

# 修 士 論 文

## 動的 3 次元広域仮想都市構築



指導教官 池内克史 教授

東京大学大学院情報理工学系研究科電子情報学専攻

36411 KHAIRIL AZMI (カイリル アズミ)

2005 年 1 月 28 日提出

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>5</b>
1.1	はじめに	6
1.2	研究の目的	8
1.3	ITS における位置付け	8
1.4	都市計画における位置付け	10
1.5	論文の構成	10
<b>第2章</b>	<b>3次元仮想都市の構築</b>	<b>11</b>
2.1	はじめに	12
2.2	関連研究と既存の技術	12
2.3	本研究においてこれまで採用されてきた既存手法	13
2.4	本研究における新規アプローチ	16
2.5	航空写真の影解析による提案手法	17
2.5.1	影解析の原理	17
2.5.2	初期仮定	19
2.5.3	画像2値化による影抽出	19
2.5.3.1	航空写真の性質	19
2.5.3.2	2値化の原理	22
2.5.3.3	固定しきい値による航空写真の2値化	22
2.5.3.4	方位ベクトルによる影の長さの算出	23
2.6	考察：問題点とその対策	25
<b>第3章</b>	<b>交通流の動的3次元可視化</b>	<b>27</b>
3.1	はじめに	28
3.1.1	背景と目的	28
3.1.2	静的なインパクト評価手法の問題	29
3.1.3	交通運用策評価用のシミュレーション	31
3.2	関連研究	33
3.2.1	著名なシミュレーションモデル	33
3.2.1.1	CONTRAM	33
3.2.1.2	SATURN	34
3.2.1.3	TRAF-NETSIM	35

3.2.1.4	東大生研モデル (DESC モデル)・改良東大生研モデル	36
3.2.1.5	DYTAM-I	36
3.2.1.6	INTEGRATION	37
3.2.1.7	DYNASMART	38
3.2.1.8	FHWA のリアルタイムシミュレーションモデル	38
3.2.1.9	日産交通流シミュレータ	39
3.2.1.10	SOUND	39
3.2.1.11	SOUND 一般道路版	39
3.2.1.12	AVENUE	40
3.3	トラフィック・モデリング	40
3.3.1	クラス 1 (流体 - 密度管理なし)	41
3.3.2	クラス 2 (流体 - 密度管理あり)	41
3.3.3	クラス 3 (離散 - 密度管理なし)	42
3.3.4	クラス 4 (離散 - 密度管理あり): リストタイプ	43
3.3.5	クラス 4 (離散 - 密度管理あり): 追従タイプ	43
3.3.6	クラス 4 (離散 - 密度管理あり): ハイブリッドタイプ	44
3.3.7	各シミュレーションモデルでの交通現象の取り扱い	44
3.4	経路選択挙動のモデリング	48
3.4.1	経験利用者層のモデル化	48
3.4.2	情報利用者層のモデル化	49
3.5	AVENUE による 2 次元道路網交通シミュレーション	50
3.5.1	開発の背景・流れ	50
3.5.2	シミュレーションモデルの概要	51
3.5.3	ハイブリッドブロック密度法	54
3.5.3.1	ブロック密度法	55
3.5.3.2	ハイブリッドブロック密度法	58
3.5.3.3	レーン選択・交通規制・信号交差点などのモデル化	60
3.5.3.4	マルチスキャンハイブリッドブロック密度法	63
3.5.4	経路選択モデル	66
3.5.4.1	交通の発生・集中	66
3.5.4.2	経路の列挙	66
3.5.4.3	経路の表現	67
3.5.4.4	経路の選択	68
3.5.4.5	経路コストの質が経路選択挙動に与える影響	69

3.5.5	オブジェクト指向による交通モデルの記述	74
3.5.5.1	ノード・リンク ( Node, Link )	76
3.5.5.2	経路・ターン・ターン端点 ( Path, Turn, Turn-End )	76
3.5.5.3	レーン ( Lane )	76
3.5.5.4	ブロック・フロー・ フロー整流器 ( Block, Flow, Flow-Regulator )	76
3.5.5.5	車両・ドライバ ( Vehicle, Driver )	77
3.5.5.6	信号制御機・ 信号灯器 ( Signal-Controller, Signal-Light )	77
3.5.6	システムの概要	78
3.6	仮想空間での動的 3 次元可視化	80
3.6.1	概要	80
3.6.2	AVENUE からの入力情報	80
3.6.3	座標変換	81
3.6.3.1	緯度経度座標から実世界座標へ	81
3.6.3.2	実世界座標から 3 次元仮想空間座標へ	82
3.6.4	動的 3 次元交通流シミュレーション	82
3.6.5	工夫点	83
3.6.5.1	車の回転角・姿勢	84
3.6.5.2	インターポレーション	84
3.6.5.3	上下車線	85
3.7	川崎市を対象とした例	85
<b>第4章</b>	<b>汚染物拡散の動的 3 次元可視化</b>	<b>86</b>
4.1	はじめに	87
4.2	関連研究・既存技術	87
4.3	排出量推計手法	89
4.3.1	基本的な考え方	89
4.3.1.1	交通流シミュレーションモデル	90
4.3.1.2	排出モデル	90
4.3.1.3	排出量推計指標変換モデル	91
4.3.2	排出量の具体的な算出手順	91
4.4	汚染物拡散動的 3 次元シミュレーション	92

<b>第5章 結論</b>	<b>94</b>
5.1 結論	95
5.2 今後の課題	95
<b>謝辞</b>	<b>96</b>
<b>発表文献</b>	<b>97</b>
<b>参考文献</b>	<b>98</b>

# 第 1 章

## 序論

## 1.1 はじめに

仮想現実(VR : Virtual Reality) システムの多くは、幾何学形状モデルを用いて、仮想環境や物体を表現し、コンピュータグラフィックス(CG : Computer Graphics) 技術によって描画・表示される。VR の利用分野は広く、シミュレーション、医療応用、福祉応用、3 次元モデリング、娯楽、芸術など多岐にわたる。CG 技術の発展に伴い最近では種々のレンダリング技術の進歩によって、実写に近い表示が得られるようになってきている。

また仮想空間におけるモデルについても各種のセンサやコンピュータビジョンなどの技術を用いて精度の期待できるモデリングが可能になりつつある。仮想空間における動的なオブジェクトの動きに関しても物理法則や動的特性などを考慮し、現実世界で起こり得る動作を仮想空間の中で実現することができるようになった。しかしその運動自体はリアルに表現できるものの、自律的なものの動きは実世界での状態を反映していない場合がほとんどである。例えば、テレビゲームでは主人公のキャラクタはユーザ自身が操り、ドライビングシミュレータにおける周囲車の走行の仕方はランダムであったり、またはある一定の決められた規則に従ったり動作していることが多い。そこで本研究では実世界における活動を仮想空間に投影することを目的としている。これはいま現在進行している実世界での活動を実時間のうちに 3 次元の仮想空間へ挿入することを意味する。図 1.1 はこの研究の概念を示す。

本研究における仮想都市とは CG 技術を利用して電子的に再現した 3 次元都市を意味する。周知のように、仮想都市の構築は、従来ならば非常に手間、費用そして時間のかかる作業である。特に広域都市を仮想空間においてモデル化するとすると、莫大な努力が必要となる。本研究では、まず、仮想都市構築というプロセスにおいて、手間、費用、時間を節約すべく、できるだけ多くの作業を自動化することを目的としている。

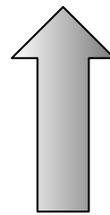
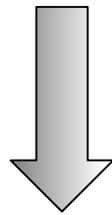
また、仮想都市は ITS(高度交通システム)そして都市計画とも深く関わっている。例えば、仮想都市において交通状況をシミュレートし、交通量の時間軸上の変化に伴う汚染度の変化をシミュレートできれば、都市計画上、大変意味のあることである。また、実世界情報を採取しつつ、実世界と同期を図ることで、よりリアルなシミュレーションができ、カーナビゲーションや天気予報などに大いに役立つことが期待できる。

このように、仮想空間において、既存の 3 次元空間座標に加えて、4 次元目の情報として時間を導入することにより、4 次元仮想空間が構築される。また、時間の変化により、交通量や汚染度も動的に変化することにちなんで、動的 3 次元ともいう。



実世界

情報投影



フィードバック

仮想空間

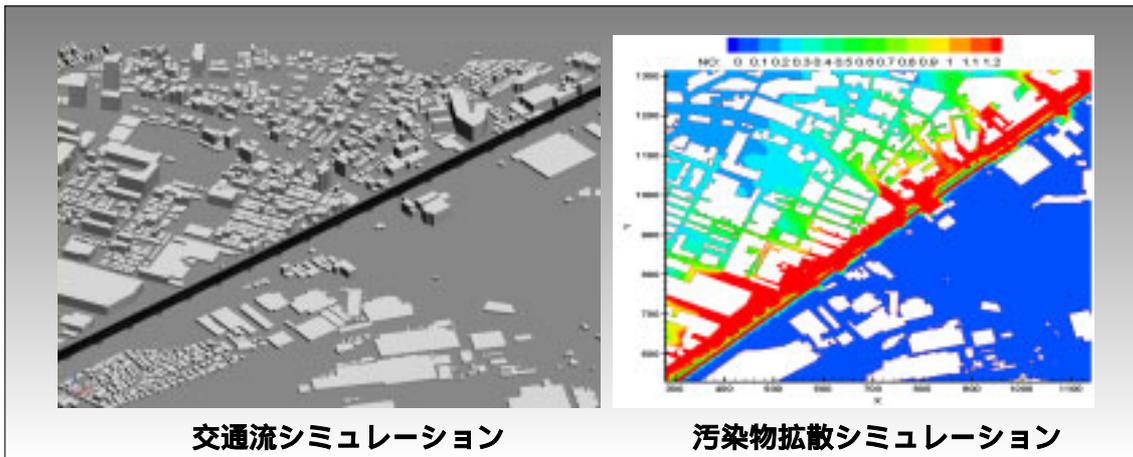


図 1.1: 本研究の概念図

実世界の情報を仮想空間へ投影することの利点は、任意の視点から対象となる空間を眺められることである。これにより実世界における対象オブジェクトと、その周囲の環境との空間的な関係を容易に把握できるようになる。

このような視覚化が有効な例としては、スポーツシーンでの多地点からの観戦、監視システムなどへの適用などが考えられる。スポーツシーンでは視点を変えて表示することにより、プレイヤーの迫力を味わうことができるようになる。またデータ分析にも有用である。

監視システムでは工場，倉庫，プラントなどの管理区域，危険区域などで役に立つものと思われる．本研究では ITS そして都市計画での利用を考慮し，交通状況の視覚化によるドライバの安全運転支援，そして汚染物拡散を動的 3 次元的に把握することを目的とするシステムを提案する．

## 1.2 研究の目的

従来ならば非常に手間のかかる仮想都市の構築プロセスを高速化・簡単化・自動化すること，そして，その構築された仮想空間内において，実世界において起こりうる活動をシミュレートし，実世界を仮想空間内に再現することを短期目的としている．将来的には，実世界情報をリアルタイムに採取し，仮想空間に実時間のうちに投影することが最終目的となる．

## 1.3 ITS における位置付け

ITS は道路交通に関する総合的な情報通信システムであり，人と道路と車両とを情報で結び道路問題を解決する．その目的は，交通の安全性の向上，円滑化，および環境改善による快適性の向上である．ITS を構成する開発分野は以下の 9 つに大別されている．

1. ナビゲーションの高度
2. 自動料金収受システム
3. 安全運転の支援
4. 交通管理の最適化
5. 道路管理の効率化
6. 公共交通の支援
7. 商用車の効率化

## 8. 歩行者などの支援

## 9. 緊急車両の運行支援

現在，日本ではこれらのシステムの一部は実現されつつある．例えば，1 に関しては VICS (Vehicle Information and Communication System) というシステムが既に実用化されている．VICS によりドライバーは交通関連情報をリアルタイムで受信することができる．このおかげで渋滞情報や最短経路等がナビゲーションシステムに表示され，移動時間の短縮により快適な移動が可能となる．また，2 においては 2000 年 4 月から首都圏などの主要な料金所で道路自動料金収受システム(ETC : Electronic Toll Collection System) が積極的に運用されており，料金所の渋滞解消や，利便性の向上が図れている．

日本の車両保有台数は年々増加傾向にある．自動車はいつでもどこへでも自由に移動できるという利便性や快適性において他の交通手段にない特徴をもっており，これによって現在のような自動車社会が生み出された．しかし他方では，自動車交通は交通事故による多数の死傷者を発生する原因となった．日本国内においては 1970 年の 16765 人を最高として 1980 年ごろまでにほぼ半減し，その後の横ばい・増加を経て最近では漸減の傾向にある．しかし，今なお事故件数は年間 95 万件，負傷者数は 110 万人を超え安全性の向上が望まれている．

このような状況の中，ITS の開発分野においては 3 にあるドライバーに対する安全運転支援は重要視されており，効果的なシステムの開発が望まれている．交通事故の原因を過去の事故発生内容から分析した結果として，ドライバーの発見の遅れと判断の誤りが全体事故の中で 60%にも達している．このことから事故を低減するためにはドライバーに必要な情報を適宜提供すること，ドライバーへの警告情報の提供・危険回避のための緊急操作支援を行うことなどが考えられる．ところで本研究の将来の課題である仮想空間への実世界情報の投影の利点は，状況を視覚化しユーザに任意視点からのビューを提供できることにある．これによりたとえば実世界情報として道路状況を採取し，仮想空間の中でそれを再現することによりドライバーへ任意の視点から見た交通状況を提供するという利用が考えられる．交差点付近などでは特に事故件数が多いとの報告がなされており，交差点での右折事故や出会い頭の衝突事故などへも有用な一助になると予想される．

また，4 と 5 に関しては，本研究の主題である仮想空間内における交通流シミュレーションを通して，どのように交通・道路を管理すれば交通渋滞が減少するかなどの検討も素早く行える．

## 1.4 都市計画における位置付け

大気汚染の交通公害の発生が著しいか、著しくなる恐れのある道路、又は道路景観、アメニティ等、良好な都市環境の保全・形成に配慮すべき道路を対象として、総合的な環境対策及び都市環境の形成の推進に資するため、都市計画の立場から総合的な環境計画を策定するためには、無論のことながら、まず汚染物拡散状況そのものを把握しなければならない。特に、本研究では、自動車から排出される汚染物排出量を推計し、それを仮想空間内において再現し、様々な交通施策をシミュレートし、それぞれの大気汚染削減効果を把握することを目的としている。

広域かつ動的に交通状況が変化するような交通施策による大気汚染削減効果を把握するためには、動的な交通状況の変化を再現するとともに、排出量に影響を及ぼす速度変動の要素を的確に捉えた排出量推計を行う必要がある。このような複雑な交通状況を再現するツールとして多くの交通シミュレーションモデルが開発されている。このシミュレーションモデルと排出モデルを組み合わせて様々な交通制御、交通運用施策による環境への影響評価を行うニーズは高く、実務への適用に向けた様々な検討が行われている。特に、個々の車両の詳細な加減速挙動を出力可能なマイクロシミュレーションとそれに対応する詳細な排出モデルの組み合わせにより、詳細な交通状況の変化にも対応した時空間的に詳細な排出状況の出力が容易に行えることが期待されている。

## 1.5 論文の構成

第1章は本章であり、本研究の概要、背景と目的、ITSや都市計画における本研究の位置付け、そして本論文の構成について述べた。第2章では3次元仮想都市の構築について述べる。関連研究における手法や既存の手法を紹介し、航空写真の影解析による提案手法をそれらと比較する。第3章では、まずトラフィックモデルや交通流2次元シミュレーションについて説明する。その上で、本研究の主題の一つである、3次元仮想空間へシミュレーションを動的にもっていく手法、すなわち仮想空間での動的3次元可視化について述べる。第4章では、車の汚染物排出量をどのように推計するかについて述べ、そして、その汚染物拡散をどのように動的3次元的にシミュレートするかについて説明する。最後に、第5章では、本論文で述べた研究結果をまとめるとともに、その結果について検討を行う。また、今後の研究の課題などについて議論を行う。

## **第2章**

### **3 次元仮想都市の構築**

## 2.1 はじめに

本章では仮想空間となる 3 次元都市モデルの構築について述べる。

本研究における仮想空間とは現実の都市空間をもとに CG 技術を利用して電子的に再現した 3 次元都市空間を意味する。この仮想都市の用途として、従来から都市計画における景観シミュレーションや公共や企業における地下の整備管理、またマーケティングや教育などの広範囲な分野での応用が実現されている。これに伴い 3 次元デジタル地図などの空間情報の重要性が高まっているといえる。

現在の技術では、広域都市モデルを構築するためには依然として非常に費用・時間がかかる。それというも、建物の 3 次元幾何学形状の計測においては、計測器となるハードウェアの役割が大きいからである。計測はソフトウェアのみに任せることはできないと考えられている。

一方、発展途上国においては、このような事情から、都市をモデル化することは殆ど不可能である。レーザ・レンジセンサのような計測器は高額である上に、それを扱えるだけのスキルも必要である。

そこで、本論文では、既存の技術では必要不可欠とされてきた計測器を一切用いない手法を考える。その第一歩としては、航空写真から建物の影を抽出し、抽出した影から高さ情報を得る手法を提案する。

## 2.2 関連研究と既存の技術

都市空間をより忠実に表現するためには、3 次元形状を自動的に計測する手法が必要不可欠である。これまでステレオ航空写真から建物や道路などの 3 次元情報を抽出する手法が盛んに研究されてきた[1]。この手法はステレオマッチング技術によって 3 次元情報を抽出する方法であるが、航空写真に影や隠蔽などが非常に多い場合、建物の検出率と信頼性を向上させることはなかなか容易ではない。また、ステレオマッチングの場合、視差を取るために必ず複数の航空写真が必要である。

一方近年、レーザ計測技術の発展に伴いレーザレンジファインダ(距離計測装置)などを利

用して実物体の 3 次元情報を計測することが比較的容易になりつつある。地上レーザ計測器によるものもあれば[2][3], 航空レーザ計測器によるものもある[4][5]。しかし、いずれにしても、このようなレーザ計測器自体は高額なものであると同時に、それを扱うためにも高度な技術が必要とされる。

こういった研究により 3 次元デジタル地図は身近なものになりつつあるが、一方で幾何学形状モデル作成の自動化はやはり困難であり作業の効率化と大衆化が求められているのも確かである。そこで、モデリングの難点を解消するため、実写から CG 映像を作成する技術が盛んに研究されている。画像列から新たな画像を直接生成する技術にはモーフィング、QuickTime VR [6]、光線空間法などがあり、Image-based rendering と呼ばれている。Image-based rendering では、複数の撮影条件で撮影された画像から、他の撮影条件で得られるであろう画像を補間によって作り出す。しかし画像ベースで表現すると視点の移動に関して違和感が生じる。また大量の画像データを必要とする。画像の補間によって画像を生成するため、任意視点の移動が可能であるといっても完全ではない、などの問題がある。幾何学形状モデルを持つか、画像をベースに表示を行うかという選択はその利用方法により適切に選択されるべき技術である。

## 2.3 本研究においてこれまで採用されてきた既存手法

都市部でほぼ整備が完了しつつあるデジタル化された 2 次元の地形図を用いて 3 次元建物の幾何学形状モデルを生成する。この生成方法では、住宅地図に含まれる建物図形と階数から立体図形を自動生成するため、詳細さにはかける問題がある。しかし、用によっては単純な形の図形による近似で十分であり、本研究においてもこれまではこの方法を採用した。

建物図形に高さを階数×4 メートルの壁面と天井面を与えることで、仮想的な建物オブジェクトを構築した。この幾何学形状作成のための 2 次元地図にはゼンリン住宅地図 ZMAP-TOWNII (1/2500, shape file, 東京都千代田区) を利用した。図 2.1 に 2 次元の住宅地図を示す。また、壁面と天井面を与えた 3 次元幾何学形状モデルを図 2.2 に示す。

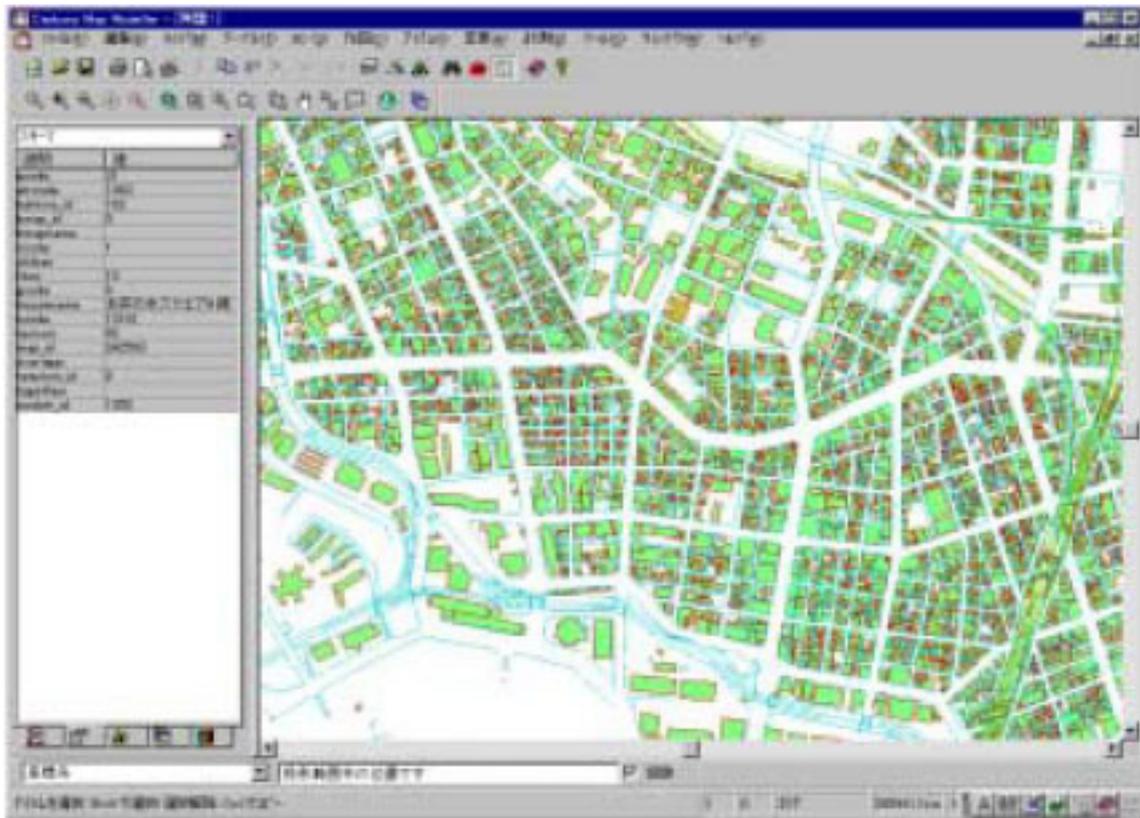


図 2.1 : ゼンリン 2 次元住宅地図



図 2.2 : 得られた 3 次元仮想都市の幾何形状モデル

## 2.4 本研究における新規アプローチ

本研究では、いわゆる低コストな「3D city modeling on your desk」の完全実現を目指している。すなわち、実際の現場に行ったり、航空機や計測器などを使い航空撮影・計測を行ったりすることなく、実世界の都市を仮想空間へ低コストに投影できることを目標としている。

本研究で入力情報として必要とされているのは、個人でも購入可能な昼間撮影の航空写真である。航空写真に影解析処理を施し、処理結果として3次元情報が得られる。この3次元情報を元に、3次元都市モデルを構築する。

航空写真のステレオマッチングによる手法と違うのは、本手法では複数の航空写真・画像列を必要としない点である。影解析手法では、たった一枚の航空写真で実世界の都市の3次元情報を得ることができる。

現段階では主に建物の3次元情報復元を目的としているため、3次元情報から得られるのは建物の高さだけであるが、建物の2次元情報は航空写真から既知であるため、建物の基本的な3次元幾何学形状が構築できる。すなわち、航空写真により与えられている建物の2次元平面の長さ・幅に高さを与えることで立体形状が生成できる。(図2.3)

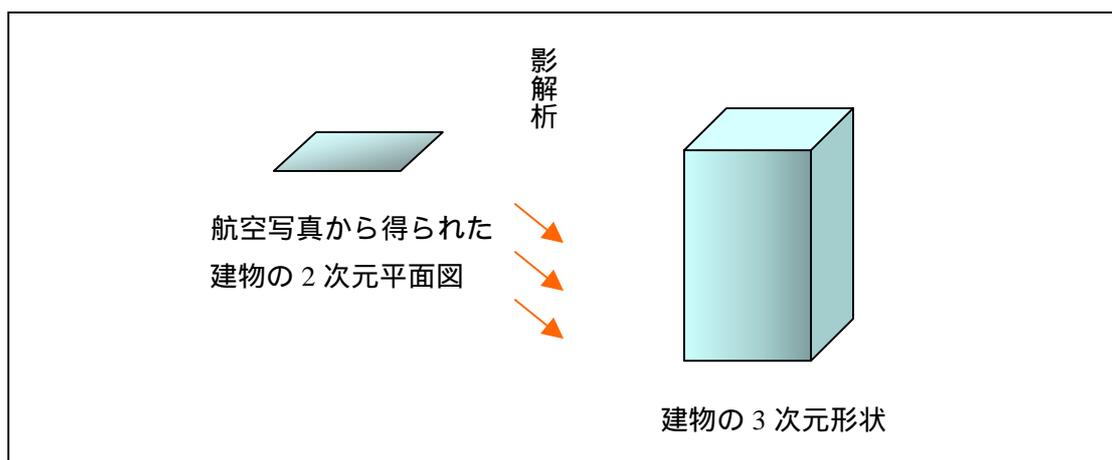


図 2.3 : 本研究の概念図

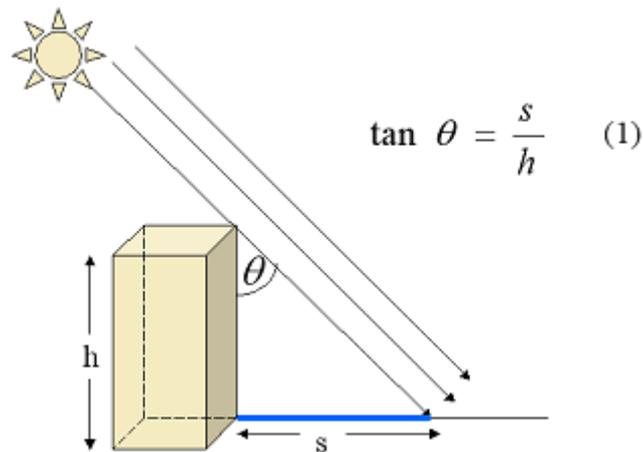


図 2.4： 建物の影解析における天頂角， 建物の高さ， 影の長さの関係

建物以外に関しては，現段階では基本的に対象外としている．特に，地上道路は基本的に 2 次元情報だけでも構築できるので，その構築には 3 次元情報を必要としない．しかし，比較的大きな木の群れや高架道路，つまり建物以外で建物の大きさ以上の立体形状をもつ物体は本研究の対象となる．

## 2.5 航空写真の影解析による提案手法

### 2.5.1 影解析の原理

図 2.4 に示すように，建物の高さと影の長さは比例する．また，任意の実空間（広さに限度のある都市単位）において時刻  $t$  における天頂角  $\theta$  はほぼ一定数に決まる．従って，時刻  $t$  における天頂角  $\theta$  さえ分かれば，建物とその影の比が求まる．（式 1）

ちなみに，天頂角  $\theta$  は次のように求まる：（式 2， 図 2.5） [6]

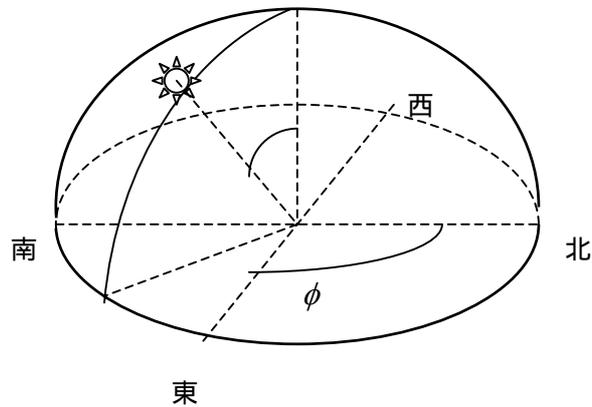


図 2.5 : 天頂・方位の原理図

$$\cos \theta = \sin d \sin L + \cos d \cos L \cos k$$

$$\sin \phi = \frac{\sin d - \sin L \cos \theta}{\cos L \sin \theta}$$

$$\sin d = -\cos \left[ (D-1) \frac{180}{182.6} \right] \sin(23.45)$$

$$k = (LST - 12) \cdot 15$$

(2)

但し,

$\theta$  : 天頂角 (solar zenith)

$\phi$  : 方位角 (solar azimuth)

LST : Local Solar Time (現地太陽時間)

L : 緯度

D : 月日指数 (12月20日 = 365, 12月21日 = 1)

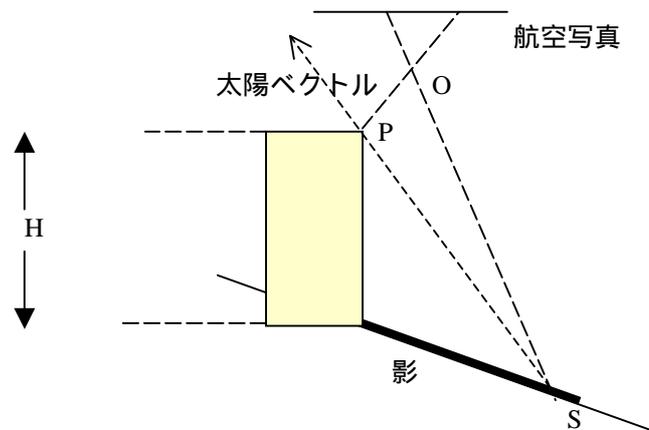


図 2.6： 影解析による 3 次元情報取得の基本概念

## 2.5.2 初期仮定

本研究では、少なくとも現段階において、航空写真は対象の建物の真上から撮影されていると仮定し、また地面が建物の側面と垂直である（つまり、地面がスロープでない）と仮定している。この仮定によって誤差が出ることは避けられないが、誤差を把握し、後に結果を修正すれば問題を最小化できる。

厳密には航空写真から影を解析するためには、図 2.6 に示すより適応性のある状況を想定しなければならない[7]。しかし、これには本研究において未知であるカメラ位置に関する正確な情報が必要である。

## 2.5.3 画像 2 値化による影抽出

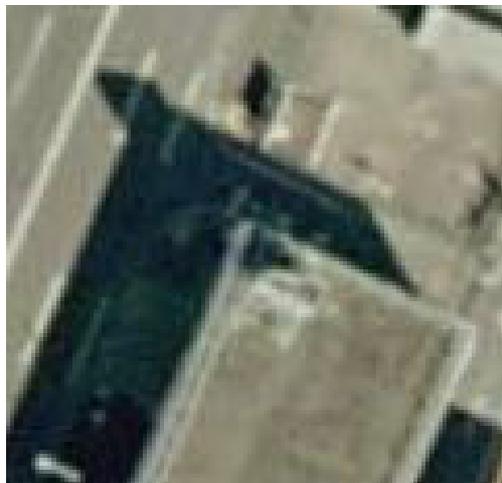
### 2.5.3.1 航空写真の性質

本研究で扱う航空写真はデジタル画像であり、構成単位の小さな点である画素が 2 次元的に多数集まったものである。また、各画素における画像の明るさを階調または階調値と呼ぶ。画像の任意の画素を座標  $(x,y)$  によって表すと、その画素における画像の明るさに相当する階調値を  $f(x,y)$  とする。また、 $f(x,y)$  の取り得る値の範囲あるいは個数を階調数と呼ぶ。通常の航空写真はカラー画像であるが、カラー画像では、各画素  $f(x,y)$  は RGB, YMC 等の 3

原色の階調を表している。例えば、RGB 画像の場合、各画素  $f(x,y)$  は、R(Red), G(Green), B(Blue)それぞれの階調を示す  $R(x,y)$ ,  $G(x,y)$ ,  $B(x,y)$ によってその画素の色が決定される。

昼間撮影の航空写真では、影領域とそうでない領域の画像の明るさに大きな差がある。また、影でない領域に含まれている画素の階調値は高く、一定値に収束する。この値を本論文では高階調収束値と呼ぶ。同様に、影領域に含まれている画素の階調値も低く一定値に収束する。本論文では低階調収束値と呼ぶ。

図 2.7 (a)と(b)は本研究に用いる航空写真から取り除いたものを示す。その濃度ヒストグラムはそれぞれ図 2.8 (a) と(b)に示す。縦軸は画素数、横軸は階調値を表す。両ヒストグラムから分かるように、多くの画素は低階調収束値または高階調収束値に収束する。低階調収束値は影領域の階調値を表すのに対し、高階調収束値は影でない領域の階調値を表す。ヒストグラムのグラフの谷にあたる階調値をしきい値にすることによって、影領域と影でない領域を分割する良好な 2 値画像(階調値  $f(x,y)$ が 0 または 1 の画像)を得ることができる。カラー画像・階調画像を 2 値画像へ変換する処理は 2 値化と呼ぶ。



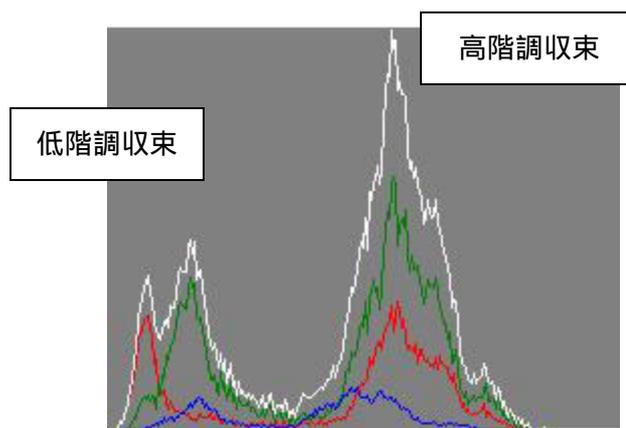
(a)

図 2.7： 航空写真の例

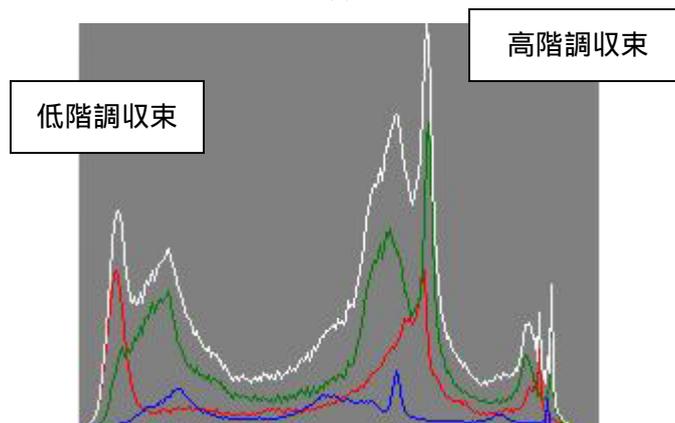


(b)

図 2.7： 航空写真の例



(a)



(b)

図 2.8： 航空写真の濃度ヒストグラム

### 2.5.3.2 2値化の原理

ある濃度値（階調値） $t$ をしきい値としてあらかじめ決めておき、すべての画像領域で

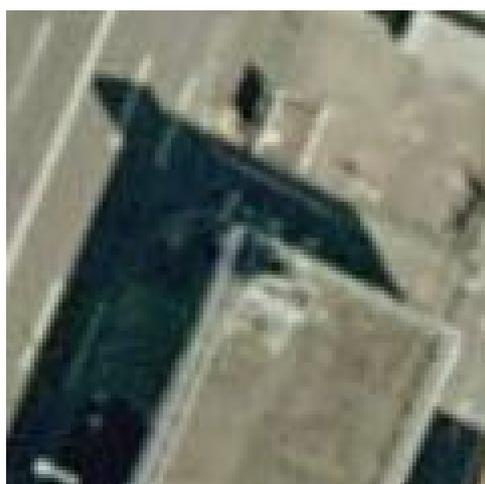
$$b(x, y) = \begin{cases} 1 & (f(x, y) \geq t) \\ 0 & (f(x, y) < t) \end{cases} \quad (3)$$

とする。但し、 $b(x, y)$ は2値画像の画素 $(x, y)$ の階調値とする。

### 2.5.3.3 固定しきい値による航空写真の2値化

固定しきい値による2値化では、航空写真全体に対してただ一つのしきい値を設定する。しきい値の決定にはヒストグラムを用いることが多い。前述のように、航空写真の性質のために、航空写真のヒストグラムに明確な谷が存在する場合が殆どである。このような場合、ヒストグラムの谷にあたる階調値をしきい値にすることにより、良好な結果が得られる。

図 2.9 は本研究で実際に2値化した航空写真の例を示す。原画像（図 2.9 (a)）では影が直接地面に射影する。原画像のヒストグラム（図 2.8(a)）からしきい値を決定し（この例では、ヒストグラムの谷にあたる階調値は 70-90 である）、そのしきい値で2値化を行った。その結果は図 2.9(b)に示す2値画像である。



(a) 原画像



(b) 2 値画像 (t=80)

図 2.9： 航空写真の 2 値化

#### 2.5.3.4 方位ベクトルによる影の長さの算出

本研究では、方位ベクトルは知識ベースの方法とサンプル・ベースの方法の 2 方法で求める。

##### 1) 知識ベース

航空写真の撮影日・時刻が分かれば、式 2 より、方位角  $\phi$  が求まり、方位ベクトルが生成できる。

##### 2) サンプル・ベース

航空写真から一つの建物をサンプルにとり、その影の向き (= 方位角) を計り、方位ベクトルを生成する。

本研究では方位ベクトルを影の長さを計算するために用いる。現段階では次の 2 つの方法を採用している：

- 1) 影領域内において、方位ベクトルに平行なエッジを検索する。エッジにノイズがなければ、通常各建物からは高々 2 つの接線が得られる。長さの異なる 2 つの接線が得られたときは、長い接線の先端にノイズが出ている可能性があるとして、短い方を採用し、その長さを影の長さとする。しかし、図 2.10 に示すように、影領域のエッジに不規則にノイズなどが出ている場合もある。この例では、方位ベクトルと平行なエッジは一つしか得られない。このときは素早く唯一の接線の長さを影の長さとする。一方、方位ベクトル

ルと並行なエッジが全く得られない場合は、次の対策を適用する。

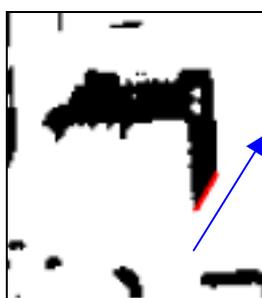
- 2) 方位ベクトルの方向に沿って影領域に複数の接線を当てはめて、それぞれの長さを計る。これによって、各建物から複数の接線が得られるが、長さの順に上から  $n$  本の接線を取り、それらの長さの平均値を影の長さとする。得られた全ての接線の長さの平均を影の長さにとることも以前考えていたが、図 2.11 に示すように、場合によっては影領域内に階調値の高い部分が存在する場合があるので、単にすべての接線を採用しその長さの平均を取るだけでは誤差を拡大することになる。



(a) 原画像



(b) 2 値画像 ( $t=80$ )



(c) 方位ベクトルと平行なエッジ

図 2.10： 方位ベクトル



(a) 原画像



(b) 2 値画像 ( t=80 )



(c) 2 値画像 ( t=100 )

図 2.11： 影領域のエッジから直線が得られない上、影領域内にノイズが出る例

## 2.6 考察：問題点とその対策

### 1) スロープ地面

影が映る地面は必ずしも建物と垂直とは限らないので、地面がスロープになっている場合、その時の対策を考えなければならない。もちろん、3次元情報をもたない単純な航空写真ではスロープを検出できないため、現段階では各建物周りの地面を平面とみなす。特殊な地形をもった都市（例えば、山岳地帯に位置する都市）ではない限り、スロープは部分的にしかならないので、その場合のスロープ無視による誤差は許容範囲内とする。

## 2) 建物が高密度に密集しているエリア

高密度エリアでは、建物の影が地面に映らず、隣接した建物に映る場合が多い。この場合、ある建物群について、その群の内側に属するすべての建物の高さが同じと仮定し、その高さの値は群の最も外側に位置し、その影が地面に映る複数建物の高さの平均値とする。(図 2.12)

## 3) 航空写真が真上から撮影されない場合

地面に垂直な建物の側面が航空写真に写っていることは、その航空写真がその建物の真上から撮影されなかったことを意味する(図 2.13)。しかし、高解像度衛星写真でも常にすべての建物の真上から撮影することが不可能である。そのため、この問題への対策としては、誤差評価を行い、ある一枚の航空写真における誤差率を検出することである。この場合、比較の参考として事前にある建物に関して正確な高さ情報を取得することが望ましい。一枚の通常の航空写真に関しては、この問題による誤差率はほぼ一意に決まる。



図 2.12： 高密度エリアの例

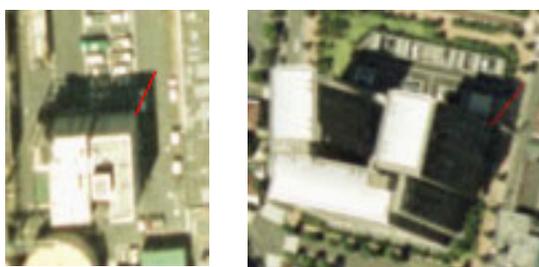


図 2.13： 航空写真が建物の真上から撮影されない例

# 第 3 章

## 交通流の動的 3 次元可視化

## 3.1 はじめに

### 3.1.1 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。

日本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 [8]。

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 [9]）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付け、「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」[10]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 [11]。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 [12]、大規模災害を想定した防災計画 [13]、ITS のような新しい技術の登場[14]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 [15] 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 [16] 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。また更に、最初に述べたように、既存の 2 次元シミュレーションシステムを動的 3 次元仮想空間へ持っていき、広域実空間と同期を取りながら、広域都市における交通流を 3 次元的に把握するシステムの構築を行っている。

### 3.1.2 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 3.1 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（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）、どちらも定義より1.0以上の値を取りうるが、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。

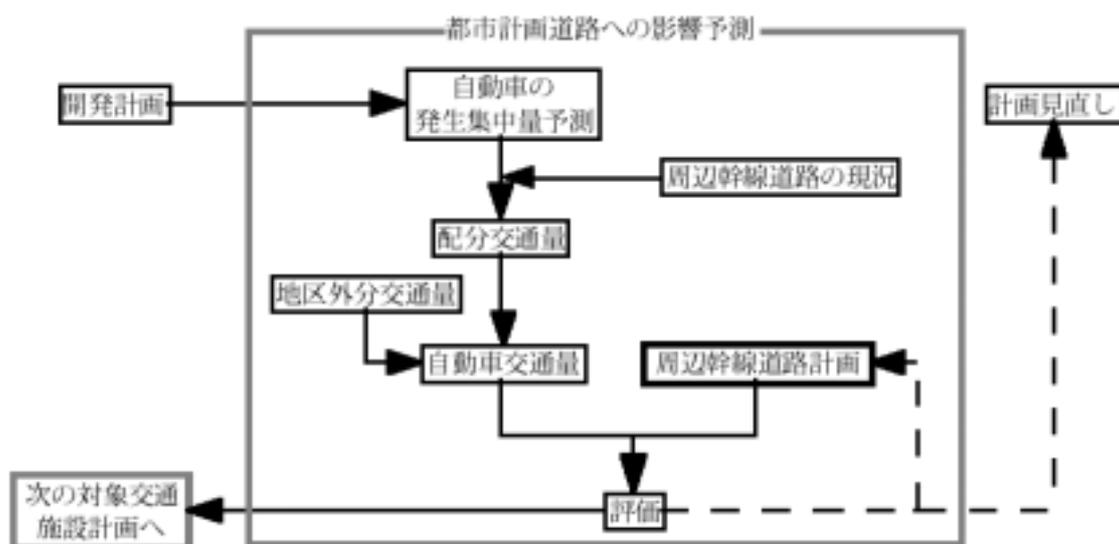


図 3.1： 大規模開発関連交通計画検討マニュアルマスターフロー（一部）

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。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。またそれらの変化に伴うドライバ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後に考察する。

### 3.1.3 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 (Origin Destination) ペア (起終点ペア) に対して複数の経路が存在し、ドライバ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。シミュレーショ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める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。

## 3.2 関連研究

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．

### 3.2.1 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 [17]．

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（Advanced Traffic Management Systems：高度交通管理システム）や ADIS（Advanced Driver Information Systems：高度交通情報提供システム），DRGS（Dynamic Route Guidance System：動的経路誘導システム）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．

#### 3.2.1.1 CONTRAM

CONTRAM(Continuous Traffic Assignment Model)は1978年に英国 TRRL(現 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 [18]．

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 回程度の繰り返して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 [19]。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 [20]。最新バージョンである CONTRAM 5 [21] では信号パラメータの最適化機能を持つ TRANSYT [22] とリンクする機能が付加されている [23]。

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かったりしたため、渋滞の延伸が正確に再現されないなど [24]、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。

### 3.2.1.2 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 [25][26]。

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（SATURNでは確率的均衡配分も実現している）。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 [27] 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 [28]。

### 3.2.1.3 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ションの統合システムである TRAF [29] の一部を構成し，TRAF-NETSIM と呼ばれている [30]。

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

り、加速度などの車両性能、ドライバの行動類型（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。

#### 3.2.1.4 東大生研モデル (DESC モデル)・改良東大生研モデル

日本においても、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 [31][32]。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 (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)。

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 [33]、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 [34]。

#### 3.2.1.5 DYTAM-I

DYTAM-I (Dynamic Traffic Assignment Model - I) は日本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 [35][36]。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計算の際における 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。

### 3.2.1.6 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[37]。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マイ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 Departure 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 [38] .

### 3.2.1.7 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 [39] .

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 [40] .

### 3.2.1.8 FHWA のリアルタイムシミュレーションモデル

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 [41] . 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 [42] .

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 ) およびミクロモデル ( 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。

### 3.2.1.9 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 [43]、実ネットワークでの交通運用策の評価を行っている [44]。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 [45]。

### 3.2.1.10 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 [46]。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がある [47]。

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ておらず、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。

### 3.2.1.11 SOUND 一般道路版

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 [48]。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ク

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。

### 3.2.1.12 AVENUE

AVENUE ( An Advanced & Visual Evaluator for Road Networks in Urban Areas ) は本研究が属するプロジェクト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 [49]。本研究の主題の一つである動的 3 次元交通流シミュレーションはこの AVENUE をベースとしている。本研究では，この 2 次元システムを動的 3 次元のものに持っていくことが重要な課題である。モデルの詳細については後述するが，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。

## 3.3 トラフィック・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 3.1 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。

前述したように，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

		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</div> <div style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">追従タイプ</div> <div style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">ハイブリッドタイプ</div>

表 3.1： 交通流表現手法の分類

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。

### 3.3.1 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。

### 3.3.2 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 [50] 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。

### 3.3.3 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 (First In First Out) 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．

### 3.3.4 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．

### 3.3.5 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，多くのマイ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．

### 3.3.6 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．

### 3.3.7 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 3.2 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  は対応可能， は一部（条件付きで）対応可能， 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の経路選択機能を持っているか？

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) 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。

		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	×	×	○	×	×				×	△	○

表 3.2: 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

## 3.4 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 [51] 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、Wie ら [52] や Boyce ら [53] によって、その解法が報告されている。また桑原ら [54] 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。

### 3.4.1 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はないため、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 Horowitz [55]、Mahmassani ら [56] 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。

### 3.4.2 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 [57]。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 [58]。

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。

## 3.5 AVENUE による 2 次元道路網交通シミュレーション

本学生産技術研究所の桑原らは 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 年に発表されて以来 [59] 幾つども改良され、現在に至っている [60]。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。

### 3.5.1 開発の背景・流れ

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。

そのため本研究が属している 3 研究室プロジェクトでは、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(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)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。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。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。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(グラフィックユーザインターフェース)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 3.2 に AVENUE の画面イメージを示す。

### 3.5.2 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 3.3 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。

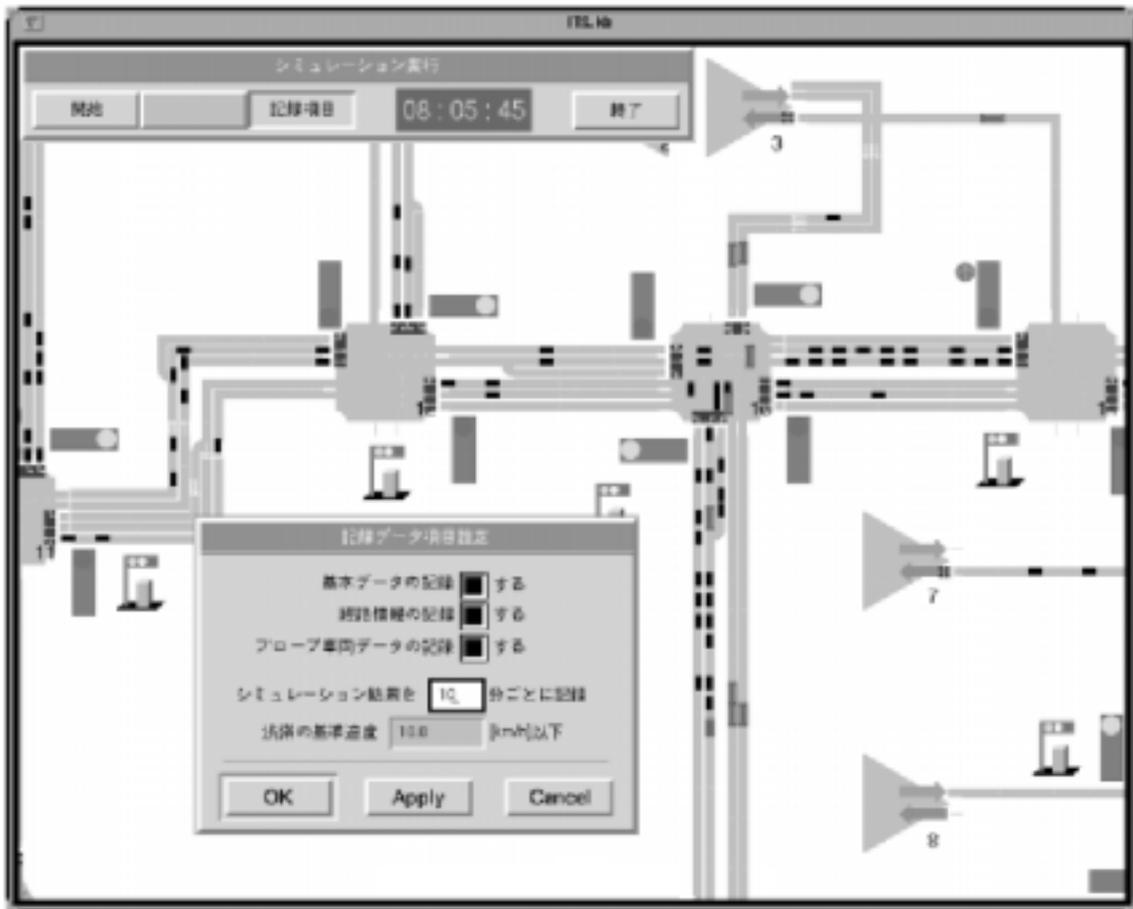


図 3.2 : AVENUE 画面表示の例

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。

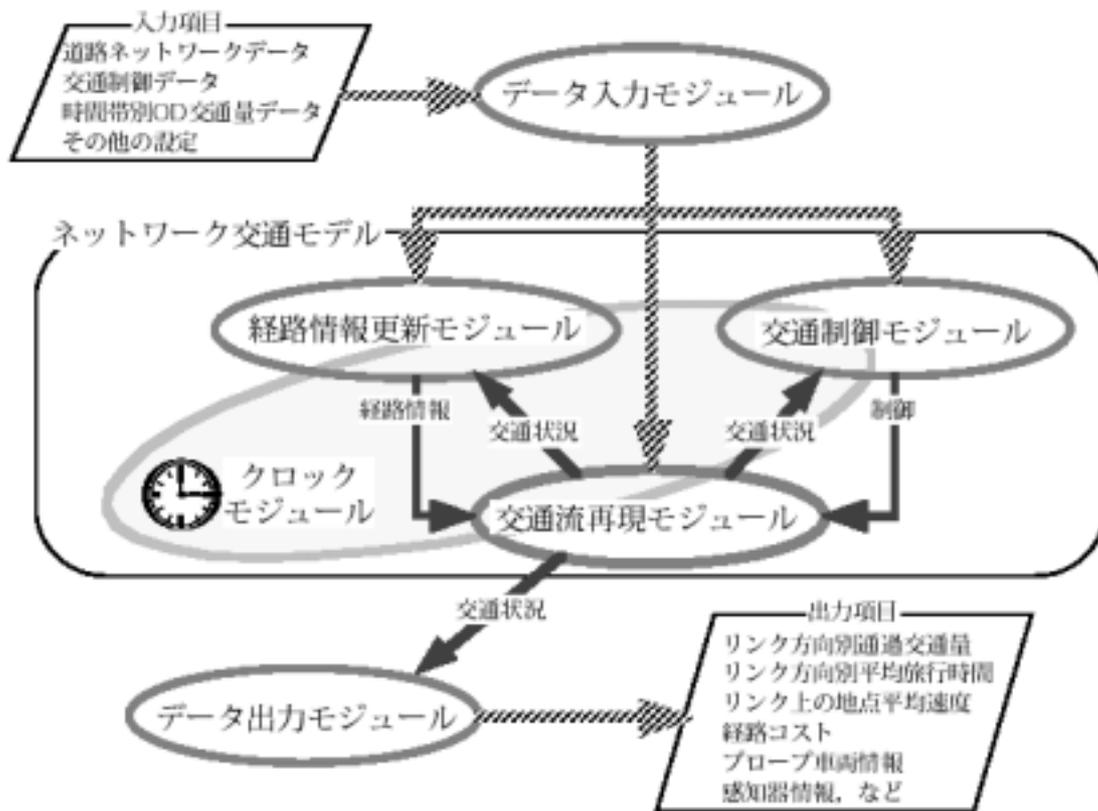


図 3.3： シミュレーションモデルの概要

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。スキャンインター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、スキャンインター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，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（実際は後述するブロックごとの平均速度）
- 4) 経路コスト
- 5) プローブ車両の区間所要時間（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）
- 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．

### 3.5.3 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 [61] や東大生研モデル [62] 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 [63]，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 [64] 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 [65] についても説明する．

### 3.5.3.1 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 3.4 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 3.5 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。

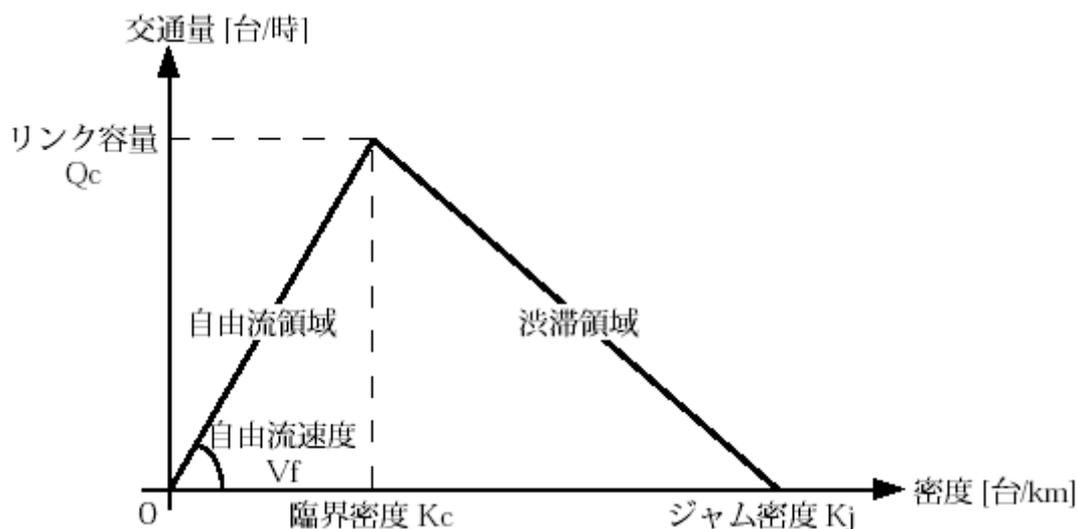


図 3.4： AVENUE で用いられる交通量 - 密度曲線

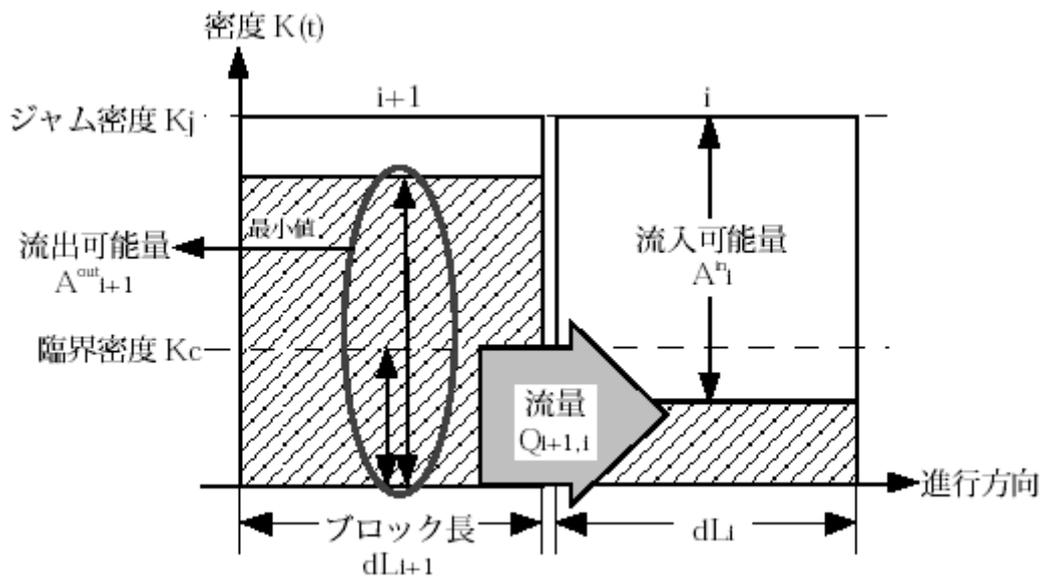
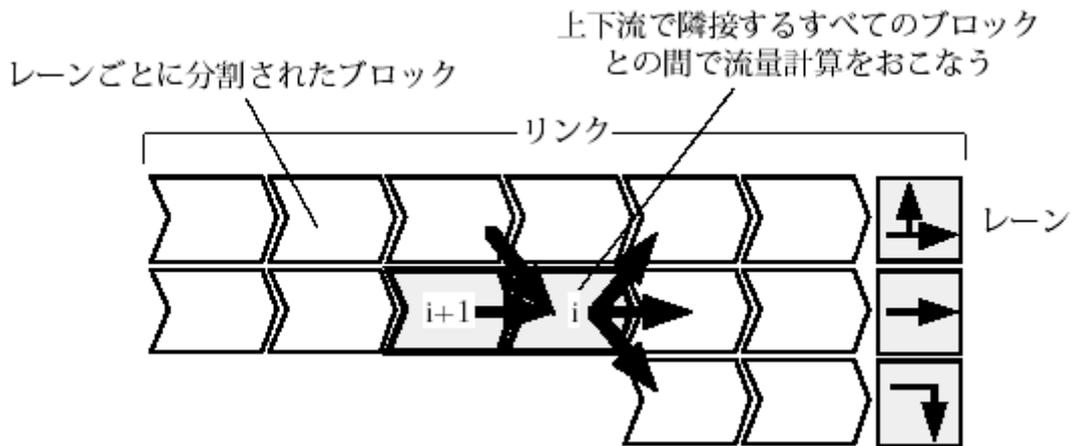


図 3.5： ブロックの密度と流量

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  $K_{c_i}$  とブロックジャム密度  $K_{j_i}$  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(4)～(7)で示される．

$$A_i^{out}(t) = \min(K_{c_i}, K_i(t)) \frac{dL_i}{dt_i} \quad (4)$$

$$A_i^{in}(t) = \begin{cases} (Kj_i - K_i(t)) \frac{dL_i}{dt_i} & K_i(t) \in Kc_i \\ \frac{Kc_i(Kj_i - K_i(t))}{Kj_i - Kc_i} \frac{dL_i}{dt_i} & \text{if } Kc_i < K_i(t) \in Kj_i \end{cases} \quad (5)$$

$$Q_{i+1,i}(t) = \min(A_{i+1}^{out}(t), A_i^{in}(t)) \quad (6)$$

$$K_i(t + dt_i) = K_i(t)dL_i - Q_{i,i-1}(t)dt_i + Q_{i+1,i}(t)dt_i \quad (7)$$

ここで  $i$  はブロックを表す添字で、 $A_i^{out}(t)$  と  $A_i^{in}(t)$  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、 $Kc_i$  と  $Kj_i$  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(4)~(7)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(4)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(5)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(6)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(7)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(4)~(7)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．

### 3.5.3.2 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．

$$M_{i+1,i}(t) = \text{RoundUp}(Q_{i+1,i}(t)dt_i) \quad (8)$$

但し，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(9)で求める．

$$E_{i+1,i}(t) = M_{i+1,i}(t) - Q_{i+1,i}(t)dt_i \quad (9)$$

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(8)(9)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(8')(9')に置き換えられる．

$$M_{i+1,i}(t) = \text{RoundUp}(\max(0, Q_{i+1,i}(t)dt_i - E_{i+1,i}(t-1))) \quad (8')$$

$$E_{i+1,i}(t) = M_{i+1,i}(t) + E_{i+1,i}(t-1) - Q_{i+1,i}(t)dt_i \quad (9')$$

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 3.6 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 2 台の車両が存在し，次スキャン以降の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ぬので， $i+1$  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．

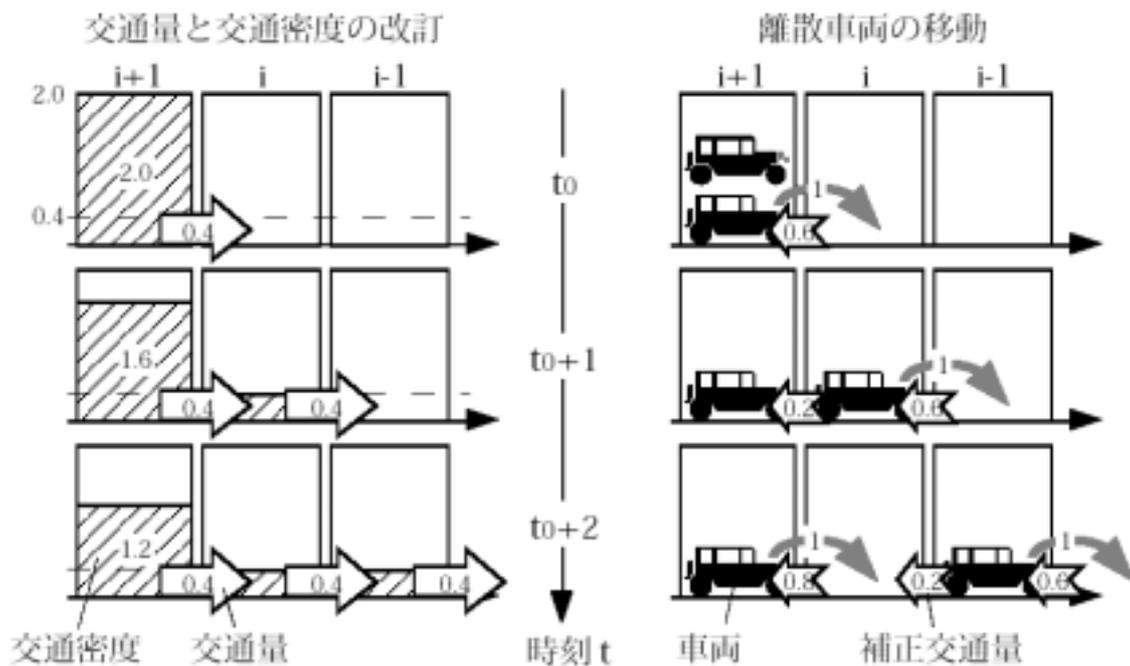


図 3.6： ハイブリッドブロック密度法による車両移動

### 3.5.3.3 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（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）やレーン変更（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）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。

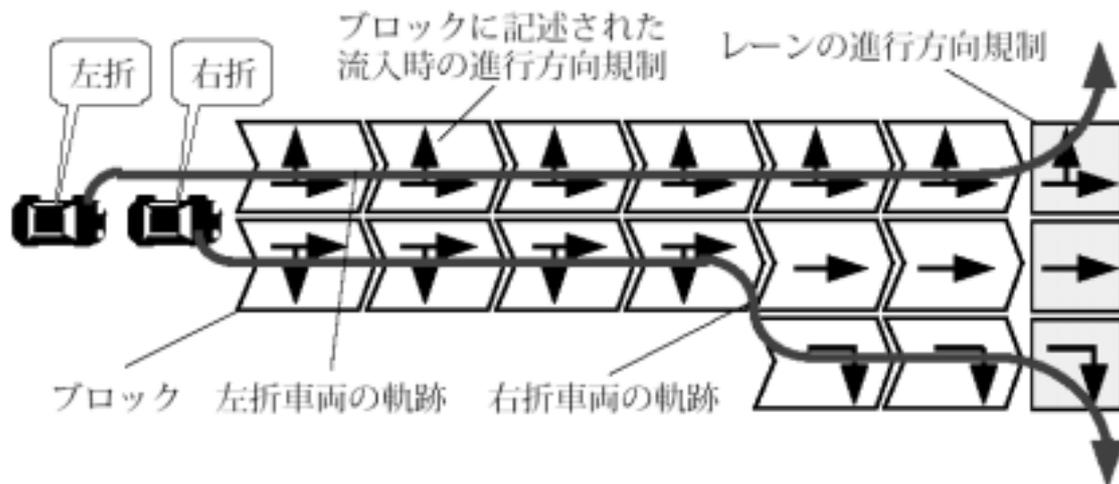


図 3.7： 流入時の規制に従うレーン選択

図 3.7 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。

## 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 3.8 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。

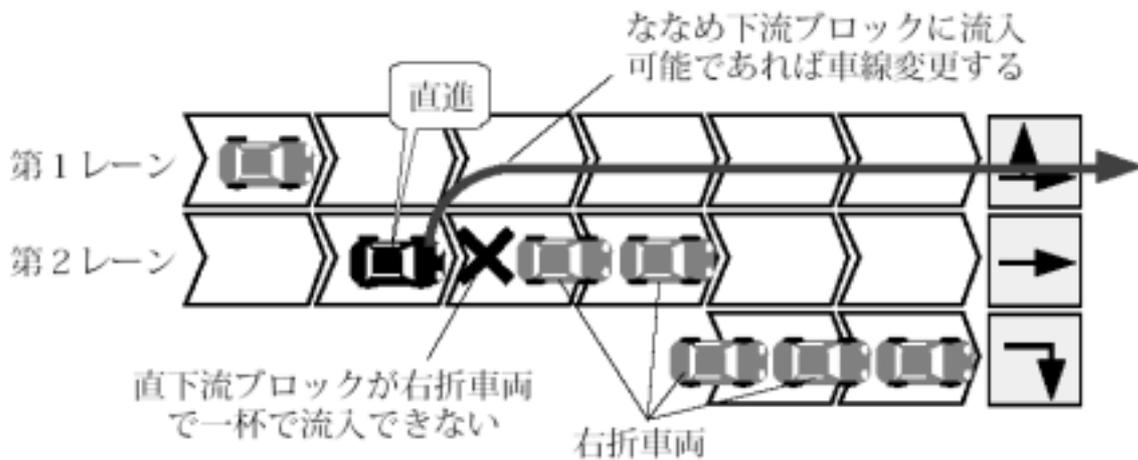


図 3.8： 右折待ち車両のブロッキングに伴うレーン変更

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はなく，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 3.9 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．

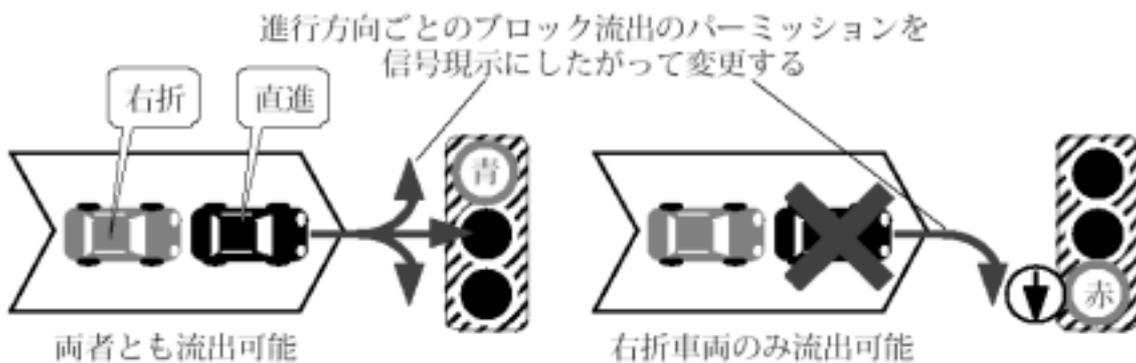


図 3.9： 流出時の規制の動的な変更による交通流制御

#### 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(10)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[66]。

$$S_R = 1800 \frac{f(SG - qC)}{S - q} \frac{1}{C} + K \frac{3600}{C} \text{ [台/時]} \quad (10)$$

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 3.3 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。

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

表 3.3： 右折車両のギャップアクセプタンス確率

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 3.10)。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 3.3 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。

#### 3.5.3.4 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。

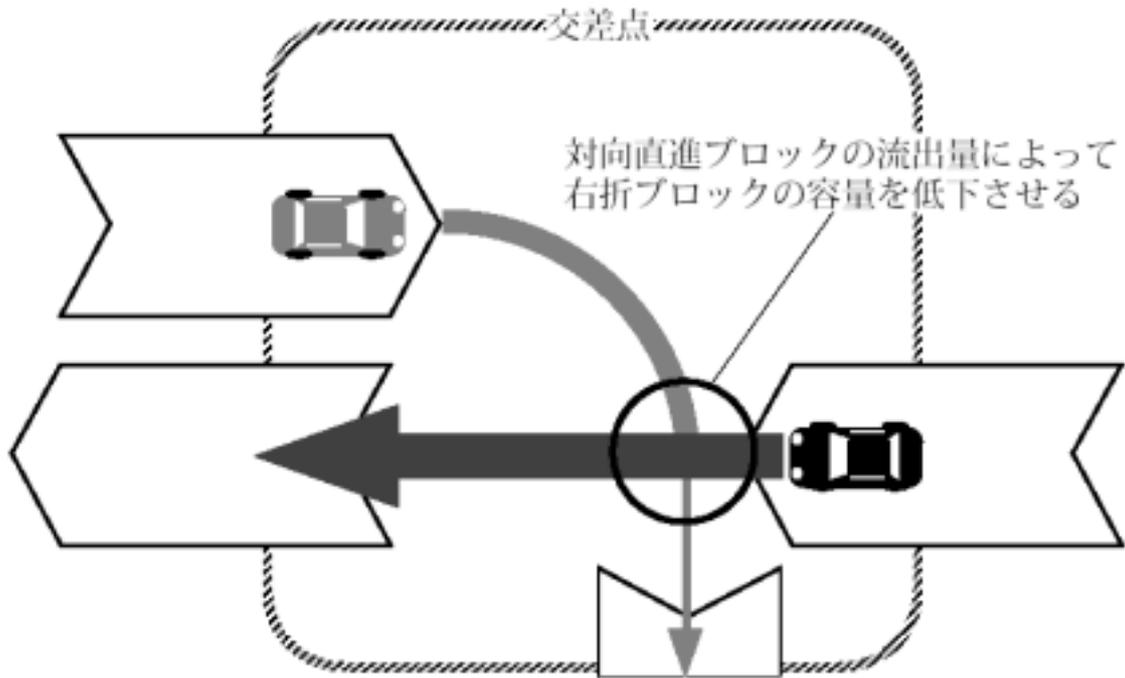


図 3.10： 対向直進交通による右折容量の逓減



図 3.11： マルチスキャンハイブリッドブロック密度法でのブロック分割方式

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(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)。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ドブロック密度法を提案する。すなわち、図 3.11 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(4)の流出可能量計算と式(5)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(6)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 秒掛かり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超えるごとに、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。

### 3.5.4 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。

#### 3.5.4.1 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。

#### 3.5.4.2 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（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。）

### 3.5.4.3 経路の表現

経路の探索は、図 3.12 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。（但し、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。）

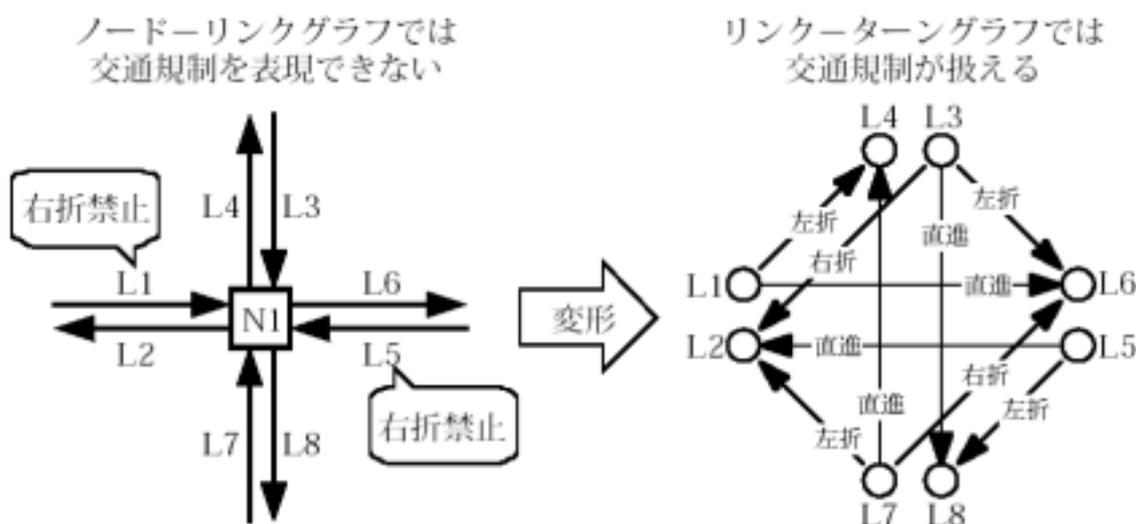


図 3.12： ノード - リンクグラフとリンク - ターングラフ

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、より実際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[68]、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、あまり実際的ではない。

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。

#### 3.5.4.4 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(11)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

$$p_{ij}^{rs} = \frac{\exp(-q_j c_{ij}^{rs})}{\sum_k \exp(-q_j c_{kj}^{rs})} \quad (11)$$

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， $\theta_j$  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  $\theta_j = \infty$  とすれば必ず最短経路を選択し， $\theta_j = 0.0$  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の中に分けられて埋め込まれる．図 3.13 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（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．）．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(11)に従って経路を選択する．

#### 3.5.4.5 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(11)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．前述したように，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定に不自然さが指摘される．

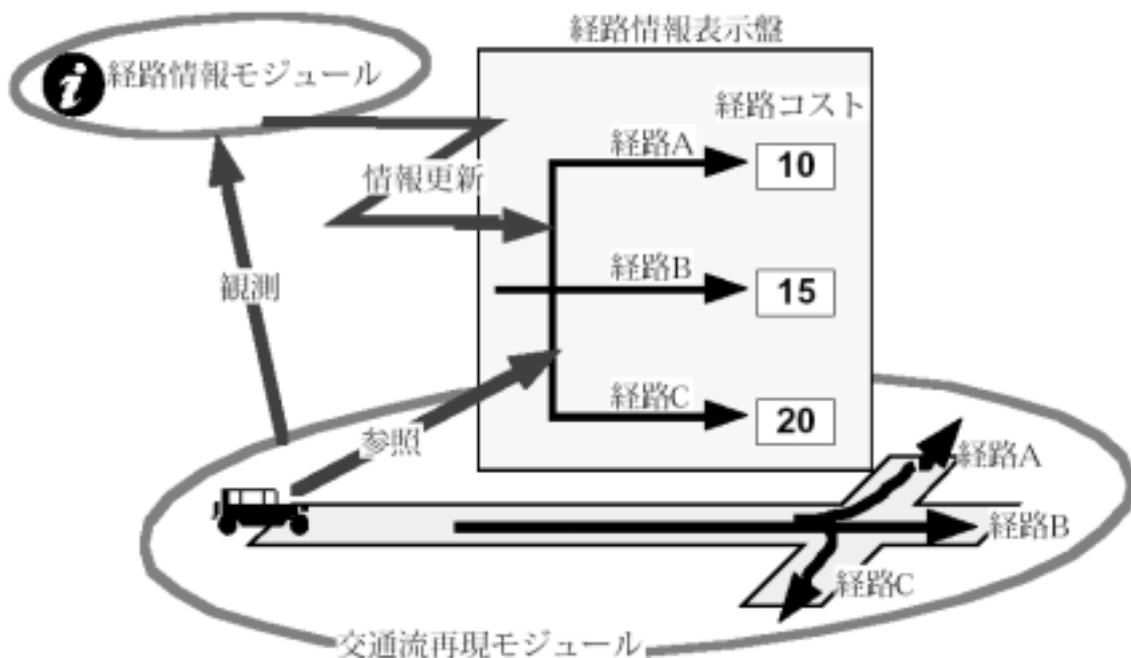


図 3.13： 経路コスト情報に基づく経路選択

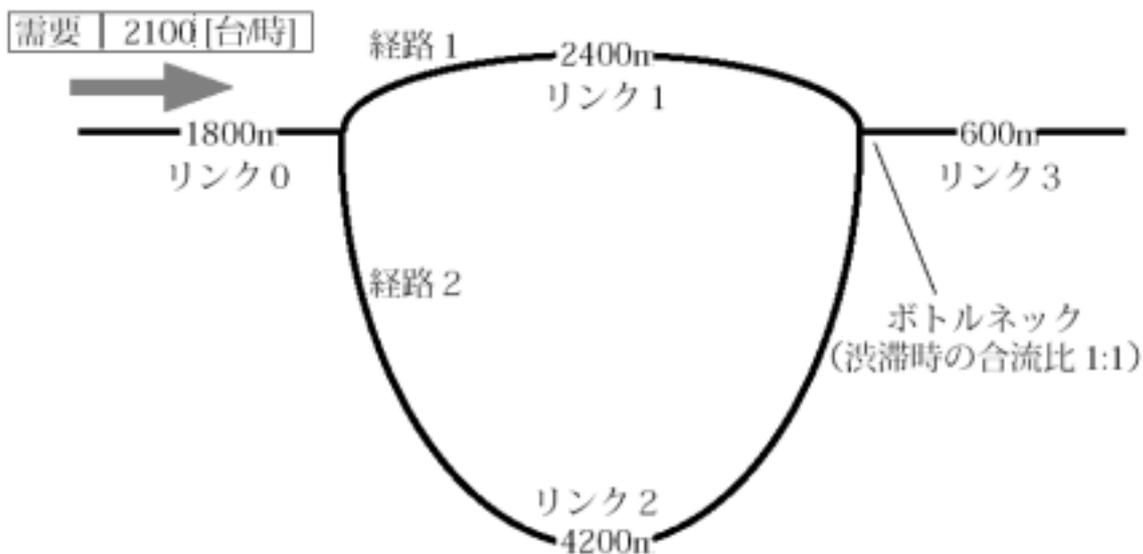
本モデルでは現在の旅行時間をコストとした，リアクティブな動的均衡配分を仮定している。これはシミュレーションでの取り扱いが容易であるのに加え，可変情報表示盤や VICS，ATIS などの新たな情報提供の枠組みが近年整備が進められていることから，さまざまな要求に応えうるモデルである。

図 3.14 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  $\theta$  とし，渋滞時のボトルネックでの合流比は 1:1 とする。

図 3.15 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，利用者均衡状態になることを示す。

一方，図 3.16 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「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 と仮定しているため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。



	リンク0	リンク1	リンク2	リンク3	単位
リンク長	1800	2400	4200	600	[m]
自由流速度	36	36	36	36	[km/時]
単路部容量	2200	2200	2200	1800	[台/時]
ジャム密度	120	120	120	120	[台/km]

図 3.14： 2 経路からなるネットワーク

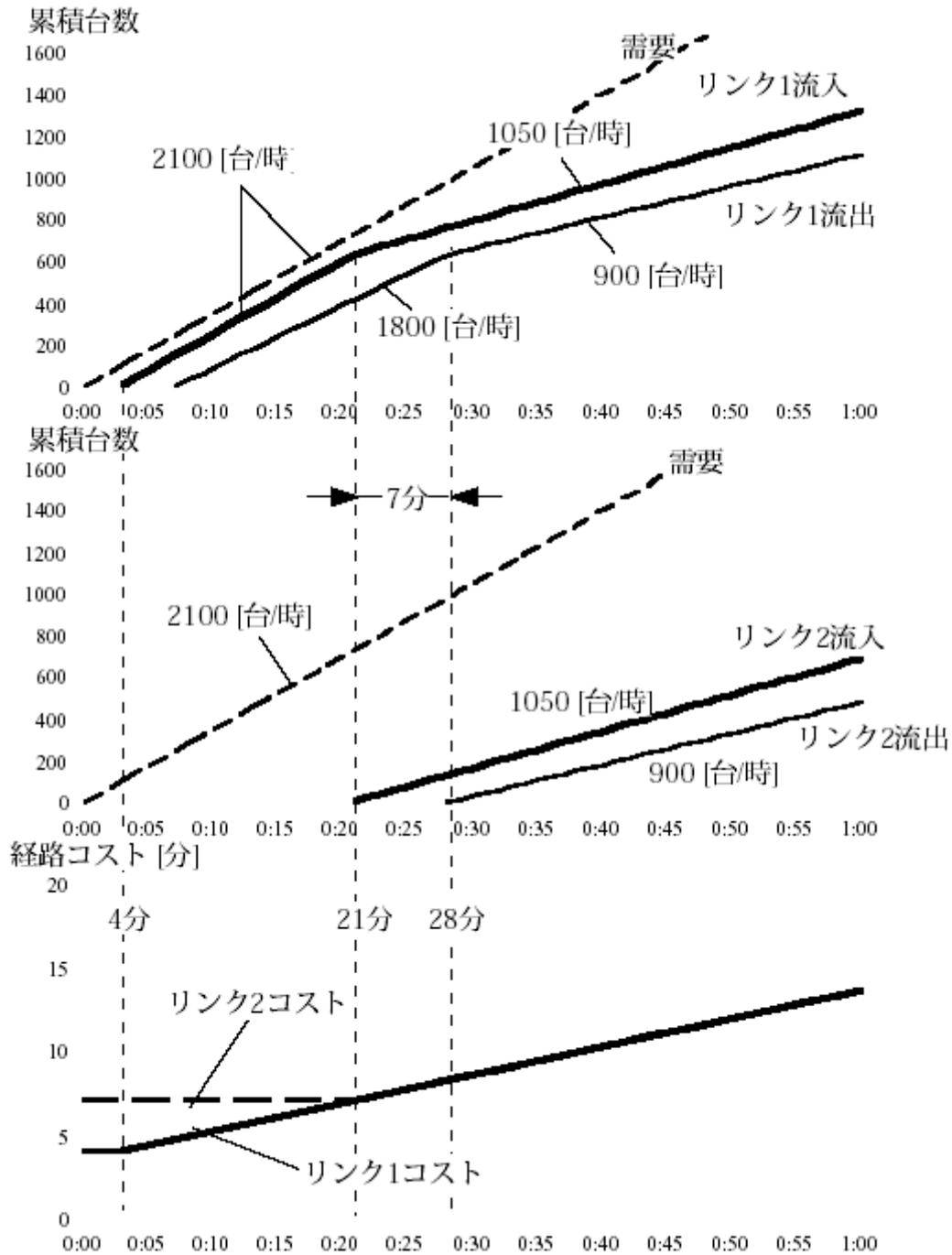


図 3.15： 将来の旅行時間をコストとしたときの経路選択挙動 ( $\infty$ )

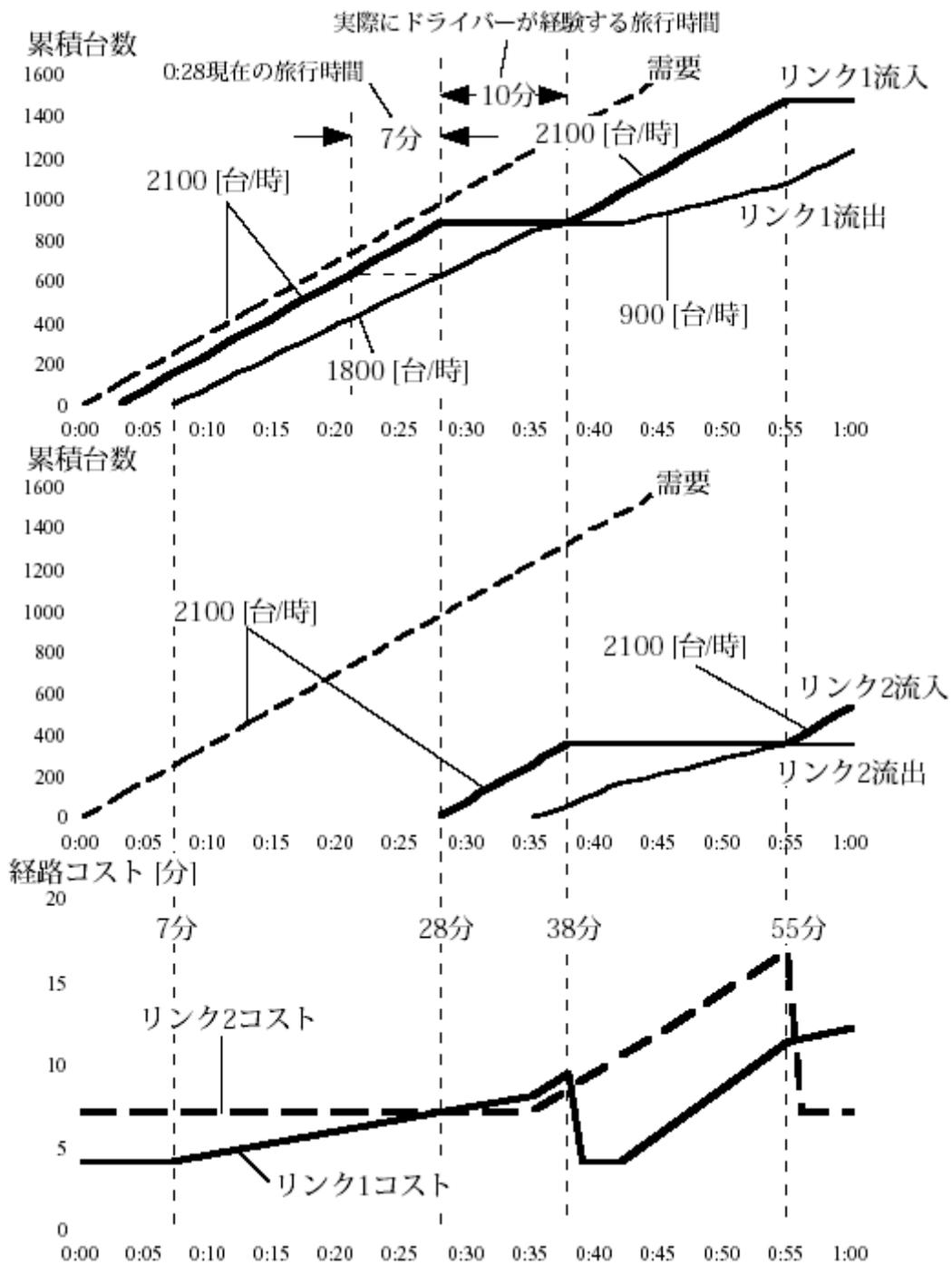


図 3.16： 現在の旅行時間をコストとしたときの経路選択挙動 (  $\infty$  )

現在の旅行時間をもとに経路選択を行う場合、ドライバ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 [69]、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  $\theta$  が大きい場合はここで示した  $\theta = 1$  の挙動に近づき、 $\theta$  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 11110000 秒 ~ 1111 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。

### 3.5.5 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 [70][71]。

図3.17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3-18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。

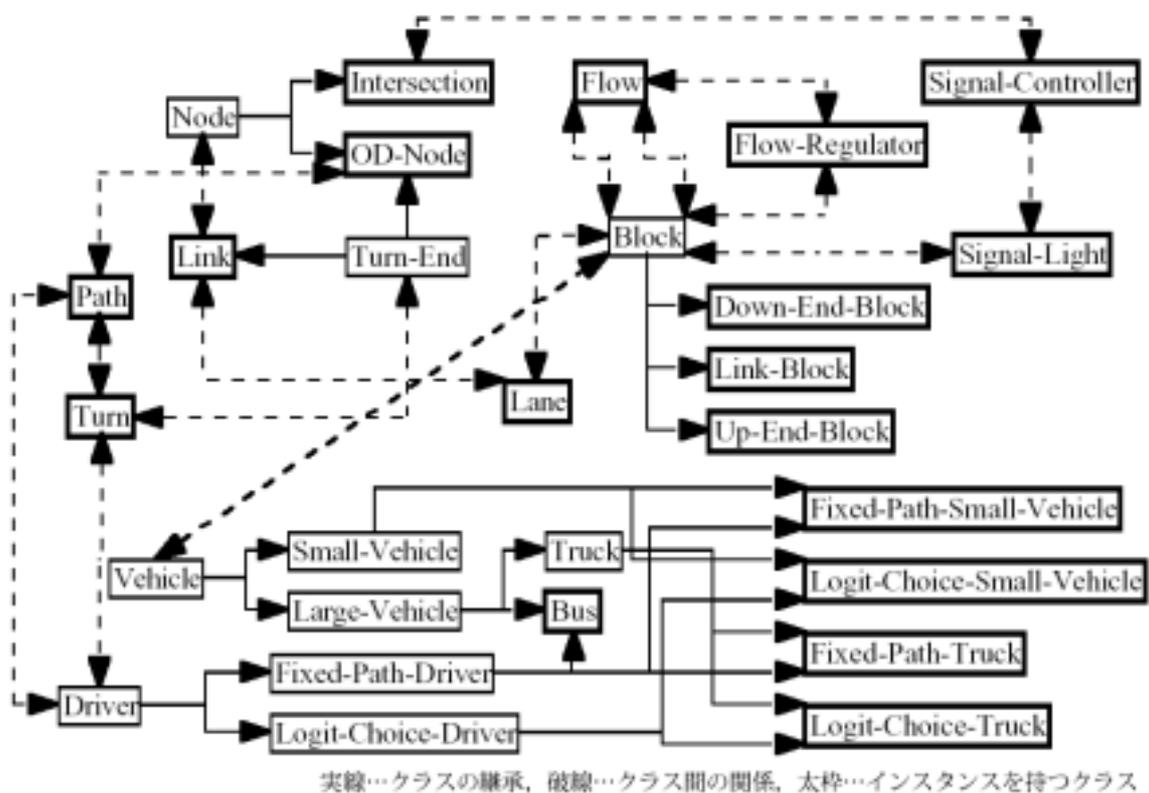


図 3.17 : AVENUE 交通モデルの主要オブジェクトクラス階層図

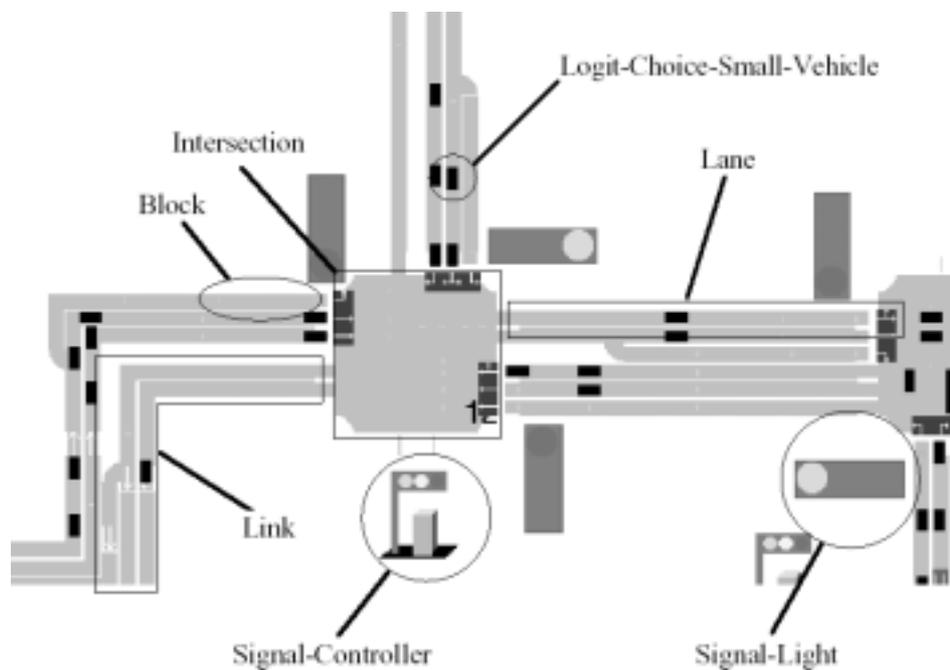


図 3.18 : AVENUE 画面上のオブジェクトアイコン

### 3.5.5.1 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．

### 3.5.5.2 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．

### 3.5.5.3 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．

### 3.5.5.4 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．

#### 3.5.5.5 車両・ドライバ ( 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 ( Fixed-Path-Driver ) と確率選択ドライバ ( Logit-Choice-Driver ) に分けられる．それぞれのドライバ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からの多重継承を受けており，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．

#### 3.5.5.6 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．

### 3.5.6 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 G2 [72] 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はなく，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 3.19 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コマの割合でコマ取り録画している。

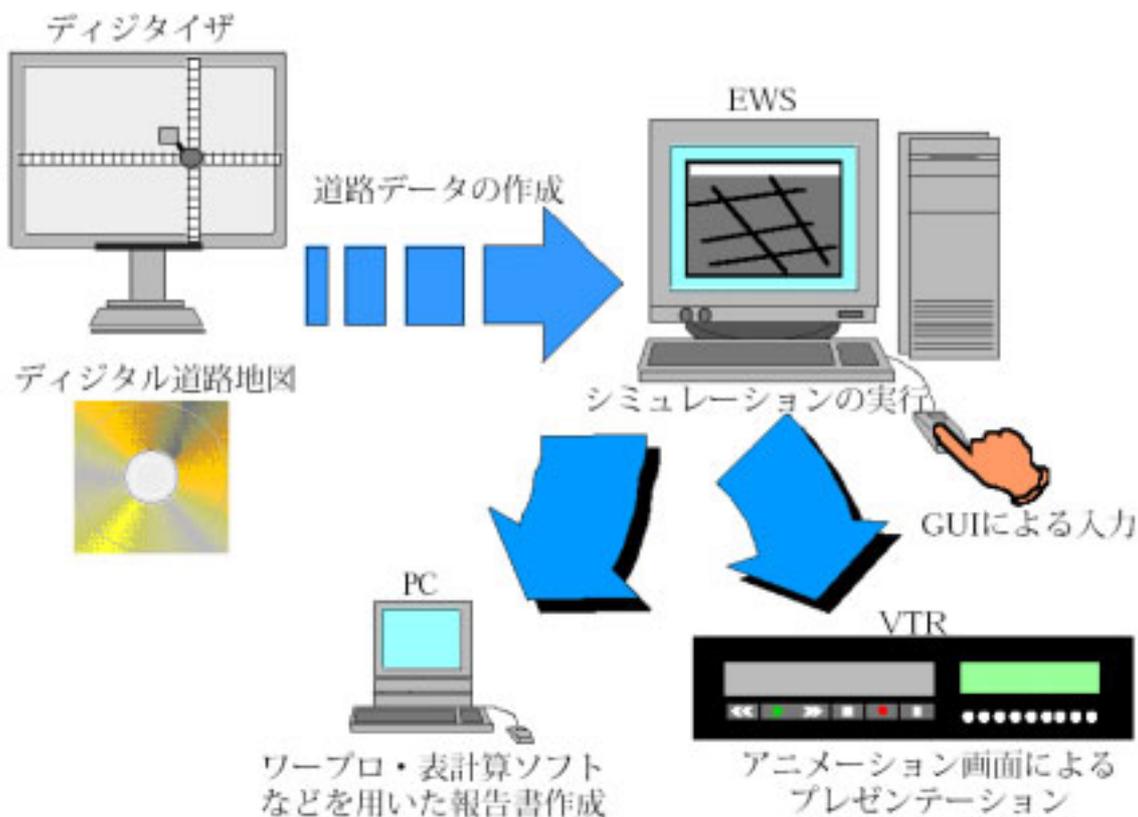


図 3.19： AVENUE システム構成の概要

## 3.6 仮想空間での動的 3 次元可視化

### 3.6.1 概要

本章で紹介した交通流シミュレーションはすべて 1・2 次元システムであり、空間性をもっておらず、現実性に欠けているといえる。それというのも、我々が今活動しているこの実空間はいうまでもなく 3 次元空間であるからだ。よりリアルなシミュレーションを実現するためには、リアルな空間との同一性・同時性を向上させなければならない。2 次元交通シミュレーションを 3 次元仮想空間へ持っていき、その交通流シミュレーションの外見的なリアル性を向上させるばかりでなく、様々な外部要素との相互関係をよりリアルに再現し、現実に近いシミュレーションを構築するのが本研究における重要な課題である。

作業の流れとしては、まず AVENUE において 2 次元交通流をシミュレートし、各車両の移動情報（移動経路（時刻  $t$  における位置座標）、車種、レーン番号）が出力される。AVENUE より出力されたこの時系列情報を 3 次元仮想空間内において読みとり、読みとった情報に基づき、該当車両の走行を制御する。こうすることによって、AVENUE で生成された交通流シミュレーションが 3 次元仮想空間に遷移する。

### 3.6.2 AVENUE からの入力情報

AVENUE からは次の情報が得られる：

1) 車両位置が**実世界緯度経度相対座標**の場合（未処理データ）：

車両移動データ：

時刻、リンク ID、車 ID、移動距離、車種、レーン

リンクデータ：

リンク ID、リンク端 A（ノード ID）、リンク端 B（ノード ID）、リンク長

ノードデータ：

ノード ID、経度、緯度

2) 車両位置が**実世界緯度経度絶対座標**の場合 (処理後データ):

車両移動データ:

時刻, 車 ID, 経度, 緯度, 車種, レーン

3) 車両位置が**実世界距離絶対座標**の場合 (緯度経度座標 実世界距離座標 変換後)

車両移動データ:

時刻, 車 ID, X, Y, Z, 車種, レーン

(但し, 距離の単位はメートル(m)とする)

3) 車両位置が**仮想空間距離絶対座標**の場合 (実世界距離座標 仮想空間距離座標 変換後)

車両移動データ:

時刻, 車 ID, U, V, W, 車種, レーン

(但し, 距離の単位は仮想空間内の距離単位とする)

### 3.6.3 座標変換

座標変換は, まずは, 緯度経度座標から実世界距離座標へ, そして実世界距離座標から仮想空間距離座標へと2回行われる.

#### 3.6.3.1 緯度経度座標から実世界座標へ

まずは, 地図上の任意ノードを基準点とし, その経度緯度座標と実世界距離座標をそれぞれ $(e_0, n_0)$ と $(x_0, y_0)$ とする. また, 基準点であるために,  $(x_0, y_0) = (0, 0)$ とする. ノード ID (或いは絶対座標の場合, 単なる車両の位置座標でもいい)  $n$  の実世界距離座標を $(x_n, y_n)$ とする. (但し,  $z$  軸座標はそのまま標高  $h$  の値を用いるとする)

赤道半径を  $R_{eq}$ , 極半径を  $R_{pl}$  とすると, 次式が成り立つ:

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{e_n - e_0}{360^0} 2\pi R_{eq} \sin \frac{(90 - n)^0 \pi}{180^0} \\ \frac{n_n - n_0}{360^0} 2\pi R_{pl} \end{bmatrix} \quad (12)$$

### 3.6.3.2 実世界座標から3次元仮想空間座標へ

最適移動、回転、スケールの計算で仮想空間のスケールが定数として得られる（或いは既に与えられている場合は、与えられる値を採用する）。このスケールさえ分かれば、実世界座標から仮想空間座標へ座標変換ができる。

そこで、仮想空間座標を  $(u_n, v_n)$  とし、また同様にその基準点を  $(u_0, v_0)$  とし、スケール量を  $s$  とすると、次式が成立する：

$$\begin{bmatrix} u_n \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 + x_n \cdot s \\ v_0 + y_n \cdot s \end{bmatrix} \quad (13)$$

こうして各点の3次元仮想空間座標が得られる。

### 3.6.4 動的3次元交通流シミュレーション

座標変換後のデータを読みとり、仮想空間に入力すると、車両移動制御プログラムによって、時刻  $t$  になったら、車両位置が  $(x(t), y(t), z(t))$  となるように制御される。このように3次元交通流シミュレーションが実現できる。

### 3.6.5 工夫点

3次元仮想空間内において交通流シミュレーションを実現する際にあたって、これらの課題をまずクリアしなければならない。

#### 1) 自動化

まず意識しなければならないのは、AVENUE から出力される車両移動情報は非常に莫大なものであることである。例えば1500台の車の移動を川崎市池上新町付近で10分間シミュレートするだけで、その車両移動データの計算機上テキストファイルが23万行以上のものになる場合がある。数万～数十万行から成るデータを一行ずつ仮想空間に入力するのは非効率的である。データ自動読み込みシステム構築が必要不可欠となる。本研究においても、これが立ち向かわなければならぬ最初の課題であった。

現段階では、ほぼ全作業を自動化するに至った。AVENUEからのデータ取得、座標変換、そして3次元仮想空間へのデータ入力、3次元仮想空間内における車両移動制御、全て自動化できるようになった。

#### 2) 同一性

同一性とは、実空間と仮想空間の間に誤差があってはならないことを意味する。すなわち、仮想空間における活動は実空間のそれに一致しなければならないことである。そのため、仮想空間内において例えば車両が不自然な動き（建物のなかをパスしたり、対向車線の車と衝突したり、不自然なスピードを出したり、不自然に後戻りしたり）をしたりしてはいけない。例え不自然な動きがあったとしても、それを検出し、自動的に修正する機能をもつシステムが必要となる。

#### 3) 同時性

動的3次元とは、空間次元の3次元に加え、時間の次元が追加され、また、その時間軸上の変化に対し動的に対応することを意味する。動的3次元システムにおいては、時間が非常に重要な役割をもっている。

交通流シミュレーションはあくまでもシミュレーションであり、車両トラッキングではないため、車両トラッキングシステムに対してよく求められているような、実空間の車両活

動をリアルタイムに仮想空間内に再現する機能を必要としないが、実空間の時間と仮想空間の時間の定義が一致しなければならない。例えば、仮想空間の1分は実空間の1分と同じでなければならない。同時性がないと、仮想空間の車両のスピードが間違っていて計算されてしまうので、見た目からしても不自然な動き・スピードをし、現実性の問題となる。

上記をふまえて、本研究では次のように工夫した：

### 3.6.5.1 車の回転角・姿勢

AVENUE から与えられているデータには、車の回転・姿勢が含まれていない。車の回転・姿勢を考慮せずにデータを読み込むと、車が如何なる移動をしても向きを変えないため、リアル性がない。そこで、時刻  $t$  と  $t-1$  の位置座標から、車の姿勢を自動的に計算できるように工夫した。

時刻  $t$  における車の回転角  $\alpha(t)$  は次のように定義した：

$$\tan \alpha(t) = \frac{y(t) - y(t-1)}{x(t) - x(t-1)} \quad (14)$$

但し、 $y(t)$ ,  $y(t-1)$  はそれぞれ時刻  $t$  と  $t-1$  における  $y$  軸位置座標、 $x(t)$ ,  $x(t-1)$  はそれぞれ時刻  $t$  と  $t-1$  における  $x$  軸位置座標である。

### 3.6.5.2 インターポレーション

AVENUE における車の位置はもともとノードやリンクからなる相対座標で定義されているので、絶対座標に変換すると、不具合が生じる場合がある。特にリンクとリンクの間の無リンクの地点を通過すると、車が不自然なスピードで後戻りしたりする場合がある。

そこで、その「不自然なスピード」を定義し、ある時刻  $t$  においてある車に関して不自然なスピードが検出された場合、その時刻  $t$  の位置座標・姿勢をインターポレートする。そうすることによって、後戻り現象が解消され、全ての車が自然な走行をしてくれることが期待できる。

### 3.6.5.3 上下車線

簡単のために今 AVENUE から出力されるデータでは、上下車線の区別はない。そのため、データをそのまま読み込むと、車同士が真正面から衝突し合ったりする。対向車線の車とぶつからないように、そこで今回は、すべての車に対して、その各時刻における位置座標を走行方向より（日本の場合）左へ移動ベクトル（角度：走行方向角+90°、移動量 R：車の幅の2台分）でずらす。そのため、データから与えられている位置座標を $(x_0, y_0, z_0)$ とすると、ずらした後の位置座標 $(x_1, y_1, z_1)$ は次のように定義される：

$$x_1 = x_0 + \frac{R}{\sqrt{1 + \tan^2(\theta + 90^\circ)}} \quad (15)$$

$$y_1 = y_0 + \sqrt{R^2 - (x_1 - x_0)^2} \quad (16)$$

## 3.7 川崎市を対象とした例

本研究では現在主に川崎市池上新町付近を対象空間としている。午前 07:02~07:10（車台数：1500 台）と午前 12:00~13:00（車台数：4500 台）、一般道路、高架道路と様々な条件でシミュレーションを行っている。図 3.20 は池上新町交差点より北の地区の仮想空間における 3次元交通流の bird view を表している。

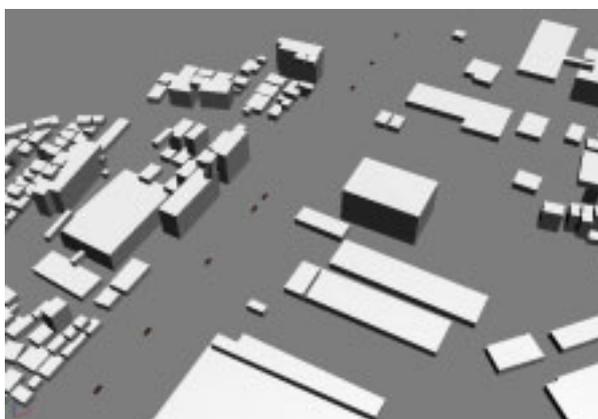


図 3.20： 川崎市の 3次元仮想空間における動的 3次元交通流シミュレーション

## 第 4 章

# 汚染物拡散の動的 3 次元可視化

## 4.1 はじめに

ロードプライシング，広域信号制御など，広域かつ動的に交通状況が変化するような交通施策による大気汚染削減効果を把握するためには，動的な交通状況の変化を再現するとともに，排出量に影響を及ぼす速度変動の要素を的確に捉えた排出量推計を行う必要がある．このような複雑な交通状況を再現するツールとして多くの交通シミュレーションモデルが開発されている．このシミュレーションモデルと排出モデルを組み合わせる様々な交通制御，交通運用施策による環境への影響評価を行うニーズは高く，実務への適用に向けた様々な検討が行われている．特に，個々の車両の詳細な加減速挙動を出力可能なマイクロシミュレーションとそれに対応する詳細な排出モデルの組み合わせにより，詳細な交通状況の変化にも対応した時空間的に詳細な排出状況の出力が容易に行えることが期待されている．

しかし，シミュレーションによる排出量推計手法については，シミュレーションと排出モデル，それぞれの特性を考慮した上で適切なアプローチであるかどうか，また，これらを踏まえた適切なアプローチのあり方については，必ずしも十分に検討がなされているとは言えない状況である．

本章では，シミュレーションを用いた既往の排出量推計アプローチの問題点を指摘するとともに，これらの問題を踏まえた，シミュレーションの現実的な精度を前提とした新たな排出量推計アプローチを提案し，その有効性を示す．

## 4.2 関連研究・既存技術

Hot spot などの環境負荷の大きな地点における排出量を的確に捉えるためには，車両の発進停止などによる速度変動の影響を適切に捉える必要がある．以前は，停止回数・遅れ時間・走行距離などの要素に分割して排出量を推計する方法，加速・減速・定速・停止などのモード毎に分けて排出量を推計する方法が多く用いられてきた．これらの方法はいわゆるマクロシミュレーションとも親和性があり，単純な状況下の簡易な推計（非飽和信号交差点における発進挙動など）であれば十分実用的であるが，複雑な交通状況には必ずしも対応できず，速度変動要素の再現，排出量の空間的な分布の再現性は十分ではない．

一方，近年ではマイクロシミュレーションに詳細な排出量モデルを組み合わせた方法が全盛となっている．これは，計算機能力の飛躍的向上により広域なネットワークに対してもミ

クロシミュレーションを実用的なレベルで適用できるようになったこと、排出ガス量の計測技術の進展により速度・加速度別の排出率など詳細な排出原単位が整備されつつあることなどによる。しかしながら、これらのアプローチに対しては様々な問題が指摘される。

一つは、シミュレーションの出力としての加速度が、排出量推計の観点から十分な精度を有するか定かではない、ということである。これは、モデルそのものの問題と言うよりは、シミュレーションの実際の利用形態に起因する部分が多い。すなわち、ネットワーク上での各種施策効果の評価に当たっては、まず第1に渋滞現象の変化、つまり旅行時間、リンク速度、断面交通量などのマクロな交通状況が興味の対象となる場合が多い。同時に、それらのマクロな交通状況値が再現性の指標として用いられ、

キャリブレーションもそれらの指標に基づいておこなわれることになる。従って、そのように設定された各種モデルパラメータを用いた場合にミクロな加減速挙動が再現されるか、排出量推計という視点で見た場合に十分に妥当な精度であるか、検証された例はほとんどないし、また各シミュレーション適用事例に対してそれらを検証することは、検証データ獲得困難性の面からも非常に難しい。二つ目は、ミクロな排出モデルから、区間の集計量が適切に再現されるか、という問題である。すなわち、この手法では時々刻々の排出挙動の積分量として推計対象区間における集計量が得られるが、排出モデルはミクロな排出現象に基づいてキャリブレートされたものであるから、集計量が妥当な値となっている保証はない。特に、時々刻々の加減速挙動が十分な精度を有していないならば、なおさらである。

三つ目は、排出要因の論理的説明力の欠如である。ある時空間単位における排出量を評価しようとする場合、算出される排出量は時々刻々算出される排出量の積算である。そのため、得られた集計排出量を直接的かつ論理的に説明できる指標はなく、排出要因を論理的に分析する場合に困難が生ずる。特に、速度・加速度別排出率テーブルなど単に測定データの集計から作成したモデルを用いる場合にはこの問題は大きい。

以上のような問題により、加減速挙動について再現性の検証がなされない状況下で排出量の推計を行っても、単に推計値が得られたというだけで、その妥当性については何ら保証が得られず、場合によっては偏った排出量を推計し、推計したい施策に対して十分な感度がない、あるいは感度が大きすぎるなど、施策評価ツールとして適切な解を与えない可能性も考えられよう。

その一方、ある程度詳細に速度変動要素を捉えることができる排出モデルは、入力として速度プロファイルが得られていることが前提である。そのため、ここにシミュレーション

の現実的な出力と排出モデルで要求される入力との間にギャップが存在することとなる。

## 4.3 排出量推計手法

### 4.3.1 基本的な考え方

上記の問題点も踏まえて、小根山らは交通流シミュレーションに期待される現実的な出力を踏まえ、求められる時間的・空間的な集計単位に応じて現実的な精度を確保することができる排出量推計アプローチを提案している [78]。図 4.1 には、提案アプローチのフローを示している。大きな特徴は、交通流シミュレーションモデルと排出モデルの gap を埋め、両モデルを結びつけるために『排出量推計指標変換モデル』というモデルを導入している点である。この詳細は次節に述べるが、シミュレーションのアウトプットとして現実的に再現可能な詳細度の走行軌跡から、排出モデルの入力である排出量推計指標へ変換（算出）するものである。

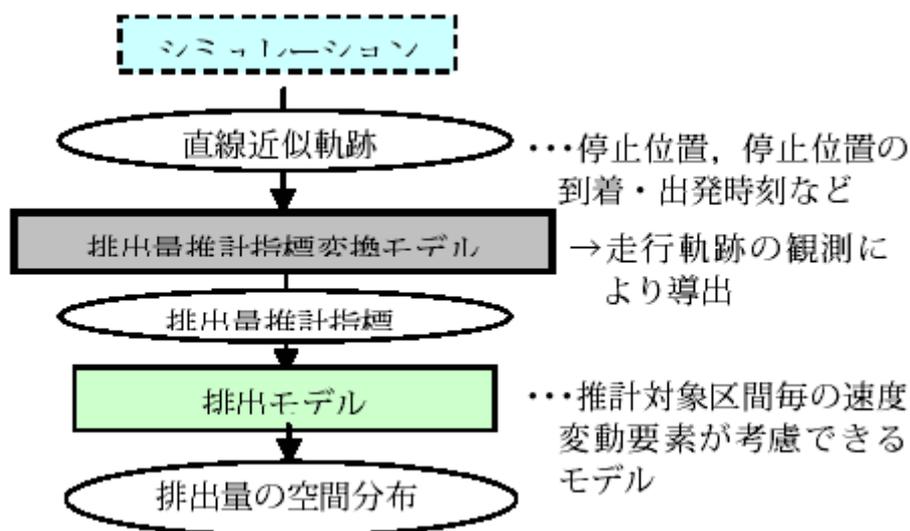


図 4.1： 排出量推計の基本的な考え方

以下，要素毎にその概要を説明する．

#### 4.3.1.1 交通流シミュレーションモデル

シミュレーションモデルでは，最低限マクロレベルでの交通状況の再現性とともにより，個々の車両について停止位置（又は速度が大きく変化する位置），停止位置における遅れ時間，停止位置間の平均巡航速度が再現されている状況を前提とする．この際，速度，加速度など詳細な走行軌跡についての再現性は期待しない．なお，上記のような状況を車両の走行軌跡として模式的に描くと直線のみで近似された車両軌跡となる．

#### 4.3.1.2 排出モデル

排出モデルとしては，ある程度(10～100m)の空間集計距離において，速度変動を考慮した排出量を推計できるモデルである必要がある．しかし，4.3.1.1 のようなシミュレーションの出力を対象とすると，速度・加速度別排出率のような詳細なモデルは適用困難であるとともに，4.2 で示したミクロな排出量と集計量の不整合の問題もある．従って，ここでは推計対象区間における車両軌跡から排出量を説明する要因を複数抽出し，各要素の推計対象区間における集計量を説明変数とするモデルの適用を基本とする．具体的に，エンジン出力と排出量が比例，エンジン回転数一定となるようにギヤ比を設定という仮定に基づき導出されたモデル式 [79] を以下に示す．

$$F = c_1 \cdot Z_v + c_2 \cdot Z_{v3} + c_{3a} \cdot Z_{\alpha v} + c_{3b} \cdot Z_{\alpha} + c_{4r+} T_{r+} + c_{4r-} T_{r-} + c_{4i} T_i \quad (17)$$

ここで， $Z_v$ ， $Z_{v3}$ ， $Z_{\alpha v}$ ， $Z_{\alpha}$ ， $T_{r+}$ ， $T_{r-}$ ， $T_i$  が排出量を説明するために抽出された指標（排出量推計指標）であり，推計対象区間における車両軌跡から算出される．なお，排出量推計指標はそれぞれ論理的な意味づけを有しており， $Z_v$ ， $Z_{v3}$  は走行距離に比例して増加する項（距離項）， $Z_{\alpha v}$ ， $Z_{\alpha}$  は速度変動に伴って増加する項（速度変動項）， $T_{r+}$ ， $T_{r-}$  は走行時間に関する項（走行時間項）， $T_i$  は停止時間に関する項（停止時間項）として整理できる．このような意味づけを有する排出量推計指標に分解することは，速度・加速度別排出モデルを用いる方法に比べて，排出量の要因分析とそれに基づく施策の検討とい

った観点からも有効であると考えられる。

#### 4.3.1.3 排出量推計指標変換モデル

4.3.1.2 の「排出量推計指標」は、車両の走行軌跡から算出される量であるため、4.3.1.1 の直線近似された車両軌跡からは直接求められない。従って、4.3.1.1 の車両軌跡から 4.3.1.2 の排出量推計指標を推計するモデルが必要となる。これが、「排出量推計指標変換モデル」である。すなわち、シミュレーションの出力である直線近似された車両軌跡の情報を用いて、排出量推計指標（式(17)のモデルでは  $Z_v, Z_{v3} \dots$ ）それぞれに対して排出量を再現するように空間分布を当てはめる。この操作は、いわば直線近似された車両軌跡に対して“排出量が合うように排出量推計指標を fitting”することであり、速度プロファイルを直接排出モデルに代入して排出量を推計する手法との大きな違いである。

排出量推計指標変換モデルは、実験車等により精度良く観測された走行軌跡データに基づき設定する。これにより、排出量に大きな影響を与える速度・加速度の精度を確保できるとともに、排出量推計指標の推計精度の検証を通して、事前に期待される排出量の推計精度を評価できるというメリットもある。

### 4.3.2 排出量の具体的な算出手順

ここでは、シミュレーションの出力（直線近似軌跡）から排出量推計指標を算出するモデルの具体的な流れを示す（図 4.2）。

直線近似された車両軌跡から加速範囲、減速範囲を設定し、続いて加速範囲、減速範囲を除いた範囲を定常走行範囲（速度 > 0 の場合）、停止範囲（速度 = 0 の場合）として設定する。なお、加速範囲、減速範囲は直線近似された車両の軌跡の巡航速度が変化する地点において、その前後の速度から設定される。各範囲毎に、その区間における排出量推計指標値をモデルにより算出する。このモデルは、基本的には初速度、終速度（加速範囲、減速範囲）、巡航速度（定常走行範囲）に基づき設定される。

加速範囲、減速範囲については、別途設定された排出量推計指標の空間分布（この分布も初速度、終速度に基づき設定される）を用いて配分され、排出量推計指標の空間分布が算出される。

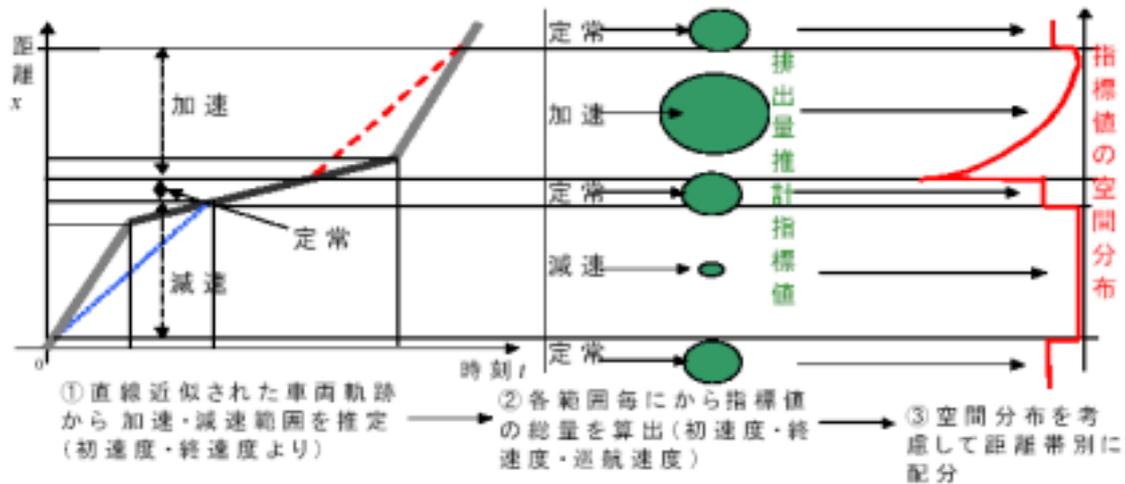


図 4.2： 出量推計指標変換モデルのイメージ

この方法により，対象とするすべての排出量推計指標について空間分布を算出し，排出量推計モデルに代入することにより，排出量の空間分布が算出される．

#### 4.4 汚染物拡散動的 3 次元シミュレーション

汚染シミュレーションを実現するシステムは現在本学生産技術研究所加藤・大岡研究室との共同プロジェクトにおいて開発されている．本研究では，CFD (Computational Fluid Dynamics = 数値流体力学)技術を採用している．

CFD とは，流体力学の研究を可能にするコンピュータ解析技術である．ユーザーは CFD を使用して，研究対象であるシステムや装置を表現した数値モデルを作成する．次に，この仮想プロトタイプに対して流体の流れに関する物理学が適用され，ソフトウェアからは流体の流れを予測する出力が得られる．CFD は，流体の流れの動きを予測するだけでなく，熱伝達，質量（蒸散や溶解など），相の変化（凍結や沸騰など），化学反応（燃焼など），機械的な動きを伴う流れ（インペラー周りの流れなど），流れによる応力や固体の変形（風によるマストの湾曲など）なども予測する．図 4.3 は 2003 年 9 月 3 日午前 9～10 時の川崎市の実際の気象情報をもとに本研究で構築した都市モデルにおいて CFD を用いてシミュレートされた CO 拡散状況を示す．

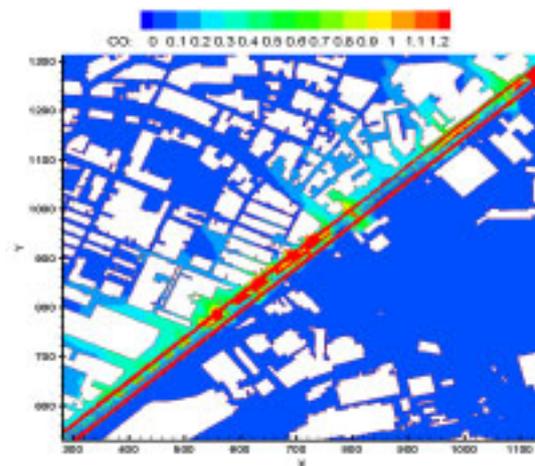


図 4.3： CFD での CO 拡散動的 2 次元シミュレーション

しかし、CFD はあくまでも 2 次元（動的 2 次元）でしか拡散をシミュレートすることができず、3 次元的な見えを与えてくれない。本研究では、各高さにおけるこのような CFD シミュレーション結果を 3 次元仮想空間内において重ね合わせることによって動的 3 次元シミュレーションを構築している（図 4.4）。

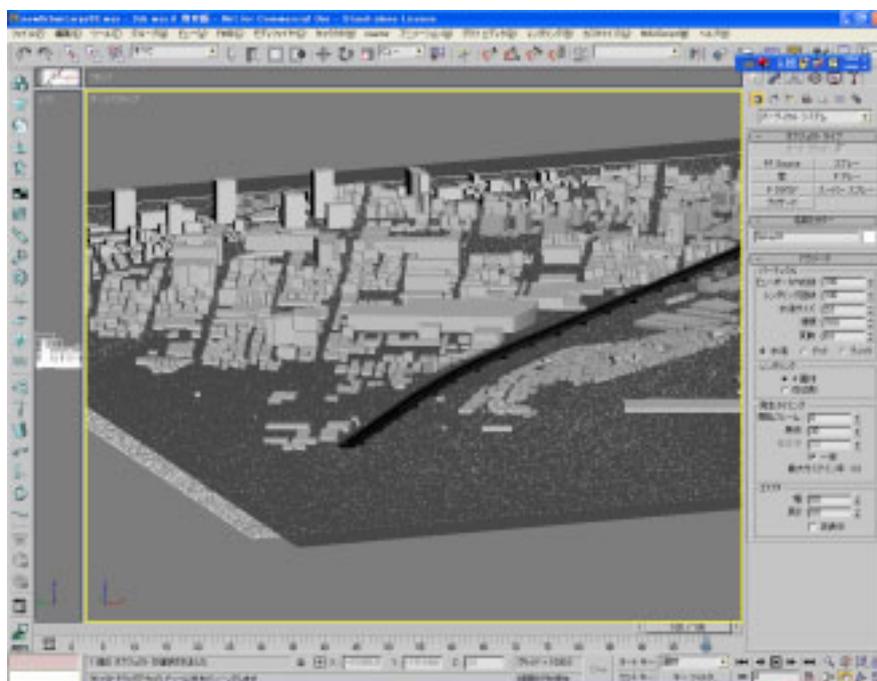


図 4.4： CFD シミュレーション結果に基づく 3 次元仮想空間における汚染物拡散動的 3 次元シミュレーション

# 第 5 章

## 結論

## 5.1 結論

本論文では、時間軸上動的に変動する交通量と汚染度の変化をシミュレートする仮想空間としての、広域 3 次元仮想都市を構築した。また、広域仮想都市構築の自動化・効率化・低コスト化を図り、航空写真を入力とした影解析による 3 次元幾何学形状の復元手法を提案し、航空写真の影抽出に成功した。

## 5.2 今後の課題

今後の課題としては、仮想都市構築のための影解析に関しては、影解析手法のアルゴリズムを構築し、そしてスロープ地面や密集地域での影解析手法の応用を試みることや、仮想空間におけるシミュレーションに関しては、交通シミュレーションと汚染シミュレーションの融合だけでなく、交通と汚染のこの 2 キーワード以外の実空間の活動をも仮想空間内において再現することが挙げられる。

# 謝辞

本研究を進めるにあたって、いつもお忙しいなか、毎週打ち合せをして頂き、素晴らしい研究環境と適切な助言・指導をいただいた池内克史教授に心から感謝いたします。研究だけでなく、生活、人生に関しても心づかいをいただき、研究生活の支えになりました。

また、本研究が属するプロジェクトにて、適時に適切な助言・指導をいただいた桑原雅夫教授、加藤信介教授、大岡龍三助教授、影沢政隆助手に心から感謝いたします。微力な私を本プロジェクトに参加させて頂いて光栄に思っております。研究の内容だけでなく、研究の進め方や方向性について、大変勉強になりました。

先輩として研究に関する様々なアドバイスをして頂き、研究を遂行する上で多くの助言や協力をして頂き、かつ、研究を遂行する上で重要な計算機の管理や保守に常に尽力して頂いた、同じ ITS グループでもあり、私の隣席者でもある、博士課程 3 年の平原清隆さん、博士課程 2 年の小野晋太郎さんに深く感謝します。

研究を進めるに際して、様々な協力やアドバイスを頂いた、小川原光一さんに、深く感謝します。

学会出席やその他の事務関係についてお世話になりました、長谷川仁則技官、松浦芳子さん、元木恵子さん、斉木優子さん、平山幸恵さん、菊地薫さん、小林聡子さんに、深く感謝致します。いつもご親切にして頂いて深く感謝します。

研究室の生活を送るにあたりお世話になり、学会や生産技術研究所公開において共にごんばってくれて勇気付けてくれた同学年・同 ITS グループの太田亮さんに感謝します。いつも楽しい話をありがとうございます。

そして、短い間でしたが、池内研究室のみなさんに感謝します。

本論文は筆者個人のみのもので出来たものではなく、上記の方々以外にも電気系専攻同期の方々をはじめとする多数の方々から御教示や御協力を頂きました。最後に、昼夜を問わず研究生活を共にしたこれらのの方々、そして学生生活をあらゆる面で支えてくれた、遠い国にいる両親、妻、息子、に感謝致します。国へ帰ります。

# 発表文献

- [1] K. Azmi, S. Ono, M. Kagesawa, K. Ikeuchi, “Automatic Reconstruction of Large-scale Virtual Environment for Intelligent Transportation Systems Simulation”, Proc.of the 11<sup>th</sup> Intelligent Transport System World Congress, Oct. 2004.
- [2] カイリル アズミ、小野晋太郎、影沢政隆、池内克史, “広域仮想都市構築のための航空写真影解析による3次元情報復元”, 第3回 ITS シンポジウム, Oct. 2004.
- [3] K. Azmi, K. Ikeuchi, “Shadow Analysis of Aerial Imagery for Large-Scale Virtual City Reconstruction”, Proc.of the Indonesia – Japan Joint Scientific Symposium 2004 (IJSS 2004), Oct. 2004.
- [4] K. Azmi, K. Ikeuchi, “3D Information Restoration Based on Shadow Analysis of Aerial Imagery for Large-Scale Virtual City Reconstruction”, Proc.of the 13th Indonesian Scientific Conference in Japan (ISCJ 2004), Sept. 2004.

# 参考文献

- [1] C. Baillard and H. Maître, “3D Reconstruction of Urban Scenes from Aerial Stereo Imagery : A Focusing Strategy,” *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 76, no. 3, Dec. 1999, pp. 244-258.
- [2] C. Frueh and A. Zakhor, “3D Model Generation for Cities Using Aerial Photographs and Ground Level Laser Scans,” *Proc. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE CS Press, 2001, vol. 2.2, pp. 31-38.
- [3] H. Zhao and R. Shibasaki, “Reconstructing Textured CAD Model of Urban Environment Using Vehicle-Borne Laser Range Scanners and Line Cameras,” *Proc. 2nd Int’l Workshop Computer Vision Systems*, LNCS 2095, Springer, 2001, pp. 284-297.
- [4] M. Morgan and K. Tempeli, “Automatic Building Extraction from Airborne Laser Scanning Data.” *Proc. 19th Int’l Soc. Photogrammetry and Remote Sensing Congress (ISPRS)*, book 3B, ISPRS, pp. 616-623.
- [5] H. Norbert and B. Claus, “Generation of 3D City Models from Airborne Laser Scanning Data.” *Proc. 3rd European Assoc. Remote Sensing Laboratories (EARSEL) Workshop Lidar Remote Sensing of Land and Sea*, A.A. Balkema, 1997.
- [6] S. E. Chen, “QuickTime VR – an image-based approach to virtual environment navigation,” *Proc. of ACM SIGGRAPH’95*, pp. 29–38, 1995.
- [7] S.Hinz, F. Kurz, A. Baumgartner and P. Wasmeier, “The Role of Shadow for 3D Object Reconstruction from Monocular Images”, *Optical 3-D Measurement Techniques (V)*, Institute of Geodesy and Geophysics, Vienna University of Technology, 2001, pp. 354 – 363.
- [8] 交通工学研究会編「交通工学ハンドブック」, 技報堂出版, 1984.
- [9] 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.

- [10] 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.
- [11] 警察庁交通局監修「月間交通」, 1993, 3月号.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] イメージ工学研究所編「ITSのすべて」, 日本経済新聞社, 1995.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] R. D. Coombe: Review of Computer Software for Traffic Engineers, Transport Reviews, Vol. 9, No. 3, pp. 217-234, 1989.
- [18] 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.
- [19] R. D. Coombe, T. J. Annesley, R. P. Goodwin: The Application of CONTRAM in Bahrain, Traffic Engineering & Control, pp.50-59, February, 1983.
- [20] C. White, N. Taylor, N. Hounsell: CONTRAM - A Computer Suite for Modeling Road Congestion, Traffic Technology International '94, pp.106-110, 1994.
- [21] N. B. Taylor: Contram 5: An Enhanced Traffic Assignment Model, TRRL Research Report 249, 1990.
- [22] D. I. Robertson: TRANSYT: A Traffic Network Study Tool, Road Research Laboratory Report, LR253, Crowthorne, 1969.
- [23] MVA Systematica, "CONTRAM 5 User Guide", 1989.

- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 交通工学研究会「交通信号の手引き」，1994.
- [28] 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.
- [29] C. C. Liu: Integrated Network Modeling with TRAF, Preprint at the Second Multinational Urban Traffic Conference, Beijing, China, May, 1991.
- [30] A. K. Rathi, A. J. Santiago: Urban Network Simulation: TRAF-NETSIM Program, Transportation Engineering, Vol. 116, No. 6, pp.734-743, 1992.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.

- [36] 木戸伴雄, 池之上慶一郎, 斎藤威: 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.
- [37] M. Van Aerde, S. Yagar: Dynamic Integrated Freeway / Traffic Signal Networks: A Routing-Based Modeling Approach, Transportation Research A, Vol. 22A, No. 6, pp. 445-453, 1988.
- [38] S. Yagar: Assessing the Traffic Assignment Procedures in INTEGRATION, submitted to Transportation Research, 1993.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 吉井稔雄, 桑原雅夫, 森田緯之: 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.

[47] 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.

[48] 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.

[49] 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.

[50] 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ョン，土木計画学研究講演集，No. 14(1)，pp. 301-308，1991.

[51] 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.

[52] 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.

[53] 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.

[54] 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.

[55] J. L. Horowitz: The Stability of Stochastic Equilibrium in a Two-link Transportation Network, Transportation Research, Vol. 18B, No. 1, pp. 13-28, 1984.

[56] 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.

[57] 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.

[58] 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.

[59] 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.

[60] R. Horiguchi, M. Kuwahara, M. Katakura, H. Akahane, H. Ozaki : A Network Simulation Model for Impact Studies of Traffic Management 'AVENUE Ver.2', the proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Transport Systems, Orlando, 1996.

[61] 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.

[62] 桑原雅夫,上田功,赤羽弘和,森田緯之: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.

[63] 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.

[64] 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.

[65] 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,1996.

[66] 交通工学研究会「平面交差の計画と設計 - 基礎編 - 」, 1984.

[67] 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.

[68] 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.

[69] 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.

[70] J. ランボー, 他「オブジェクト指向方法論 OMT」トッパン, 1992.

[71] P. Coad, E. Yourdon, "Object-Oriented Design", Yourdon Press Computing Series, 1991.

[72] 伊藤忠テクノサイエンス「G2 リファレンスマニュアル」, 1995.

[73] 交通工学研究会編「交通工学ハンドブック」, 技報堂出版, 1984.

[74] 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.

[75] 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.

[76] 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.

[77] 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.

[78] 小根山裕之, 大口敬, 赤羽弘和, 桑原雅夫: 直線近似された車両軌跡からの排出量推計手法, 土木計画学研究・講演集, No.24, CD-ROM

[79] Hiroyuki Oneyama, Takashi Oguchi and Masao Kuwahara: Estimation Model of Vehicle Emission Considering Variation of Running Speed, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.4, No.5, pp.105-117, 2001.10

[80] 小根山裕之, 大西博文, 山田俊哉, 平井洋: 自動車の走行特性を反映した排出係数の設定に用いる実走行モードについて, 土木計画学研究・講演集, No.22(2), pp.571-574, 1999

- [81] R.B. Irvin and D.M. McKeown, "Methods for Exploiting the Relationship Between Buildings and Their Shadows in Aerial Imagery", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 19(6), 1989, pp.1564-1575.
- [82] 安居院猛, 長尾智晴, "画像の処理と認識", 昭晃堂, 1996.
- [83] 酒井幸市, "デジタル画像処理入門", CG 出版社, 2004.
- [84] 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, 東京大学大学院工学系研究科 1996 年度博士論文, 1996.
- [85] 小根山裕之, 大口敬, 桑原雅夫 : 交通流シミュレーションを用いた排出量推計手法に関する考察 , 土木計画学研究・講演集, Vol.27, CD-ROM, 土木学会 , 2003-06.
- [86] 村尾真洋: 仮想空間への実世界情報の投影, 東京大学大学院新領域創成科学研究科 2000 年度修士論文, 2000.