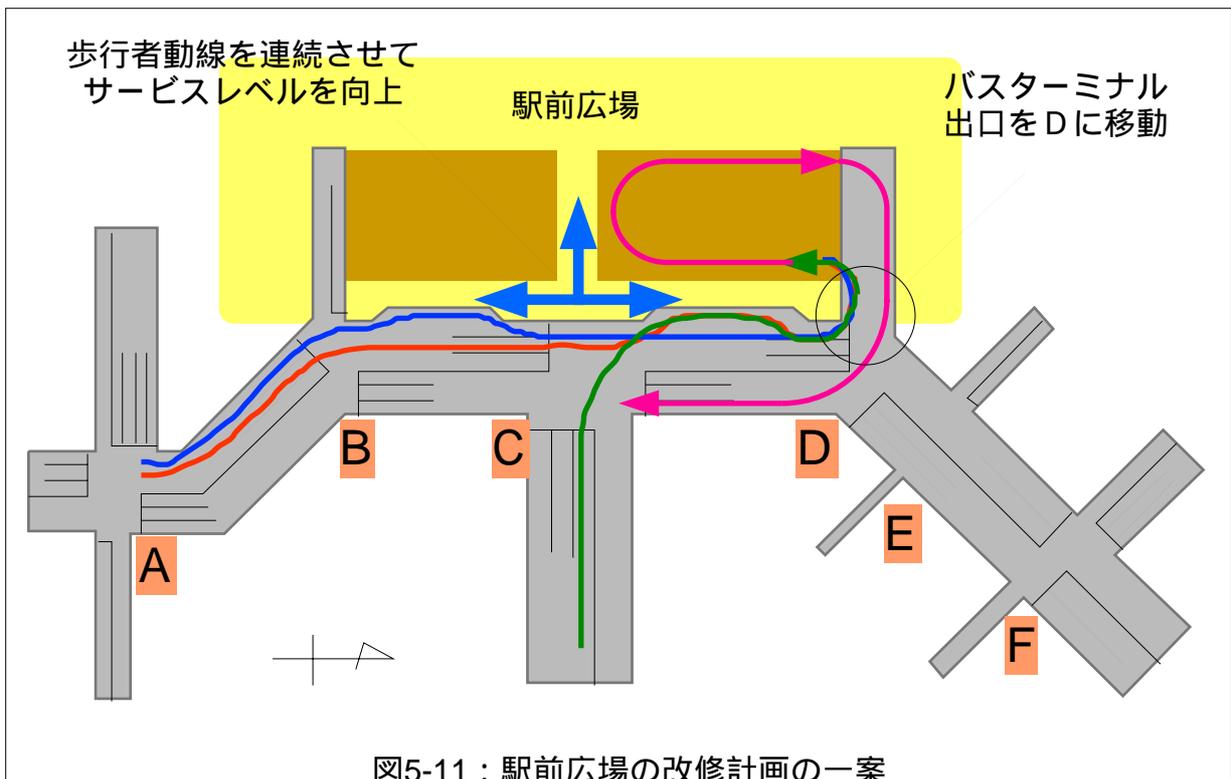


図5-11：駅前広場の改修計画の一案

5.2.3 駅前広場改修案のインパクト評価への適用

現在、この地区における再開発の計画が進んでいる。この中で、駅前広場の歩行者に対するサービス水準を向上させることが検討されている。その一案として、図5-11（前頁）に示されるように、バスターミナル出口を交差点Dに移動し、駅前広場からバス停Bにつづく歩行者動線を連続させようというものがある。しかしながら、この案では交差点Dにおいてバスターミナル出口のための青現示を新たに設ける必要があり、相対的に駅前道路に対する青時間が減少してしまうことから、道路交通にとっては悪影響を及ぼすことが予想される。このため本シミュレーションモデルを用いて、どの程度交通状況が悪化するのか、あるいはその影響をどれくらい少なく押さえることができるのかについて、インパクト評価を行った。

将来のOD交通量は、再開発計画が完了する平成24年の時点での需要を推定した結果に基づいている。これは金沢都市圏パーソントリップ調査での伸び率を用い、現況交通需要を拡大したほか、現状でも問題となるバス交通については、一部を駅の反対側のターミナルに発着させるなどの運用策を仮定している。将来の交通流量図を図5-12に示す。

図5-12よりわかるように、駅前道路を通過する交通の伸び率に比べ、交差点AからCをとって東（図では下）に向かう交通およびその反対方向の交通の伸びが非常に

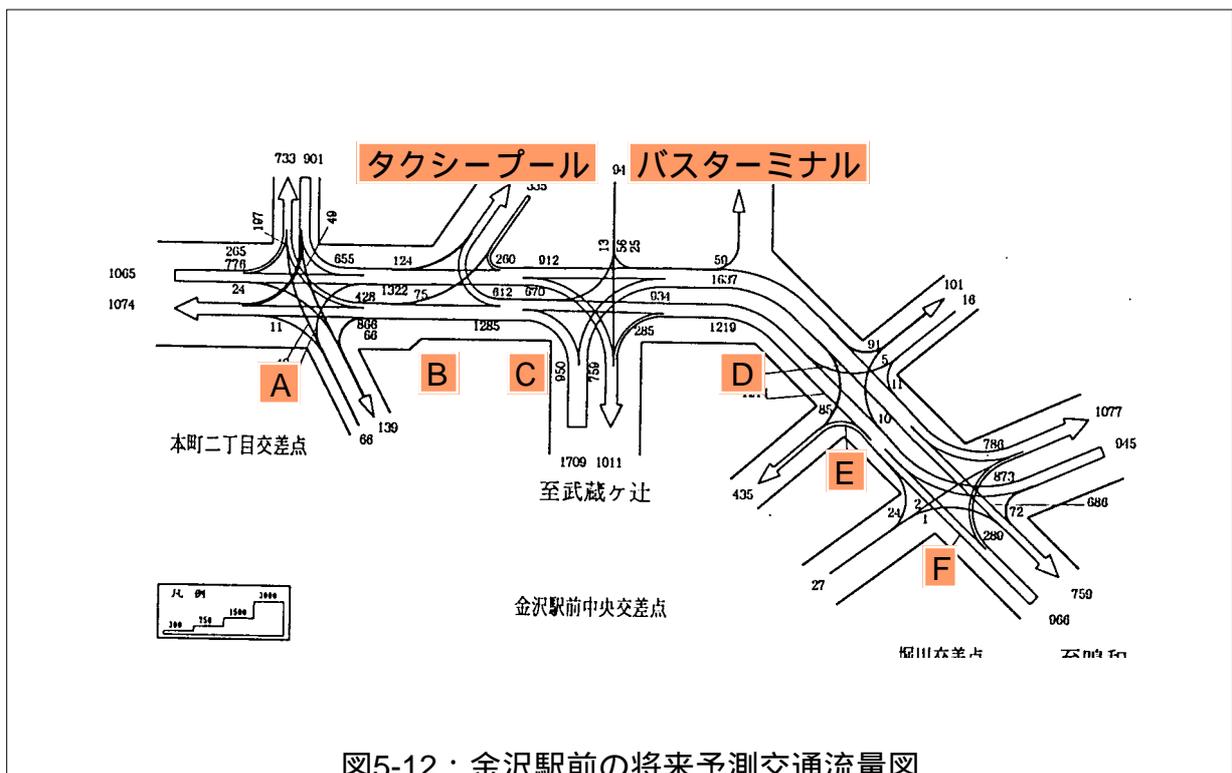


図5-12：金沢駅前の将来予測交通流量図

大きい。これは将来はこの方面で金沢市の繁華街と接続するためである。したがってレーン構成，信号現示などを現況と大幅に変える必要がある。

予測される交通需要に対し，レーン構成や信号現示などは，平面交差点の設計指針や飽和度などを使って，ある程度最適なものを設計することができる。しかしながらこのような手法の延長で過飽和状態の交通に対して，最適なオフセットまで設計することは難しく，シミュレーションによる解法に頼らざるを得ない。

今回のインパクト評価では，レーン構成や信号現示が変更されたネットワークに対し，オフセットの設定を変えて何通りかシミュレーションをおこなった。ここではそのうちの

設定1) 現況のオフセットパターンに近いもの

設定2) バスターミナルからの流出が円滑になるように考慮したものの2通りの結果を現況のシミュレーション結果と比較したものを示す。各種の設定の中では，この設定2が最も良い結果だった。

図5-13は交差点A～Fの間の旅行時間を比較したグラフである。将来の2案はどち

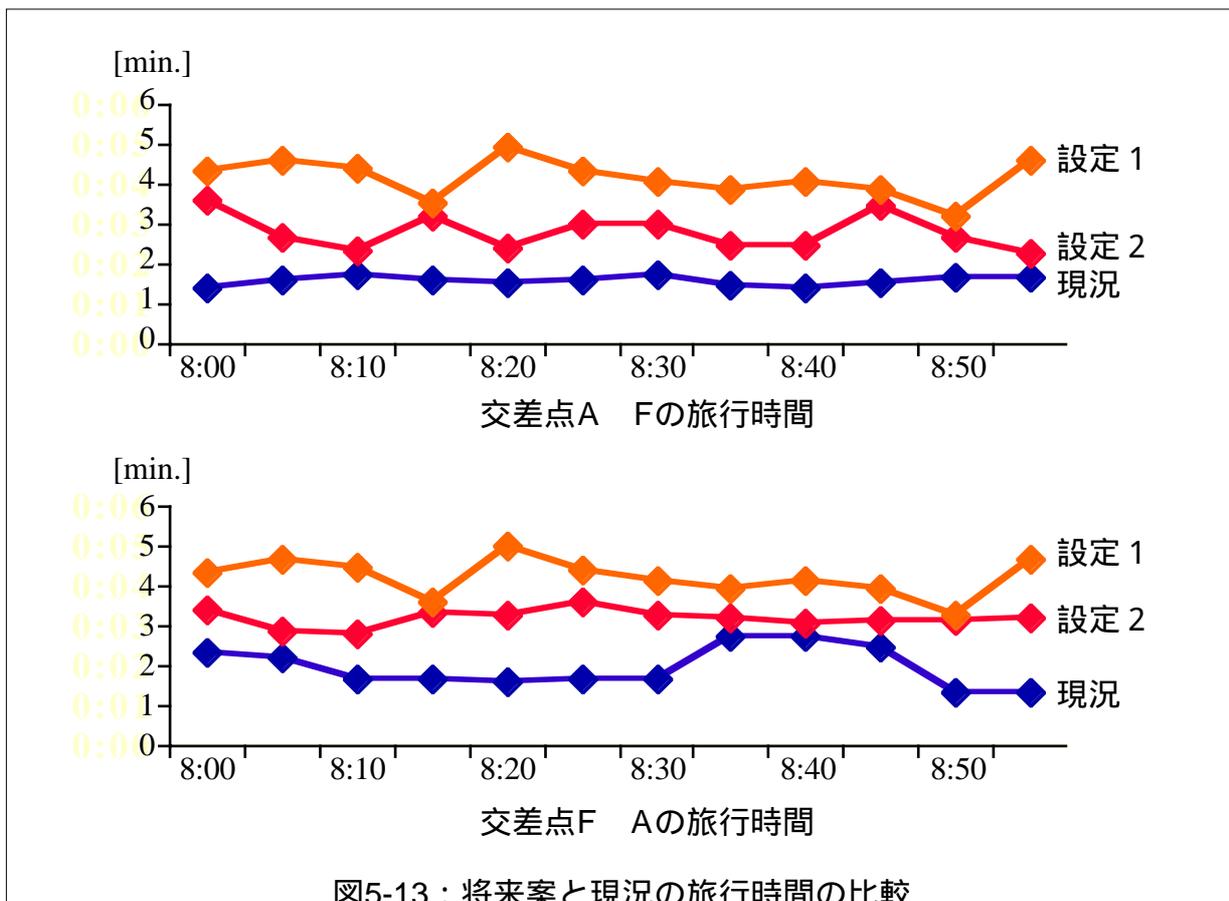


図5-13：将来案と現況の旅行時間の比較

*) 「静的な」意味で最適ということで，ダイナミックに変化する交通状況では最適とはいえない。

らも現況より旅行時間が増加しているが、設定2の方が増加量が平均で30秒～2分弱程度と小さく押さえられている。シミュレーション画面で車両の動きを確認すると、バスの流出をスムーズにしたため、駅前道路上で信号待ちのために停車するバスが交通の障害になる状況が他の設定より少なかったためとわかった。

また駅前広場改修後では交差点Cでのバスの流出がなくなったため、東から流入して右折する交通の渋滞長が短くなるといった結果も明らかになった。

5.2.4 金沢駅前のシミュレーションでの問題点

金沢駅前地区のシミュレーションを通して幾つかの問題点が明らかになった。

まず車両のレーン選択モデルに関する問題があげられる。今回のケースのような、数10mといった非常に短いリンクを含むネットワークの場合、信号待ちなどによって生じる滞留容易に上流側のリンクに到達してしまう。

図5-14に示されるように、リンク3下流端で右折する車両の滞留リンク2まで伸びた場合、実際の交通状況では後続の右折車両はリンク1にいる時点であらかじめ右レーンに寄って、滞留の最後尾につくので、リンク3で直進する車両は左レーンを走行することができる。しかし、シミュレーションでは、選択した経路からそ



のリンクでの進行方向が決められるので、リンク3で右折する車両もリンク1やリンク2を走行するときは直進車両としてあつかわれてしまう。このため、リンク2でも左車線を走行することができ、リンク2の下流端でリンク3の右レーンに移動することができないため、つまってしまう。後続の直進車両も、このため進行することができず、意図しない渋滞の原因となってしまう。

金沢駅前のケースではダミーのリンクを設けるなどして、この問題を回避したが、その後の改良によって、このような問題が発生しそうな短いリンクに関してはユーザが指定することで先のリンクでの進行方向を考慮して、あらかじめ適切なレーンを選択するような機能をつけ加えている。

次に、シミュレーションモデルそのものの問題ではないが、実ネットワークに適用する際の幾つかの問題があげられる。例えば、シミュレーションの対象となる範囲は他の地域での渋滞の影響を受けないように、あるいはシミュレーション範囲内の渋滞が極端に外部に延伸しないように、注意深く設定されるべきであるが、現実には調査規模や入手可能なデータの問題などから、理想的な範囲とは異なる場合があることである。金沢駅前の場合、シミュレーション対象ネットワークをこえて渋滞が広がっており、この地域での交通状況の改善が、全体ではどれくらいの効果を及ぼすのかを推定することが困難であった。このような問題については第6章でさらに考察を加える。

5.3 トヨタ自動車本社周辺地区における実証的検証

次に，経路選択の余地のあるネットワークでの検証をおこなった．対象としたのは豊田市におけるトヨタ自動車本社周辺の約3km×3kmの地区のネットワーク（以下豊田市ネットワーク）である．以下にその概要を述べる．

5.3.1 豊田市ネットワークでの交通概況

図5-15に示されるのは検証の対象とした豊田市ネットワークである．ネットワークの規模は，交差点数が54（無信号交差点を含む），リンク数が193であり，リンクの総延長は約73kmに達する．この地域内にはトヨタ自動車本社工場などの大規模な駐車場を伴う施設が点在し，朝の通勤時間帯にはこの地区への流入交通量約3万台のおよそ半数が，トヨタ自動車への勤務者で占められる．このため本社工場周辺で渋滞が発生しており，何らかの対策が求められている*．



*) 平成7年よりトヨタ自動車の勤務形態が連続2交代制に変更になり，通勤時間が早まったため，現在では朝の混雑は緩和されている．

この地域には幾つかのボトルネック交差点が独立して存在し、渋滞を引き起こしている。顕著なボトルネック交差点は、下市場とトヨタ町北およびトヨタ町南である。下市場では市街の中心部から（図では上から）流入するリンクと東から（図では右から）流入するリンクに渋滞が発生し、ピーク時では渋滞長が1km以上にまで成長する。トヨタ町北およびトヨタ町南では幹線道路が交差し、さらに周辺に大規模な駐車場が集中しているため、すべての方向から車両があつまり、ここでも激しい渋滞が発生している。そのほかにも道路整備の遅れが指摘される前山町2丁目などがボトルネックとなっている。対象ネットワークの周辺にもいくつかのボトルネック交差点が存在するが、これらが原因となる渋滞が対象ネットワーク内部に達し、影響を及ぼすことはあまりない。

5.3.2 シミュレーションデータの作成

基本データである道路ネットワーク形状は、ディジタイザによる入力補助システムを用いて道路地図から入力した。ただし、レーン構成などは地図から読みとることはできないので、航空写真で確認している。

OD交通量データは、平成5年にトヨタ自動車がおこなった交通量調査、駐車場入庫調査、および車両通勤者へのアンケート調査などを用いて推定している。交通量調査では対象ネットワーク内の主要交差点21箇所、朝ピーク時を含む7:00～9:30において15分ごとに通過交通量が計測されている。駐車場入庫調査は12箇所の駐車場のうちの8箇所において、到着した車両数を計測している。またアンケート調査は勤務者の10%を抽出しておこなっており、出発時間、到着時間、駐車場までのおおよその経路などの項目について質問している。

シミュレーションは対象時間帯を6:30～9:30とし、トヨタ自動車通勤者のOD交通量とその他の通過交通のOD交通量を分離して推定している。ODペア数は、端点ノードが18箇所、および駐車場が12箇所なので、 $18 \times (18 + 12 - 1) = 540$ となる。OD交通量推定の作業フローを図5-16に示す。具体的には、交差点調査の結果を用い、エントロピー最大化によるOD交通量推定手法⁶⁹⁷⁰を利用して、全体のODパターンを推定している。このうちトヨタ自動車通勤者については、アンケート調査の結果を拡大して作成したODパターンに置き換え、差し引いた残りを一般交通のODパターンとしている。また端点から発生する交通量もトヨタ通勤者と一般交通を分離して時間帯別に推定し、それぞれの発生量とODパターンから、時間帯別OD交通量を作成するものである。

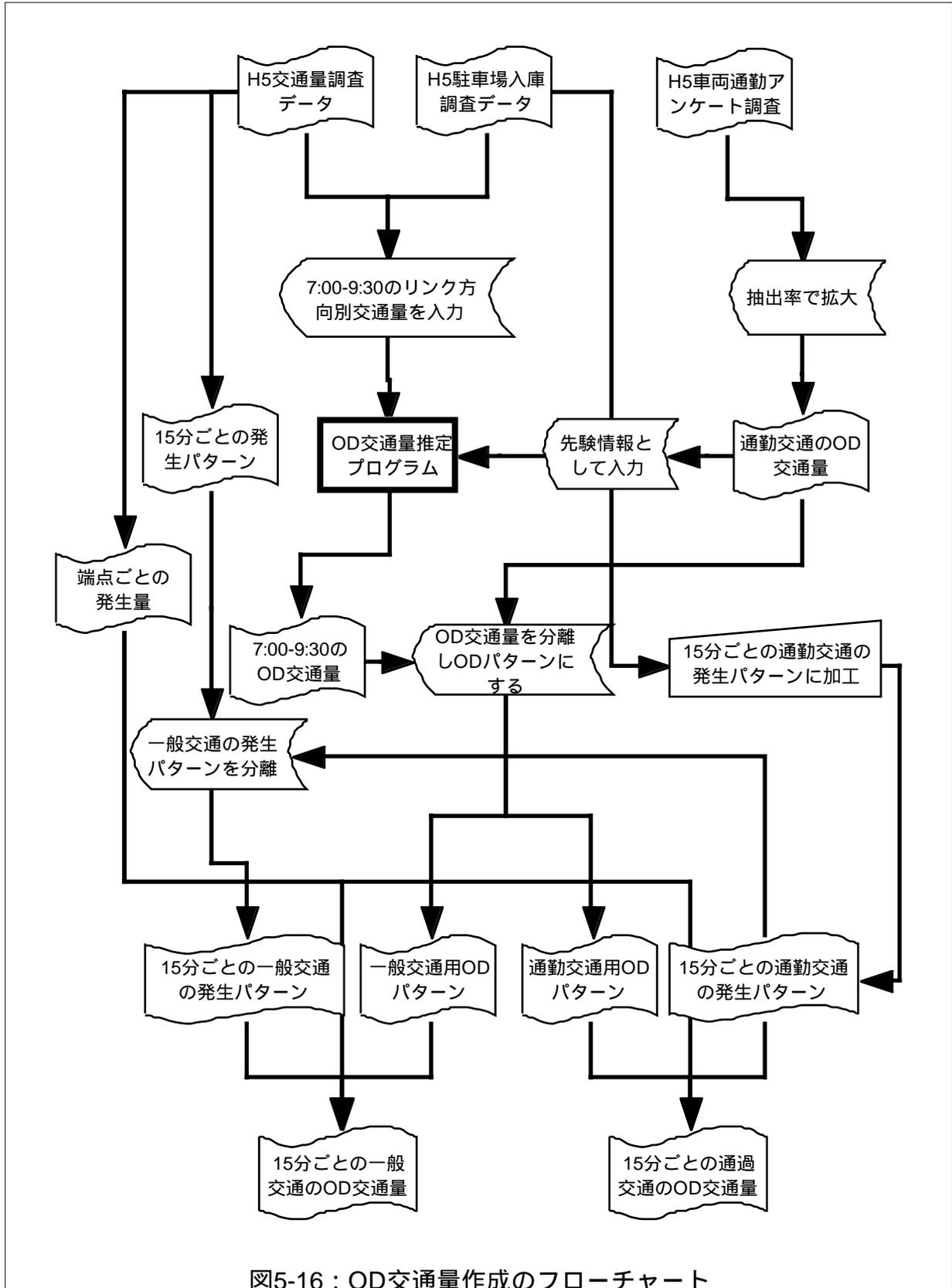


図5-16 : OD交通量作成のフローチャート

端点での発生量は実測値がないため、端点ノードに最も近い調査対象交差点での通過交通量を用いて推定した。このため下市場やトヨタ町南などの渋滞が発生している交差点に流入する端点では、実際とは異なる発生パターンが設定されている。

リンクの飽和交通流率や交通量 - 密度関数のパラメータについても実測値がないため、道路幾何構造から妥当と思われる数値を仮定し、シミュレーションを繰り返して微調整をおこなっている。同様に経路選択行動に関しても十分な調査データがないため、現在の旅行時間を経路コストとし、ロジットパラメータは他地域での分析から得られた値を仮定し、微調整をおこなっている。

5.3.3 現況再現シミュレーションの結果（豊田市ネットワーク）

現況再現のシミュレーションにあたって、このネットワークに固有の機能を追加

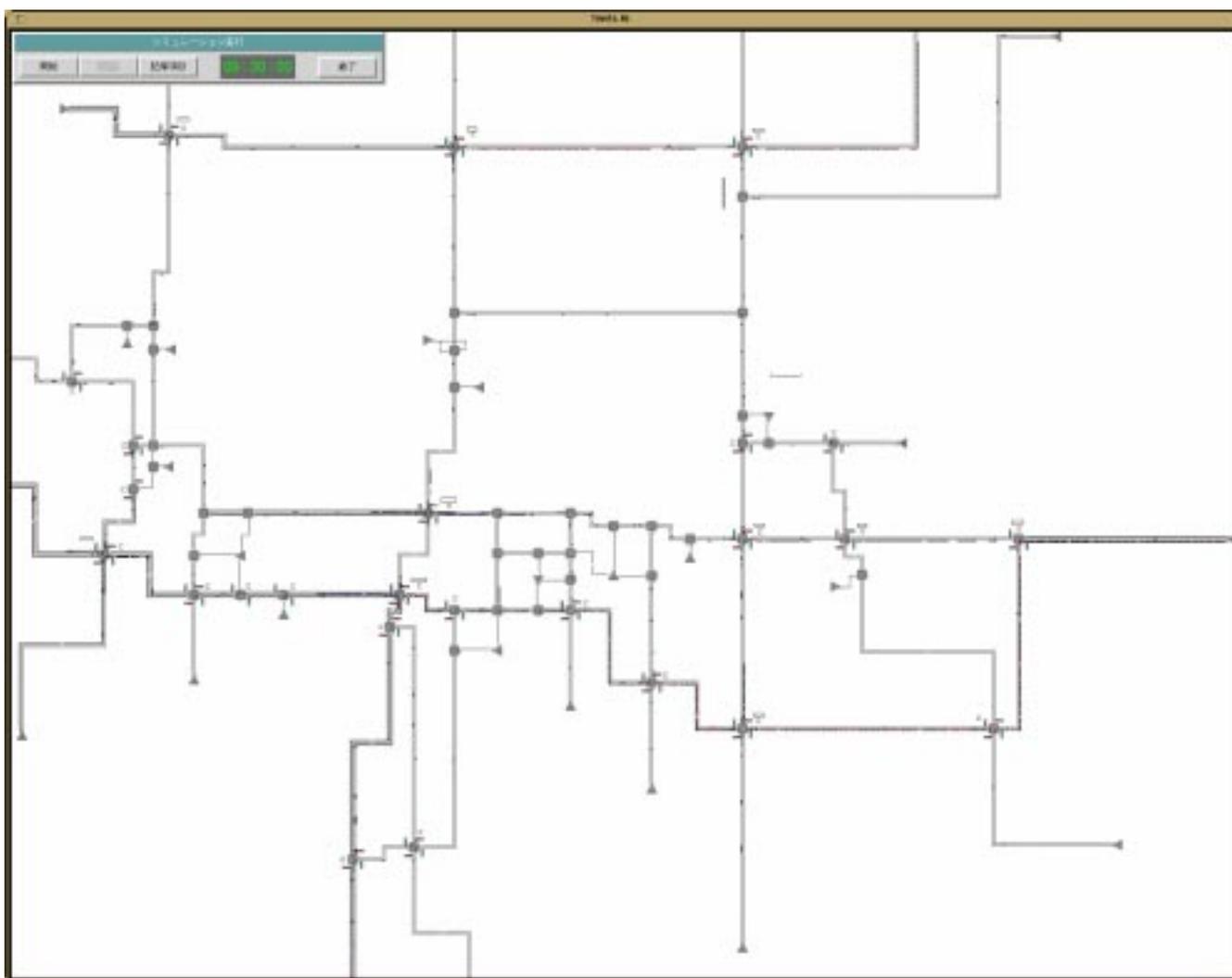


図5-17：豊田市ネットワークシミュレーション画面

している。トヨタ町北の西側（図では左）はトヨタ自動車本社の敷地内を通るリンクであり、8:00以前はゲートが開放されていないため通過することができない。したがってシミュレーションにおいても、このリンクを通る経路については8:00以前は選択することができないようにした。図5-17に豊田市ネットワークのシミュレーション画面におけるトヨタ町南周辺を示す。

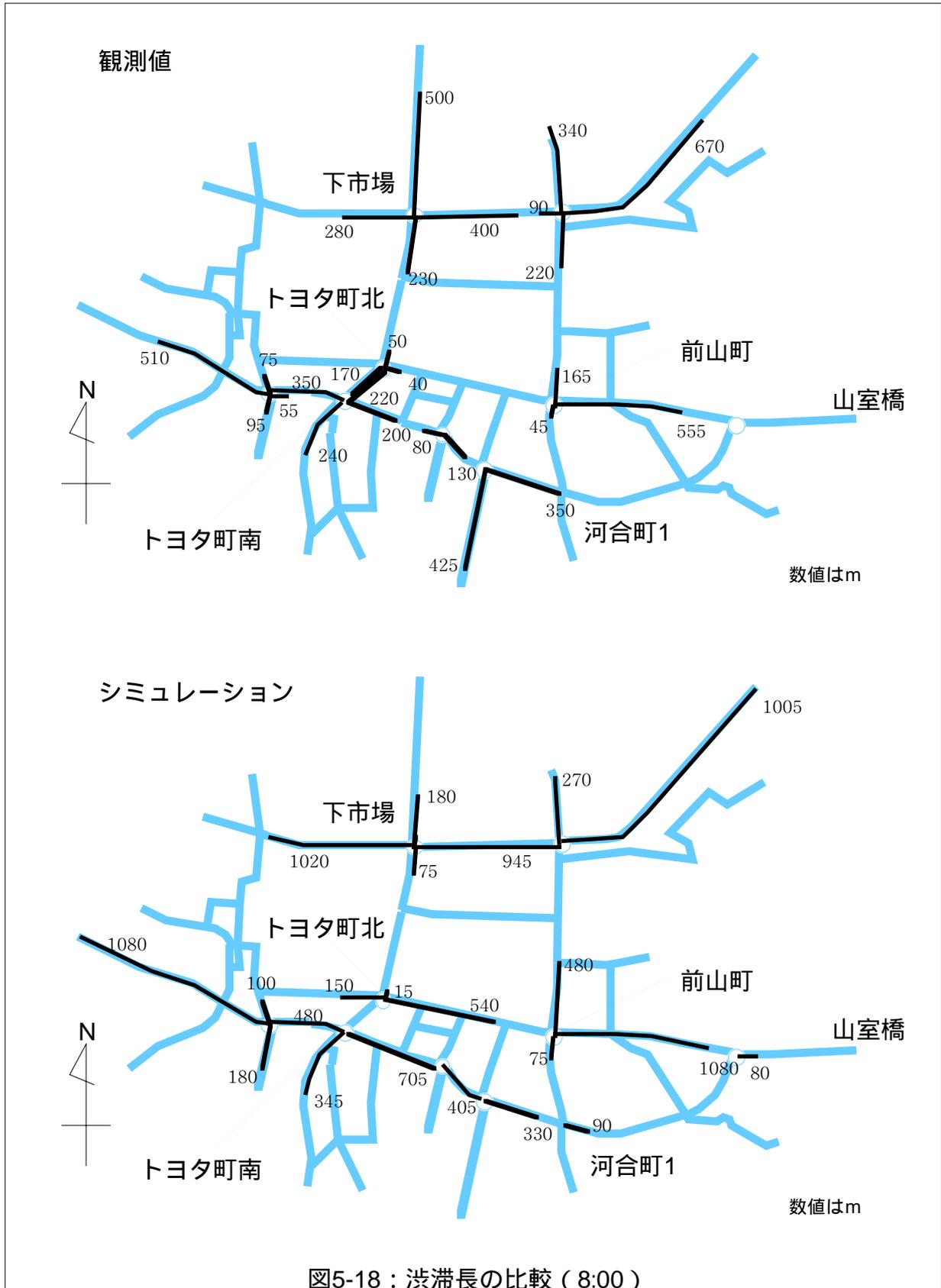
以下ではシミュレーションの結果の渋滞長と経路の旅行時間を比較することで、現況再現性を検証する。

渋滞長は混雑が発生する7:00～8:40において、20分ごとに観測されている。図5-18は渋滞が最も顕著な8:00における渋滞長の分布を地図上に記入し、比較したものである。観測値とシミュレーション値とで渋滞長の定義が違ふ、渋滞長調査の日が交通量調査の日と違ふ*、などの理由から、定量的にシミュレーション結果と比較するには信頼性が低い。しかしながらボトルネックの交差点や渋滞が発生する方向は変わらないと考えられるので、定性的な比較を試みると、実際にボトルネックとなっている交差点でシミュレーションでも渋滞が発生しており、まずまずの再現性を示している。

渋滞長の分布の傾向で顕著に異なっているところは、まず下市場を先頭に北方向に伸びるもので、シミュレーションではこの渋滞が再現されていない。これは北からの実際の到着需要がわかるわけではなく、発生交通量として下市場で観測された時間帯別の通過交通量を代用しているため、渋滞を引き起こすような流入率で需要が与えられないことによる。この部分の渋滞を正確に再現するには、渋滞にかからないもっと上流の地点で到着需要を計測することが必要である。

また下市場での東西方向の渋滞は、シミュレーションでは過度に再現されており、9:00になっても解消されない。西側の流入リンクについては、住宅地と接しているためネットワークには含まれない細街路が接続されており、かなりの交通がこのリンク上で消滅している。シミュレーションではこのようなことを考慮していないので、余分な交通が下市場に流入してくるため、渋滞がひどくなってしまう。また東側については、その上流の長興寺9丁目で左折すべき交通が直進してくるため、実際よりもひどい渋滞が発生している。これは後述するトヨタ町北およびトヨタ町南で渋滞が実際よりひどく再現されたため、代替経路のコストが増加し、本来の経路選択とは異なる挙動を示した結果と思われる。

*) 渋滞長の観測は交通量調査とは別に、半年後の平成6年2月におこなわれている。観測値は目視であり、シミュレーション値は地点平均速度が10 km/時を下回るブロックの長さの合計である。



次にトヨタ町北およびトヨタ町南を先頭とする渋滞を見てみると、トヨタ町北の東側流入部の渋滞長が実際より著しく長い。この流入部では実際の交通状況がレーン構成から推定される状況と異なっているため、飽和交通流率に幾何形状から妥当と思われる数値をはるかに超えた値を設定しているにもかかわらず、依然渋滞は過度に再現されてしまう。これは東側の山室橋から流入し、西側方面に向かう交通には、前山町～トヨタ町北を経由する経路と、河合町1～トヨタ町南を経由する経路が考えられるが、ここでの経路選択行動が十分に分析されていないため、実際と異なって前者の経路に交通が集中してしまうためと考えられる。また推定されたOD交通量が実際とかけ離れているため、この経路を選択する交通が多くなってしまった可能性もある。

同様の比較を、経路の旅行時間についてもおこなう。図5-19は走行調査によって所要時間が測定されている経路のうち、トヨタ町北とトヨタ町南を通るものについて示したものである。図5-20～5-22はそれぞれの経路の所要時間について、観測値とシミュレーション値を比較したグラフである。シミュレーション値は、実際の走行車両の出発時刻をはさんだ前後5分以内に、同じ経路を選択した車両の旅行時間を、1台ずつプロットしたものである。ただしここでも、各経路につき走行調査はたかだか2回程度である、走行調査がおこなわれた日は交通量調査から1年以上後の平



図5-19：旅行時間を計測した経路

成6年である，といった理由から両者を直接比較することは難しい．

経路1と経路2は東側の山室橋から流入し，それぞれトヨタ町北とトヨタ町南を
通って西側に向かう経路である．経路1では7:40頃に出発した場合*では両者は比較的
よく合致しているが，8:10頃の場合は渋滞長の比較でも認められたように，前山P～
トヨタ町北の区間に交通が集中したため，実際よりも時間がかかっている．これは
トヨタ町北～第2立体Pの区間のリンクは8:00以前は一般車両には開放されておらず，
通行可能になった時点では車両が存在しないため，8:00の直後ではこの区間を含む経
路1の旅行時間が相対的に短くなり，交通が過度に集中してしまうためと考えられる．

一方，経路2については，7:40と8:20のどちらに出発した場合でも，トヨタ町南を
通過するまでに実際より多くの時間を必要としている．トヨタ町南の東流入部での
通過交通量を比較すると，観測値に近い値がシミュレーションでも通過しているた
め，飽和交通流率については実際と近い値が設定されているにもかかわらず，渋滞
が過度に再現されているのは，この経路が選択候補となるODの発生交通量の推定値
が大きすぎた，シミュレーションでは考慮していない経路の途中で消失する交通量
が無視できない量だった，などの原因が考えられる．

経路3はボトルネックであるトヨタ町南を經由して，西から東に向かう経路である
が，ここでは観測値に非常に近い値でシミュレーション値が再現されている．こち
らの方向については適切なボトルネック容量が設定され，OD交通量も実際に近い値
が推定されているようである．

渋滞長の比較のところでも述べたように，旅行時間の比較からも定性的にはボトル
ネックとなる箇所を再現していることがわかるが，定量的にも再現するためには，
OD交通量を正確に推定すること，経路選択行動を十分に分析することなどが必要で
ある．

*）実際はこの時間帯はトヨタ町北～第2立体Pの区間が一般には開放されていないため，通行できないが，シミュレーションではプローブ車両だけを通行可能にして旅行時間を記録した．

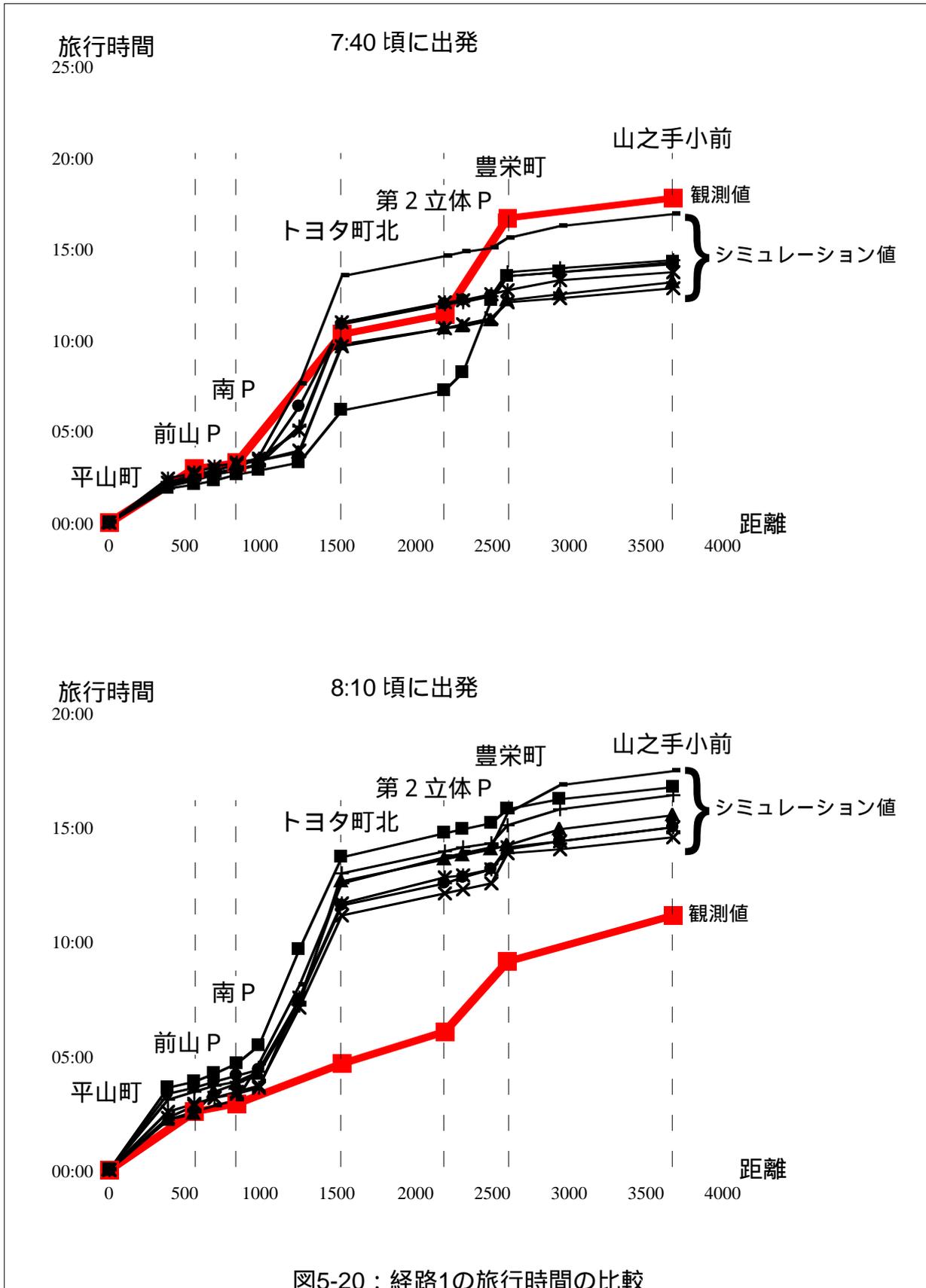


図5-20：経路1の旅行時間の比較

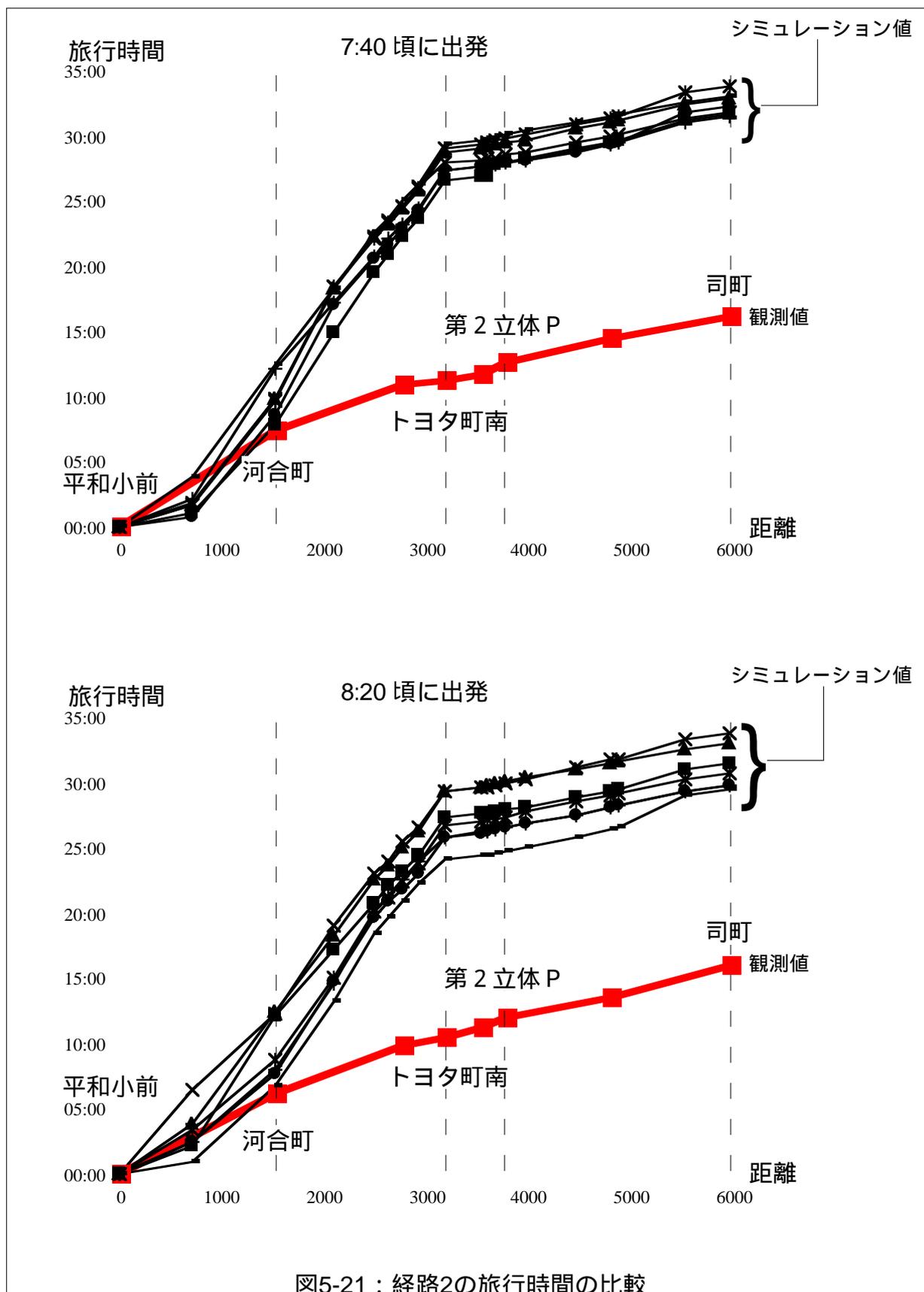


図5-21：経路2の旅行時間の比較

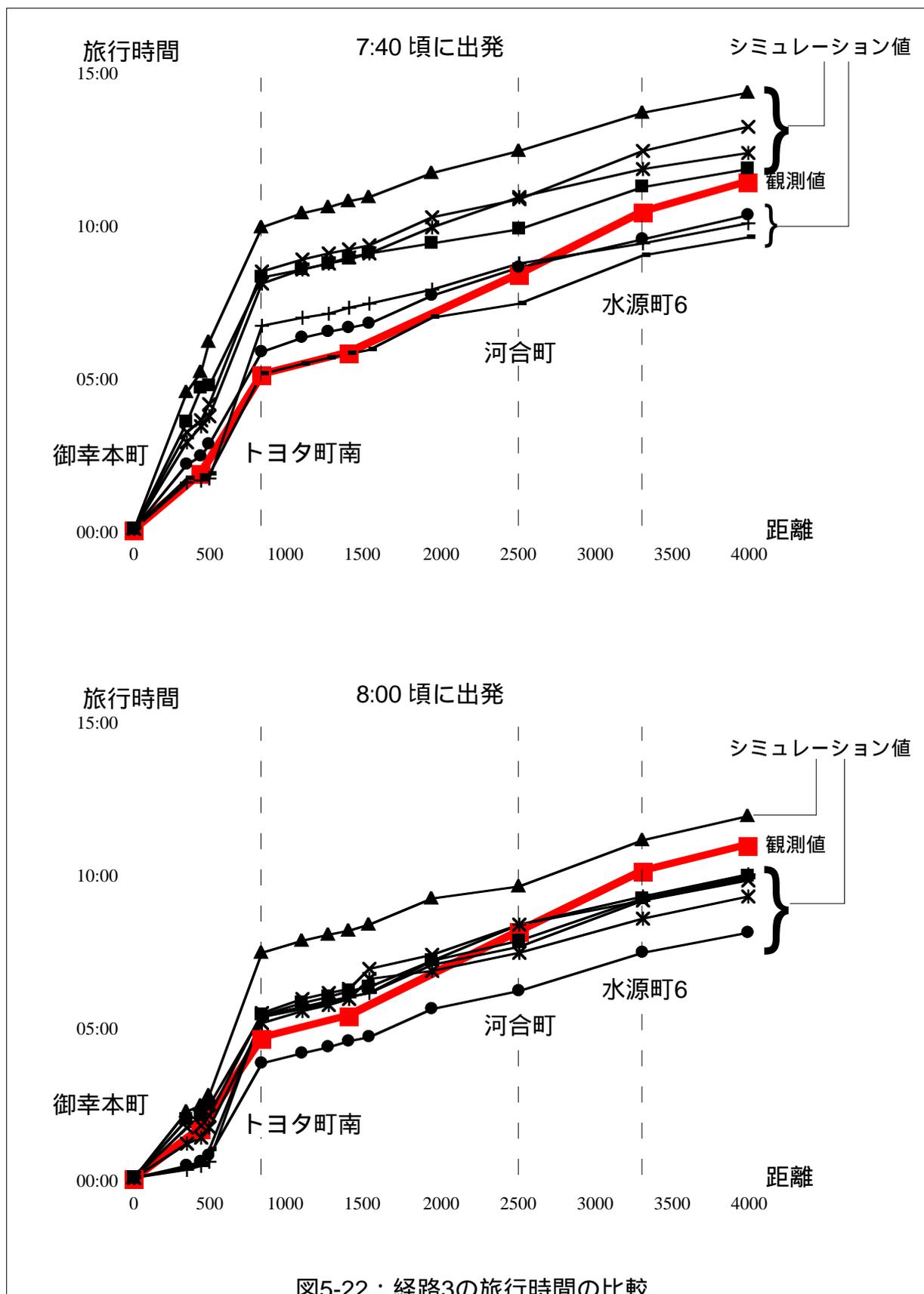


図5-22：経路3の旅行時間の比較

5.3.4 豊田市ネットワークの検証での問題

繰り返しになるが、この検証における問題点は、

- 1) OD交通量データの信頼性の低さ、
- 2) パラメータ調整に要する労力の大きさ、
- 3) 検証用データの信頼性の低さ

の3つに集約される。

まずOD交通量データであるが、この規模のネットワークで直接求めることは困難であるため、何らかの手法で推定せざるを得ない。ここでは交差点の通過交通量から推定しているが、すべての交差点での観測量があるわけではなく、またリンクの流入出で交通量が保存されていないなどの観測量につじつまが合わない点などが障害となって、精度よく推定できない。さらに渋滞が発生している交差点を中心に通過交通量を観測しているので、ネットワークに実際に流入する需要の時間変動が推定できない、OD交通量推定の際に仮定しなければならない経路選択行動について分析がなされていない、など多くの不確定要素が存在する。

次にリンクの飽和交通流率などのパラメータ調整の問題であるが、ここでも実測データがないため、シミュレーションを繰り返して試行錯誤で設定するしかない。しかしながら調整の対象となるパラメータは多数あり、しかも一つのボトルネック交差点の飽和交通流率を変えただけで、ネットワーク全体の交通状況が大きく変化してしまうようなこともあるので、何度もシミュレーションを繰り返す必要があり、効果的な探索をおこなうことが困難であった。

最後に検証用のデータの問題であるが、これらのデータはOD交通量の推定に使われる交差点通過交通量などの交通実態調査と同時に行われているわけではなく、全く交通状況が異なる日に採取されている。しかも労力の問題から、十分なデータ数が採取されたとはいえず、これらをもとに定量的な比較をおこなうことについては疑問がある。

これらの問題から議論される、シミュレーションを実ネットワークに適用する際の留意事項などについては、第6章において述べる。

5.4 交通運用策評価への適用例

本節ではシミュレーションの実業務での適用例として、静岡駅前における地下駐車場出入口の設置位置の検討と、新浦安駅周辺地区でのショッピングセンターへの来客誘導案の検討の2つを簡単に紹介する。

5.4.1 地下駐車場出入口の設置位置の検討

図5-23は静岡駅北口付近の道路ネットワークを模式化したものである。駅の北側には国道1号線（A～B）が通っており、交通量が多い地域となっている。とくに休日の日中は、繁華街の近くであるため、買い物客の交通が多く、国道1号線は近飽和状態となっており、また周辺の駐車場に入りきれない車両がときおり交通の障害となっていることが問題として指摘されている。図中の矢印と数字は、休日ピーク時（12:00～13:00）の主要交差点での通過交通量を示している。

現在この地域に、400台規模の地下駐車場を建設する計画が進められている。しかしながら、その駐車場を利用しようとする車両がこのネットワークに流入するため、国道1号線の交通量が増え、渋滞が発生する可能性が心配された。図5-24は地下駐車場を加えて、その出入口付近の交通規制に変更を加えたネットワークである。駐車場の出入口は、国道1号線からはずれたところに設け、入庫待ち行列が国道にまで伸びないことを考慮している。図中の矢印と数字は、予測される休日ピーク時の

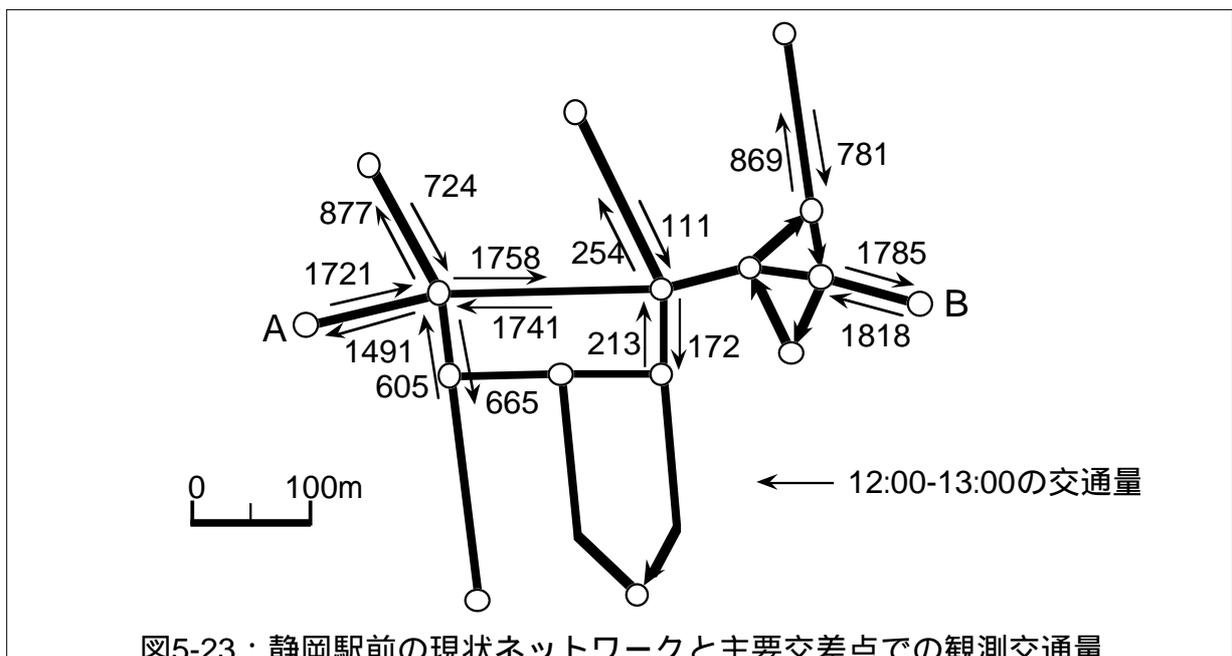
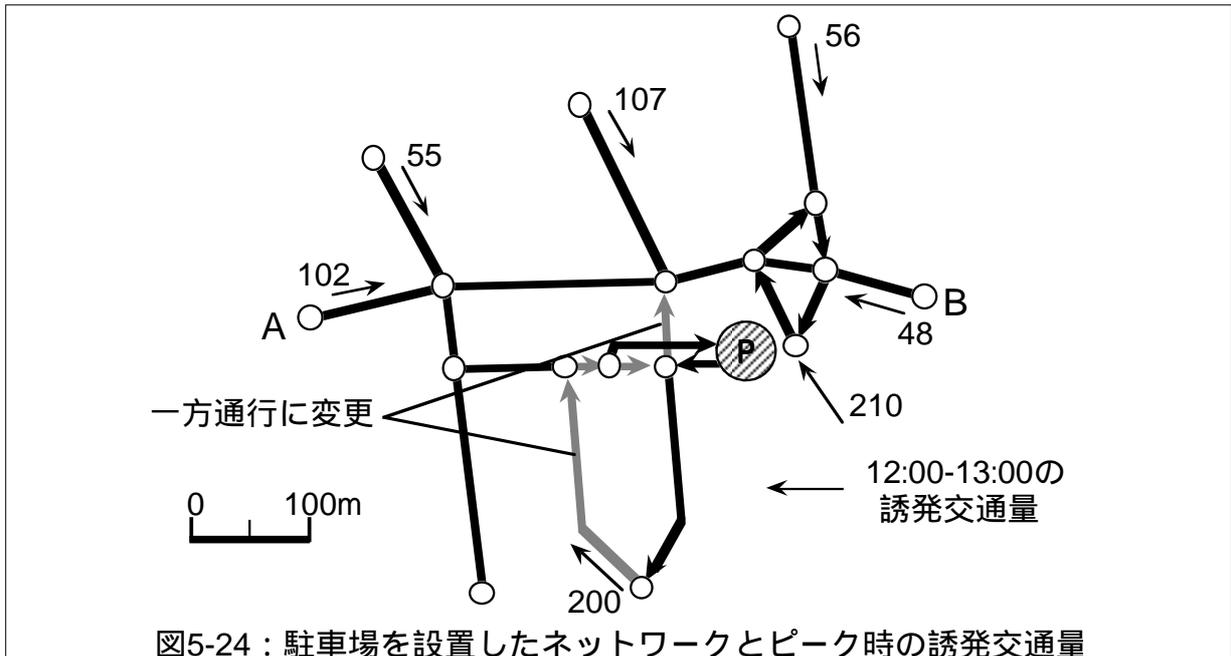
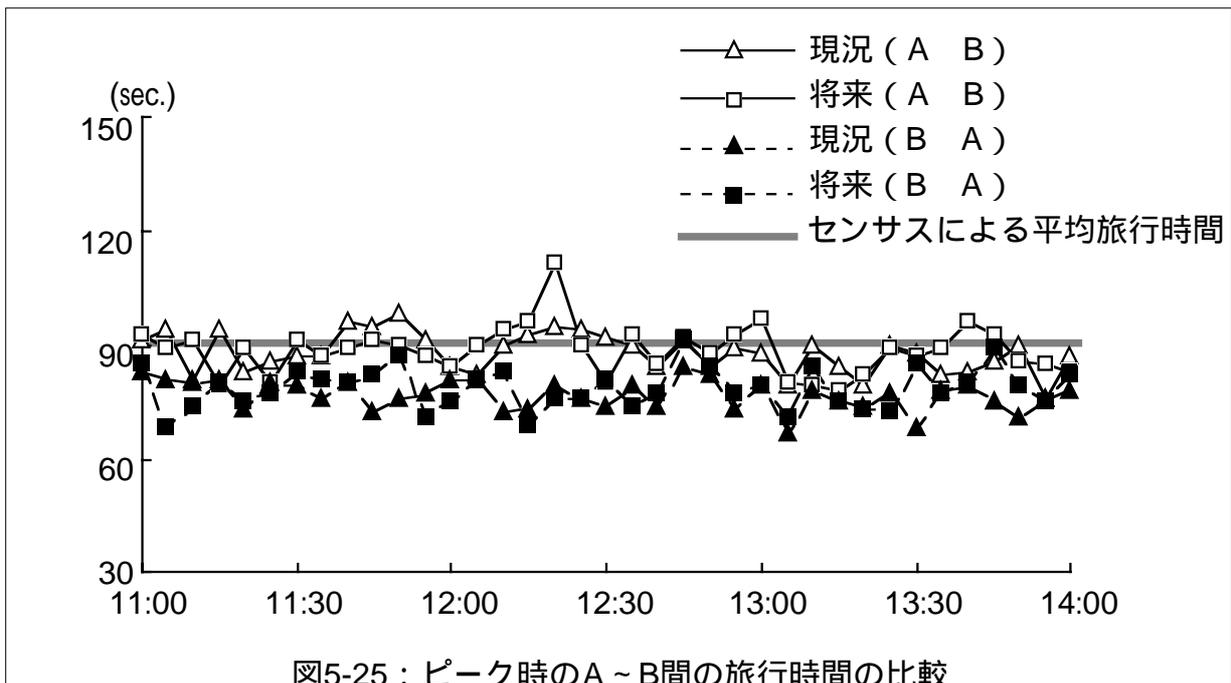


図5-23：静岡駅前の現状ネットワークと主要交差点での観測交通量



駐車場の誘発交通量である。

この場合は、現状のネットワークと地下駐車場とそこへの誘発交通量を加えたネットワークを用いてシミュレーションを行い、両者の国道1号線の旅行時間を比較することで、検討を行った。図5-25は、両者のA～Bの区間の平均旅行時間を5分ごとと比較した結果である。図から読みとれるように、駐車場を設置しても旅行時間には有為な差は見られない。また参考のために、センサスによるこの地点の平均旅行時間を図中に示しているが、シミュレーション値は比較的近い値となっている。



また駐車場の入庫待ち行列が国道にまで到達しないことについても、アニメーション表示により確認を行っている。したがって駐車場を建設し、計画された位置に出入口を設置しても、現況の交通には大きな影響はないと予測される。

5.4.2 大規模集客施設への誘導案の検討

図5-26はJR新浦安駅周辺の道路ネットワークである。対象地域には大規模な駐車場を伴うショッピングセンターがあり、多くの買い物客が車で来場する。周辺道路から駐車場への案内誘導がすべて交差点Dを通過するようになっており、買い物交通のピークである休日の夕方には、来場車両の需要が断面d1-d2の容量を超えてしまい、渋滞が発生する。交差点BとDを結ぶ道路は駅前に面しており、比較的交通量が多いため、この渋滞を解消することが求められている。図5-27は現況のデータをもとにシミュレーションを行った画面である。シミュレーションにおいても渋滞が発生し、主要道路に延伸していることが再現されている。

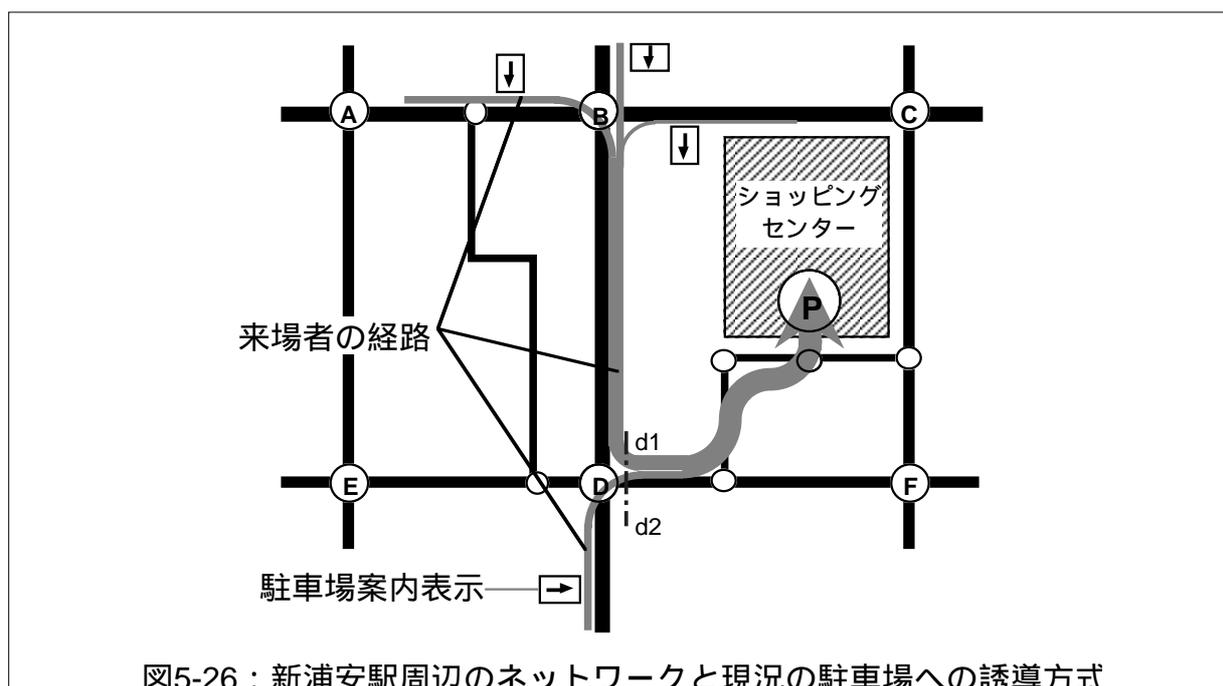


図5-26：新浦安駅周辺のネットワークと現況の駐車場への誘導方式

対策案の一つとして、来場車両の誘導方式を変更することが検討された。図5-28は交差点Bに画面上方向から流入する来場車両を、交差点Cを経由させて駐車場に誘導し、シミュレーションを行った結果の画面である。シミュレーションにおいては、来場車両は経路固定層として表現されており、この場合も指定する経路を変更するだけで、新たな誘導方式の検討を容易に行うことができる。この場合は交差点Dの

負担が軽減されたため、渋滞が解消されていることがわかる*。



図5-27：現状誘導方式でのシミュレーション

*) しかしながら、実際は交差点C～E間は住宅地となっているため、この区間に車両を誘導することは周辺住民に迷惑をかけることとなり、この案は結局採用されなかった。



図5-28：誘導方式を変更した例

第6章 結論と今後の課題

本章ではまとめとして、本研究で得られた結論と、本研究での実証的検証を通して明らかになったシミュレーションによる交通運用策の評価における問題点について述べる。また交通シミュレーションが普及するにつれ、今後どのように進化していくかについて、筆者の考えを述べる。

6.1 結論

本研究で得られた結論を以下に述べる。

1. 従来の静的な指標を用いた交通運用策の評価手法の限界を示し、交通シミュレーションを用いた動的な検討手法の優位性を主張した。また地区レベルでの交通運用策の検討に適用する際に、シミュレーションに要求される機能を明らかにした。
2. 交通運用策の評価業務における実用化を目的とした交通シミュレーションシステム AVENUE を開発した。AVENUEで採用するシミュレーションモデルの構築にあたり、ここで要求される機能を満足するために、ハイブリッドブロック密度法と呼ぶ新たな交通流表現手法を提唱し、その利点および計算アルゴリズムを明らかにした。さらにITSの導入や交通情報提供などの「高度な」運用策の評価にも対応できるように、利用者層ごとに経路選択挙動を設定することができる柔軟性の高い経路選択モデルを組み込んだ。
3. 交通規制や路上駐車、交差点での右折待ちといった、街路において特徴的な状況をハイブリッドブロック密度法をもちいてモデル化し、この手法の表現力の高さを示した。また計算量を軽減するために同手法を改良して、長い区間のブロックを混在させるマルチスキャンハイブリッドブロック密度法を提唱した。
4. シミュレーションモデルの基本的な性能を確認するために、まずハイブリッド

ブロック密度法について、簡単なネットワークを用いて理論的検証をおこなった。検証した項目は、1) 飽和交通流率の再現性、2) リンク上でのショックウェーブの伝播、3) リンクをまたがった渋滞の成長と解消、4) 信号交差点での遅れ、および5) 対向交通による右折容量の低下、の5つで、ブロックへの分割の仕方が細かい場合と粗い場合とで結果が異なるかどうかについても検証している。1~3) についてはブロックへの分割の仕方にかかわらず理論値と一致した結果を示している。4) についてはシミュレーションでの遅れ時間は、ブロックへの分割が細かい場合、ランダム到着の遅れと一様到着の遅れの理論値の間に分布するが、ブロックの分割を粗くした場合、一様到着の遅れをわずかに下回ることが判明した。また5) については理論式と完全に一致はしないが、シミュレーションにおいても対向直進によって右折容量が低下している現象が再現されている。

5. つぎに経路選択モデルについて、同様に簡単なネットワークを用いて理論的検証をおこなった。検証実験ではリアクティブ均衡配分を仮定し、ドライバーに対し現在の旅行時間情報を提供して経路を確率選択させた。その結果、ドライバーが旅行時間差に対して敏感に反応する場合は、理論値からも予測されるように経路交通量が振動する。利用者均衡のような定常状態にならないのは、与える旅行時間情報の質の違いに起因するものである。したがって実際の適用に際しては、経路選択挙動に関する分析をおこない、ドライバーにどのような情報を与えるか、どのような基準で経路を決定させるかを、注意深く設定する必要がある。
6. AVENUEの実用性を検証するために、実際の道路ネットワークでのデータを用いてシミュレーションをおこなった。はじめに経路選択の余地のない錦糸町の国道14号線および金沢駅前道路におけるネットワークに適用した。シミュレーション結果の渋滞長や旅行時間などを観測値と比較した結果、混雑している交通状況についても、比較的よい再現性を得ることができた。また金沢駅前道路のケースについては、バスの運用を考慮したシミュレーションをおこない、駅前広場改修に伴うバスターミナルの形状変更の影響評価を行っている。
7. 実証的検証の次の段階として、経路選択の余地のある豊田市ネットワークでのシミュレーションをおこなった。推定されたOD交通量の精度があまりよいもの

ではない，経路選択挙動に関する分析がなされていない，などシミュレーションデータの作成に際して，問題点が幾つか指摘されたが，実際にボトルネックとなる交差点でシミュレーションでも渋滞が発生しており，定性的な比較では良好な結果を得た．

- 8．実務における運用策評価の例として，地下駐車場の出入口設置位置の検討と大規模集客施設への誘導方式の検討例を紹介し，シミュレーションによる交通検討の可能性を示した．

6.2 シミュレーションによる交通運用策の評価における諸問題

6.2.1 交差点の交通量調査

交通運用策の適用が検討されるような地区では、現状の交通がどれくらい混雑しているかを把握するために、交通実態調査が行われる。動的な現象を扱うシミュレーションにおいては、運用策による改善の程度を評価できるように、対象地域を設定することが望まれる。そのため交通実態調査では、その地域での渋滞の原因と思われる問題交差点を明らかにするだけでなく、現在の渋滞が影響を及ぼしている範囲、その渋滞を引き起こしている交通需要などを把握しなければならない。

しかしながら、飽和度などによる静的な評価手法が前提とされている現状では、問題交差点でのみ交通量調査が行われている場合がほとんどである。これではその渋滞している地区に流入する交通需要の時間変動のような、シミュレーションに必要とされるデータを得ることができない。

従って、シミュレーションによる評価を想定とした場合、調査では次の点について留意することが必要である。すなわち、予備調査や経験的な知識から、渋滞の影響が及んでいる地域を把握し、シミュレーションの対象ネットワークはその地域を包含するように設定する。また、交通実態調査においては、渋滞の原因となる交差点だけではなく、その渋滞への需要を把握するために、周辺部の交差点についても交通量調査を行うことが望ましい。

6.2.2 評価に用いられる指標の観測

シミュレーションによる運用策評価では、まず現況を再現するシミュレーションを行い、各種の設定の妥当性を確認した後に、運用策を適用した後の状況を予測するシミュレーションを行い、両者を比較するという手順が一般的である。現況の再現性の議論の際は、断面交通量、渋滞長、旅行時間、などがその指標に用いられる。このうち断面交通量については、調査で観測されている場合が多いが、その他の指標については観測されていないか、あったとしても精度が良くない場合がほとんどである。調査を計画する段階から、これらの観測値を得ることを考慮しておくべき

である。

しかしながら，別の観点から，渋滞長については評価用の指標になりにくいとの考えもある。すなわち，渋滞長はその定義が明確でないため観測が困難であることや，時間帯内での変動が大きいことなどから，観測値の精度・信頼性があまり高くないと考えられる。渋滞長はシミュレーション範囲を決定する際や，結果の定性的な評価などの判断材料にとどめておく程度が無難である。

したがって，調査においてはむしろ旅行時間の観測に労力を裂くべきと考えられるが，一般的な走行車両による測定では，あまり多くの点数のデータを得ることができない。街路の走行においては，信号による待ち時間が大きな割合を占めるが，ほぼ同時刻に同じ地点を出発しても，信号のタイミングによっては大幅に旅行時間が異なる場合も考えられるため，シミュレーション結果と比較するならば，平均的な走行時間を知る必要がある。そのためには，測定する区間の両端部においてナンバープレートを読み上げ，1台ごとの所要時間を観測するなどの調査が必要となる。

6.2.3 ネットワーク・信号データの入手

対象となるネットワークが大きくなるのに比例して，データ入力作業の労力も増す。デジタル地図データからの自動変換や，ディジタイザによる座標読み取りなどで，ある程度省力化することは可能であるが，本研究のようなシミュレーションで必要とされるレーン構成や信号現示といった詳細なデータまでは得られない。入力作業が完全に自動化されるためには，これらのデータが一元的に管理させるのを待たなければならない。とくに信号現示については，パターン制御や需要感応制御など，シミュレーションの対象時間帯内で動的に変化していると考えられるが，その内容やアルゴリズムについては明らかにされていない場合が多い。このため，現状ではある時点における現示パターンを観測し，それを一定値としてシミュレーションで採用している。

6.2.4 OD交通量の推定

ネットワークでのOD交通量は，端点においてナンバープレートを照合することで直接知ることができるが，シミュレーション対象範囲が広がると，このような作業は非常に困難になる。主要交差点やリンク中間地点などにおける通過交通量を基に，OD交通量を推定する手法については従来より多くの研究があるが，実際の問題

に適用した場合、信頼できる結果を得られるものは少ない。今後の研究が待たれる。

このような研究とは別に、近年VICS等に代表される路車間通信の情報インフラが整備されつつある。車載機の搭載率が高くなれば、それらからの情報を利用して、より正確な交通流動の実態を把握することも可能になるかもしれない。こちらの方向性にも期待したい。

6.2.5 経路選択行動の分析・モデル化

本研究で対象とするような、数キロ四方の地域では、短・中期的な運用策が適用された場合の経路選択行動は、通常の意味でのそれと違い、ドライバーの目的地（＝ネットワークの端点）が変わってしまうようなことが多い。このような行動には対象地域内の交通状況だけでなく、それ以外の地域の交通状況に関する情報などが影響する。これらの行動については、その傾向・実態に対する分析を行うだけでなく、どのようにモデル化を行うかについても議論する必要がある。

6.2.6 シミュレーションパラメータの調整

一般に交通流モデルを記述するパラメータのすべてについて、観測値や真値を得られるわけではなく、ほとんどのものが推定された値に設定されている。このため、現況を再現する段階で、それらの設定を変更して、シミュレーションを繰り返すわけだが、わずかな変更がシミュレーション結果を大きく変えることもあるため、どうしても慎重に変更して行くしかない。シミュレーションそのものに長時間を要する場合は、このパラメータ調整に費やす労力が非常に大きくなる。本研究の場合は、モデルパラメータにはリンクの飽和交通流率や自由旅行速度などがあるが、これらはある程度は幾何形状などから推定可能で、自由度もそれほど大きくないと考えられるため、観測された交通量データなどからヒューリスティックな知識を用いた処理によって効率的に推定する手法を考案する必要がある。

6.3 交通シミュレーションの展望

本研究では短・中期的な運用策の評価を目的としたシミュレーションモデルを開発したが、このようなシミュレーションが交通運用の業務だけでなく、幅広く使われるためには、どのような研究開発の方向性があるであろうか。

- 1) **交通計画・防災計画のツールとして...**シミュレーションアプリケーションの一つに、防災計画の一環としての災害時の交通運用が考えられる。このような場合、地形や土地利用状況などの都市計画に必要とされるデータと連動して、運用策評価を行うことが望ましい。シミュレーションが計画段階の業務に浸透していくには、GISのようなツールを利用し、土地利用モデルや地域開発モデルと融合することが求められる。
- 2) **交通インパクト評価ツールとして...**都市部においては自動車交通が環境に与える悪影響がしばしば問題となることから、交通運用策の評価に際しても、騒音や大気汚染状況といった指標を求められることも多い。この場合は交通シミュレーションの後処理として、それらの指標を求めるモデルを負荷することが考えられる。
- 3) **リアルタイムの制御用ツールとして...**シミュレーション機能を組み込んだ、より高度な信号制御や情報提供を考えた場合、シミュレーションは即時に将来の交通状況を予測することが求められる。シミュレーションの実効速度を向上する一つ的手段として、計算の並列化が考えられる。実際、交通シミュレーションは並列計算に向けた問題であり、並列アーキテクチャの議論や、ネットワークを分割して並列化する研究などが報告されている。
- 4) **多目的な運用策評価ツールとして...**本研究でのシミュレーションモデルはハイブリッドブロック密度法を採用しており、マクロな指標を用いて交通流を計算するものであった。一般にシミュレーションモデルは目的を満たすような諸元をきめてから、開発されるため、すべての状況に対して適用できる汎用性を持つものではない。本モデルも、無信号の合流部や駐車場出入口周辺などのような、容量を外生的に与えることが困難な部分については、ハイブリッドブ

ロック密度法では対応できないため、新たにマイクロに車両挙動を記述したモデルを組み込むものとしている。したがって、より汎用的・多目的に使われるシミュレーションツールとなるには、このような部分的な現象について詳細なモデル化を行うような研究が必要とされる。

参考文献

(重複しているものもある)

1. 交通工学研究会編「交通工学ハンドブック」, 技報堂出版, 1984
2. 浅野光行: 大規模都市開発と関連交通計画をめぐる論点, 大規模都市開発と交通インパクトの評価, 第6回土木計画学ワンデイセミナー, 1995
3. 建設省都市局「大規模開発地区関連交通計画検討マニュアル」, 1994
4. 警察庁交通局監修「月間交通」, 1993, 3月号
5. 原田昇: インパクトフィーの論点と適用手法, 道路交通経済春季号, No.59, pp.46-51, 1992
6. 中川大: 地震直後の交通渋滞と防災交通計画, 交通工学, Vol.30, 増刊号, pp.22-27, 1995
7. イメージ工学研究所編「ITSのすべて」, 日本経済新聞社, 1995
8. 越正毅, 明神証「新体系土木工学 道路(Ⅰ) - 交通流 - 」, 技報堂出版, 1983
9. 交通工学研究会「交通管制における交通状況予測手法に関する研究」, 1971
10. R. D. Coombe : Review of Computer Software for Traffic Engineers, Transport Reviews, Vol. 9, No. 3, pp. 217-234, 1989
11. D. R. Leonard, J. B. Tough, P. C. Maguley : A Traffic Assignment Model for Predicting Flows and Queues during Peak Periods, TRRL Laboratory Report 841, 1978
12. R. D. Coombe, T. J. Annesley, R. P. Goodwin : The Application of CONTRAM in Bahrain, Traffic Engineering & Control, pp.50-59, February, 1983
13. C. White, N. Taylor, N. Hounsell : CONTRAM - A Computer Suite for Modelling Road Congestion, Traffic Technology International '94, pp.106-110, 1994
14. N. B. Taylor : Contram 5: An Enhanced Traffic Assignment Model, TRRL Research Report 249, 1990
15. D. I. Robertson : TRANSYT : A Traffic Network Study Tool, Road Research Laboratory Report, LR253, Crowthorne, 1969
16. MVA Systematica, "CONTRAM 5 User Guide", 1989

17. 小根山裕之, 岡田知朗, 桑原雅夫, 吉井稔雄: 交通流シミュレーションモデル「CONTRAM」の車両移動ロジックに関する分析, 生産研究, 第46巻, 第3号, pp. 54-57, 東京大学生産技術研究所, 1994
18. J. D. Bolland, M. D. Hall, D. Van Vilet: SATURN: A Model for the Evaluation of Traffic Management Schemes, Institute for Transport Studies Working Paper 106, Leeds University, 1979
19. M. D. Hall, D. Van Vilet, L. G. Willumsen: SATURN - A Simulation-Assignment Model for the Evaluation of Traffic Management Schemes, Traffic Engineering & Control, Vol. 21, pp. 168-176, April, 1980
20. 交通工学研究会「交通信号の手引き」, 1994
21. M. Van Aerde, S. Yagar: Dynamic Integrated Freeway / Traffic Signal Networks: Problems and Proposed Solutions, Transportation Research A, Vol. 22A, No. 6, pp. 435-443, 1988
22. C. C. Liu: Integrated Network Modelling with TRAF, Preprint at the Second Multinational Urban Traffic Conference, Beijing, China, May, 1991
23. A. K. Rathi, A. J. Santiago: Urban Network Simulation: TRAF-NETSIM Program, Transportation Engineering, Vol. 116, No. 6, pp.734-743, 1992
24. 尾崎晴男: 交通信号制御のシミュレーションモデルの開発, 第7回交通工学研究発表会論文集, pp. 13-15, 1984
25. 尾崎晴男: 街路網信号制御の評価シミュレーションモデル(DESC), 交通工学, Vol. 24, No. 6, 1989
26. 桑原雅夫, 上田功, 赤羽弘和, 森田綽之: 都市内高速道路を対象とした経路選択機能を持つネットワークシミュレーションモデルの開発, 交通工学, Vol. 28, 1993
27. 上田功, 坪野寿美夫, 桑原雅夫, 赤羽弘和, 尾崎晴男: 経路選択 - シミュレーションモデルの開発, 土木計画学研究・講演集, No. 14 (1), pp. 279-286, 1991
28. 交通シミュレーション研究会「街路交通規制対策の検討手法に関する研究報告書(第6次分)」, 社団法人日本自動車工業会, 1976
29. 木戸伴雄, 池之上慶一郎, 斉藤威: 街路網における経路探索・交通配分モデル(DYTAM-I), 科学警察研究所報告交通編, Vol. 19, No. 1, pp. 1-10, 1978
30. M. Van Aerde, S. Yagar: Dynamic Integrated Freeway / Traffic Signal Networks: A Routing-Based Modelling Approach, Transportation Research A, Vol. 22A, No. 6, pp. 445-453, 1988
31. S. Yagar: Assessing the Traffic Assignment Procedures in INTEGRATION,

- submitted to Transportation Research, 1993
32. H. S. Mahmassani, T. Hu, R. Jayakrishnan : Dynamic Traffic Assignment and Simulation for Advanced Network Informatics (DYNASMART), presented at the 2nd International Capri Seminar on Urban Traffic Networks, Capri, Italy, 1992
 33. P. S. Chen, H. S. Mahmassani : A Dynamic Interactive Simulator for the Study of Commuter Behavior under Real-Time Traffic Information Supply Strategies, Preprint of Transportation Research Board, 72nd Annual Meeting, Washington, D. C., 1993
 34. G. Chang, T. Junchaya : A Real-Time Network Traffic Simulation Model for ATMS Applications, Preprint of Transportation Research Board, 72nd Annual Meeting, Washington, D. C., 1993
 35. T. Junchaya, G. Chang, A. Santiago : ATMS: Real-Time Network Traffic Simulation Methodology with a Massively Parallel Computing Architecture, Preprint of Transportation Research Board, 71st Annual Meeting, Washington, D. C., 1992
 36. 吉川康雄, ほか : 渋滞改善のための交通流マイクロシミュレータの開発, 第14回シミュレーションテクノロジーカンファレンス, 日本シミュレーション学会, pp. 189-192, 1995
 37. 羽藤英二, 香月伸一, 貴志泰久 : シミュレーションによる交通制御の最適化とそれに伴う交通流の変化, 第14回交通工学研究発表会論文集, pp. 49-52, 1994
 38. 貴志泰久, 香月伸一, 吉川康雄, 森田育宏 : GUIを用いた交通流シミュレーションの入力データ作成プログラムの開発, 第15回交通工学研究発表会論文集, pp. 41-44, 1995
 39. 吉井稔雄, 桑原雅夫, 森田綽之 : 都市内高速道路における過飽和ネットワークシミュレーションモデルの開発, 交通工学, Vol. 30, No. 1, pp. 33-41, 1995
 40. T. Yoshii, H. Akahane, M. Kuwahara : An Evaluation of Effects of Dynamic Route Guidance on an Urban Expressway Network, Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Transport Systems '95, Yokohama, pp. 1995-2000, 1995
 41. 岡村寛明 : 過飽和ネットワークシミュレーションモデルの一般街路への拡張, 東京大学大学院工学系研究科修士論文, 1996
 42. 堀口良太, 片倉正彦, 赤羽弘和, 桑原雅夫 : 都市街路網の交通流シミュレータ-AVENUE-の開発, 第13回交通工学研究発表会論文集, pp. 33-36, 1993
 43. 飯田恭敬, 内田敬, 藤井聡, 鷹尾和享 : 渋滞の延伸を考慮した動的交通流シミュレー

- シヨン, 土木計画学研究講演集, No. 14(1), pp. 301-308, 1991
44. 松井寛: 交通需要の動学的分析の諸相と今後の展望, 土木学会論文集, No.470 / IV-20, pp.47-56, 1993
 45. B. W. Wie, T. L. Friesz, R. L. Tobin: Dynamic User Optimal Traffic Assignment on Congested Multi-destination Networks, Transportation Research, Vol. 24B, No. 6, pp. 431-442, 1990
 46. D. E. Boyce, B. Ran, L. J. LeBlanc: Dynamic User-Optimal Traffic Assignment: A New Model and Solution Technique, Paper Presented at the First Triennial Symposium on Transportation Analysis, Montreal, Canada, 1991
 47. 桑原雅夫, 赤松隆: 多起点多終点ODにおける渋滞延伸を考慮したリアクティブ動的利用者最適交通量配分, 土木学会論文集 (投稿中)
 48. J. L. Horowitz: The Stability of Stochastic Equilibrium in a Two-link Transportation Network, Transportation Research, Vol. 18B, No. 1, pp. 13-28, 1984
 49. H. S. Mahmassani, R. Jayakrishnan: System Performance and User Response under Real-time Information in a Congestion Traffic Corridor, Transportation Research, Vol. 25A, No.5, pp. 293-307, 1991
 50. H. S. Mahmassani, S. Peeta, G. L. Chang, T. Junchaya: A Review of Dynamic Assignment and Traffic Simulation Models for ADIS/ATMS Applications, Technical Report, DTFH61-90-R-0074-1, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 1991
 51. T. Yoshii, H. Akahane, M. Kuwahara: An Evaluation of Effects of Dynamic Route Guidance on an Urban Expressway Network, Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Transport Systems '95, Yokohama, pp. 1995-2000, 1995
 52. 堀口良太, 片倉正彦, 赤羽弘和, 桑原雅夫: 都市街路網の交通流シミュレーター-AVENUE-の開発, 第13回交通工学研究発表会論文集, pp.33-36, 1993
 53. R. Horiguchi, M. Kuwahara, M. Katakura, H. Akahane, H. Ozaki: A Network Simulation Model for Impact Studies of Traffic Management 'AVENUE Ver.2', accepted to the proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Transport Systems, Orlando, 1996
 54. 尾崎晴男: 街路網信号制御の評価シミュレーションモデル (DESC), 交通工学, Vol.24, No.6, pp.31-37, 1989
 55. 桑原雅夫, 上田功, 赤羽弘和, 森田綽之: 都市内高速道路を対象とした経路選択機能を持つネットワークシミュレーションモデルの開発, 交通工学, Vol.28, No.4, pp.11-20, 1993

56. 堀口良太, 片倉正彦, 赤羽弘和, 桑原雅夫: ハイブリッドブロック密度法を用いた都市街路網の交通流シミュレータの開発: AVENUE, 平成6年土木学会年次講演会, 1994
57. 堀口良太, 熊谷香太郎, 神前泰, 大島邦彦: オブジェクト指向に基づく都市街路網の交通流シミュレータ: AVENUE, 熊谷組技術研究報告, No.53, pp.63-69, 1994
58. 堀口良太, 桑原雅夫, 片倉正彦: 交通シミュレーションシステム -AVENUE- における交通流計算手法の改良, 平成8年土木学会年次講演会(掲載予定), 1996
59. 交通工学研究会「平面交差の計画と設計 - 基礎編 - 」, 1984
60. 星野哲三, 井上義晃: K 番目最短経路の実用的探索法とそれらへの配分, 土木計画学研究・講演集, No. 9, pp.481-486, 1986
61. 井上博司: 道路網における交通流動の動的シミュレーション手法, 土木学会論文集, No.470 / IV-20, pp.87-95, 1993
62. 麦倉武志, 桑原雅夫, 吉井稔雄, 越正毅: 交通情報が経路選択行動に及ぼす影響分析, 平成7年土木学会第50回年次学術講演会講演概要集, 第4部, pp. 80-81, 1995
63. J. ランボー, 他「オブジェクト指向方法論OMT」トッパン, 1992
64. P. Coad, E. Yourdon, "Object-Oriented Design", Yourdon Press Computing Series, 1991
65. 伊藤忠テクノサイエンス「G2リファレンスマニュアル」, 1995
66. 交通工学研究会編「交通工学ハンドブック」, 技報堂出版, 1984
67. 上野隆一: 街路網の交通運用評価のためのオンラインシミュレーションモデルの開発, 東京都立大学工学研究科1993年度修士論文, 1994
68. R. Horiguchi, M. Katakura, H. Akahane, M. Kuwahara: A Development of a Traffic Simulator for Urban Road Networks: AVENUE, Vehicle Navigation & Information Systems Conference Proceedings, Yokohama, pp.245-250, 1994
69. 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交通量の推定モデルと適用実験, 平成7年土木学会第50回年次学術講演会講演概要集, 第4部, pp. 154-155, 1995
70. 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(投稿中)