

広域ネットワークシミュレーション

東京大学生産技術研究所
助教授 桑原雅夫

1. 広域ネットワークシミュレーションの目的

交通環境を改善するために規制・制御などの交通運用策あるいは、道路を新設するなどの施設整備が行われる。このような政策を実施した場合に、一体どのように交通流の状態が変化するのか、あらかじめ評価することが必要であり、その評価ツールとして交通シミュレーションモデルが用いられる。特に、政策の影響範囲が1交差点や、1路線ではなく、面的に広がる地域に及ぶと考えられる場合に、本章の広域ネットワークシミュレーションが適用される。

さて、交通状況を表現する場合の大きなポイントは、交通渋滞を表現することである。渋滞という現象は、車両がネットワークに滞留する現象で、時間的にダイナミックに交通流を扱うことが必要になる。静的な交通量配分モデルでは、渋滞現象は表現できないため、動的なモデルとして広域ネットワークシミュレーションモデルが盛んに開発・適用されつつある。

2. シミュレーションの入力データと出力

広域ネットワークシミュレーションモデルでは、図1のように道路網を方向性を持つ有効リンクとリンクとリンクが接続するノードに分けて表現し、そこに交通需要を流し込んでいくものであるから、入力データとしては、次のようなものが必要となる。

- (1)道路ネットワークに関するデータ（リンク容量、交通量 - 密度関係、リンク長、車線数、道路種別、右左折専用レーンの数・長さ、ノード座標など）
- (2)規制・制御に関するデータ（右左折禁止、一方通行、信号制御パラメータなど）
- (3)交通需要に関するデータ（交差点分岐交通量、OD交通量など）

シミュレーションの出力は多岐にわたるが、交通シミュレーションの直接の出力は、リンク・経路旅行時間、渋滞長（渋滞の定義はまちまち）、断面交通量などが一般的である。さらに、これらの量から排ガス量、騒音レベルなどを2次的に出力するモデルもある。

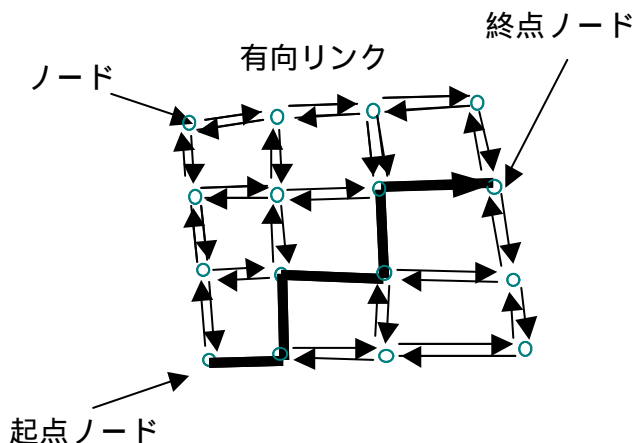


図1 有効リンクとノード

3. モデルの分類と代表的なモデル

広域ネットワークモデルの機能面の分類の主な視点としては、
 (1)ドライバーの選択行動（経路、出発時刻選択など）を内生化しているかどうか
 (2)車両移動の方法は、流体近似モデルか離散モデルか
 (3)車線単位の車両挙動を表現するかどうか
 (4)信号制御などの交通運用策の評価に対応できるかどうか
 などである。表1に最近の内外の主要な広域ネットワークシミュレーションモデルをまとめておく。

表1 主要な広域ネットワークシミュレーションモデル

モデル名	経路選択行動の内生化	流体 / 離散	開発主体
AVENUE ^{8,9)}	有り	流体 + 離散	東大、都立大、千葉工大、東洋大、株熊谷組
BOX ¹⁰⁾	有り	流体	京都大学
CONTRAM (修正版含む) ^{2,3)}	有り	離散	TRRL
DYNASMART ⁶⁾	有り	離散	Texas大
DYTAM-I ¹⁵⁾	有り	離散	科学警察研究所
FHWAモデル ⁵⁾	有り	流体 + 離散	FHWA
INTEGRATION ⁴⁾	有り	離散	Waterloo大、Queens大
MACSTRAN ¹¹⁾	有り	離散	科学警察研究所
Paramics ¹⁴⁾	有り	離散	Edinburgh大
SATURN ¹⁾	有り	流体	Leeds大学
SOUND ⁷⁾	有り	離散	東京大学
TRAF-NETSIM ¹²⁾	なし	離散	FHWA
TRANSYT ¹³⁾	なし	流体	TRRL

(1)のドライバーの選択行動が内生化されていないモデルでは、各車両は決められた時刻にネットワークに流入し、決められた経路を走行して終点に至るように事前に設定されている。(正確には1台1台の経路を事前設定しておくと言うよりも、分岐箇所における分岐率を予め設定しておくことが多い。)このようなモデルでは、政策を実施した場合の利用者の行動変化を見ることができないので、利用者の行動に余り変化がないことが期待できる場合、例えば経路選択の余地のない1路線のみのような単純なネットワークなどに有効なモデルである。最近では、時間的に変化する交通状況に合わせて可変情報板やVICS車載器などを通して交通情報がドライバーに提供されるのであるが、提供メディアによる入手可能な情報の質と量によって、ドライバーの選択行動にどのような違いが現れるのかを考慮できるモデルも提

案されつつある。

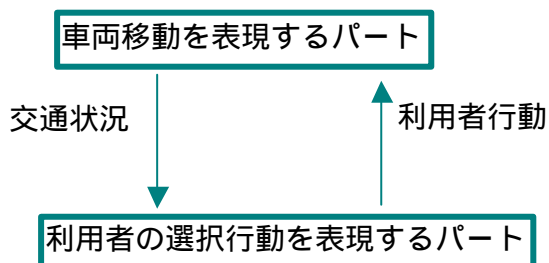
(2)の車両移動の方法には、大きく分けると流体近似モデルと離散モデルがあり、それぞれ長・短がある。(3)は、車両挙動のモデル化において、車線が考慮されて車両の横断方向の動きも考慮されているかどうかであり、評価したい政策によっては、車線単位のシミュレーションが必要な場合もある。(2)と(3)については、モデルによっては部分的なエリアに限って、車線ごとの表現を用いたり、離散・流体モデルを使い分けるといった工夫を行っているものもある。

最後(4)の分類視点はシミュレーションモデルの基本部分に関するものではなく、どのような政策評価に適用できるかであるが、信号制御などはシミュレーションを用いて評価されている重要な制御であるので、分類軸の一つとして取り上げた。

4. モデルの構造

さまざまなモデルが発表されてはいるものの、モデルの基本構造は、車両の移動を表現するパートと利用者の選択行動を表現するパートから構成され、これらをかなり短い周期で繰り返すのというものである。利用者行動パートでは、ダイナミックに変化する交通状況に応じて経路や出発時刻といった選択行動を決定し、それを車両移動パートに受け渡す、一方車両移動パートでは、決定された選択行動に従って車両をネットワーク上で移動させて交通状況を再現し、それを利用者行動パートに受け渡すといったループ構造である。

なお、当然ながら利用者行動を内生化していないモデルでは、車両移動を表現するパートのみが繰り返される。



以下、それぞれのパート別に概要をとりまとめる。なお、信号制御や交通規制に関するその他のパートが追加されているモデルも多いが、広域ネットワークシミュレーションの基本部分からはやや逸れるので、ここではこれらのパートの説明は省略する。

4.1. 車両移動を表現するパート

従来から行われてきたように、車両の表現としては交通流を流体近似して扱う方法と、車両1台あるいは数台をまとめた粒 (packet、particle) として扱う離散モデルの大きく2種類がある。

離散モデルの進行方向における典型的な車両移動方法は、道路区間ごとに定義さ

れる車頭距離 - 速度関係に見合うように、ある時刻の車頭距離から各車の速度を求めて、スキャンインターバル (dt) に走る距離だけ車両をリンク下流側から順次移動させていくものである。例えばある時刻に図2のような車頭距離を持つ車については、車頭距離Sから速度Vを求めて、 $V \cdot dt$ だけ移動させる。粒のサイズは、INTEGRATIONでは車両1台を1単位とし、CONTRAM、FHWAモデル、DYNASMART、SOUNDは、同じドライバー・車両属性を持つ車両数台を1単位として扱っているが、要求される出力の詳細度によって、粒1単位のサイズを変えることも可能である。

一方、流体モデルでは、図3のようにリンクをいくつかの区間に分割し、各区間における交通量の保存則と、交通量-密度関係に基づいて、隣接する区間を流れる交通量Qを求めて各区間の密度をスキャンインターバルごとに更新させていくものが多い。スキャンインターバルや区間の長さも要求精度によって、スキャンインターバルは1秒程度から数分の範囲でさまざまである。

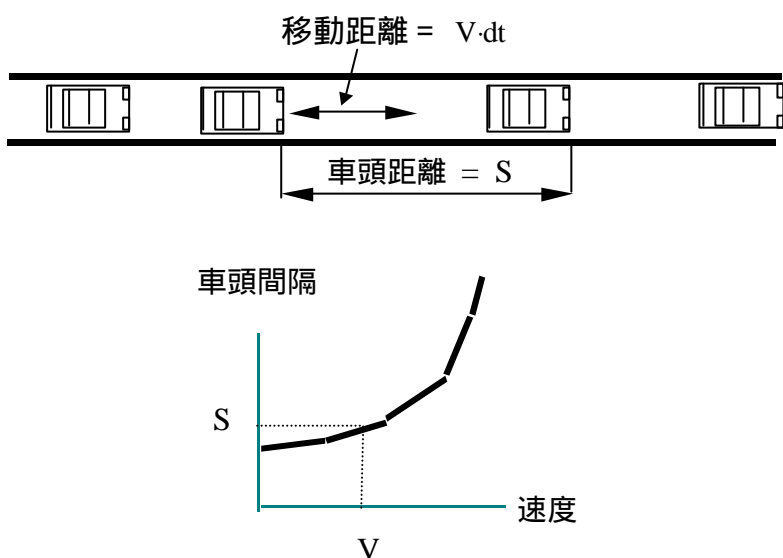


図2 離散モデルの車両移動

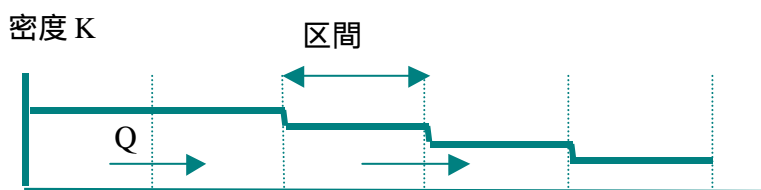


図3 流体モデルの車両移動

もちろん、必要に応じて様々な車両移動方法が考えられる。例えば、サグ、合流部、分流部、織り込み区間などにおける車両移動では、より詳細な追従モデルを用

いて車両進行させたり、車線変更や追い越しの挙動をモデル化するなどが考えられている。ただこれまでは、多くのリンク・ノードを対象とする広域ネットワークシミュレーションモデルでは、これらの複雑な車両挙動は組み込まないことが多く、次章で紹介されるような局部的により詳細にモデル化されたシミュレーションの結果として得られる、あるいは実測から推測される容量値などを外生的に与えて、車両移動は単純にしておくことが多かった。

ただし、最近では、広域のネットワークを扱うモデルであっても、FHWAモデルのように対象地域をいくつかのエリアに区分して、詳細な結果を要求されるエリアについては複雑な車線間の車の移動なども表現できるように、数種類の異なったモデリングを行っているものもある。また、Paramicsは、リンクの容量値などはいっさい外生的には与えずに、個々の車両挙動の集積結果として容量、合流比率などが得られる構造になっている。最近では、コンピューターの進歩にともなって、このようにシミュレーションモデルも多様化してきている。また、AVENUEのように離散、流体モデル両者の利点を生かしたハイブリッド型のモデルも開発されてきている。

離散モデルと流体モデルを比較すると、おおよそ次のようなことが言えよう。

- (1) 流体近似する方法は、区間の長さを適当に大きくとることによって計算負荷を大きく軽減することが可能である。
- (2) 離散モデルでは、車両ごとの属性、例えば車両の目的地、ドライバーの属性、車載器の種類等の情報を、粒ごとに管理しやすい。
- (3) 離散モデルの方が、車線変更・追い越しなどのミクロな車両挙動の表現を直接的に行える。
- (4) 離散モデルでは、車両を粒単位で整数として扱うために、実数値で設定した容量値や分合流比を正確に再現しにくい場合がある。
- (5) 現実の車両は離散的であるので、離散モデルの方が車両の動きを直接ディスプレイできる。

4.2. 利用者の選択行動を表現するパート

利用者の選択行動の中で、シミュレーションモデルに内生化されている主なものは、経路選択行動であり、その他の選択行動を組み込んでいるモデルは非常に少ない。筆者の知る限り、いくつかのモデルで経路選択と出発時刻選択行動の両方を組み込んで、日に日に変化する交通行動 (Day to Day Equilibrium) を表現することが試みられているのみである。経路選択の結果は、車両移動としては分岐部における分流比率として現れることになる。そのため、経路選択を内生化していないモデルでは、予め分流比率を設定しておく必要がある。

利用者の選択行動は、行動分析の分野で研究された結果を用いてモデル化される。経路選択行動の場合、よく用いられるのは利用者にとっての最短経路 (あるいは最小費用経路) を選択させるもの、ロジットモデルに代表されるように複数経路の旅費費用に基づいて確率選択させるものの2種類である。

利用者の選択行動を決定するためには、交通状況の変化に敏感に反応して経路を変化させるタイプの利用者かどうかといった利用者の属性と、利用者が知ることができる情報の質と量を定義する必要がある。最も単純な仮定は、誰もが同じ選択基準を持ち、誰もが同じ情報を得ることができるとするもので、1970年代の開発当初

のSATURN, CONTRAM, DYTAM-Iなどは、このような仮定に立脚していた。

ところが、近年の情報化に伴って、可変表示板、ラジオ情報、車載器情報等のような情報提供システムの違い、利用者の属性の違いなどについて分析する必要が生じたため、数種類の利用者属性と情報の質と量を用意したモデルが主流になりつつある。細部は異なるものの、BOXモデル、INTEGRATION、FHWAモデル、DYNAS MART、SOUND、AVENUE、Paramicsなどは、これらの機能を備えたモデルである。

経路選択行動のモデル化におけるもう一つの留意点は、ある瞬間の交通状況を参照して行動を決定するモデルと、実際に利用者が経験する交通状況にもとづいて選択行動するモデルとがあることである。シミュレーションモデルの多くは、前者のように瞬間瞬間の交通状況に反応して行動を決定させるタイプであり、Reactiveモデルと言われる。一方、CONTRAMのような後者のモデルにおいては、利用者が実際に経験する交通状況を知ることが将来を予め予測することであるから、Predictiveモデルと言う。将来の予測を行うためには、シミュレーション自体を何回か繰り返すか、あるいは別枠のシミュレーションをある時間すすめておいて将来の交通状況を事前に計算させながら、本体シミュレーションを進めていくという複雑な構造とならざるを得ない。

5. モデルの適用

5.1. 適用場面

ネットワークシミュレーションモデルの目的は、面的に広がるエリアに影響を及ぼすであろう政策の評価である。従って大きくは、下記のような評価にモデルが適用される。

(1) 施設整備の影響評価

環状道路建設、バイパス新設などの道路の新設や駐車場、空港、駅、大規模ショッピングセンター等の建設に関わる交通の影響評価

(2) 交通運用・管理策の評価

交通信号制御、一方通行・右左折禁止等の交通規制、路上駐車管理策、情報板やVICS等による情報提供効果などの影響評価

シミュレーションモデルと一口に言っても、これらの政策評価すべてに対応できるモデルは無いであろう。適用に当たっては従って、自分の目的にあったモデルをまず選択することが重要であり、主な選択基準は次の3つである：

- (1) 評価したい政策が、モデルで表現できるかどうか、
- (2) 要求する出力が、モデルから得られるか、
- (3) 対象とするネットワーク規模が、モデルで扱えるかどうか。

例えば、都市内道路に環状ルートを一つ加えたら交通状況がどうなるのかといった政策評価では、おそらく信号現示構成、オフセットや道路の車線ごとの状況をシミュレートする必要はないであろう。ただし、影響を受ける範囲は広く、対象ネットワークの規模は大きくなるだろう。一方、いくつかの交差点のレーン構成や信号パラメータ変更の影響を評価したい場合には、ネットワーク規模は小さいかもしれないが、信号制御や車線単位の車両挙動（少なくとも交差点近傍）等を詳しく記述しているモデルが必要になるであろう。さらに、前節でも述べたとおり、利用者の選択行動が内生化されているかどうか、モデルの大きな性質の違いであるので、政策評価に照らして、どちらのタイプのモデルを選択すべきかを考えなくてはなら

ない。

このように、評価したい政策、出力に要求される詳細度、ネットワークの規模によって適切なシミュレーションも多様である。一般には、対象モデルが広く、大規模ネットワークになるほど、シミュレーションは細かいところは簡略化していく方向にあるだろう。どんなことにも使える万能モデルはないことを前提に、適用に当たっての要件とモデルの出力が合致するかどうかよく検討することが肝心である。

5.2. 出力の解釈

モデルの出力としては、前述したような指標が出力されるが、シミュレーションはどんなに詳細なものでも、必ず実際の現象を何らか簡略化しているために、モデル出力が常に正しいとは限らない。したがって、“出力を解釈する”というステップが必要となる。要するに、モデルの性質を考慮しながら出力を理解するステップである。

モデルの性質を見るのによく行われるのは、政策をいくつかふらして（入力を変化させて）、出力の反応を見ながら、現実的な解釈を行うという方法である。しかし、もう少し論理的に解釈を行うためには、モデルの入力データ、パラメータ値に対する出力の感度をあらかじめ定量的に解析しておくことである。例えば、入力データであるOD交通需要やパラメータであるリンク容量値、信号パラメータなどに対する感度分析を行っておくべきである。

6. 広域ネットワークシミュレーションモデルの課題

広域ネットワークシミュレーションモデルの主要課題を以下に整理する。

(1) 利用者の選択行動の分析

シミュレーションモデルの結果にもっとも大きく影響するのは、利用者の選択行動である。この意味で、シミュレーション結果が説得力を持つためには、再現性の高い選択行動モデルを組み込むことが必要であり、言い換えれば利用者の選択行動という人間自体を分析することに重点を置くことが必要である。

(2) 車両挙動解析

車線変更、追従、分合流、織り込みといった車両挙動については、広く認知されたモデルがあるわけではなく、引き続き車両挙動について研究を重ねる必要がある。

(3) 交通需要データの取得

シミュレーションモデルを動かすためには、数種類の入力データを用意しなければならない。なかでもOD交通量のような交通需要データを入手することは困難な場合が多い。シミュレーションモデルの入力としては、かなり細かい時空間（ゾーンと時間帯）における交通需要が必要であり、一般に調査によって得られる需要パターンよりも細かな情報が必要となる。そのため、車両感知器で観測される断面交通量や近年設置されつつあるビーコンのアップリンク情報に基づいて、交差点における分岐率やOD交通量などの交通需要を推定する方法について研究が期待される。

(4) ネットワークデータ、交通運用データの取得

デジタル道路地図や交通規制に関するデータベースが整備されつつあるので、これらデータベースを積極的に利用してシミュレーションモデルの入力データ取得の省力化を図りたい。さらに、信号制御、交通規制などの交通運用に関するデータや

土地利用・人口データ、および鉄道網や列車運行ダイヤなどのような他の交通機関に関するデータも必要になる時期が近い。

(5) パラメーターの調整方法の確立

シミュレーションモデルには、リンク容量などの道路幾何構造に関するパラメータと利用者属性に関するパラメータが存在する。これらのパラメータは、外生的に与えるのが基本であるが、シミュレーションを実行させながらパラメータの微調整が必要となる場合がある。従来は人手によって膨大な数のパラメータ微調整を行うことが多かったが、システムティックに微調整を自動化する事を提案したい。

(6) モデル出力の解釈

シミュレーションモデルの直接の出力として、リンクの交通量、旅行時間、渋滞の長さなどの時間変化がわかる。ただし、モデルには必ず現実の世界を簡略化する仮定があるうえ、入力データ、特に交通需要データには誤差や確率変動が必ず含まれるため、これらを考慮して結果を解釈しなければならない。具体的には、入力データと出力の感度を分析しておくことが必要である。

(7) ベンチマークデータの整備

近年はシミュレーションモデルがあちらこちらで作成されているが、これまでは各種モデルのパフォーマンスは、まちまちのデータによって報告されたものであって、なかなか相互比較が難しいのが実状であった。そのため、モデルを同じ土俵で評価するため、さらに次に述べるようにモデルの検証のためにも、ベンチマークデータが必要である。今後もいろいろなモデルが開発されていくものと思われるが、同じ入力データにおける比較検討が、モデルを作成する者にとっても、利用する者にとっても必要であろう。

(8) モデル検証方法の標準化と審査基準

シミュレーションモデルは、なにも1つに限定する必要はないと考える。お互いに切磋琢磨して、操作性の高い魅力的なモデル作りが進められることを望む。ただし、シミュレーションをある目的に使用するためには、最低限満足しなければならない機能があり、それを審査する基準が必要である。すなわち、モデルの検証方法と満足すべき定量的な要件を整理しておく必要がある。

モデルの検証は、2段階で行うべきであろう。第1段階は、理論的に正しいとされている交通状況が再現できるかどうかの検証である。例えば、交通密度の管理が正しく行われて渋滞の延伸状況が理論通りに行われているかどうか、経路選択行動が正しく組み込まれていて、理論的な配分結果と一致するかどうかなどである。第2段階は、実際のデータに基づいて交通状況の再現性の検証である。基本的には第1段階の検証に問題がなければ、モデルパラメータの設定によって実現現象を再現できることが期待できる。しかしながら、実現現象とつき合わせることで、場合によってはモデル構造自体（例えば選択行動のモデル構造など）の問題点が発見されることがある。

広域ネットワークシミュレーションモデルは、政策評価にとって便利なツールであるが、以上のような解決すべき問題もたくさんあり、シミュレーションモデルが今後多くの方々に正しく使われるためには、これら課題についての研究と制度づくりが待たれる。

参考文献

1. M.D.Hall, D.Van Vliet, and L.G.Willumsen: SATURN - a simulation-assignment model for the evaluation of traffic management schemes, Traffic Engineering and Control 21, pp.168-176, April 1980.
2. D.R.Leonard, J.B.Tough, and P.C.Baguley: CONTRAM: a traffic assignment model for predicting flows and queues during peak periods, TRRL Laboratory Report 841, 1978.
3. N.B.Taylor : CONTRAM 5 : an enhanced traffic assignment model, TRRL research Report 249, 1990.
4. Michel Van Aerde and Sam Yagar: Dynamic Integrated Freeway/Traffic Signal Networks: A routing-Based Modelling Approach, Transpn. Res., Vol.22A, No.6, pp.445-453, 1988
5. Gang-Len Chang, Thanavat Junchaya, and Alberto J. Santiago: A Real-Time Network Traffic Simulation Model for ATMS Applications: Part I - Simulation Methodologies, IVHS Journal, Vol.1(3), pp.227-241, 1994
6. Peter Shen-Te Chen and Hani S. Mahmassani: A Dynamic Interactive Simulator for the Study of Commuter Behavior Under Real-Time Traffic Information Supply Strategies, TRB 72nd Annual Meeting 1993
7. 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、1995
8. Horiguchi, R., M. Kuwahara, M.Katakura, H. Akahane and H. Ozaki: A Network Simulation Model for Impact Studies of Traffic Management 'AVENUE-ver.2', Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Transport Systems, Orlando, October, 1996
9. 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
10. 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
11. 池之上慶一郎、斉藤威、花堂紘之：街路交通のシミュレーションモデル、科学警察研究所報告 交通編、16巻1号、1975
12. Rathi, A.K. and A.J. Santiago : Urban Network Simulation : TRAF-NETSIM Program, Transportation Engineering, Vol.116, No.6, pp.734-743, 1992
13. Robertson, D.I.: TRANSYT: a Traffic Network Study Tool, Road Research Laboratory Report, LR253, 1969
14. Cameron, G., Brian J.N. Wylie and David McArthur : PARAMICS - Moving Vehicles on the Connection Machine, IEEE Conference, 1994
15. 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、19巻1号、1978