

## 交通計画のためのペトリネット・シミュレーションシステムに関する研究\*

Study on PETORI NET Simulation System for Traffic Management Planning.

高木秀彰\*\*, 木俣 昇\*\*\*

By Hideaki TAKAKI, Noboru KIMATA

Using PETORI NET as a modeling technique, we can easily develop a traffic flow model. The modeling technique is as follows; Firstly we make micro PETORI NET models which can evaluate performance of each car in the traffic flow. Secondly we integrate them into an area model, using common structure of each PETORI NET model. In this paper we present a traffic simulation model at an intersection applying this procedure, and show the several case of simulation and discuss the useful model for traffic management.

### 1. はじめに

近年における交通問題はおおきな社会問題となっている。例えば、市街地における交通渋滞は慢性化の様相をみせており、物流などの経済問題やエネルギー消費、大気汚染といった環境問題も引き起こしている。このような問題に対し、市街地では新しい道路の建設や、既存道路の拡幅が困難であるので、有効な既存道路の運用が必要となってきた。これらの運用計画の評価のためには、交通現象を記述できるモデルが必要であり、特に市街地における交通現象のモデルは細かな要因を考慮できるものでなければならない。なぜなら、市街地での交通現象は、例えば路上駐車のように、車1台が渋滞の原因となっている場合も多く見られるため、車1台の挙動に

関わる要因も考慮する必要があるからである。

交通現象に関わる要因は、確率的要素と決定的要素を同時に含んでいるので複雑であり、理論解析の場合では、十分簡略化した仮定を用いてもなお解析の過程が複雑となり適用範囲も限定され、現実的解析は困難である。したがって、交通計画により生ずる交通現象を評価するためには、システムと相似なモデルをつくり、それをシミュレーションすることで、評価することが有効な方法であると考えられる。旧来から、交通現象を扱うシミュレーションモデルは数多く開発されてきたが、それらのモデルは、それぞれ個別の目的に応じたものが多く、シミュレーションのアルゴリズムもモデルに依存している。また、細かな要因まで考慮してモデル作成することは困難な作業であり、さらにそれをシミュレーションするアルゴリズムも複雑になるといった運用の柔軟さにかけるという欠点をもっていた。

本論文で提案するペトリネットによる交通現象のモデル化では、単純な基本モデルを作成し、それを

\* キーワード：ペトリネット、交通計画、交差点シミュレーション

\*\* 学生会員 金沢大学大学院 工学研究科専攻

(〒920 金沢市小立野2-40-20)

\*\*\* 正会員 工博 金沢大学教授 工学部基礎工学教室

(同上)

組み合わせることで、複雑な現象システムのモデル化ができる。例えば、”1台の車の挙動モデル”，”信号制御モデル”を基本単位として”交差点モデル”が作成できる。さらに、”交差点モデル”を基本単位をして、それらを連結することで”道路ネットワークモデル”が構築できる。したがって、このネットワークモデルの最小単位モデルは、”1台の車の挙動モデル”であるので、車1台の挙動を扱えることができるネットワークモデルが作成される。ペトリネットでは各段階のモデル構築が同一手法で行え、シミュレーションアルゴリズムは、ペトリネットルールに基づいているため不変であるという特徴を持っている。この意味においてペトリネットモデルは、従来のモデルに比べ柔軟性をもっており、拡張性にも富んでいる。本論文は、道路ネットワークモデルの基本単位モデルとなる交差点モデルのペトリネットによるモデル化手法とその解析方法について検討し、その有効性についてみるものである。

## 2.交通現象のペトリネットによるモデル化

### (1) ペトリネット的にみた交通現象

ここでは、交通現象のペトリネットでのモデル化のため、交通現象をペトリネット的にとらえる。ペトリネット的というのは、現象を事象と、その生起条件、あるいは生起抑止条件で捉えるということである。そこで表-1のように交通現象の事象とその生起条件、抑止条件をとらえた。

### (2) ペトリネットによる車両進行のモデル化

ペトリネットの道具は、”○”で表されるプレース、”|”で表されるトランジション、それらを結合する”→”で表されるアークである。さらにペトリネットは、プレース内に”●”で表されるトークンを置き(マーキングという)、図-1のようにトランジションの全ての入力プレースにトークンがマーキング

表-1 事象とその生起条件

事象	事象生起条件	事象生起抑止条件
車の進行	進行空間に空きがあること。	交差点への進行時では、信号が赤であること。
信号の切り変わり	1つ手前の信号状態が一定時間続くこと。	
交差点での右折	進行空間に空きがあること。	対向車が存在していること。
追い越し	進行空間に空きがあること。	後続車が接近している。

されると、それらのトークンを取り去り、全ての出力プレースにトークンをマーキングするという挙動(トランジションの発火)を行う。そして、ペトリネットでは、現象システムの動的ふるまいは、トランジションの発火とそれに伴うトークンの移動で表現する。プレース、トランジション、トークンが意味することは、各モデルに依存するが、交通現象のペトリネットモデルでは、トランジションは事象を意味し、プレースは状態を意味しているとしてモデル化を行った。従って、プレースにトークンがマーキングされているということは、現象システムがそのプレースが意味する状態にあるということである。また、トランジションの発火はそのトランジションが意味する事象が生起したということに対応する。またそれらの入出力関係は、ある状態が事象の生起条件であれば、プレースからトランジションにアークを伸ばし、事象生起により起こる状態であれば、その逆となる。

車の進行をモデル化する上で、図-2に示す閉塞区間を仮定し、ある空間に存在する車は前方の閉塞区間が空きであればその空間に移動するということで車の進行をモデル化した。閉塞区間に存在できる車の個数は、その閉塞区間を表すプレースに車が存在できる台数分だけ、トークンをマーキングすることで表現できる。図-3にペトリネットによる車両進行モデルを示す。図-3のp0は”閉塞区間Aに車が存在している状態”を示している。p1は”閉塞区間Bに車が存在していない状態”を示しており、p2に”閉塞区間Bが空きである状態”を示すトークンがマーキングされている。t0は”車が閉塞区間Bに進入”，t1は”車が閉塞区間Bを脱出”に対応している。

車速のモデル化のために、プレースタイムという概念を導入する。これは、トークンにタイムを与え、その時間分だけトークンは発火条件にならないとするものである。従って、進行した車を表すトークン(図-3でp1にマーキングされたトークン)に対して、閉塞区間を通過するのに要する時間分だけプレース

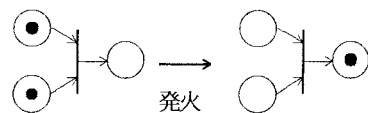


図-1 トランジションの発火

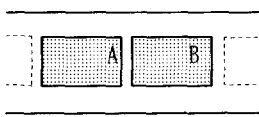


図-2 道路の閉塞区間分割

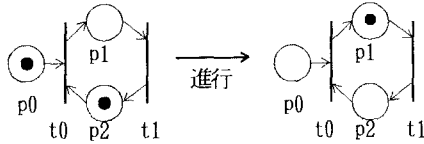


図-3 車の進行ペトリネットモデル

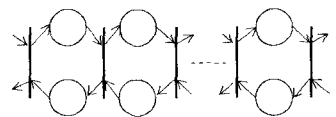


図-4 連続的車進行のペトリネットモデル

タイムを与えることで、車速は表現される。このプレースタイムの概念は、ペトリネットモデルにおいて唯一の時間進行を扱えるものである。さらにこの車進行モデルを連結することで、図-4の様に連続的な車の流れを表現することができる。

(3) ペトリネットによる諸モデル

a) 進行方向の違う車のモデル化

道路が分岐している場所では、直進車、右左折車によりその進行方向を変化させる。このことをモデル化するためにペトリネットのカラートークンの概念を導入する。カラートークンは、通常のトークンにはない”カラー”という属性を持つ。このカラートークンにより発火させられたトランジションは、そのカラーに応じて、複数ある出力プレース中から出力プレースを選択しトークンを出力する。カラートークンは、特定のトランジションが発火したときに作られる。

分岐点における車両進行のモデル化のために、図-5に示す閉塞区間を設けて考える。閉塞区間Aを脱出する車は、左折車、右折車の種類に応じて、次に閉塞区間Bあるいは閉塞区間Cに進入する。右折車、左折車の種類をカラーとしてトークンに与え、発火時の出力先を選択することで、この現象を図-6の様にモデル化する。図-6のp0は”閉塞区間Aに車が存在している状態”であり、このプレースにはカラートークンがマーキングされる。p2が前方区間の空気を表すプレースであり、p1, p3は閉塞区間B, Cに対応している。p0中のカラートークンは、そのカラーにしたがい、p1またはp3に発火により移動する。また、進行した後の車を表すトークンに対して、閉塞区間進行に要する時間をプレースタイムとして与える。

b) 車による進行抑止のモデル化

交差点内で右折しようとしている車が、対向車が進行してくるために、その進行が抑止されるという現象は交差点でよく見られるものである。実際現象では、車が右折進行するかしないかは、対向車の車

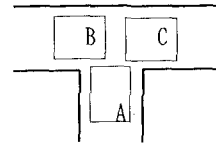


図-5 分岐点の閉塞区間分割

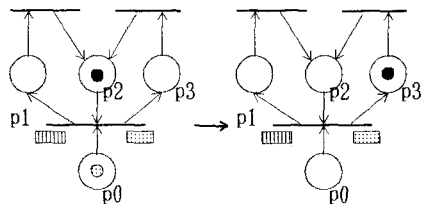


図-6 分岐点における車両挙動のペトリネットモデル

速、車種、距離等に影響されると考えられる。しかしここでは、単純に対向車の距離だけに影響されるものとして、モデル化を行う。

車両進行抑止のモデル化のために、ペトリネットの抑止アークという概念を導入する。通常、アークは”→”で表され、トランジションの発火条件となるが、抑止アークの場合”—○”で表されトランジションの発火を抑止する働きを持つ。つまり、トランジションは、抑止アークと連結されているプレースにトークンがマーキングされている場合は、発火できなくなるというものである。

右折車の挙動のモデル化のために、交差点内部の右折車と対向直進車が交差する部分を図-7のように閉塞区間に分割する。(2)の考えにしたがって、車進行のペトリネットモデルを作成する。閉塞区間A2を脱出する右折車は、閉塞区間B1, B2に車が存在する場合は、右折行為が抑止されると考える。したがって、この現象のペトリネットモデルは、閉塞区間B1, B2を表すプレースから”右折車がA2を脱出”を表すトランジションに対して、抑止アークを伸ばすことで作成できる。右折時の車の挙動をあらわすペトリネットモデルは図-8になる。

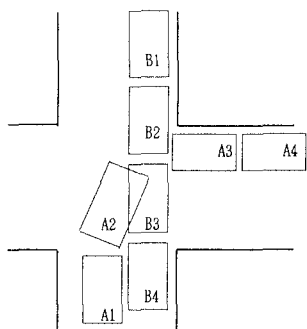


図-7 右折車進行のための閉塞区間分割

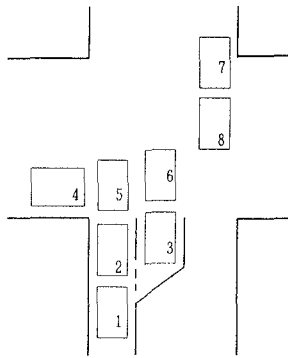


図-10 閉塞区間分割

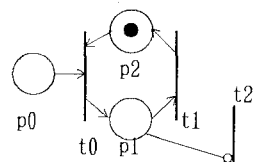


図-11 対向車抑止ペトリネットモデル

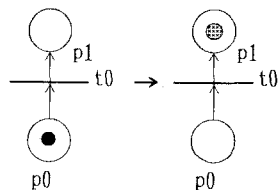


図-12 車発生のペトリネットモデル

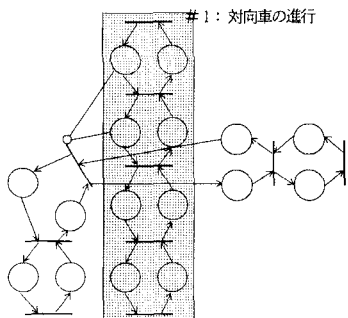


図-8 右折車進行を表すペトリネットモデル

c) 信号制御のモデル化

信号については、青状態、黄色状態、赤状態の信号の状態を示すプレース群を設ける。信号が赤であると車は進行できなくなるので、信号のペトリネットモデルは、“信号が赤”を表すプレースから“車が交差点へ進入”を表すトランジションに対して抑止アークを伸ばすことで作成できる。また、信号時間として、プレースタイムを各信号プレースにマークされたトークンに対して与えることで、信号時間のモデル化を行う。図-9に信号制御のペトリネットモデルを示す。図-9で、 $p_0 \sim p_2$ は信号状態を示し、信号赤状態を示す $p_2$ からは、“交差点への進入”のトランジション $t_3$ へ抑止アークを伸ばす。 $t_0 \sim t_2$ は信号切り替わりのトランジションである。青、赤、黄色の他にも、右折専用信号などの信号の状態があるときには、その状態を表すプレースを加えれ

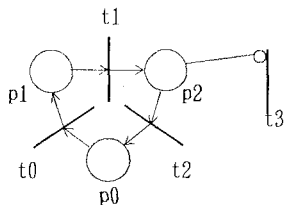


図-9 信号制御ペトリネットモデル

ばよく、時差式信号の場合には、各信号でプレースタイムの与え方を変えることでモデル化できる。

3. 交差点システムのモデル化

(1) システムのモデル化

今回仮定した交差点システムは、単路部は片側1車線で、交差点入口に右折専用レーンを持つものである。この交差点システムに対し、交差点入口における、1方向のみの車両の挙動をペトリネットモデル化した。まずこの部分を図-10のように閉塞区間に分割し、2(2)に従い車両進行モデルを作成する。

車速については、車1台が存在することができる閉塞区間を単位閉塞区間とし、ここを通過するのに要する時間は、一律に0.6秒であるとして、プレースタイムをトークンに与えた。

対向直進車による右折車の抑止は、図-8の#1の部分をも簡略化した図-11のモデルを作成した。図-11で $p_0$ は閉塞区間7(図-10中)に、 $p_1$ は閉塞区間8(図-10中)をそれぞれ示す。 $p_2$ は“閉塞区間8が空き”を表している。 $t_0, t_1$ は対向車の閉塞区間8への進入と脱出を示している。 $t_2$ は“右折車進行”を表し、 $p_1$ から抑止されている。また、 $p_0$ に適当な時間間隔でトークンを発生することで対向直進車の発生をモデル化した。

車の到着のモデル化は、図-12の様に特定のプレースに適当な時間間隔でトークンを発生させることでモデル化した。図-12の $p_0$ に適当な時間間隔でトークンが発生し、発生したトークンは $t_0$ を発火させることで $p_1$ に移動する。その際右折車が直進車である

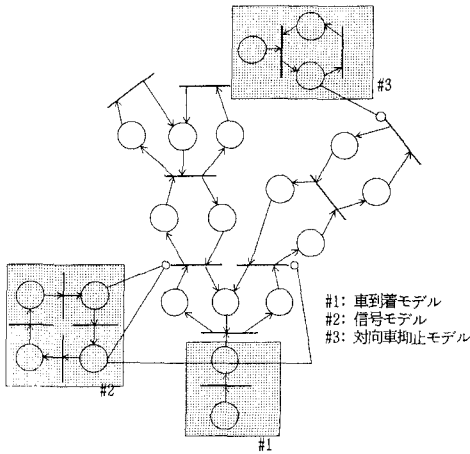


図-13 交差点システムペトリネットモデル

かの属性がカラーで与えられる。p1 は閉塞区間1 (図-10 中) を表すプレースである。

信号については、右折用矢印信号を持つものとしたので、この状態を表すプレースを図-9の信号制御モデルに付け足すことでモデル化できる。また、歩行者の存在はないものとした。

今回のモデル化では、モデル再現性の検証は行っていないので、プレースタイム時間は実際の意味を持っていない。

上述の仮定と2での諸ペトリネットモデルを構成することで、システムモデルは完成する。システムモデルを図-13 に示す。

#### (2) 時間進行機構

本論文でのペトリネットモデルのシミュレーションでは、発火するトランジションが無い場合に時間進行を行うという時間進行機構をとった。その際の時間進行のさせかたは、無駄なチェックを省くという観点から、可変時間増加法をとる。一般に可変時間増加法では、最早事象生起時刻に時間は進められるが、ペトリネットモデルでの事象発生とは、トランジションの発火、あるいは自然発生トークン(車の到着のようにトランジションの発火によらず発生するトークン)の発生である。

事象生起であるトランジションの発火の必要条件は、トークンのプレースタイムが解除されていることなので、発火するトランジションがなくなった時、仮最早事象生起時刻として、現時刻に最も近いプレースタイム解除時刻、あるいは自然発生トークン発

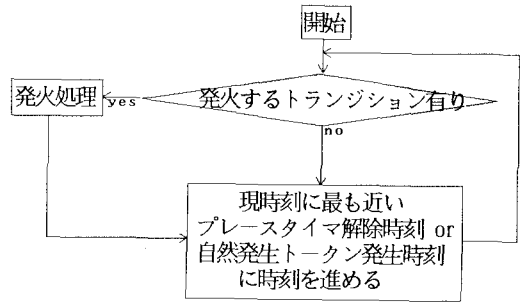


図-14 時間進行アルゴリズム

生時刻に時間は進められる。ペトリネットシミュレーションではこれらの時刻に現時刻をあわせていくことで、シミュレーション時刻が進行していく。図-14 に時間進行アルゴリズムを示す。

#### 4. シミュレーションによる解析法

ペトリネットシミュレーションでは、トランジション発火回数やプレースのトークン保持数を調べるにより様々なシステムに関する情報を得ることができる。例えば、交差点モデルの場合、ある空間を表すプレースのトークン数を数えることで、渋滞長を得ることができるし、また、ある空間からの車脱出を表すトランジションの発火回数を数えることで、その空間を車が何台通過したかが分かる。

解析例として、3のモデルにおける、右折車線容量と右折信号時間を変更した時の交差点入口に存在している車の数を算出する。右折専用信号時間は、その状態を表すプレースにマーキングされたトークンに、プレースタイムとしてあたえることで表現する。右折容量は図-10 における閉塞区間3の空きの個数としてとらえることができる。したがって、その空間の空きを表すプレースに、右折容量分だけトークンをマーキングすることで表現できる。右折容量が5台の場合の初期シミュレーション画面を図-15 に示す。ただし、画面右下の信号を表すプレースからの抑止アーク、信号切り変わりのトランジションは省略してある。また、対向直進車のペトリネットモデルも図-11 のp1以外は画面では省略してある。

出力は、図-10 の閉塞空間1~3に存在する車であるので、図-15 のp1, p2, p3, p5, p10, p12のプレースのトークン数を数えることで算出する。図-16 にシミュレーション結果を示す。①が右折信号なし、右折レーン1台、②が右折信号10秒、右折レーン5

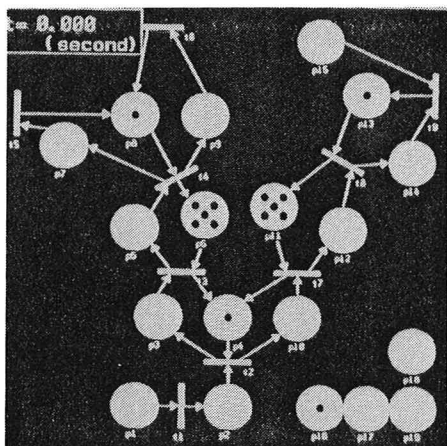


図-15 シミュレーション初期画面

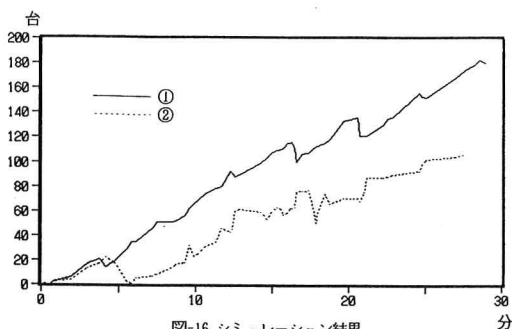


図-16 シミュレーション結果

台である。その他のパラメータは、車到着率は20分台/分、対向車到着率20台/分、青信号時間60秒、黄色信号時間3秒、赤信号時間は赤以外の信号状態の時間の合計であり、シミュレーション時間は30分である。ただし、結果についてはモデルそのものの再現性を検証していないので、実地的意味は持たない。

## 5. あとがき

本論文では、システムを部分的にモデル化し、それらを組み合わせることで、より大きなシステムモデルを構築するというペトリネットでのモデル化手法を用いて、交差点モデルを作成した。この方法では、複雑にみえる現象も比較的簡単にとらえモデル化できる。さらにこのことから、考慮していなかった要因を、新しくモデルに付け足す場合にも、そのペトリネットモデルを既存のモデルに付け足すだけで対応できるということもいえる。

本論文では、車の挙動モデル、信号モデル等を基

本モデルとして、交差点をペトリネットモデル化した。次に、交差点モデルを基本モデルとして道路ネットワークモデルを構築することが考えられる。この場合には、交差点間を連結する単路部のペトリネットモデルを作成し、それを用いて交差点モデルを連結すればモデルが作成できる。このようにペトリネットでは、同一の手法でモデルを作成することができ、さらにペトリネットシミュレーションでは、ペトリネットモデル自体に変更があっても、ネットの挙動はペトリネットルールにしがっているため、シミュレーションアルゴリズムには変更の必要はなく、シミュレーションモデル作成の労力が少なくてすむ。

本論文では、ペトリネットシミュレーションの例として、交差点システムを取り上げたが、ブレースタイマ時間の厳密化、歩行者等の要因の追加などを行った後で、再現性の検証をする必要がある。また、交差点モデルを連結させてネットワーク解析をする場合には、交差点を連結する単路部のペトリネットモデルを作成しなければならない。

(参考文献)

- 1) J.L. ピーターソン著、市川淳信、小林信訳、ペトリネット入門、共立出版社、1984
- 2) 村田忠夫：ペトリネットの解析と応用、近代科学社、1992
- 3) 椎塚久雄：実例ペトリネット、コロナ社、1992
- 4) 古川俊夫、堀江清一：道路交通情報システム、オペレーションズ・リサーチ、4月号、pp. 206 ~ pp. 211、1990
- 5) 栗本譲：道路交通流のデジタル・シミュレーション・モデル、土木学会論文集 第302号、1982年4月