

マイクロ交通流のペトリネットシミュレータの検証に関する基礎的研究

Fundamental Study on Validation of Petri Net Simulator for Micro Traffic Flows

木俣 昇 * 横山 誠 ** 西村武敏***

By Noboru KIMATA, Makoto YOKOYAMA and Taketosi NISIMURA

1. まえがき

自動車交通流のシミュレーション研究は、時の交通計画が抱えている課題と、利用可能な計算機の制約の下で進展してきた。計算機の容量制約の緩和と高速化にともなう、セグメントからネットワークシミュレーションへと発展し、バッチ処理から対面処理、視覚出力化の今、第三世代のソフトウェアの時代を迎えているといえよう。交通計画の側では、ITS 技術の進展があり、ITS 化の視点からセグメント改良策にもまた目が向けられるようになっている^{1),4)}。いま一つは、専門家・管理者による計画から PI を重視する計画へという変化が起きている²⁾。このような需要状況の下で、NETSIM, AVENUE, PARAMICS, HUTSIM, tiss-NET 等々の第三世代のソフトウェアが開発されてきている^{3)~5)}。

それらは、視覚性を中心にそれぞれの特徴を競っており、種々の評価項目の下での比較研究や、さらには目的に応じた最適選択のシステム研究が試みられている^{6),7)}。著者らも、視覚性と柔軟性に特徴を持つペトリネット型のシミュレータ^{8)~11)}を開発してきており、やはりシステム特徴を競うという意識が強く働いている。それがシミュレータ開発の原動力ではあるが、原点はやはり精度(accuracy)向上にある。“交通シミュレーション実用化ワークショップ(WS)”の取り組み¹²⁾は、この原点に戻って、検証の諸基準情報を明確にし、それに基づく検証結果の公開を求める試みであると理解される。

検証の概念と手続きの問題は、シミュレーション研究史とともに深化させられてきた。その意味では古く、古典的ですからある¹³⁾。重要なことは、上述したように、ITS がセグメントシミュレーションにも再び目を向けさせているのと同様に、交通計画を取り巻く状況変化の中で再検討されなければならないということである。WS の取り組みは、上述した計画の PI 化の流れの中で、基準情報の確立化をシステム的に行おうとする所に価値がある。即ち、間情動的適合性の枠組みでは、基準情報は、個人的—社会的軸と理論的—経験的軸とによる4種類のもの

があるとし、適合性もこれらの基準情報との関係で4種類に区分する。そして、基準情報は、個人的ないしは社会的に承認されさえすればよいものである¹⁴⁾。WS の主張である公開性は、実行と承認グループの拡大化によって、基準情報と評価結果の社会的適合性を増大化するものと言える。

本研究の目的は、この趣旨に沿って、著者らのシミュレーションシステムを対象とし、その特徴を生かした形で、説明責任のための検証(Validation)、検証のための検討(Verification)という視点からの精度評価の検証を試み、著者らの基準情報と適合性評価結果について、承認と批判とを受けることにある。具体的には、シミュレーションの主要な利用は、現システムの抱える問題点の発見と、提案された計画代替案の評価にある。交通量の想定は、この両者に共通する作業であるが、時間交通量やその車両構成、時間変動等は比較的明確で説明も可能だが、その確率過程的な特性の想定は複雑であり、説明性には問題がある。そこで、まず、著者らのシミュレータでの交通流の確率化の基本構造とその帰結の明示化を試みる。次に、それらを踏まえた上で、理念形に近い(nearly ideal)な交差点での計測交通量の再現性評価シミュレーションを実施し、再現性を明らかにする。

2. ペトリネット型シミュレータの基本交通流特性の検証

2-1 シミュレータの駆動アルゴリズムの概要

図-1 は、基本交通流の部分ペトリネットによる構成図の一つである。車両は、図の“発生ネット”のプレース P0 でランダムに生成され、道路に相当する“走行ネット”のトランジションを次々と発火させる形で進行し、“信号ネット”からの抑止によって制御されるという最も単純な交通流の記述ネットである。本シミュレータではこのネットがそのまま視覚的な出力図となり、しかも、その駆動も以下のような比較的単純・明解なルールによる^{8),11)}。

一つは、前出のトランジションの発火のルール^{15),16)}で、当該トランジションの入力プレースの全てにトークンがマーキングされていて、かつその抑止プレースの全てにトークンが存在しないときに発火し、全ての入力プレースからトークンを一個ずつ消去し、全ての出力プレースにトークンを一個ずつ配置するというものである。このルールによる車両進行での追突安全性の保証は、走行ネ

キーワード：発生交通、交通流、システム分析

* 正員 工博 金沢大学教授 土木建設工学科

(〒920-0942 金沢市小立野 2-40-20 Tel. 076-234-4914)

** 学生員 金沢大学自然科学研究科環境基盤工学専攻

*** 学生員 金沢大学工学部土木建設工学科

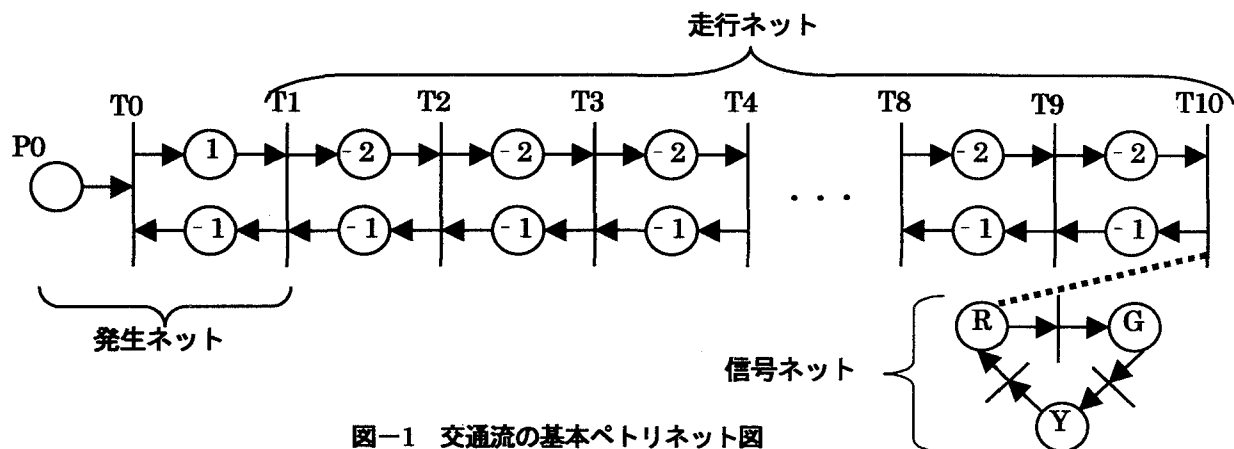


図-1 交通流の基本ペトリネット図

表-1 車速更新表

閉塞区間長		6.7 (m)		更新タイプ			
当該閉塞区間		進行先閉塞区間		1	2	3	4
滞在時間(秒)	対応速度 (km/h)	滞在時間(秒)	対応速度 (km/h)	車速更新率 (%)			
$t \leq 0.80$	$30 \leq v$	0.6	40	100	30	40	40
$0.80 \leq t \leq 1.20$	$20 \leq v \leq 30$	0.8	30	100	60	70	60
$1.20 \leq t \leq 2.40$	$10 \leq v \leq 20$	1.2	20	100	100	100	80
$2.40 < t$	$v < 10$	2.4	10	100	100	100	100
発進遅れ				1.2 (秒)			

ットに内包されている。即ち、道路を閉塞区間に分割し、図-1 に示すように、まず、各塞閉区間を 2 つの補完的 (complement) 関係にあるプレース; 車両の存在(タイプ-2)と空間の空き(タイプ-1)で表現し、次に、前方塞閉区間の空きプレースが車両進行のトランジションの入力となる形で結合することで、車両追突を回避するネットとなっている¹⁷⁾。

もう一つのルールは、このトランジションの発火ルールで走行ネットを進行する車両の車速の更新ルールである。これについては、表-1 に示すように、発火時の当該閉塞区間での車速を参照し、進行先の閉塞区間での車速を上げるか、あるいは現状維持かを、想定確率で決定するという方式を採用している。表-1 には、この想定確率を 4 タイプ表示している。

具体的には、車速から逆算される閉塞区間内の滞在時間がトークンのタイマとして更新されていく。上述のルール中で発火の条件を規定する”トークンのマーキング”は、このように更新付与されたタイマが消化された状態をいう。

表-1 には、発進遅れ時間も記述する方式を取っている。表-1 の想定では、閉塞区間内の滞在時間が 2.4 秒以上、車速では 10Km/h 以下の時は停車と判定し、表に記載された発進遅れ時間を加えた時刻を発火時間としている。この部分は今回の論文では確率化していない。ペトリネット型シミュレータでの交通流の確率過程化の主要部は、この発生ネットと車速更新ルールにある。以下ではこの 2 つに着目して生成交通流の特性の明示化を行う。

2-2 生成交通流での車頭時間間隔の検証

”発生ネット”の挙動も、2-1 で述べた 2 つのルールに従う。このルールによる時間進行は、トランジションの発火(事象の生起)毎に進行する可変時間増分法による。このことは、微小時間 Δt 毎に進行する一定時間増分法のシミュレータではサンプリングの形となるのに対して、着目する事象の生起を全数、確実に補足できることを意味している。即ち、ここで問題としている生成交通流の車頭時間間隔は、図-1 の T0 の発火時間間隔によって確実に計測することができる。

まず、上述の駆動アルゴリズムの概要から分かるように、プレース P0 の役割はトークンの数の生成ではなく、その生成時刻の発生にある。発生ないしは到着が平均値 m (台/分)のポアソン分布のとき、車頭時間間隔はその逆数を平均値とする指数分布となる。P0 では、トークンのマーキング時刻をこの関係を利用して、想定交通量を分交通量に換算し、その逆数をパラメータとする指数乱数で生成している。

さて、図-1 でのトークンの初期配置を、全てのタイプ-1 のプレース、即ち道路上に車両が全く存在しない状態とすれば、P0 でのトークン生成によって、図-2 の(1)の状態となる。トランジション T0 は、この状態で発火ルールの条件を満たしており、従って、発火する。そして、図-2 の(2)の状態に推移する。この時、車速の更新ルールでのタイマの決定が必要となるが、P0 のトークンには生成時刻はあるが参照すべき滞在時間はない。図-1 ではこの特殊性を明示するために、車両の存在を示すプレースではあるがタイプを-2 ではなく 1 と表示し、かつこれ

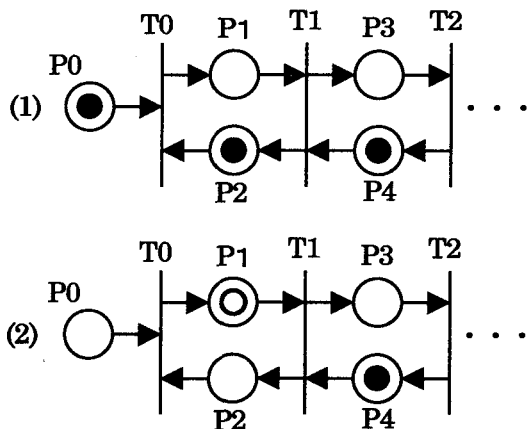


図-2 交通流の基本ペトリネット図

には固定タイマ 1.6 秒を設定している。

図-2 の(2)の状態で P0 にトークンがマーキングされたとしても、このトークンは T0 を直ちには発火させることは出来ない。即ち、図-2 の(2)の P1 のトークンに設定した固定タイマが消化され、T1 が発火して、P2 のプレースにトークンが戻って初めて発火可能となる。即ち、T0 の発火時間間隔で計測される本シミュレータ生成の交通流の車頭時間間隔には下限値 1.6 秒が存在するという発生ネットとなっている。そして、その下限値はプレースタイプ 1 に設定する固定タイマによって定まることが分かる。

1.6 秒は現システムでのデフォルト値であるが、この下限値の存在は、本システムで生成される 1 レーン当たりの最大時間交通量¹⁰⁾は、 $3600/1.6=2250$ 台となるということでもある。換言すれば、本発生ネットは物理的な 1 レーン当たりの最大容量の制約性を自動的に満たすものであるといえよう。

以上の議論より、本シミュレータによる生成交通流の車頭時間間隔は、P0 でのトークン計測ではなくて、先に示したように T0 の発火時間間隔の計測による検証が必要であることが分かる。この計測は、本シミュレータの“解析項目の設定”のメニュー¹¹⁾によって容易に実行できる。また、視覚的なシミュレータの特性を生かす形で、“ステップ実行”のメニューによって、T0 の発火の視認とそのときのシステム時間を手集計するという方式でも可能である。

車速更新表は表-1 のタイプ 2 を使用し、信号を青現示に固定し、1 レーン当たりの時間交通量を 800 台として 1800 秒のシミュレーションを実施した。図-3 に T0 の計測による車頭時間間隔の度数分布図を示す。白棒は下限値なしの指数分布による理論値で、1 秒以下は 1~2 に集約してある。黒棒はシミュレーションによる計測度数である。上で論じたように、1.6 秒以下は発生せず、1~2 の実態は 1.6~2 の度数である。この理論値による χ^2 値は 17.86 で、自由度 13 で 0.05 の χ^2 値 22.40 以下であり、指数分布となっている。もちろん、この結果は P0 でのトークンの生成に使用する乱数初期値にも規定され

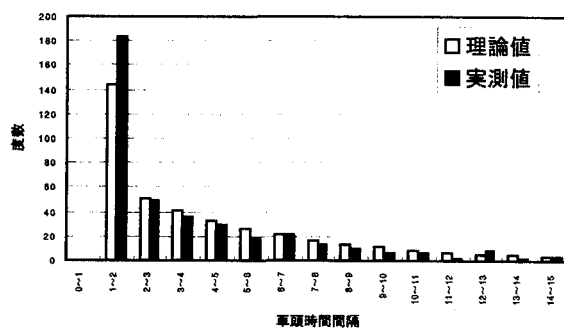


図-3 車頭時間間隔分布図

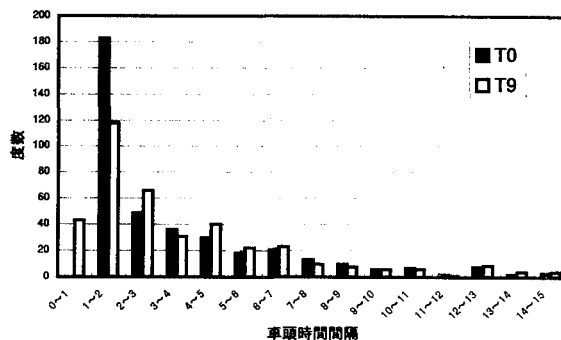


図-4 自由走行時車頭時間間隔との比較

ることはいうまでもない。

T0 の発火時間間隔は、もう一つの確率化要素である車速更新表による影響は受けない。しかし、自由走行時の車頭時間間隔には影響する。この特性を明らかにするために、上のシミュレーションでは図-1 の T9 の発火時間間隔も同時に計測した。図-4 に両者の比較図を示す。白棒は自由走行時の車頭時間間隔で、1.6 秒より短い 0~1 秒のケースも発生することを示している。

これは、車速の更新を確率化したことで低速車と高速車との混合流となり、車頭時間間隔が短くなることを示している。定性的ではあるが、このことはわれわれの経験的基準情報に適合する結果であるといえよう。この場合でも、空間的な最小車間間隔は、想定する閉塞区間長によって規定され、2-1 で述べた走行ネットの構造と発火ルールによって自動的に保持され、追突安全性は保証されていることを指摘しておきたい。

2-3 実測交通流の再現性検証のための部分検証。

(1) 車速更新表の検定

上では、本シミュレータでの生成交通流の確率化に、車速更新表が大いに関与するものであることを示した。即ち、この車速更新表の想定は、実測交通流の再現性検証にとって重要な作業となる。そこでまずこれに関する部分検証を行う。

先の論文¹⁰⁾で、著者らは交差点から発進・加速する車両の速度計測結果を報告した。計測台数が 10 台と少な

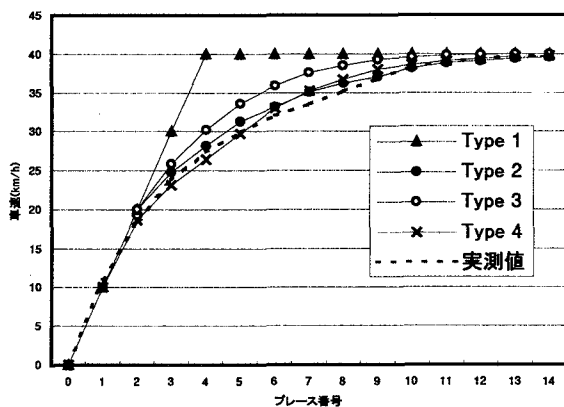


図-5 車速更新表のシミュレーション結果

く十分な基準情報とはいえないが、この平均速度の変化との比較による検証を試みた。使用ネットは図-1 にさらに走行ネットを加え、14 ブレースでの計測を可能なものとした。車速更新表は表-1 に示した 4 タイプを使用し、発生時間交通量を 800 台として、各ケースについて、2000 秒のシミュレーションを乱数初期値を 3 回替えて繰り返し実行した。そして、スタートからの 14 ブレースでの滞在時間を、やはり解析項目のメニューを用いて計測した。それらを速度換算してタイプ別にプロットしたものが図-5 である。

各回のシミュレーションで得られるデータ数は、ブレース毎に 420～450 台分である。図-5 のグラフの各点の値は、その 3 倍の 1260～1350 台分程度の平均値である。タイプ 1 は実質的には確率化していないもので、実測値から最も乖離している。タイプ 3 は、20km/h から 30km/h の加速更新率 70%と最も高いもので、やはり乖離している。タイプ 2 と 4 は共にほぼ実測値近い結果となっている。この結果からも車速更新の確率化は少なくとも必要であるといえよう。また、比較的単純なルールであるが、実測値を再現する力を十分に持つことも確認ができたと思われる。

(2) 想定時間交通量の生成補正

本シミュレータの発生ネットの特性として、生成車頭時間間隔に下限値が存在することを上では論じた。それは、1 レーン当たりの物理的な容量制約を自動的に満たすという有利な働きをするが、その一方で、P0 のパラメータ設定に一つの問題点を課す。即ち、道路に負荷したい交通量から直ちに発生パラメータを定めると過少生成

となるという問題である。簡潔に言えば、P0 では 0～∞ の指数分布を使用しているが、発生段階では最小値 1.6 秒という制約が働き、それ以下のものは 1.6 秒にシフトし、結果として平均車頭時間間隔は大きくなるため、生成される時間交通量は設計ないしは想定値より小さくなるという問題である。

この影響は、当然 1.6 秒以下の比率が増える大きな設計ないしは想定交通量のときに大きく出る。また、出来るだけ計測値に近い値の負荷の下での議論が必要な実交通流の再現性の検証に際しても問題となる。そこで、この補正法を提案し、その効果をシミュレーション結果を用いて示す。

いま、設計時間交通量を m (台/時)、その分交通量換算値を n (台/分)とする。そして、この時の車頭時間間隔を、平均値 $\mu = 60/n$ (秒)の指数分布で生成するとする。1.6 秒未満となる車頭時間間隔の平均値は、

$$E(t) = \int_0^{1.5} t \frac{1}{\mu} e^{-t/\mu} dt$$

となり、それらの発生確率は、

$$\Pr(t \leq 1.5) = \int_0^{1.5} \frac{1}{\mu} e^{-t/\mu} dt$$

となる。これらから減少分を推定し、さらに重み付けを考慮して、 μ の補正值 μ' の算定式を誘導し、補正パラメータ n' (台/分)を、 $60/\mu'$ で設定する方式を検討した。そして、下限値を持つ指数分布という特性を保持した

$$\mu' = \mu - \frac{(\mu - 1.6)d \times \Pr}{\mu}$$

$$d = \frac{1.6 - E(t)}{1.6}$$

という簡便方式を提案する。表-2 に、設計時間交通量を 500～2000 台としたときのこの方式による補正とその結果の生成比率とを示す。

具体的には、P0 のパラメータを表-2 の n' (台/分)で設定し、図-1 の T1 の発火回数を 1 時間計測するというシミュレーションを、乱数初期値を変更して 15 回繰り返し求めたものである。時間交通量が 2000 を除くと平均値で 1%程度増で生成出来ている。標準偏差もそれほど

表-2 発生交通量パラメータの補正

設計交通量(台/時)		500	800	1000	1200	1500	2000
設計交通量(台/分)		8.33	13.33	16.67	20.00	25.0	33.33
補正パラメータ(台/分)		8.49	13.82	17.45	21.07	26.37	34.26
生成交通量(台/時)	平均	504.1	805.2	1014.1	1216.5	1517.3	1965.9
	標準偏差	13.46	14.05	14.31	14.17	12.97	14.24
生成比率		1.0083	1.0075	1.014	1.014	1.012	0.983

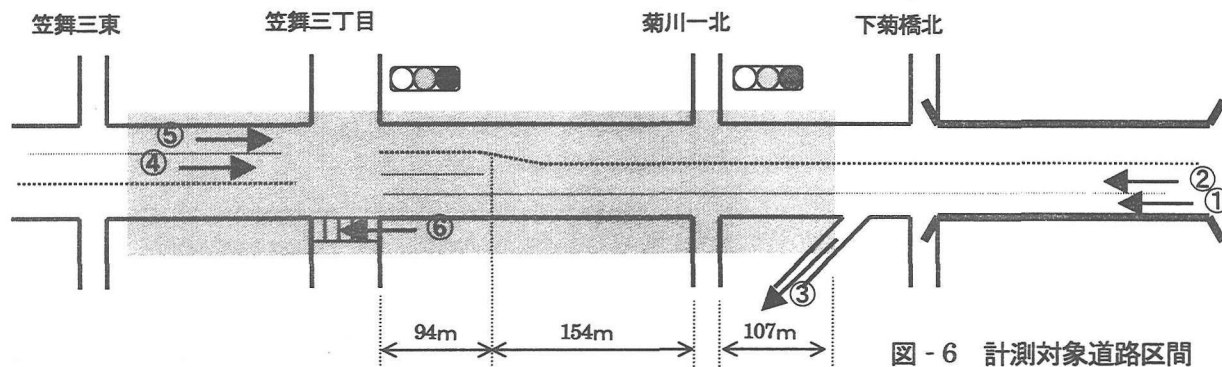


図-6 計測対象道路区間

表-3 計測発生交通量データ

	①	②	③	④	⑤	⑥
平均	80.75	83.25	19.00	16.04	11.81	3.48
標準偏差	6.58	9.04	3.96	4.83	4.06	3.12
MAX	89	96	26	24	21	12
MIN	71	69	11	5	6	0

①～③: 台/5分 ④～⑥: サイクル毎

表-4 計測通過台数(信号サイクル毎)

実測値	左折	直進	右折
平均	26.26	34.63	5.56
標準偏差	4.43	2.58	2.17
MAX	35	39	9
MIN	18	29	2

表-5 計測信号サイクル

信号	青	右青	赤
笠舞3丁目	74	12	54
歩行者信号	15	4	121
菊川1丁目	116	-	24

大きくはなく、実用上問題はない結果が得られているといえよう。少し煩雑になるが次節の再現性の検証では、この補正方式を使用する。

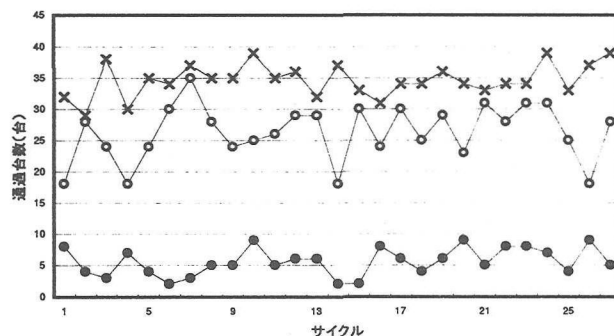
3. 実交差点流の再現性の検証

3-1 計測交差点の概要と調査結果

本シミュレータの実交差点流の再現性の検証のために、図-6 に示す金沢市内の交差点における交通流の調査を実施した。この交差点は、本シミュレータの検証に適した(*nearly ideal*)条件⁹⁾をいくつも備えている。まず、図に示すように、直進・左折・右折の専用レーンがあり、車線変更に伴う車両間の相互作用を考慮しなくてもよい。歩行者も少なく、左折車に特殊な流れが発生していない。ただし、歩道が広く植栽があることは考慮する必要がある。調査時間帯(7:30～8:30)では大型車はバスのみで、その本数も少なく、影響は大きくはない。図の③で流出流があるが、CED も付近にはなく、特殊な入出流は考慮する必要がない等である。

調査日は1999年12月10日(金)で、天候は晴れ、調査員9名、ビデオカメラ2台(信号現示時間撮影)で実施した。まず、図-6の①と②からの交通流を主交通流とし、④と⑤からの交通流を対向車流とし、図-6の①と②、および流出の③では5分毎の通過台数を、④と⑤と⑥では、信号サイクル毎の通過台数と通過人数を計測した。表-3にその結果を示す。時間交通量に換算すれば、主交通流は960～1100台/レーンで、対向車流は300台/レーンと大きな差がある。この時間帯では都心部に向かう通勤交通流が卓越している道路であることを示している。また、サイクル当たりの横断歩行者は0人～12人と大きく変動しているが、平均では3.5人と少ない。

次に、笠舞三丁目交差点での左折・直進・右折車の通



○ 左折車 × 直進車 ● 右折車

図-7 計測通過台数(サイクル毎)

表-6 減速車速更新表

閉塞区間長		6.7(m)		車速更新率(%)
当該閉塞区間		進行先閉塞区間		
滞在時間(秒)	対応速度(km/h)	滞在時間(秒)	対応速度(km/h)	
$0.60 \leq t$	$v \leq 40$	0.8	30	100
$0.80 \leq t$	$v \leq 30$	1.2	20	100
$1.20 \leq t$	$v \leq 20$	2.4	10	100
$2.40 < t$	$v < 10$	2.4	10	100

表-7 シミュレーションパラメータ

発生地点	①	②	④	⑤	⑥
計測値	12.35	16.65	6.87	5.06	1.49
パラメータ	12.76	17.43	6.97	5.10	1.49

過台数をサイクル毎に計測した。この結果を表-4 と図-7 に示す。また、信号現示時間を表-5 に示す。青時間(黄を含む)は 74 秒であり、変動を考慮すれば、直進車の青 1 時間当たり処理台数は 1680~1900 台と飽和交通量¹⁹⁾ 以下となっている。また、左折車も、1260~1700 台となりこちらも飽和交通量以下となっている。右折車は最大で 9 台、平均では 5.56 台と少ない。

今回の調査では、渋滞長と旅行時間については、調査人数の制約で十分なデータが得られなかった。渋滞長に関しては、図-5 の菊川一丁目を超える場合が数度発生していることは確認している。

3-2 再現性シミュレーション結果と考察

まず、シミュレーション対象領域を図-5 の網かけ部分とし、道路を 6.7m の閉塞区間に分割し、基本部分ペトリネットモデルを用いてシミュレーションネットの構築を行った。まず、車両信号は 2 箇所とし、笠舞には右折青の現示プレースを設ける。車両発生部は、図-1 の①と②、および④と⑤の 4 箇所とし、それぞれに配置する。次に、右折車については、中央レーンを走行し、笠舞交差点手前 94m の地点で右折専用レーンに分岐するとし、生成トランジションによる右折車カラーの生成と、選択トランジションによる右折専用レーン分岐ネットによる組み込みを行う。交差点での右折行動は、④と⑤からの対向直進車の影響を受けるとし、交差点内の 2 台と交差点手前の 3 台による抑止¹⁸⁾を組み込む。

左折車については、左折専用レーンである路肩レーンを走行し、⑥で発生する横断歩行者からの抑止を受けるとする。また、交差点が広く、歩道端に植栽があるために減速して左折ということも考える必要がある。本シミュレータでは、プレースのタイプを減速部分だけは-2 から-3 に変更し、表-6 に示すような更新表を登録しておくだけで、ネットを変更することなくこの考慮が可能となる。本研究では、横断歩行者モデル⁹⁾は簡略ネットを使用し、歩行者が発生すれば 4, 7, あるいは 10 秒間の抑止を受けるとし、その比率を 20:60:20 と想定した。

次に、シミュレーションパラメータとしては、信号は表-5 に示す調査結果を使用する。そして、発生交通量については表-7 に示す補正值を使用する。これらは、表-3 に示した計測値を分交通量に換算し、それに 2-3 の(2)で提案した補正法を適用したものである。なお路肩レーンの①については、③からの流出分を減じて求めている。また、上で述べた右折車カラーの生成トランジションに設定する右折車率は、表-4 の直進車と右折車の通過台数から求めている。

シミュレーションケースとしては、まず、2-3 の(1)で論じたように、表-1 の車速更新表のタイプの 2 と 4 のケースを取り上げる。次に、左折車ネットの説明の所で触れた減速の考慮の有無を取り上げる。即ち、この組み合わせで、S1:タイプ 2 で左折減速プレース有り、S2:

表-8 シミュレーション結果 (サイクル毎)

		左折	直進	右折
実測交通量		26.26	34.63	5.56
S1	平均値	27.462	33.769	5.128
	誤差	4.6	-2.5	-7.8
S2	平均値	28.628	33.808	5.218
	誤差	9.0	-2.4	-6.2
S3	平均値	27.205	33.859	5.244
	誤差	3.6	-2.2	-5.7
S4	平均値	28.564	33.897	5.064
	誤差	8.8	-2.1	-8.9

表-9 サイクル毎変動の比較

		左折	直進	右折
実測値	平均	26.26	34.63	5.56
	MAX	35	39	9
	MIN	18	29	2
	分散	19.625	6.656	4.709
S3	平均	26.88	34.58	5.27
	MAX	31	40	8
	MIN	21	26	2
	分散	6.564	10.936	2.735
	誤差	2.38	-0.15	-5.23

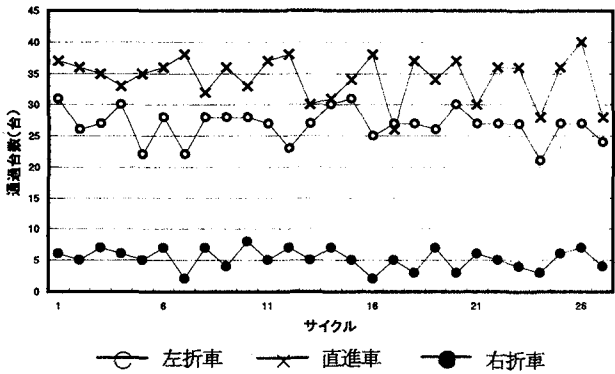


図-8 シミュレーション結果 (S3,サイクル毎)

タイプ 2 で左折減速プレース無し、S3:タイプ 4 で左折減速プレース有り、S4:タイプ 4 で左折減速プレース無し、の 4 ケースのシミュレーションを実施し、左折・直進・右折車のサイクル毎通過台数の再現性について検討する。

S1~S4 のシミュレーションを上述のパラメータ値を用いて、乱数初期値を 3 種類用意してそれぞれ 3 回づつ実行した。そして、左折・直進・右折の各トランジションの発火回数を信号サイクル毎に計測した。その結果を表-8 に示す。ここでは、シミュレーション開始から 6 サイクル目までは初期条件の影響があるとして、それ以後の 26 サイクル分の計測値を用いた結果を示している。

まず、左折車については、誤差は全て正值となり、S3

<S1< S4 <S3 という順位となり、左折車減速が有効に働いているという結果となった。次に、直進車については、誤差は全て負となるが、各ケースではほぼ同じ程度の数値となり、全て 2.5%以下となった。平均値的にはかなりの再現性が得られているといえよう。右折車についても、誤差は全て負となり、5.7~8.9 と少し大きくなった。ここでも S3 が最小誤差となっている。表-8 からは、S3、即ち、車速更新はタイプ 4 で、左折時減速有りとするケースが総合的に最も良好な再現性を示すといえよう。

そこで、S3 でのサイクル毎の変動を細部検証するために、このシミュレーションの 1 ケースの出力結果を図-8 と表-9 に表示した。図-8 と実交差点での計測結果の図-7 との比較からも、表-9 からも、良好な再現性が示されている。特に直進車と右折車については、MAX と MIN においても近い値が得られている。しかし、左折車については、MAX は近い値だが、MIN は差がある。特に分散に着目すると、実交差点での計測値の方がシミュレーションによる計測値より 3 倍という大きく開いている。この変動性は、減速によるというよりか歩行者によると考えるのが妥当だろう。本論文では歩行者が少ないという理由で安易に簡略ネットモデルを使用したか、歩行者の到着特性と横断特性を考慮した精緻化ネットが必要であるといえよう。

4. あとがき

本論文では、WS の提言を受ける形で、著者らが開発してきたペトリネット型のミクロ交通流のシミュレータの検証を実施した。まず、ミクロ交通流のシミュレータでは、交通流の発生部での想定と、その結果として生成される交通流の特性を明確にする必要があるとして、生成交通流での車頭時間間隔の分布特性の明示化を試みた。そして、発生時においては、1.6 秒を下限值とする指数分布となること、この下限値が最大発生交通量をレーン容量制約内に規制することを示した。一方、自由走行時には車速更新表の確率化によって低速車と高速車の混在となり、最小車頭時間間隔は 1.6 秒より小さくなることを示し、経験的な交通流特性を備えているとした。さらに、この結果を受けて、車速更新表の検証を実測調査との比較という形で実施し、確率化の有効性と実測値を再現する車速更新表タイプを明確にしている。また、下限值 1.6 秒の存在に伴うパラメータ設定の問題を指摘し、厳密な交通量の負荷の必要な時の有効な補正法を示した。

次に、実交差点での計測交通流の再現性の検証として、金沢市内の笠舞交差点近傍を取り上げ、独自の調査データによる検証シミュレーションを実施した。この交差点では、左折・直進・右折の各専用レーンがあり、歩行者数も少なく、近くに CED もなく、基本的な検証に適しているとし、2 つの信号を含む区間のシミュレーションネットを、既開発の部分ネットを活用して構築し、先に検

討した車速更新表タイプや補正法を考慮して、4 ケースのシミュレーションを実施した。そして、車速更新表タイプ 4 と左折時減速スペース有りのケースが、左折・直進・右折車のサイクル毎通過台数を総合して最も良好な再現性を持つことを示した。特に、直進・右折車に関しては、変動性を含めて高い再現性あることを示した。しかし、左折車に関しては平均値的には良好ではあるが、変動性の再現には問題があり、単純に簡易ネットモデルを使用した歩行者ネットの再検討が必要となることが明らかとなった。これが当面の課題であるだろう。

もちろん検証対象の拡大化も課題であるが、調査の制約は個人レベルでは解消が困難である。他の人々の論文でも苦勞が推察される。WS のに期待するところが大きい。また、ソフトウェアの公開も課題の一つであると考えている。

検証論的には、2-3 で行った作業をパラメータチューニングとするか、トランスファ可能な独立した部分検証と位置づけるかという課題もある。前者だとすれば楽だが、単純にそうする訳にはいかないだろう。シミュレーションの使用事例からすればチューニングチャンスの無い場合の方が圧倒的に多いからである。その意味では、そのような作業が出来るだけ少ないシンプルさもシミュレータの条件になるといえよう。もう一点は、2-2 で述べた本シミュレータが可変時間増分法であるという特徴から生まれる関心事象の確実な捕捉性と、ネットという視覚的な出力系によるそれらの視認性は、個人的・経験的基準情報による検証を容易にすることを指摘しておきたい。計画の P I 化の時代にあつては、このベースでの検証が計画推進のキーとなる。ソフトをも含むインターネットによる公開性は、その大規模な促進策として最も有効なものであり、今後の大きな課題であると考えている。

5. 参考文献

- 1) 高田邦道監修；ITS-道路・交通・情報システムとそのアクションプログラム，地域科学研究会，1996。
- 2) 道路審議会；中間とりまとめ，1997。
- 3) 交通技術委員会；第 7 回交通技術セミナーテキスト，交通工学研究会，1998。
- 4) R.Horiguchi, M.Kuwahara, I.Nishikawa; The Model Validation of Traffic Simulation System for Urban Road Networks: 'AVENUE', Proc. 2nd World Congress on Intelligent Transport Systems, Vol.IV, 1977-1982, 1995。
- 5) 坂本邦弘，久保田尚，門司隆明；地区交通計画評価のための交通シミュレーションシステム tiss-NET の開発，土木計画学研究・論文集，16，845-852, 1999。
- 6) P.D.Prevedouros; Signalized Intersection Capacity Analysis Software, Traffic Congestion and Traffic Safety in the 21st Century, 69-75, ASCE, 1997。

- 7) J. Daniel, S. Hallmark; An Expert System for Selecting Computer Programs, Traffic Congestion and Traffic Safety in the 21st Century, 83-87, ASCE, 1997.
- 8) 木俣昇, 高木秀彰, 黒川浩嗣: ペトリネットによる交通流シミュレーションの開発, 土木計画学研究・論文集, 12, 691-699, 1995
- 9) 木俣昇, 鷺坂崇; 横断歩行者を考慮した交差点流のペトリネットシミュレーションの開発, 土木計画学研究・講演集, 19(2) 225-228, 1996.
- 10) 木俣昇, 千田諭, 白水靖郎, 他; ペトリネットを用いた交通流シミュレーションの検証, 土木計画学研究・講演集, 22(2) 865-868, 1999
- 11) 木俣昇, 岸野啓一, 白水靖郎: 交通流ペトリネットシミュレータの実用化システムの開発, 土木情報システム論文集, 9, 31-40, 2000.
- 12) 赤羽弘和, 桑原雅夫, 久保田尚, 内田敬, 他: 交通シミュレーションモデルの標準化に向けての課題, 土木計画学研究・講演集, 22(1) 695-701, 1999.
- 13) B.D. Ripley; Stochastic Simulation, John Wiley & Sons, 1987.
- 14) 吉田民人, 加藤秀俊, 竹内郁朗: 社会的コミュニケーション, 培風館, 1967.
- 15) W. Reisig; A Primer in Petri Net Design, Springer-Verlag, 1992.
- 16) K. Jensen; Coloured Petri Nets, Springer, 1997.
- 17) 木俣昇, 千田諭, 浦本武; ペトリネットによる車両衝突事故シミュレーションに関する基礎的研究, 土木計画学研究・講演集, 21(1) 363-366, 1998.
- 18) M.G. Lay ed.; Handbook of Road Technology, Vol. 2, Gordon & Breach Science Publishers, 1998.
- 19) 土木学会; 土木工学ハンドブック II, 技報堂, 1996.

ミクロ交通流のペトリネットシミュレータの検証に関する基礎的研究

木俣 昇, 横山 誠, 西村 武敏

交通流シミュレータは視覚的出力に特徴を持つ第三世代に入っている。しかし、基本は精度にあるとして、本論文では著者らの開発シミュレータの検証を行っている。まず、最も基本となる生成交通流の特性を車頭時間間隔分布から明らかにし、発生段階では 1.6 秒を下限とする指数分布となり、レーンの物理的制約内で交通量を生成すること、自由走行時には車速更新の確率化が働き、低速-高速車の混合流となり、最小車頭時間間隔は 1.6 秒以下にもなるという妥当な結果を得ている。また、下限値の存在による発生パラメータの補正法も示している。最後に、実交差点流の再現性シミュレーションを実施し、適切な車速更新表と左折時減速プレースの適用で良好な再現性が得られるが、左折車の変動性の再現には歩行者ネットの精緻化が課題であることを示している。

Fundamental Study on Validation of Petri Net Simulator for Micro Traffic Flows

Noboru KIMATA, Makoto YOKOYAMA and Taketoshi NISIMURA

We have developed Petri Net type simulator for micro traffic flow analysis. In this paper, we do validation study of this simulator from two points of view. First, we analyze the distribution of between-times of car's head and head generated by the simulator and show it becomes exponential distribution with a lower bound of 1.6 second, and the maximum generation of traffic volume then satisfies physical limitation of lane-traffic capacity. We also demonstrate some of between-times become less than 1.6 in free flow by its probabilistic renew rule of place-timers. Second, we do a series of simulation to evaluate its reproducibility of real traffic flows and demonstrate that the simulator shows a good performance for straight and right-turn vehicles. But for left-turn ones, we point out need to refine its pedestrian crossing sub-net.
