

## 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 \* 千田 諭 \*\* 横山 誠\*\*\*

By Noboru KIMATA, Satoshi SENDA and Makoto YOKOYAMA

#### 1. まえがき

近年、ミクロな交通流シミュレーションによる検討がカギとなる計画課題が増大化してきている。それに応えるべく多くのシステムが開発・提案されている。それらのシステムは、単に数値的な結果を出力するだけではなく、PIへの強い要求を背景に、目的に応じた結果の説明性につながる視覚性や透明性や構成性といった機能装備をも追求しており、その意味では、新世代の時代を迎えているといえよう。

シミュレーションシステムの検証は、どの世代にあっても基本的な概念であり、作業である。しかし、これも説明性という文脈の中で明確に位置づけられることが望ましいと考える。“交通シミュレーション実用化促進ワークショップ(WS)”<sup>1)</sup>の取り組みは、そのような試みの一つであると受け取っている。

WSの試みは、検証に関する基準を明確にし、その基準による検証結果を公開するものである。間情報の適合性の枠組みでは、基準情報には、(I)個人的・社会的軸と、(II)理論的・経験的軸とによる4種類のものがあり、それらとの関係で情報の適合性にも4種類あるとする。そして、基準情報は個人的ないしは社会的に承認されればよいとする。説明性は、これら基準情報との適合性の度合いで評価できると考えれば、WSの試みは、社会的・理論的及び社会的・経験的基準情報の体系の提案であり、公開は、それらは実践を通じて初めてより堅牢な基準情報となるという表明であると解釈できるだろう。

本研究は、このような理解の下で、著者らが開発を試みているペトリネット型の交通流のミクロシミュレータ<sup>2),3)</sup>を対象に、一つはWSの提案の中で最

も基本的な事項である「車両の発生」に関する検証、いま一つは著者ら自身による実測交差点交通データを用いた再現性の検証の実践を通して、この取り組みに何らかの寄与を試みるものである。

#### 2. 車両発生の基本部分ネット特性の検証

##### (1) 生成車頭時間間隔の検討

車両発生は、全ての交通流シミュレーションの最も基本的な部分の一つである。ペトリネットシミュレータでは、 $p_0$ を発生ブレースとする図-1のような基本部分ネットによって車両の発生を行っている。この特性の明確化は、シミュレーション結果の解釈に際しての最基本情報の提示という意味を持つ。

一般に、車両の発生は、経験分布、タイムスケジュール、ランダム分布、及びこれらの組み合わせのいずれかを想定している。ペトリネットシミュレータでは、ランダム発生を基本仮説として採用している。この場合、車頭時間間隔は指数分布となる。具体的には、 $p_0$ で平均車頭時間 $\mu$ の指数乱数を生成する設定となっている。

図-1に示すように、車両発生の部分ネットは車両進行の基本部分ネットに接続され、車両走行システムネットを構成する。従って、図-1のトランジション $t_0$ が発火し、トークンが $p_1$ に出現したときにシステムに車両が発生したことになる。生成される車頭時間間隔の検証は、このトランジション $t_0$ の発火時間の計測によって行うことが出来る。

図-2にこの $t_0$ の発火時間間隔の計測による生成車頭時間間隔の度数分布を示す。これは時間交通量( $m$ :台/時)が1000台の時の結果である。なお、ペトリネットシミュレータでは分交通量( $n$ :台/分)に直してパラメータ値を指定する。

この時の $\mu$ は、 $\mu = 3600/m = 3.6$ (秒/台)となる。図-2には、この値による理論頻度も表示してある。 $\chi^2$ 値は31.15と基準値29.86より少し大きく

キーワード: 発生交通, 交通流, 交通容量, 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)

\*\* 正員 工修 トーニチコンサルタント

\*\*\* 学生員 金沢大学自然科学研究科環境基盤工学専攻

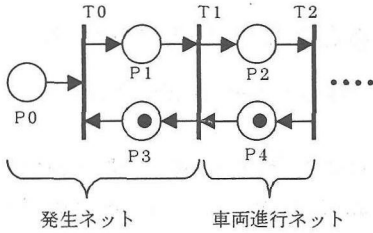


図-1 車両発生の基本部分ネット

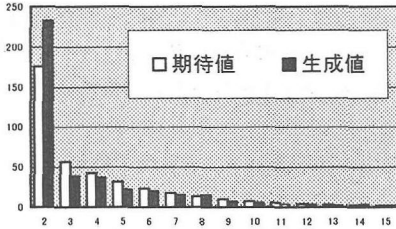


図-2 生成車頭時間間隔の分布図 (1000 台/時)

なる。それは、0~2 の区間で両者に大きな差があるため、2以上の範囲での検定では、 $\chi^2$  値は 13.33 となり、車頭時間間隔は指数分布となっている。

0~2 での差は、実は 図-1 のネットでは生成される車頭時間間隔には 1.6 秒という最小車頭間隔が存在することによる。ペトリネットシミュレータでは、車両の進行をネットと発火ルールで記述する。そのために、図-1 に示すように、道路を閉塞区間に分割し、1つの閉塞区間を“車両の存在”と“空間の空き”を示す2つのプレースで表現している。換言すれば、前方閉塞区間の“空間の空き”を示すプレースにトークンがマーキングされているときにのみ車両は進行することになる。

また、車両の走行速度をダイナミックに表現するために、“車両の存在”を示すプレース上のトークンタイムは可変とし、表-1 に示すように、直前の閉塞区間での滞在時間、換言すれば走行速度によって決定するというルールを採用している。このルールでは、直前閉塞区間の滞在時間が常に所与であることが必要となる。そのために、図-1 での接続部のプレース p1 にはプレースタイムを予め設定しておく必要がある。

現システムでは、p1 には 1.6 秒がデフォルト値として設定されている。上述の車両進行のネット構造とこのタイムのために、トランジション t0 の発火間隔は 1.6 秒以下となることはなく、この時間が最

表-1 車速更新表

当該閉塞区間		進行先閉塞区間		車速更新率
滞在時間 (秒)	対応速度 (km/h)	滞在時間 (秒)	対応速度	
$t \leq 0.80$	$30 \leq v$	0.60	40	30
$0.80 < t \leq 1.20$	$20 \leq v < 30$	0.80	30	60
$1.20 < t \leq 2.40$	$10 \leq v < 20$	1.20	20	100
$2.40 < t$	$v < 10$	2.40	10	100

発進遅れ時間 1.2 秒

小車頭時間間隔となる。

図-1 の車両発生のネットは 1 レーンのネットである。最小車頭時間間隔の存在は、従って生成可能な 1 レーン当たりの限界最大交通量が存在するというを意味する。1.6 秒というデフォルト値の場合には、それは 2250 台/時となる。これは 1 レーン当たりの交通容量に近い値であり、図-1 の車両発生のネットは、容量の物理的な制約性という経験的基準情報に適合しているとも言える。

(2) 生成交通量と設定パラメータ補正の検討

最小車頭時間間隔の存在は、設計交通量の生成保証性の面で問題を生む。設計交通量を  $m$ (台/時)とし、パラメータ設定を  $n = m / 60$ (台/分)とすれば、最小車頭時間間隔が存在するために、0~1.5 秒で生成された分は 1.6 秒と間隔が長くなり、その分時間当たりの発生車両数の期待値  $m'$ (台/時)は減少し、設計交通量を確保できなくなる。

まず、 $\mu = 60 / n$ (秒)とすれば、0~1.5 秒となる部分の平均車頭時間は

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

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、上述の減少分  $d$  を推定し、さらに重みを考慮して、 $\mu$  より小さな補正平均値  $\mu'$  をの算定式を誘導し、 $n' = 60 / \mu'$  をパラメータとして設定することで設計交通量の確保を試みる。

この方式の一つとして、ここでは

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

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

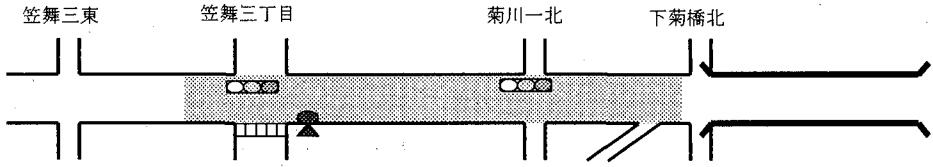


図-3 シミュレーション対象区間

表-2 設計交通量確保のための補正

m (台/時)	500	800	1000	1200	1500	2000
補正前(m)	8.33	13.33	16.67	20	25	33.33
補正後(m')	8.49	13.82	17.45	21.07	26.37	34.26
平均(台時・m)	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 (m'/m)	1.008	1.007	1.014	1.014	1.012	0.983

を提案する。

表-2 は、設計交通量  $m$  を 500~2000(台/時) で変化させ、それぞれでの補正値を示すとともに、乱数初期値を 15 個用意し、図-1 のネットでの生成交通量を計測した結果である。指数分布での発生を想定し、その分散を考慮すれば、2000 を除けば設計交通量の生成は十分な精度で達成可能といえよう。

表-3 計測交通量データ

	路肩	中央	流出	対直車	対直車	横歩数
SUM	969	999	228	433	3.19	94
MAX	89	96	26	24	21	12
MIN	71	69	11	5	6	0
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
台/分	16.15	16.65	3.8	7.22	5.32	

表-4 実測通過台数 (サイクル毎)

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

表-5 信号サイクルおよび歩行者データ

笠舞三丁目交差点 (秒)	青 72, 黄 2, 右青 9, 黄 3, 赤 54, 計 140
横断歩行者到着率	3 人/分
歩行者横断時間 (秒)	速い: 4, 普通: 7, 遅い: 10
歩行者信号 (秒)	青 15, 点滅 4, 赤 121, 計 140
菊川一丁目北交差点	青 116, 赤 24, 計 140

### 3. 実測交差点交通流の再現性検証の検討

#### (1) 実測交通流データの概要

2.での検証は、理論的基準情報の領域での問題であり、基準情報も手続きも比較的簡単で分かり易い。しかし、実測交差点交通流の再現性の検証では、基準情報についても手続きについても検討しなければならない課題は多い。前記 WS の提言のように、実践による議論が何よりも重要となる。ここでは、図-3 に示す地域での著者らの調査結果を基準情報として行った適合性の評価とその結果を報告する。

まず、調査実施日時は 1999 年 12 月 10 日(金)7:30~8:30 である。天候は晴れ、調査員 9 名、ビデオカメラ 2 台(信号計測用)で実施した。調査に関する詳細情報は、経験的基準情報としての受容性や、モデルでの記述・非記述を判断する上で非常に重要となるが、紙面制約のために、表-3~表-5 に、図-2 の笠舞交差点を中心とする交通流の調査結果の概要のみを示す。

表-3 が再現性シミュレーションで使用する入力交通量の基礎データで、表-4 が再現性評価に使用する基準データである。表-3 の入力交通量の方は 5 分単位で計測したものの集計で、表-4 の方は信号サイ

クル毎に計測したものである。表-5 は各信号での現示時間と歩行者のデータである。菊川一丁目北は歩行者信号であるが、この時間帯は常に押された状態で、下菊橋北詰と連動し車両信号として機能していた。車両の発進遅れについては、笠舞交差点で別の日の朝と昼に、先頭車両と 10 台目車両について、それぞれ 25 サンプル程度計測し、平均は約 1.2 秒という結果であった。

#### (2) 検証シミュレーションでの諸仮定

まず、笠舞三丁目交差点を中心とする寺町方面からの交通流の再現性の検討を目的とし、図-2 で網かけした部分のシステムネットモデルを構成する。このとき、閉塞区間長は 6.7m とする。当然、表-1 に示した更新表も 6.7m が基準となる。最高速度は 40m/h とし、発進遅れは 1.2 秒とし、希望加速比率は「低速時程希望は高い」という定性的な仮説の下での一例となっている。

次に、この交差点には直進・左折・右折の各専用レーンが設置されており、車両発生は路肩レーンと中央レーンの2箇所とし、中央レーンの車両が直進・右折に分離するとする。その比率は実測値から86:14とした。路肩レーンには流出部があり、ここではその交通量を減じた発生交通量を使用する。信号は表-5の2箇所とし、笠舞交差点での左折車は横断歩行者からの抑止を受けるとする。

最後に、右折に関しては、対向直進2レーンの交差点内の3台とその先の2台の合計5台から抑止を受けるとしている。距離では約33.5mで、これが想定ギャップアクセプタンスということになる。車両発生に関しては、ここにも2箇所用意する。

### (3) シミュレーション結果の考察

発生交通量は、対向直進車については、比較的小さいので表-3の実測値をそのまま使用し、主交通流の中央レーンと路肩レーンは、2の(2)で提案した補正後のパラメータを使用し、車速の更新表は表-1に示したものとし、再現性シミュレーションを実施した。シミュレーションは、4つの発生プレースに関する乱数初期値を3組用意し、各31サイクル分実行した。そして、安定化後の6サイクル目からの26サイクル分のデータで検討することにした。これは実測側のデータ数と合わせたことによる。表-4に対応するシミュレーション結果を表-6に示す。

まず、サイクル当たりの平均台数は、直進台数では誤差は2.66%で、右折台数では4.68%であるが、左折台数については10.0%と少し大きくなった。しかも、左折台数だけが実測値より多めとなった。また、変動については、MaxとMinで比較する限りではほぼ実測値と一致するという結果となった。

次に、細部の再現性については、設計交通量の発生誤差は、中央レーンが0.9%、路肩レーンが1.3%となり、補正が機能し、設計交通量の発生が確保されていた。また、直進車と右折車の分離比率も(85.87):(14.13)となり、想定比率が実現されていることも確認できた。その意味では確認可能な想定条件は成立している。

このシミュレーション結果には、この他に、表-1に示した車速更新表の諸数値、横断歩行者による左折車抑止モデル、対向直進車による右折抑止モデルが関与しているが、本調査ではこれらを議論するに

表-6 シミュレーション結果(サイクル毎)

シミュレーション値	左折	直進	右折
平均	28.89	33.71	5.30
MAX	34	41	10
MIN	17	23	2
標準偏差	4.49	4.35	1.85
誤差	10.0	-2.6	-4.7

たるデータを得られておらず、出力もしていない。それらの検討が課題となるが、限定された状況性は残だろうし、そのような状況下でどう評価するかも課題である。

### 4. あとがき

ここでは、著者らのペトリネットシミュレータを対象に、その全ての出発点となる車両発生の特性の検証を実施し、最小発生車間間隔を持つ指数分布となり、設計交通量の発生を保証するには、補正が必要となることを示した。その補正の下で、実測交差点流の再現性シミュレーションを実施し、確認可能な想定についてはその実現性を明らかにし、平均値と変動の両面で再現度を示した。その一方で、諸仮説の中で未確認の部分も明示した。それらについては、WSがクリアリングハウスで提供するデータを用いて検討を試みるとともに、再現性の検証とパラメータチューニング時のデータの同時性の問題、予測等利用時への移行性の問題も考えたいと思っている。

### 参考文献

- 1) 土木計画学研究・講演集: 21(1):609~614(1998), 22(1):695~702(1999)
- 2) 木俣, 他: ペトリネットによる交通流シミュレーションシステムの開発, 土木計画学研究・論文集, 12: 691~699(1995)
- 3) 木俣, 他: ペトリネットを用いた交通流シミュレータの検証, 土木計画学研究・講演集, 22(2):865~868(1999)