

I-4 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

Development of Practical Software for Micro Traffic Flow Petri Net Simulator

木俣 昇* 岸野 啓一** 白水 靖郎***
Noboru Kimata Keiichi Kisino Yasuo Siromizu

[抄録] 近年、マイクロな交通流のシミュレータによる支援を必要とする計画課題が増大してきている。また、PIの必要性の強調も、個別説明性が求められるという意味で、マイクロな交通流のシミュレータへの需要を高めている。著者らは、事象の生起に着目し、視覚的な特性を強く持つペトリネットによる対象交通流の記述に基礎を置く、新しい形のシミュレータの開発を試みてきた。本論文では、PI支援に必要な条件を、①個別シミュレーションの開発支援性と、②開発シミュレーションの幅広い説明性として、Windows環境で開発を試みた実用化システムのプロトタイプについて報告する。特に、①では記述ネット開発の負担を、ネット作画のメニューや実行の即時化で漸進的構築を可能とすることで軽減させ、②では複雑化するネット図の視覚性の確保と、動的説明性を強化するトレース機能のメニューで対処する工夫を、事例を用いて説明する。

[Abstract] Recently demand for micro traffic simulator is increasing both from changes of problem situations we encounter and the intensity of PI movement in public planning processes. We have developed a new type simulator based on Petri Net methodology. This type simulator has potential to be put into practical use as PI support system. In this paper, we present a more practically strengthened prototype system on Windows-OS platform and show its active supportability for development of individual simulations and accountability of their usage to a wide range of people involved. We demonstrate especially how newly developed menus like drawing traffic-flow-net, tracing token behavior on the net, making the individual places, transitions, or arrows visible / invisible by selection work and improve readability of Petri Net description of micro traffic flows and contribute to putting the simulator into practical usage.

[キーワード] シミュレーション, ペトリネット, ミクロ交通流, 交通計画, PI(パブリックインボルブメント)

[Keyword] simulation, Petri Net, micro traffic flow, transportation planning, PI(public Involvement)

1. まえがき

交通計画の支援システムとして、近年マイクロなシミュレータに関する需要が増大してきている。例えば、道路の新設といった抜本的な渋滞対策は、費用分担的にも用地確保的にも極めて困難であり、部分的な道路改良や信号制御の高度化、路上駐車に対するレッドゾーン規制や公共交通への転換支援としてのバスレーン設置といった対策に移行している。これらの対策の検討には、交通流のマイクロなシミュレーションによる支援が望ましい。また、都心部の再開発や、大規模イベントや観光シーズン時の駐車場問題、ITS 施策としての自動料金所の最適設計、公共交通への転換支援策であるP&R用の駐車場問題などの諸課題や、緊急車両の走行性支援システム開発でも、

地点特性や代替案細部をも考慮するマイクロな交通流シミュレータによる詳細な検討が必要となる。

もう一つの重要な背景として、パブリック・インボルブメント(PI)への関心の高まりが挙げられる。即ち、この下で、交通計画や実施施策に関しても幅広い関連主体への説明性が強く求められてきている。例えば、上述の駐車場関連問題では周辺交通への影響の具体的な説明が、交差点信号制御方式の変更ではそれに伴う不満や疑問に答えることが求められる。マイクロな交通流のシミュレータは、この面からも必要とされている。

このような状況の下、NETSIM や AVENUE,あるいはPARAMICS や HUTSIM など、視覚性に優れたマイクロ交通流の実用シミュレーションシステムが提供されている³⁾。

* 正会員 金沢大学工学部土木建設工学科 教授 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

** 正会員 中央復建コンサルタンツ株式会社 計画環境部 (〒532-0004 大阪市淀川区西宮原 1-8-29)

*** 正会員 中央復建コンサルタンツ株式会社 東京支社計画設計室(〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町 2-11)

著者らは、マイクロな交通流とは、対象それぞれに固有な現象性、空間性、さらに対策の制約性といった個別性・差異性を認めることを含意するもので、マイクロシミュレータには、それらの個別性表現への特化指向と、個々のケースにも十分に対応しうる汎用化指向がせめぎ合っていると考える。具体的には、出来るだけ広範な汎用性を備え、かつ対象個別性への十分な特化能力を備えていることが目標となる。また、説明力に関しては、交通に関するPIでの関連主体の幅広さを考えるとき、交通流のモデル化の詳細レベルに至るまでの論理的な説明性から、主体の個人的な交通体験に則した直感的な理解レベルでの説明性まで、幅広く対処出来ることが望ましいと考える。

著者らは、ペトリネットに基礎を置く交通流のマイクロシミュレータの開発研究を試みてきた⁴⁾。ペトリネット方式は、事象の生起に着目する離散型のシステムで、
①対象とするマイクロ交通流の記述を視覚的なネットモデルで行う

②このネットモデルの動的挙動は単純で汎用的なルールで視覚化される

③ネットは共通構造をもち、結合化による精緻化・拡張化が可能である

といった基本特性を持つ。著者らは、②の基本特性を生かし、フローチャート方式とは異なり、対象の記述系とは独立な駆動系ソフトを開発することで汎用性を確保し、③の特性を活用した個別性への特化能力と、①の特性による幅広い説明性を特徴とするマイクロ交通流のシミュレータ開発を目指している。

著者らは、現在、この形式のシミュレータの基本ソフトの開発を終え、渋滞問題から緊急車両走行までの幅広い応用研究や、実交通流の基本的な再現性の検証を経て、実用化システム開発に向かっている^{5)~10)}。これまでの研究では、いろいろな交通流がペトリネットによって記述可能なことの実証のみに力点があり、PI支援を意識した使用性にまでは議論が及んでいなかった。本論文では、出来るだけ多くの人々にとって、それぞれの目的に特化した形でのシミュレーションが可能となる実行環境の提供を目的に、基本ソフトをUNIXからWindows環境に変更し、その上で使用者によるシステムの特化のプロセスに沿ったメニュー化を付加した実用化プロトタイプを紹介し、本方式によるマイクロ交通流シミュレータの特徴発揮の可能性と、今後の課題について検討する。

2. 交通流のペトリネットシミュレーション方式の概要

2-1. ペトリネットによる交通流の表現技法

著者らは、対象とする自動車交通流を、いくつかの基本部分ネットの結合化によって表現する方法を開発してきている。本節では、片側1車線の道路が交差する信号

交差点を事例に取り上げ、ペトリネットによる表現技法を説明する。ここでは、まず、交差点近辺には右折専用レーンが設置されており、信号にも右折現示があるとし、左方向からの直進・左折・右折車の交通流と、右方向からの対向直進車の交通流の記述に関心があるとする。

この対象交通流のシステムネットは、図-1に示すように、既開発の基本部分ネット⁴⁾の内の5個、即ち①車両発生、②車両進行、③車線分岐、④信号制御、および⑤右折抑止の基本部分ネットの結合によって記述される。まず、図-1の左端と右端に、それぞれ左右両方向からの交通の発生を担う形で①の部分ネットが配置されている。この端のプレース(Oで表示)は発生プレースと呼ばれる特殊プレースで、指定された平均値を持つ指数時間間隔で車両トークン(●で表記)を発生させる。この部分ネットの先に、②の車両進行の部分ネットが、対象とする道路長に応じて結合される。

車両進行の部分ネットは、図-2の(a)に示すように、まず、道路を閉塞区間に分割し、1つの閉塞区間を補完関係にある2つのプレース、即ち、“空間の空き”を表すプレースと、“車両の存在”を表すプレースでの2つで表現する。そして、“車両の進行”を意味するトランジション(|で表示)への入出力アークを、図-2に示すような構造で結ぶことで、前方閉塞区間のプレースが“空間の空き”のときのみ、車両は、図-2の(a)から(b)の推移で示すように進行し、図-2の(c)のようなときには進行せず、常に最小車間間隔が確保される工夫がなされている。この動的挙動については、2-2の駆動系のアルゴリズムのところで再度説明する。

右折車線への分岐には、特殊なトランジションを使用する。一つはGTと表記されているカラートークンの生成トランジションで、これを通過する時に指定した比率でトークン(車両)に直進・左折車カラーか右折車カラーが付与される。もう一つはSTと表記されている選択トランジションで、これを通過する時にトークンカラーが識別され、カラーに応じて出力プレースの選択がなされる。この組み合わせで、直進・左折車は路肩レーンに、右折車は中央レーンを進行するネットとなっている。図-1では交差点での直進車と左折車の分岐の記述にもこの方法が使用されている。

車両進行は信号によって制御される。図-1の右上の四角形のネットは、この信号の基本部分ネットである。ここでは、左右方向の交通に関する赤・青・黄・右折の4現示状態が4つのプレースで表示され、現示時間の経過と共にトークンがこれらのプレースを移動するネットとなっている。そして、赤現示プレースから交差点進入を表す3つのトランジションに抑止アーク(点線で表示)を伸ばし、右折現示プレースからは対向直進車の交差点

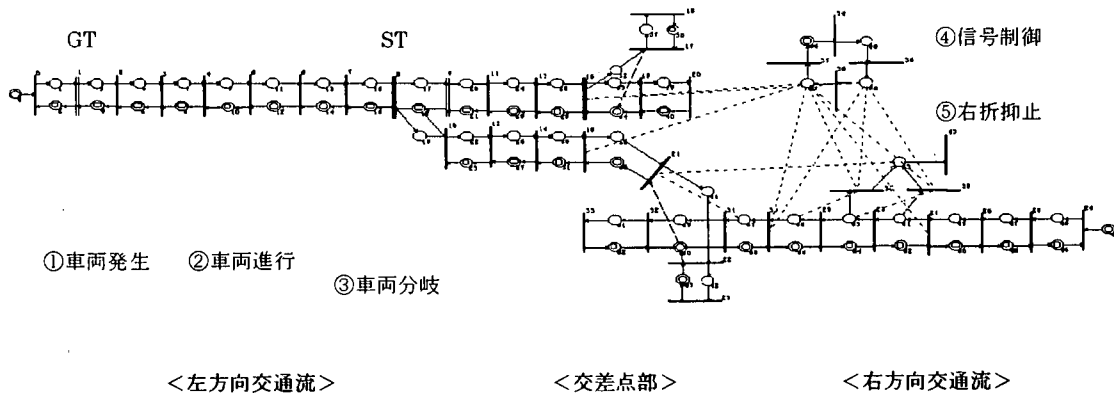


図-1 信号交差点近傍での交通流のペトリネット記述事例

進入を表すトランジションに抑止アークを伸ばしている。2-2 の駆動系のアルゴリズムで述べるが、この抑止関係によって、赤現示時には車両は交差点手前で停車し、右折現示時には対向直進車のみが交差点手前で停車し、安全な交通流が保証された記述となっている。

青・黄現示時の右折車の挙動については、対向直進車との車間間隔との関連性の問題がある。⑤の右折抑止の基本部分ネットはその記述用に作成されたネットである。図-1 の右方の中央の部分ネットがそれで、少し込み入ったネットとなっているが、ここでは右折車は交差点内の全ての対向直進車と、交差点手前の3台の対向直進車からの抑止を受けるとしてネットモデル化している。もちろん3台を5台に想定したモデル化も可能だし、さらに右折車のドライバー特性によってこの台数が変化するという精緻化も可能である。

ここで使用した基本部分ネットの他にも、横断歩行者や押しボタン信号、車線変更や合流などの基本部分ネットも同様な形で使用可能な状態にある。

このシステムネットは、Sdata と呼ばれる形式でも表現される。表-1 に図-1 に示したシステムネットのSdata 表記の一部を示す。詳細は省くが、まず、図-1 のシステムネットに登場する全てのプレースとトランジションについて、PLACE と TRAN の項に、その総数や種類や結合関係のデータが記載される。プレースの種類は基本形では4種類あり、-2 は車両進行の基本部分ネットの説明で述べた”車両の存在”を示すプレースを、-1 は”空間の空き”を示すプレースを意味する。残りの2つは、1 と正値を持つプレースで、これらの値は、2-2 で述べるトークンへの付与タイマのデータに対応する。

このネット例では、正値を持つものは信号の各現示プレースに対応しており、その値は各信号の現示時間を意味し、各プレース上のトークンに付与されるタイマ値である。ちなみに -1 は”空間の空き”を示し、その上のトークンにはタイマは不要となる。一方、-2 のプレ-

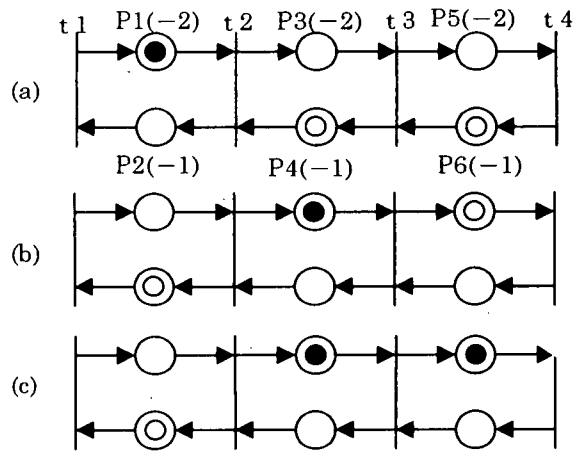


図-2 車両進行の基本部分ネット

```

PLACE 68
-1 -1 0 1 /*PLACE 0*/
-1 1 0 1
-1 -1 -1 0
...
15 30 38 39 -1 10 -1 2 3 /*信号右折青*/
15 16 30 38 39 -1 27 -1 2 0 /*信号赤*/
end
TRAN 41
0 2 -1 1 -1 0 /*TRAN 0*/
...
13 16 -1 14 15 -1 0
15 18 -1 16 17 19 -1 2 /*分岐*/
...
TOKEN 100
2 -1 4 -1 6 -1 ... -1 31 -1
GENE 2
0 15 0.001
44 10 0.001
-1
generatetransZ 2
1 1 70 2 30
9 1 60 2 40
    
```

表-1 図-1 ネットのSdata

スは“車両の存在”を意味し、そのプレース上のトークンは車両に対応する。それへ付与されるタイマは当該車両の車速に該当する。その値は当然状況によって変わる。本シミュレータが他のペトリネットシミュレータと大きく異なる点は、-2 で指定される可変プレースの使用と、その更新アルゴリズムにある。1 という種類のプレースも車両発生の基本部分ネットでのみ使用される特殊なもので、この可変プレースの存在と関連しており、これらについては2-2 で述べる。

トランジションの種類は 3 種類で、0 =通常、1 = 生成、2 = 選択を意味し、通常のカラペトリネット²⁾で使用される範囲のものである。生成と選択トランジションの機能については、分岐の基本部分ネットのところで既に説明している。

次に、TOKEN の項に、システムネットの初期状態を指定するためのトークンの初期配置データを(配置プレース番号)(初期タイマ値)という形式で記載する。この Sdata 事例では信号現示を青とし、閉塞区間が全て空き、換言すれば道路上に車両が全く存在しない状態を初期状態としていることになる。

最後に、上述の説明で特殊とした発生プレースについては、その全てについて、GENE の項で、(プレース番号)(平均発生率)(発生初期時刻)という形で改めて記載し、カラートークン生成トランジションについても、generatetransZ の項で、(トランジション番号)(1 番目カラー名)(1 番目カラー生成率)(2 番目カラー名)(2 番目カラー生成率)という形で、必要なパラメータ値を指定している。この Sdata がコンピュータシミュレーションには不可欠となる。

2-2 交通流ペトリネットシミュレータの駆動系アルゴリズムの概要

(1) トランジションの発火ルールによる駆動化アルゴリズム

2-1 で記述した交通流のペトリネットモデルは、トランジションの“発火”によるトークンの移動という形で、その動的挙動表現がなされる。このトランジションの“発火”のルールは、非常に単純・明快であり、

- ① 当該トランジションの全ての抑止プレース上にトークンが存在せず、かつ
- ② 全ての入力プレース上にトークンがマーキングされているとき
そのときのみ発火し、
- ③ 全ての入力プレース上からトークンを 1 個ずつ消去し、かつ
- ④ 全ての出力プレース上にトークンを 1 個ずつ配置する

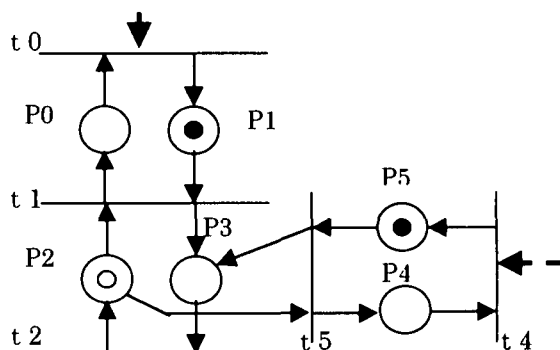


図-3 競合状態のネット事例

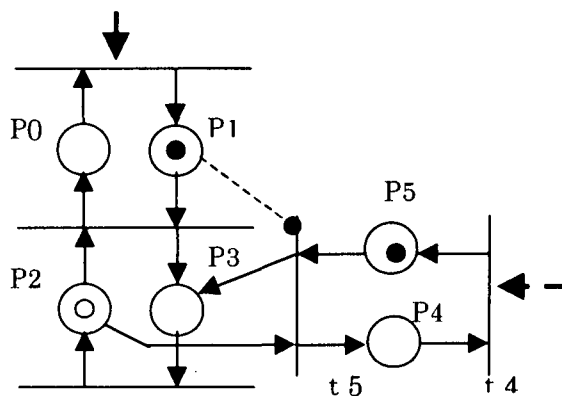


図-4 優先権の付与ネット

というものである。ここでプレースがマーキング状態であるとは、配置トークンのタイマがシミュレーション現時刻との関連で切れている状態をいう。

一般のペトリネットのルール¹⁾と対比すると出力プレース側の条件を使用していない。このことは、プレースの容量(capacity)を無限大に設定することに相当する。もちろんプログラム上は有限だが、十分な大きさに設定すれば良く、一般のペトリネットのルール内にある。大きな相違点は、いわゆる競合(conflict)状態の時の処理法にある。

図-3 は競合状態のネット図の一例である。上方向からの進行してきた車両と右方向からの車両とが、信号のない交差点に差しかかった状況である。トランジション t1 と t5 は共に上述のルールの①と②を満たしており、“発火”が可能な状態にある。いま、t1 の方を発火させたとすれば、③と④のルールで、p1 のトークンは p3 に、p2 のトークンは p0 に進み、p2 からトークンが消える。その結果、トランジション t5 に関してはルールの②が満たされなくなる。逆に、t5 の方を発火させると、t1 の方が発火出来なくなる。このような状況にある 2 つのトランジションを競合関係にあるといい、一般のペトリネットではどちらか一方のみを(ランダムに)発火させる¹⁾。それに対して、本シミュレータでは、以下のような理由で、①と②を満たす全てのトランジションを発火させる

というルールを採用する。

いま、図-3 に著者らのルールを適用すれば、④の処理に伴って p3 に 2 つのトークンが配置されることになる。これは交通流では車両衝突の発生を意味する。われわれが取り扱う課題の多くでは、安全な交通流の保証が大前提となる。交通流ペトリネットシミュレータでは、衝突リスクの有無がモデル作成者により明確に意識されることで、安全性の保証がより高いシステムネットの作成が促されるとして、このルールを採用している。

ちなみに、このルールでも安全な交通流のシステムネットは、図-4 のようになる。この例では、上方向からの交通流に優先権を付与し、p1 から t5 に抑止アークを伸ばすことで、上述のルールの①によって、トランジション t1 のみを発火可能とし、p5 の車両は p1 の車両が通過するまで、停車ないしは減速してそこに留まる。交通規則でも、図-3 のような場合にはどちらかの道路に優先権を付与しており、図-4 の記述はより遵法的であるといえる。

2-1 で述べた右折抑止の基本部分ネットにもこの考え方が使用されている。即ち、この場合には対向直進車に優先権があり、それらの存在プレースから右折を意味するトランジションへ抑止アークを伸ばしたネットとなっている。事故シミュレーションへの応用に際しては、ドライバーの認知ミスの発生や非遵法性の発現ネットを作成し、安全確保機構の破綻化を意識的に組み入れることになる¹⁰⁾。

(2) 可変プレース上のタイマの更新ルール

上述したように、-2 のプレースに配置されるトークンは車両を意味し、それに付与されるタイマは車速に対応する。タイマはより直接的には希望車速で1つの閉塞区間を通過するに要する時間である。前出の図-2 の車両進行のネットではトランジションが発火し、-2 のプレース上のトークンが次の閉塞区間の -2 のプレース上に配置される毎に、このタイマ値が更新されることになる。このルールがもう一つ駆動系のアルゴリズムに組み込まれている。

ペトリネットシミュレータの特徴として、単純なルールによる駆動ということを挙げたが、このタイマ更新ルールも単純であることを心掛け、ドライバーは基本的には現状維持か加速を希望するとして、表-2 に示すような vptimer 表による更新ルールを採用する。

この表は、閉塞区間長を 6.7 m とし、最高速度を 40 km/h とした時の例であるが、実現のタイマ(表の第1列の値)を元に、この表との対応で進行後のタイマ、換言すれば希望走行速度を(現状維持)か、あるいは第2列の値(加速)かに、第3列の値で確率的に決めるというルールである。もう一つは、停車車両には発進遅れが発生す

表-2 可変プレースタイマの更新表

Current Value	Increment	Decrement	Probability/Count
0.8	0.6	0.7	
1.2	0.8	1.0	
2.4	1.2	1.0	
4.8	2.4	1.0	
else	2.4	1.0	2947
lagtime 4.8 1.3			

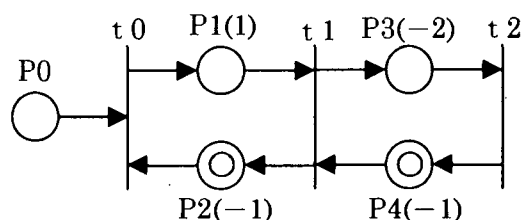


図-5 車両発生と車両進行ネットの結合化

るが、この表の最下行に示す停車中と見なす識別タイマ値と発進遅れ時間を用いて、実現タイマ値が識別値以上であれば停車車両とし、発進遅れ時間を加算後に車両進行のトランジションを発火させ、タイマ更新ルールを適用するというものである。

このように、タイマの更新にはその元となる値、プレースでの滞在時間が必要となる。しかし、上述の発生プレース上のトークンは、その発生時刻のみが指定され、この値を持たない。そのために、それに続くプレースは車両の存在を意味するにもかかわらず、タイマ更新が必要な可変プレース、即ち-2 とすることは出来ない。

この問題解決のために導入されたのが、前出の 1 という値を持つプレースである。この特殊プレース上のトークンに 1.6 秒というデフォルト値をタイマとして付与することで、図-5 に示すように、車両発生の基本部分ネットと、-2 の可変プレースを持つ車両進行の基本部分ネットとの結合を可能としている。

この設定値は、車両発生の時間間隔の最小値、逆にいえば発生交通の最大値を規定する。具体的にはこの設定では最大発生交通は 2250 台/時となる。この値は、1 レーン当たりの交通容量とされるものにほぼ等しくなり、1 というプレースは一見すると奇異に思えるが、妥当な車両発生ネットを導くものでもあることを付記しておく。

車両の減速という現象は、図-1 の交通流モデルでは、前方の低速車に高速車が追いついたとき、右折時に対向直進車がいるとき、および信号が赤現示のとき起きるが、

これらの減速アルゴリズムは、直接的には駆動系には組み入れていない。減速や停車は、記述側のネットの構造と、上述の単純な発火のルールによって出現する。上述の第一の減速は、図-2の(c)に示したように、車両進行の基本部分ネットでは、各閉塞区間が補完的な2つのプレース(-2と-1)で表現されており、後続の高速車のタイム(小さい)が切れても、前方閉塞区間の低速車のタイム(大きい)が切れていなければ、“空間の空き”を示す-1のプレースにはトークンがなく、②の発火のルールによって当該閉塞区間に滞在し続けるために滞在時間が長くなり、減速した形になる。第二と第三のケースでは、②の発火ルールは満足されていても、抑止アークのために、①の発火のルールによって進行することが出来ず、やはり当該閉塞区間に留まり、減速ないしは停車した形となる。

ミクロな交通流のモデル化では、いろいろな形の減速が想定される。例えば、誘導員による指示や情報の収集、場合によって景色に見とれるでの減速なども記述対象になる。それらを全て駆動系のアルゴリズムに組み入れることは困難であるばかりではなく、シミュレータの説明性の上からも得策でもないと考える。本ペトリネットシミュレータでは、非常に単純な発火ルールと、補完的な2つのプレースと抑止アークを使用した車両進行とその制約化という表現技法のみによることで、逆にミクロ交通流のより豊かな表現力の獲得を指向しているともいえる。

この方式は、記述をネットに頼り過ぎるために、実用化レベルでは、記述ネットが複雑になり、長所である視覚性が損われるという問題を内包している。次節では、実用システム化を目指して、この問題を含む諸要件とその解決策を探る。

3. 交通流ペトリネットシミュレータの実用化の試み

3-1 実用システム化の諸要件

著者らは、2.で概説したミクロ交通流のペトリネットシミュレータの基礎研究を試みてきた。そして、その基本的な特性ないしはセールスポイントは、

- ①視覚的なネットによる対象交通流の記述と、単純な駆動ルールによるその動的挙動の確認による幅広い説明性と、
- ②ネットの精緻化と結合化によるミクロ交通流の幅広い記述性と、記述系とは独立した駆動系の汎用ソフトの開発性による個別シミュレーションの構築性にあるとし、本方式のシミュレータの実用化に際しては、これらの特性を生かし、図-6に示すようなPI場面の使用を想定することが肝要と考えた。

具体的には、ある問題状況の下で、住民側は独自の認

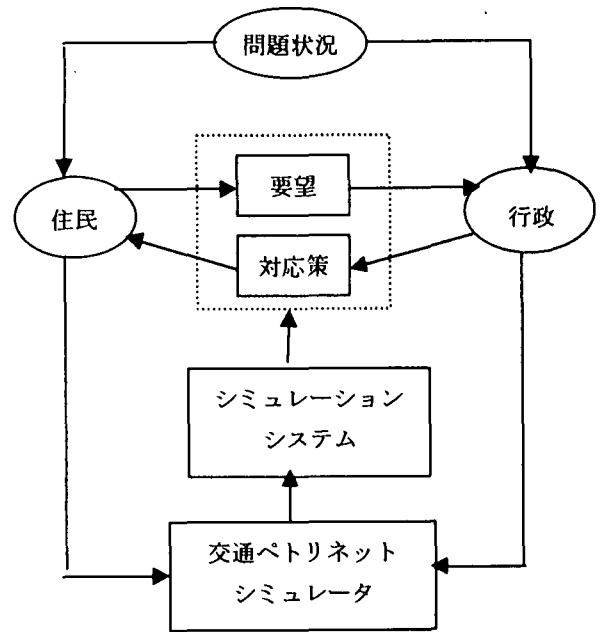


図-6 ペトリネットシミュレータの使用場面想定

識に基づいて要望を出す。行政側はそれらの要望をも踏まえて独自の対応策を提示する。このプロセスで、問題状況に応じた個別シミュレーションが交通流ペトリネットシミュレータの支援の下で構成され、それらが共通の土俵となることで対話が成立するというPI支援型のシステム開発が目標となる。

シミュレーションの利用のプロセスは、図-7のような3フェーズより成るだろう。第一フェーズは、問題状況にある交通流のペトリネットによる記述化であり、第二フェーズは、第一フェーズの結果を開発シミュレータによってコンピュータ上に再構築するものであり、第三フェーズはその利用ということになる。実用化システムは、当然この第二フェーズ以後のプロセスに必要なメニューをまずは備えていなければならない。

このプロセスは専門家には馴染みのオーソドックスなものであるが、図-6で想定する多くの人々にとっては、第一フェーズの負担が大きく、この負担の軽減が重要な要件となる。これには、第一フェーズでの個別モデル構築を、ペトリネットシミュレータの特徴を活用して、第二フェーズ以降のコンピュータ上で漸進的に進めるという形式が望ましい。即ち、第二フェーズのシステムネット図、Sdata、vptimer表の取り込み、シミュレーション設計、および第三フェーズのシミュレーション実行の諸メニューの構成に際して、この漸進的構築性という思想に十分な配慮を行うことが肝要となる。このことの達成は、第三フェーズの役割でもあるモデルの説明性の向上にも、またミクロ交通流のシミュレーションの構築技術の蓄積化にも寄与する。

説明性については、前述したように、いくつかのレベ

ルでの説明性が望ましい。上述のように、漸進的構築性はその構築プロセスを逐次的に再実行して見せることで、説明性の付与にも大いに寄与する。この再実行には、実行モードの多様化と共に、ネット図作画時での Ndata (位置データ) の生成と、その Sdata との対保存が必要となる。

2-2でも指摘したように、実用化レベルでは記述ネットが複雑化し、説明性が低下する。これに積極的に対処する工夫が、実用化システムでの最も重要な課題の一つである。例えば、対象空間や実在物との対応性や、必要とする細部レベルでの構造の視覚性を持つ形での出力ネット図の設定機能の付加が望ましい。また、交通流としての車両の動的挙動の説明性や、優先信号やETC料金所などの新規提案ネットの処理論理の説明性には、ネット上でのトークン移動に関する種々のトレース機能の付加も重要な要件となるだろう。

最後に、質問や疑問に答える形での説明性ないしは応答性が問題となる。当然、図-6の想定場面では、車速や発進遅れや交通量といった数値データへの質問や疑問が出される。また、実現現象の再現性や考慮すべき要因や事象についての疑問や提案も予想される。数値データについては、出来るだけ外部化し、操作可能な形にして置くことが望ましい。検証や提案については、ミクロ・個別ということから、各自による実行と確認性を最大限に保証することでの対処ということになるだろうと考える。

3-2 Windows 版交通流ペトリネットシミュレータの開発

実用化に際しては、利用環境の拡大化も重要となる。そこで、UNIX から Windows 環境への基本ソフトの移行を行い、その上で、図-7のプロセスに沿って必要な機能を、上述の諸観点よりメニュー形式として構成し、付加・強化した。図-8は、そのメインメニューと、この最大の特長である「ネット図」の子メニュー、さらに、その中の「ネット図設定」に関する孫メニューを表示している。ここでは、第一フェーズでシステムネットモデルとその Sdata ファイル等が一応作成されているとして、図-7のプロセスに沿って、これらのメニュー機能とその運用法の概要を述べる。

まず、図-8のメインメニューの中の「ファイル」によって当該の Sdata ファイルを開き、上述の「ネット図」の中の「図形配置」をクリックして、システムネット図の作成を行う。「図形配置」をクリックすれば、図-9のような支援画面が表示される。左方の上下のウィンドに配置すべき「プレース」と「トランジション」の番号リストが表示される。それらをクリックし、画面上にその配置位置を指定し、配置ボタンをクリックすることでネ

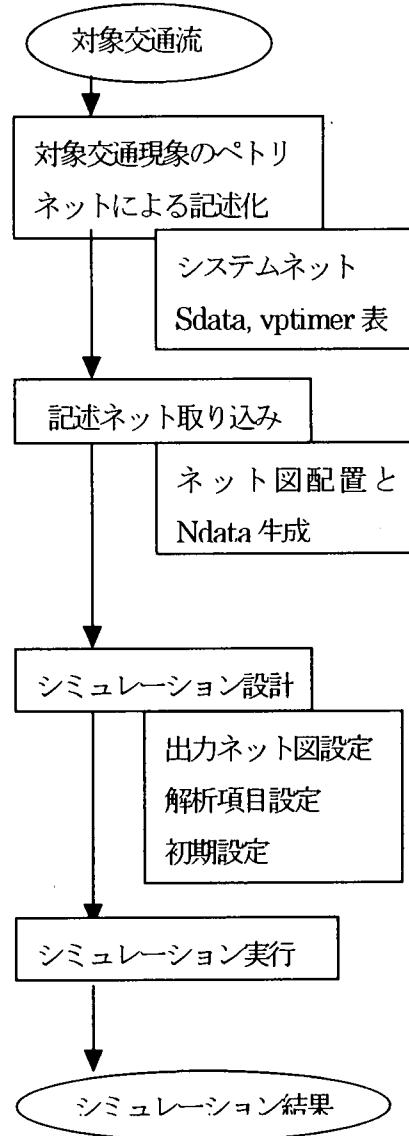


図-7 シミュレータ利用の3フェーズ

ット図の作成が進行する。

この作業は、右方ウィンドに示される、配置した図形に関連するプレースやトランジションリストを参照して進めることができる。さらに、複雑なプレースとトランジション間のアークは Sdata による自動描画され、その負担の軽減化も行なわれている。また、配置位置は、当該図形をドラッグすることで修正が可能で、作成の初期段階では出来るだけスペースを取る配置にし、複雑化するアーク関係の再検討を行い、Sdata のミスチェックも行い、完成段階では重ね合わせや、実空間や実在物と対応した位置への移動を行うで、複雑な実用化レベルでの記述ネットの視覚性を確保するという運用を可能としている。

この作業が終了すれば、システムネット図の位置データは、図-8の「ファイル」のメニューによって、Ndataとして Sdata と対で保存され、以後は Sdata を開くとネット図が描画される。記述ネットの漸進的構築の逐次的

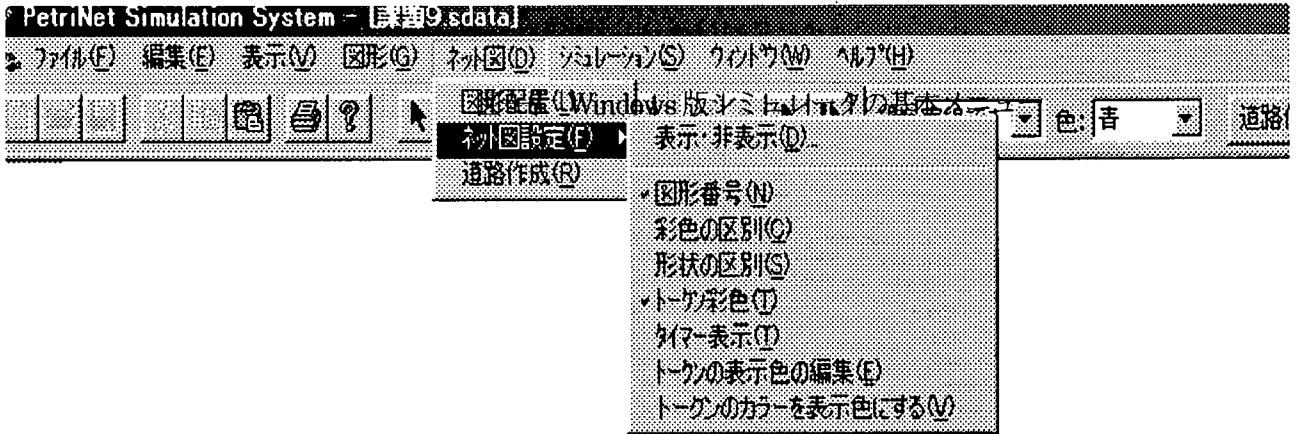


図-8 Windows版シミュレータの基本メニュー一覧

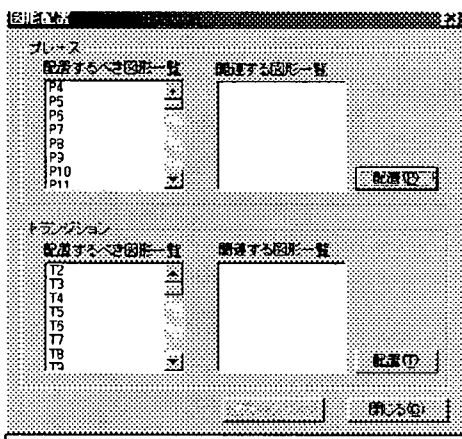


図-9 図形配置メニューの機能

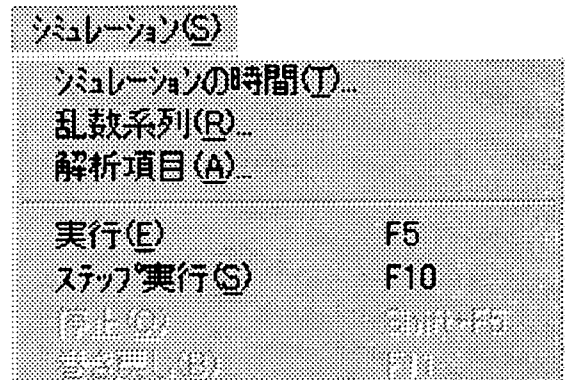
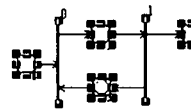


図-10 シミュレーションメニュー

な再実行は、これで可能となる。

シミュレーションの実行には、図-8の基本メニューの「シミュレーション」を使用する。図-10がその内容で、“シミュレーション時間”や“乱数系列”の初期設定、シミュレーション結果の出力用の“解析項目”，および実行モードに分類できる。“乱数系列”の設定の外部化は、同一初期値の設定による再実行時の交通流生成の同一性や、繰り返し実験での乱数系列の独立性を保证する。“解析項目”の設定は、目的に応じてトランジションとプレースを指定し、指定したトランジションの発火回数や、指定したプレース群上に存在するトークン数を Excel ファイルに出力するもので、前者からは各種の通過台数や旅行時間、車速や車間間隔の分布データ等が、後者からは各種の渋滞長データが得られる。渋滞長については信号サイクル毎のグラフの同時出力も可能となっている。実行モードには“ステップ実行”や“巻戻”を用意し、再実行性や動的挙動の確認性にも配慮している。

最後に、実用化の重要な要件としたネットの複雑化への対応と、動的挙動の視覚的トーレス機能の付与について、図-11を事例に説明する。まず、図-8の親メニューの「ネット図」にこれらの機能を付与している。ここには、①「図形配置」、②「ネット図設定」、③「道路作

成」の3つのサブメニューが用意されている。この中「図形配置」については説明済である。図-11では、この②と③が使用されている。

「ネット図設定」には、図-8に示すように8個の機能が用意されている。まず、“表示・非表示”明に必要となるプレースやトランジションのみを使用して、システムネット図を表示するためのもので、Sdataの列の最後に意図的に付加した1(表示)と0(非表示)を参照した表示となる。この機能はネット図が複雑化すると思いの外の働きをする。“図形番号”は、その表示の有無の選択によって、複雑化に伴う視覚性の低下を防ぐとともに、次の“彩色区別”や“形状区別”によるシステムネットの論理構造の視覚化と合わさって細部の説明性にも寄与する。

“彩色区別”や“形状区別”は、ネット図に組み込まれている特殊な発生プレースや、生成・選択トランジションを、“彩色”や“形状”の区別で視覚化するもので、システムネットの論理構造を分かり易くするものである。図-1のシステムネットにも、“形状区別”を使用しており、生成(GT)と選択(ST)のトランジションが二重線と太線で区別表示されている。

“トークン彩色”から“トークンのカラーを表示色にす

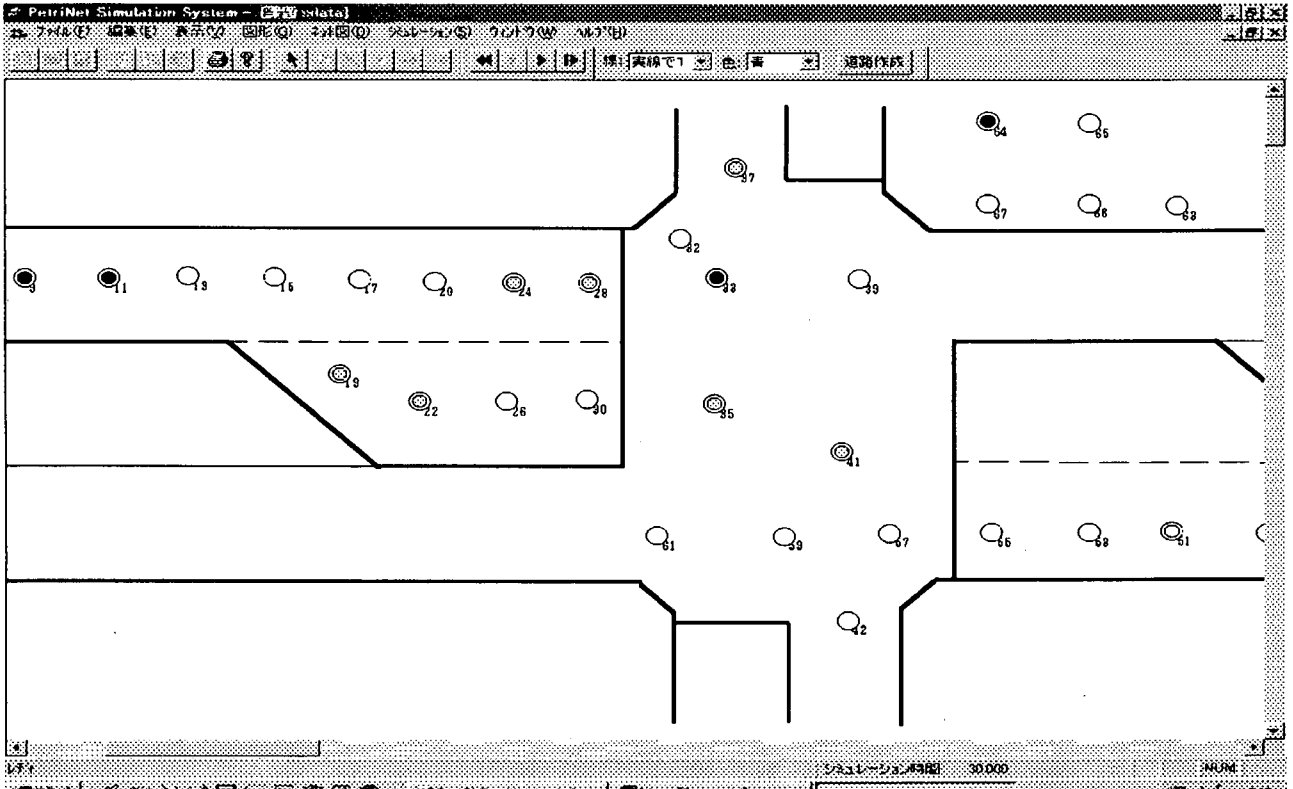


図-11 実空間との対応性を持つシステムネット表示例

る”までのものは、トークンの動的挙動のトースのための機能である。「ステップ実行」と合わせて、個々のトークンの挙動のトレースが、カラー化によって視覚的にも容易なシステムとなっている。

図-11は、図-1のシステムネットに「ネット図設定」のこれらの機能を活用し、出力ネット図を設計した事例である。この事例では、まず、トランジションは全て非表示とし、プレースは-2の「車両の存在」を示すものと、「信号」のみを表示とし、-1の「空間の空き」を示すプレースは全て非表示としている。図-1のシステムネット図では往々にして2車線のモデルと誤解される。しかし、図-11の表示であればこのような誤解は起きないだろう。細部の説明性が必要となれば、「ネット図設定」の“表示・非表示”をクリックし、必要なものを選択し表示を指示すれば、直ちに切り換えることが出来る。その目的で、図-11の表示では、「ネット図」の中の③の「道路作成」を使用し、その形状も描画している。

もう一つは、“トークン彩色”を使用し、各車両の位置関係と信号の現示状態の視覚化も行っている。モノラル画面ではあるが、プレース上のトークンの濃淡がこの彩色に対応している。この状況は、まず、信号現示は青で、左方向路肩レーンでは、交差点を左折中の車と直進中の車があり、さらに交差点手前に2台、その後方にも2台が走行してい。そして、中央右折レーンに2台が

いて、交差点内にも2台の右折車がいる。この交差点内の右折車は、対向直進レーンの交差点手前の3閉塞区間目に対向車が存在するために、安全間隔が確保できず停車している。信号が右折青現示になれば、対向直進車は停車し、交差点内の2台と右折レーンの数台が右折することになる。これらの動的挙動は、彩色されたトークンの動きを「ステップ実行」でより明確に確認することができ、ネットモデルによる現象記述の妥当性の説明に大いに寄与すると考えている。

4. あとがき

本論文では、視覚的なペトリネットに基礎を置くマイクロ交通流のシミュレータの実用化に向けてのプロットタイプについて報告した。このシステムでは、PI支援を意図し、まず、使用環境の拡大化のために、基本ソフトをUNIXからWindows系に移行し、①幅広い説明性と②個別シミュレーションの開発支援性を重要要件として、それらの確保機能をメニュー形式で付与・強化することを試みた。

②の個別シミュレーションの開発支援性については、負担の軽減のために、記述ネットの漸進的な構築性を可能とする工夫を行った。また、このプロセスの逐次的な再実行は、①の幅広い説明性の付与にも寄与するとして、Sdataとネット図の位置データであるNdataの対保存も

実現している。①については、実用化レベルでは、交通流の記述ネットが複雑化し、本方式の長所である視覚性が阻害されることが大きな問題になるとして、積極的な機能付加を行った。一つは、実空間や実在物との対応性があるネットが分かり易いとし、不要なものを表示しない「表示・非表示」の選択機能、第二は、複雑化した記述ネットの重要構造を視覚化する機能、第三は、動的挙動の把握のためのトークン移動の諸トレース機能の付加を行った。これらの機能に加え、道路描画の機能を用いて、マイクロ交通流の記述システムネットが視覚的に把握し易くなり、P I 支援場面での説明性がかなり向上することを示すことができ、従来の研究をP I 支援に向けて一歩進めることが出来たと考えている。

本論文ではあまり触れなかったが、本方式での時間進行は、トランジションの発火に伴う可変時間増分法による。いわゆる離散型のシミュレータである。これは、一定時間増分法では漏れる恐れのある確率事象も、その発生を確実にとらえる。しかし、考慮する事象が増えるとシミュレーションに要する時間も確実に増える。この面での高速化が実用化レベルでは必要となる。現システムでは、個別シミュレーションの開発時とその説明時にはネットを表示した形式を採るが、数値的な解析段階ではSdataのみでの実行で高速化に対応している。複数の交差点を含む広域ネットワークのレベルでの実用化にはこのSdataのみでの高速実行と、アニメーション表示の並列処理が必須となると考えている。もう一つの課題は、バス等の大型車の取り扱いである。現在はこれも記述系ネットの工夫で対処しているが、公共交通の活性化策の議論に向けた本格的な対応も今後の課題となっている。

最後に、オブジェクト指向へのソフトの書き換えに触れる。ペトリネットで使用する概念は、2.で述べたように非常に少なく、オブジェクト指向に向いている。実際、ペトリネットのソフトウェアとしてこのタイプのものが発表されている¹²⁾。ソフトウェアの充実化にとっては重要な方向であろう。しかし、交通流のシミュレータとしては、文献13)に述べられている検証上の問題点や、上述した大規模ネットワークの実行上の高速化との関連からも検討する必要のある課題と考えている。

[参考文献]

- 1) W. Reisig: *A Primer in Petri Net Design*, Springer-Verlag, 1992
- 2) K. Jensen: *Coloured Petri Nets*, Vol. 1~3, Springer, 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) 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, No. 12, 691~699, 1995
- 5) 木俣昇, 鷲見育男: 消防防災システムの阻害要因のペトリネットシミュレーションに関する基礎的研究, 土木計画学研究・論文集, No. 14, 393~400, 1997
- 6) 木俣昇, 鷲見育男, 社浦宗兵: ペトリネットによる渋滞時の緊急車両走行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. 20(2), 511~514, 1997
- 7) 木俣昇, 鷲坂崇, 千田諭: ペトリネットによる相互干渉する隣接2信号交差点での渋滞シミュレーション, 土木計画学研究・講演集, No. 20(2), 315~318, 1997
- 8) 木俣昇, 鷲見育男, 横山誠: ペトリネットによる違法駐車に伴う迷惑渋滞のシミュレーション実験, 土木計画学研究・講演集, No. 21(2), 807~810, 1998
- 9) 木俣昇, 千田諭, 岸野啓一, 樞村吾郎: ペトリネットを用いた交通流シミュレーションの応用可能性, 土木計画学研究・講演集, No. 22(2), 813~816, 1999
- 10) 木俣昇: 追突事故リスク内在型の交通流のペトリネット・シミュレータの開発, 土木計画学研究・講演集, No. 22(2), 845~848, 1999
- 11) 木俣昇, 千田諭, 白水靖郎, 北原淳一, 佐藤寛恵: 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, No. 22(2), 865~868, 1999
- 12) T. Holvoet, P. Verbaeten: Using Agents for Simulating and Implementing Petri Nets, *11th Workshop on Parallel and Distributed Simulation*, 134~137, 1997
- 13) L. Yilmaz, O. Balci: Object-Oriented Simulation Model Verification and Validation, *Proc. 1997 Summer Computer Simulation Conference*, 835~840, 1997.