

バス交通流シミュレーションへのペトリネットシミュレータの適用化研究

Application Study of Petri-Net Simulator to Bus Traffic Simulation

木俣 昇* 西村武敏** 四藤一成***

by Noboru KIMATA, Taketoshi NISHIMURA, Kazunari YOTSUFUZI.

1. まえがき

都市内渋滞対策の柱の一つとして、国内外でバス優先策による走行性改善と、その結果としての需要転換が検討されている^{1)~5)}。この検討には、バス優先策の諸アイデアの発想とそれらの具体システム化、およびその効果評価の支援を行うバス交通シミュレーションシステムが必須となる。バス交通シミュレーションシステムの研究は、いくつか報告されているが、後者の効果評価の支援が主で、アイデアの発想とそのシステム化の支援面に課題を残している^{3)~5)}。

著者らは、視覚的なネットモデルで対象交通流を記述し、シミュレーションを実行する交通流ペトリネットシミュレータ^{6)~10)}の開発を行ってきた。この方式の特徴の一つは、交通流を道路の時空間を車両が安全に占有する事象の継続的生起として捉えて、道路空間と直接かつ視覚的に対応するネット形式で記述するところにある。この特徴は、交通計画とは、限定された道路の時空間を車両にいかにして安全かつ効率的に占有化させるかの工夫であると捉えれば、交通計画の諸アイデアの工夫支援に有効に働くものとなるだろう。

バス優先策の検討とは、大型車であるバスに、限定された道路時空間を、安全かつ効率的に占有化させるアイデアと、その評価を行うことに他ならない。本研究では、まず、この特徴を活かし、一般車と大型車であるバスの道路空間の占有性を、道路空間と直接かつ視覚的に対応する記述ネット化技法を示す。

次に、ペトリネットシミュレータのもう一つの特徴である即時実行性を活かし、開発ネットの適用化の検討を行う。まず、大型車であるバスの基本走行特性は、可変プレースタイマ^{6)~10)}の拡張化によって再現できることを、基本ネットのシミュレーシ

ン実行で示す。次に、実道路区間での適用化に必要な部分ネットを示し、それらの結合化によるシステムネット構成の基本技法を整備する。そして、金沢市都心部道路を対象に、バス専用レーンの運用時・非運用時のシミュレーション実行例性を示し、今後の実用化に向けての課題を整る。

2. ペトリネットによるバス交通の表現策

(1) 大型車の閉塞区間差ネットによる表現法

交通流のペトリネットシミュレータでは、まず、図-1 に示すように、道路を閉塞区間に分割し、その空間を相互に補完関係(complement)にある2つのプレース、即ち、 $p(-2)$ 型の“車両の存在”を示すプレースと、 $p(-1)$ 型の“空間の空き”を示すプレースの2つで記述する。そして、車両の進行を、前方の閉塞区間への移動事象とし、この事象(トランジション t)の生起条件を、上記の2つのプレースとの関係で、当該閉塞区間に車両が存在し、かつ前方の閉塞区間が空きのときとし、図-1 に示すようアロー関係を持つネットで記述する。

図-1 のネットでのトークン(車両には●, 空間には○)のマーキング状態は、1 車線の道路で、左端の閉塞区間に車両が存在し、その前方の2つの閉塞区間が空いていることを示している。従って、トランジション t_1 は、生起条件を満たし、当該車両は、ペトリネットの“発火則”により、次の閉塞区間の安全な占有性が保証される形で進行して行くことになる。

従来のネットでは、一般車のみの走行を想定しており、道路は閉塞区間長を6.7mとして分割している。大型車であるバスについては、文献4)の想定と同様に、その占有閉塞区間長は一般車の2倍と考えてネット化する。具体的には、図-2(1)のネットのように、“バスの存在”を示す $p(-3)$ 型のプレースを新たに導入

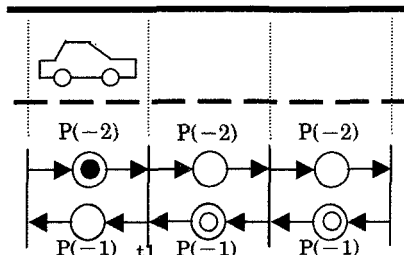


図-1 車両走行のペトリネット記述

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, Fax. 076-234-4915

E-mail kimata@t.kanazawa-u.ac.jp)

** 学生員 同自然科学研究科環境基盤工学専攻

*** 正員 計画情報研究所 (〒920-0042 金沢市

長田 2-26-5 MTK ビル 304

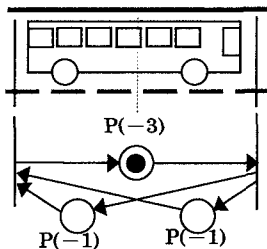


図-2(1) 大型車サイズの表現化

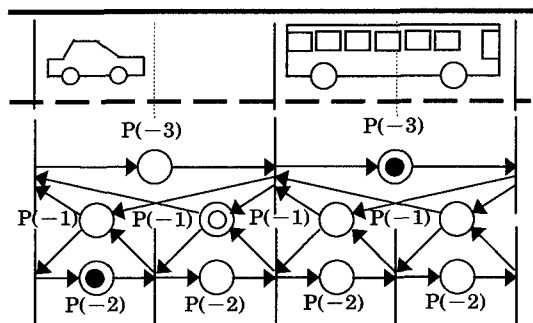


図-2(2) 混在流ネット構成

する。この型のプレースには、従来の”空間の空き”を示す $p(-1)$ のプレースが 2 個対応することになる。そのネット表示化が、図-2(1)である。

図-2(2)のネット図は、これと図-1 の一般車の進行ネットとを、空間対応性を意識して結合させたものである。即ち、混合流の道路時空間の占有性は、“バスの存在”、“一般車の存在”、および”空間の空き”のいずれかであり、 $p(-3)$ 、 $p(-2)$ 、および $p(-1)$ の 3 種類のプレースで記述できるとするものである。

図-2(2) のネットでのトークンのマーキング状態は、やはり 1 車線の道路で、左端の閉塞区間に一般車が存在し、その前方の 1 閉塞区間が空きで、その先にバスが存在している混合流を示している。この場合、混合流での追従走行の諸パターンは、ランジションの発火則により、一般車に一般車が追従するとき、及びバスに一般車が追従するときには 1 閉塞区間長が、一般車にバスが追従するとき、及びバスにバスが追従するときには 2 閉塞区間長が、それぞれ最小車間隔として自動的に確保されることになる。

一般に成立するとされる前方車 i と後方車 j 車頭間隔 h_{ij} で言えば、 C を一般車、 B をバス とすれば、

$$h_{CC} \leq h_{BC} < h_{CB} \leq h_{BB}$$

という形で実現されることになる。

(2) 大型車の走行特性の表現法

次に、大型車の走行特性の組入を考える。ペトリネットシミュレータでは、車両の走行特性は、車両を表すトークン($p(-2)$ 型プレース上のもの)に対するタイマ更新ルールによって表現されている。具体的

表-1 vptimer.txt (加速更新表)

進行先	0.80	0.60	0.40	更新率
当該	1.20	0.80	0.60	(-2) の設定
	2.40	1.20	0.80	
	else	2.40	1.00	
進行先	1.40	1.20	0.60	更新率
当該	1.55	1.40	0.70	(-3) の設定
	1.75	1.55	0.80	
	1.95	1.75	0.90	
	2.35	1.95	1.00	
	4.80	2.35	1.00	停車判定
	else	4.799	1.00	発進遅れ
lagtime	4.8	1.2		

表-2(1) 一般車の加速更新表

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	速度	滞在時間	速度	
$t \leq 0.80$	$30 \leq v$	0.6	40	
$t \leq 1.20$	$20 \leq v$	0.8	30	
$t \leq 2.40$	$10 \leq v$	1.2	20	
$t < 2.40$	$10 < v$	2.4	10	
発進遅れ				1.2 (秒)

表-2(2) 大型車の加速更新表

閉塞区間長		13.2 (m)		車速更新率 (%)
当該閉塞区間		進行先閉塞区間		
滞在時間	速度	滞在時間	速度	
$t \leq 1.4$	$34.3 \leq v$	1.2	40	60
$t \leq 1.55$	$31.0 \leq v$	1.4	34.3	70
$t \leq 1.75$	$27.4 \leq v$	1.55	31	80
$t \leq 1.95$	$24.6 \leq v$	1.75	27.4	90
$t \leq 2.35$	$20.4 \leq v$	1.95	24.6	100
$t \leq 4.80$	$10 \leq v$	2.35	20.4	100
$t < 4.80$	$10 < v$	4.8	10	100
発進遅れ				1.2 (秒)

には、進行先の閉塞区間での滞在時間(その逆数が走行希望速度)は、当該閉塞区間での滞在時間(その逆数が現走行速度)を基に、表-1 に示すような **Vptimer.txt** に記載した表を参照して、更新率に従って加速が現状かに確率的に更新される。

現ソフトウェア⁸⁾では、この更新表は、複数のプレース型を想定し、型別に設定することが可能な設計となっている。図-2 のネット記述では、“車両の存在”を示すプレース型は、 $p(-2)$ と $p(-3)$ の 2 つを使用しており、これに対応して、表-1 の下欄に示すように、プレース $p(-3)$ 型を定義し、大型車の走行特性を設定することになる。表-2 は、この表をより直接的な速度対応で示し直したものである。

発進遅れ処理は、表-1 の最下欄の“lagtime”行に記載する数値を用いて行われる。即ち、当該プレースでの滞在時間が 4.8 秒を越えた車両は“停車”と判断

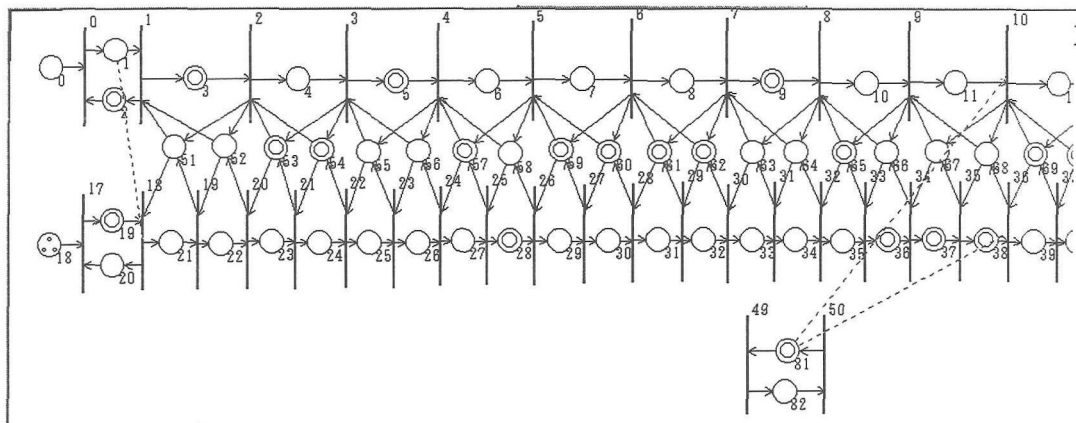


図-3 混在流ネットの実行画面例

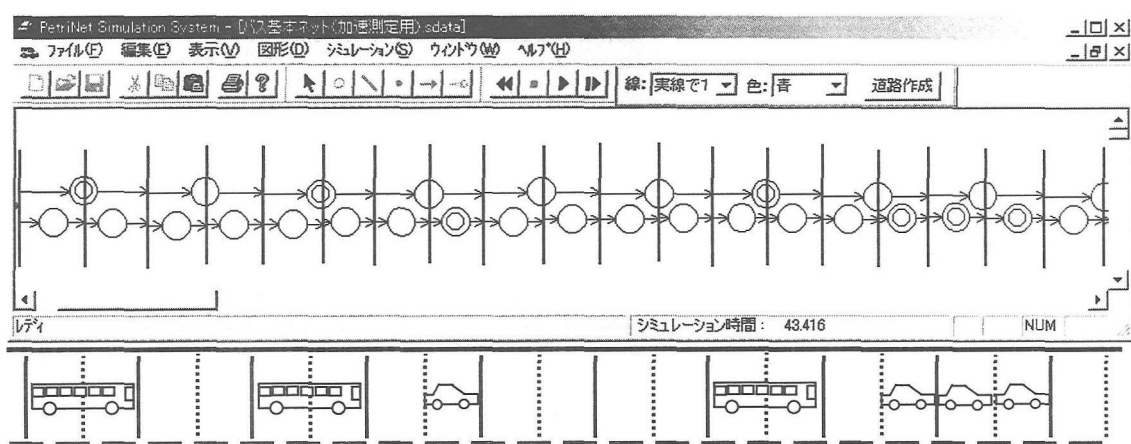


図-4 ネットの空間視覚化表現例

され、その車両進行トランジションは、発火可能時刻から設定した一定の遅れ時間(1.2 秒)後に発火し、それに上述の车速更新幅とその更新率とが作用した結果として実効化される。

(3) バス混在流ペトリネットの構築と駆動事例

大型車であるバス走行を導入するために、p(-3)という新しいプレース型を定義し、図-2 の(2)のような混在流ネットを構成し、また、表-1 のような Vptimer.txt への拡張化を行った。この拡張化ネットは、現汎用型ソフトウェアで直ちに駆動することができる。

図-3 は、図-2 の(2)のネットの左端に、バスと一般車の発生部分ネットを結合化し、さらに、車両走行特性を検証するための簡易信号部分ネットを付加したシステムネットで、現ソフトウェアを用いてコンピュータ上に構築した部分画面である。このネットの駆動は問題なく実行された。実際、図-3 は、画面下に示すように、43.416 秒後の時点での車両の位置関係を示す出力トークン配置図である。

図-2 の(2)ないしは図-3 のネットは、1 車線の混在

流を記述したものである。しかし、図-3 の表示ではこのことが十分に視覚化されているとは言い難い。この難点に対する工夫として、われわれのソフトウェアには、ネットの構成要素(プレース、トランジション、アロー)の表示・非表示を選択的に指定し、さらにマウス操作によってネットを部分移動させる機能を組み込んでいる。図-4 は、この機能を活用し、まず、“空間の空き”を示すプレース群を全て非表示とし、さらに、バスと一般車の“車両の存在”プレース群を、マウスによって近接移動させた画面例である。ちなみに、下方は、このネット画面での混在状況(トークン配置)を、バスと一般車のシンボルを用いてアニメーション風に表示したものである。

図-3 の簡略信号のトークンが p81、即ち赤プレースに在ることから、前方 3 台の一般車は停車中で、その後方から、バス、一般車、バス、バスと走行していることが分かる。

前述したように、バス優先策については、限られた道路空間の中で、その時空間をいかにしてバスに優先的に割当てることが重要な検討課題となる。本シミュレータのこれらの特徴は、対象地域の特性を考慮し、その物理的な実空間と対応させ、バス優先策の諸アイデアをミクロに検討する上で大いに役立つと考えている。この点は別に論じるが、本ソフトウェアでは、さらに実道路や計画図面を背景画像として取り込み、その上でネット図を展開する機能も備えており、この特徴を引き出すのに優れていることを付記して置きたい。ここでは、図-3 のシステムネットを用いて、大型車の走行特性の表現性を、一般車との比較を含めて検証する。

本シミュレーションでは、まず、図-3 の簡略信号の赤ブレース(p81)にトークンを初期配置し、停止線トランジション(t10,t36)の発火を一定時間抑止し、到着車両に待ち行列を形成させる。そして、青信号(p82)に変わった後、それらの車両を表-1 のVptimer の下で発進・走行させ、各々の発進・走行状況を、閉塞区間毎の滞在時間を計測することで求める。走行速度は、上述したようにそれらから逆算すれば求まる。

車両発生は、図-3 の発生ブレース(p0,p18)の一方のパラメータを 0(台/分)とし、大型車のみのケースと一般車のみのケースに分けてシミュレーションを実施し、計測を行う。このシミュレーションを、車両発生の乱数初期値を変更し、繰り返し実行し、大型車 259 台のサンプルデータを得た。図-5 に、それらの平均値を用いて作成した走行特性を示す。一般車の走行特性の検証は、文献 7)で報告しており、ここでは、組み入れた大型車の走行特性との比較のために掲載した。また、大型車の加速実験値は、文献 11)のものを使用した。

まず、この比較図から、本方式では、一般車は比較的直線的に最高速度に向かう走行特性を示すが、大型車は 20(km/h)を境に加速性に差が出る走行特性を示すことが分かる。また、“lagtime”は、一般車も大型車も共通値としているが、この走行特性差によって、実効発進遅れは、大型車の方に大きく出ることになる。2.(1)で述べた車頭間隔でいえば、明白に、 $h_{bc} < h_{cb}$ となる。

以上のように、ほぼ実験値が再現されているといっていよう。しかし、より厳密にはバスの走行実験値による確認が望ましいことは当然であり、今後の課題の一つと考えている。

3. バス交通流の基本部分ネットの組み込み

バス交通のシミュレーションには、さらに、バス停留所で挙動やその近辺での一般車の挙動、さらに

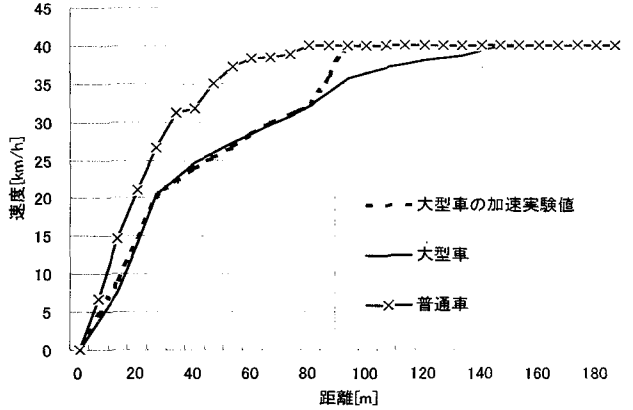


図-5 車両加速のシミュレーション結果

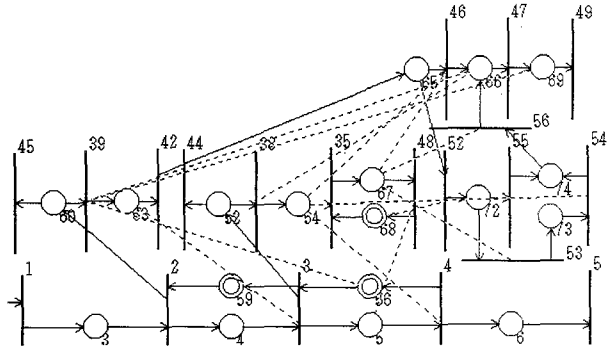


図-6 2 バスのバス停部分ネット図

バス専用レーンの運用の有無や規制等を記述する必要がある。これらの記述ネットは、既に開発してきた手法の応用で構築が可能で、それらを図-3 のネットを基本形として、対象道路空間に対応させて拡張させた本体システムネットに結合することで適用システムネットが構築できる。ここでは、バス停留所での乗降サービスと、一般車の停車中バスの追い越し部分の記述ネットを中心に説明する。

(1) バス停乗降サービス部ネット

図-6 は、2 バスの乗降スペースを有するバス停留所の記述部分ペトリネットである。まず、このネット図の下方ブレース部は、路側レーンの左方向からの走行ネットの一部で、図-3 に示した混在ネットのバスの走行部である。部分ネットのためにブレース(○)やトランジション(I)の番号が飛び番になっており、少し煩雑だが、この図で記述原理を概説する。

このネットの“バスの存在”を表すブレース(p4,p5)に併置した 2 つのブレース(p56,p59)が、乗降 2 バスの“空間の空き”を表すブレースである。そして、その上部に配置した部分ネットが、乗降 2 バスの状況に応じて、到着バスの停車位置を制御し、乗降サービス時間に応じてバスの発車制御を行う部分ネ

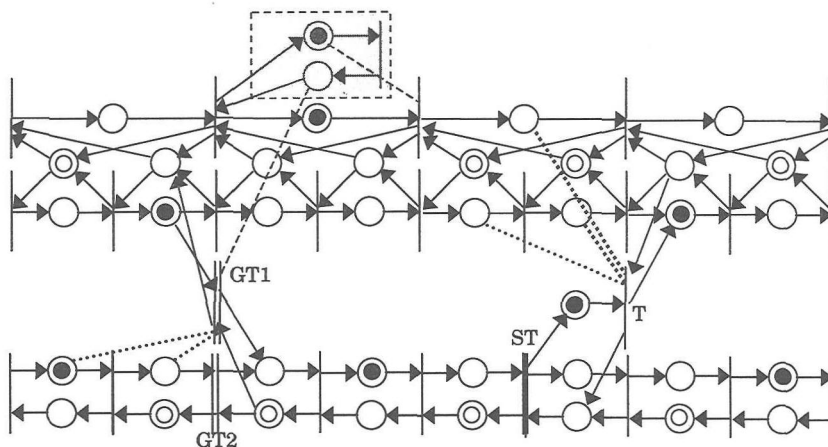


図-7 バス停付近での追い越し部分ネット

ットである。バース数の想定は、バースの“空間の空き”を示すプレースの併置数を変更し、それに伴い制御部分ネットを修飾することによって取り扱うことになる。

2 バースのケースでは、①両バース共に空き、②前方バース占有、後方バース空き、③前方バース空き、後方バース占有、④両バース共に占有の 4 状態が起きる。図-6 の制御部分ネットでは、バス停到着バスは、これらの 4 状態に対して、①の状態では前方空きバースに、②の状態では後方空きバースに停車し、乗降サービスを行い、③と④の状態では、手前で停車し、乗降サービスは行わないとしてモデル化している。

まず、①の状態で到着すると、 t_2 が発火し、トークンは p_4 と p_{60} に移動する。しかし、 p_{60} のトークンは t_{39} が p_{56} のトークン(前方バース空き)で抑止されているために、 p_{63} に進まず、従って、 t_3 の発火は抑止されず、トークンは p_5 に進む。このとき p_{52} にマーキングされたトークンは p_{54} に進み、 t_4 を抑止することになる。即ち、バスは前方空きバースに停車し、 p_{54} のタイマ分の乗降サービスを行うことになる。

②の状態で到着すると、 p_{56} にトークンは無く(前方バース占有)、 t_{39} は抑止されずに発火し、トークンは p_{63} に進み、 t_3 の発火を抑止し、バスは後方空きバースに停車し、乗降サービスを行うことになる。 p_{63} のタイマが切れて、乗降サービスが終了すると、 t_3 と t_{42} が共に発火し、トークンは p_5 、 p_{52} に移動すると共に、 p_{65} 、 p_{66} にも移動する。 p_{66} のトークンが t_{38} を抑止するために、今度はトークンは p_{52} から p_{54} には進まず、従って t_4 は抑止されることはなく、バスは p_5 には留まらない。即ち、前方バースと後方バースの両方で 2 度乗降サービスを行うという不都合が発生することはない。

③と④の状態で到着すると、 p_{59} にはトークンが

無く、従って t_2 の発火は起きない。即ち、到着バスは手前の閉塞区間 p_3 で停車し、前方のバースの乗降サービスが終了するまで待機することになる。

現実には、④の状態では後方バースの方が、後方バースのバスより早く乗降サービスを終了し、②の状態になるケースや、④の状態から③の状態になり、後方バースのバスが乗降サービスを中断し、前方バースに移動し、乗降サービスを行うケースもある。ここでは、前述の仮定で論を進める

(2) 一般車のバス停近辺の挙動部分ネット

路側レーンを走行している一般車は、バス停で乗降サービスのために停車しているバスがいるとき、中央レーンに車線変更をしてバスを追い越すだろう。図-7 は、上方にバス停近辺の路側レーンの混合流ネットを、下方に中央レーンの一般車走行ネットを配置し、ペトリネットの特殊要素であるトークンカラー生成トランジション(GT)と、選択トランジション(ST)を用いて、この一般車の走行挙動を記述するネット図である。

ここでは、中央レーンに 3 台分のギャップがあるとき、停車中バースの後方一般車は、中央レーンに車線変更することができ、さらにそれが左折車であれば、バス停先で再度安全確認をして路側レーンに車線変更をして戻り、もし直進ないしは右折車であれば、そのまま中央レーンを走行すると仮定している。

上方と下方のネットを繋ぐトランジション GT1 は、路側レーンに再度車線変更する左折車属性カラーをトークンに付与するカラー生成トランジションでもある。上方の路側レーンを進行してきた車両(トークン)は、バス停にバスが停車していないときは、この GT1 には抑止が働くために、路側レーンのトランジションを発火させ、そのまま進行するが、バスが停車しているとこの抑止は働かず、中央レーンに 3 台分のギャップがあると GT1 の方を発火させ、属性カラーの付与を受け下方の中央レーン側のプレースに

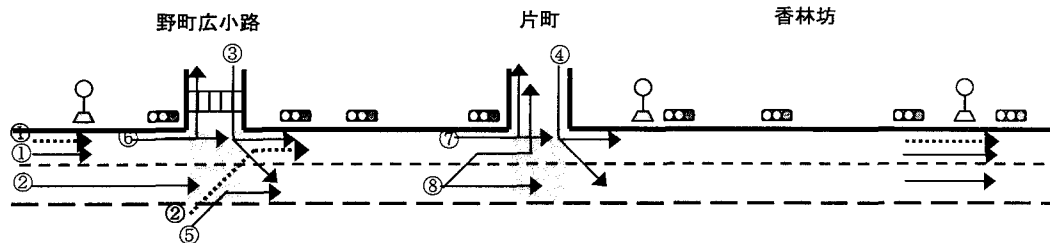


図-8 シミュレーション対象区間概念図 (.....: バス →: 一般車)

進行する。左折車属性カラーを付与されてきたトラックは、下方ネットの選択トランジション ST によって識別され、中央のプレースに選択出力され、トランジション T を発火させ、上方の路側レーンに復帰するというネット構造となっている。

この復帰部分のネットは、路側レーンをバス専用レーンとして運用するネットにも使用できる。具体的には、運用時には、一般車はバス専用レーンの占有化が制約され、基本的には全て中央レーンを走行し、左折車のみが指定された地点で侵入することが許される。まず、この中央レーン側のネット上に左折車属性カラーを付与する GT2 を設置し、そのパラメータに一般車の左折比率を設定し、次に、図-7 と同様に、ST と T と第三のプレースからなる復帰部分のネットを、指定される左折車進入地点に配置し、路側レーンと中央レーンネットを結合することで、この運用時制約を組み入れることができる。

本方式は、以上のようにいわば図解的なもので、例えば、ギャップの変更は、ネット図を見て、抑止アークを変更するだけで行えるし、車両の車線変更位置もケースバイケースで変更できる。前述したように実道路画像を背景画として取り込むことで、この図解的特性はさらに有効に働くことになる。

図-6 や図-7 や上述の諸ネットは、車両発生部ネットを結合し、初期設定を行うことで、いずれも即シミュレーション実行が可能となる。そして、駆動結果は、図-3 や図-4 に示したような実行画面に逐一表示される。われわれは、信号の現示状況、バスや一般車の空間位置、走行挙動を視覚的に確認することで、その妥当性を自己の経験で判断し、さらに、対象道路空間の知識から、記述ネットの修正や拡張化や渋滞対策のアイディアも得ることができるだろう。しかも、それらもネット記述化ができれば即時に実行ができ、効果が確かめられる。このペトリネットシミュレータの特徴を活かすには、交通流の諸パターンをネット記述する技法整備が重要となる。本研究もその一貫のものである。

4. バス交通のシミュレーション実行と考察

(1) 対象区間と交通流調査の概要

平成 12 年 9 月 28 日に金沢市が行ったバス交通に

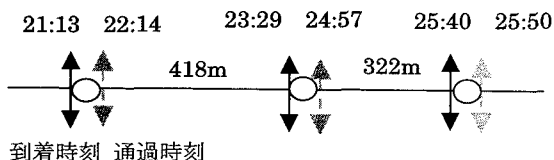


図-9 バス走行時間調査事例

関する調査結果(7:00～19:00)がある。対象は国道 157 号線の都心軸交差点で、バス・一般車の方向別直進・左折・右折の断面交通量(台/時)が求められている。また、サンプルバスの交差点到着・通過時刻が調べられている。本研究では、この調査を基に、図-8 に示す野町広小路から香林坊に至る約 1km の片側 2 車線区間のシミュレーションに、本方式を適用することを試みる。

この区間には、図に示すように、3 つの交差点があり、歩行者信号を含め 8 機の信号と、3 箇所のバス停がある。7:30～9:00 の間は、都心に向かう通勤・通学交通に対応するために、路側レーンをバス専用レーンとして運用している。本研究では、バスレーン運用時(8:00～9:00)と非運用時(9:00～10:00)のデータを用いて、両ケースのシミュレーションを行う。

まず、8:00～9:00 の時間帯の交通量(台/時)は、バスは、野町(図左方①)方面から 63 台、寺町(図下方②)方面から 30 台で、寺町方面からは全て右折流入である。一般車は、野町方面(図左方①②)から 636 台で、その中直進車が 503 台、左折車が 160 台で、寺町方面からは 814 台で、その中直進車が 81% を占め、右折流入車(図下方⑤)は 15% の 125 台である。また、図上方③と④からの左折流入一般車は、それぞれ 351 台と 209 台となっている。

9:00～10:00 では、バスは、野町方面から 30 台、寺町方面から 18 台で、各々 8:00～9:00 代の約半分になる。一般車は、野町方面からは 846 台と 4 割増になる。寺町方面からの右折流入は 125 台と変わらず、③と④からの左折流入も 376 台と 229 台の微増となっている。

バスの走行調査は、図-9 に示すように、各交差点での待ち行列への到着時刻と交差点通過時刻を調べたもので、全体のサンプルが少なく、該当する時間帯は 2 ケースで、いずれも非運用時のものである。図-9 は、9:21:13 に野町広小路交差点に到着したバス

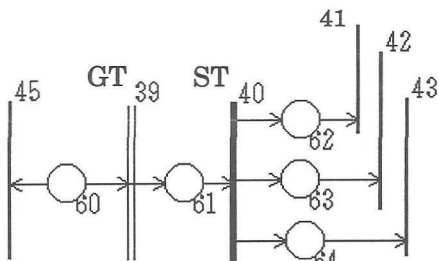


図-10 3点サービス時間生成の部分ネット

のデータで、第一交差点で1分15秒、第二で1分28秒と信号停車し、第三交差点は10秒で通過し、野町広小路交差点から香林坊交差点通過までの旅行時間は4分37秒、旅行速度では9.6 km/hとなっている。もう1ケースも9:58:25に到着したバスで、旅行時間は6分15秒、旅行速度では7.1 km/hとなっている。以下では、これらの調査を基に本方式の適用によるシミュレーションを試みる。

(2) シミュレーションネットの構築

本シミュレーションでは、図-8の左方向から右方向への交通流を主流として、バスに焦点を当て、バス専用レーンの運用・非運用時のシミュレーションネットを構成する。まず、バスは路側レーンを走行するとし、図-8に示すように、同じレーンを走行する一般車の広小路・片町の両交差点での直進と左折流出を組み入れる。次に、主交通流に合流する流入交通は、上述の調査を参考に、図-8に矢線で示す4つを組み入れる。即ち、広小路交差点では、下方からのバスと一般車の右折流入(②と⑤)と、上方からの一般車の左折流入(③)で、片町交差点では、上方からの一般車の左折流入(④)を考慮する。また、左折車の走行性を制約する横断歩行者は、片町交差点はスクランブル形式であり考慮せず、広小路交差点のみで考慮する。

非運用時のシステムネットの構築は、まず、路側レーンに図-3の混合流の基本ネットを、中央レーンに図-1の一般車の基本ネットを配置し、図-7に示したような2レーンネットを作成し、図-8に示す区間長にまで拡大する。そして、それに交差点、横断歩道、信号、およびバス停の部分ネットを、それぞれの実在位置に配置・結合化する。最後に、バスと一般車の流入交通の発生部ネット、および左折流出部ネットを、前述したように、図-8の矢線で示す位置に結合化する。

バス停での乗降サービスについては、別に実測調査を行った。その結果、いずれのバス停も降車客サービスが主で、複数の山がある不定形となり、図-5のネットを部分拡張化し、使用することにした。具体的には、実測調査から、短・中・長の3点の乗降サービス時間とそれらを発生確率を設定し、図-5のネ

ットの乗降サービス時間に対応するプレースを、図-10に示すように62~64と3個用意し、生成トランジションGTで短・中・長のサービス時間属性を確率生成し、選択トランジションSTで選択出力し、バスの進行トランジションを抑止する修飾を行った。

バス専用レーンの運用時ネットは、この非運用時のシステムネットに若干の修飾を加えることで構築できる。具体的には、直進一般車は全て中央レーンを走行し、左折車は交差点手前約40mの地点で路側のバス専用レーンに車線変更し、交差点で減速・左折する修正を行う。まず、図-8で、広小路交差点での左折車は、交差点とバス停との距離が短く、例外的に既に路側レーンに入っているとし、①で発生する一般車に全て左折車属性を付与する形をとる。次に、③および④から発生的一般車の左折流入位置を、いずれも中央レーンに変更する。そして、中央レーンを走行し片町交差点で左折する一般車の路側バス専用レーンへの進入位置⑧を、交差点から約40mに設定し、部分ネットを結合する。本シミュレーションでは、従って片町-香林坊間の路側レーンは完全なバス専用レーンという想定になる。

これらの修正は、ペトリネット記述が道路空間と直接かつ視覚的に対応していることから容易に行うことができる。また、発生位置属性を車両トークンに付与するGTを用いることで、バスも一般車もいずれかから出発したかがトークンカラーで識別でき、計測地点に選択トランジションSTを配置することで、方面別に旅行時間等も求められる。

(3) シミュレーション結果と考察

シミュレーションは、i)バス専用レーン非運用時とii)運用時の2ケースで行う。それらのシステムネットについては、上で述べた。まず、(1)で概説した調査を基に設定した入力パラメータを示す。

バス(図-8の①、②)と一般車(同①、②、③、④、⑤)の発生交通量は、表-3のように設定する。バスは調査結果そのものを使用し、一般車の①と②は、実測データがなく、i)のケースでは、直進・左折車の実測合計台数を、1:1の比率で分配し、ii)のケースでは、ネット構築で述べたように、①は広小路の左折台数、②は同直進台数に設定した。

各交差点での左折・直進比率は、表-4のように設定する。i)のケースでは、図-8の⑥と⑦の2交差点については実測結果を用いる。⑧は、i)のケースでは左折車は全て路側レーンを走行するので、直進が100%となる。ii)のケースでは、路側レーンは左折車だけに規制されており、図-8の⑥では100%左折となる。②、③、⑤から中央レーンに入り走行してくる左折車は、⑧の地点で路側レーンに車線変更する。ここでの左折・直進比率は、同調査台数を基に、40:60とした。

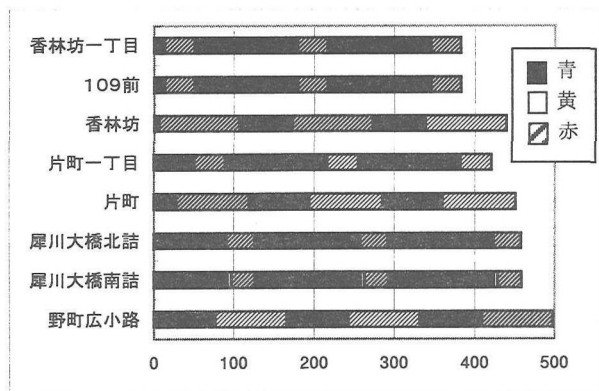


図-11 8信号のスク립トタイム表

表-5 バス停サービス時間

バス停	広小路			片町			香林坊		
	短	中	長	短	中	長	短	中	長
非運用	時間[秒]	9	15	24	14	35	67	16	31
	確率[%]	45	42	13	48	41	11	20	65
運用	時間[秒]	7	13	26	11	25	58	13	27
	確率[%]	19	53	28	29	59	12	15	67

表-6 バス走行の改善度

区間	走行速度[km/h]		改善度
	運用時	非運用時	
広小路-片町	10.00	5.51	1.81
片町-香林坊	6.91	4.99	1.39
広小路-香林坊	8.41	5.28	1.59
全区間	7.96	5.06	1.57

信号は、現地調査に基づき、図-11 に示す実測データを用い、初期設定を含めて設定した。バス停の乗降サービス時間は、前述したように、短・中・長の3点とし、これも実測調査を基に、表-5 の各時間(秒)と生成確率を設定した。

このような条件の下で、上述の2ケースのシミュレーションを実行した。実行時間は4000秒で、ここでは初期の400秒をカットした1時間分の結果を用いて交通量とバスの旅行時間の計測を行った。

まず、図-12 に、シミュレーションによるバスの交差点間の旅行速度の算定結果を示す。表-6 は、それを基にバス専用レーン運用時の旅行速度の改善度を求めたものである。また、表-7 に、各バス停での平均停車時間を示す。

次に、図-13 に、各交差点での調査交通量(台/時)とシミュレーション結果(台/時)との対比を示す。表記は、各矢線の下に[S/R]にケース i) の結果を、上の<S/R>にケース ii) の結果を掲示するもので、共に、前の数字 S がシミュレーション結果で、後の数字 R が実測調査交通量である。表-8 は、この結果を(S-

表-3 発生交通量

バスレーン		非運用	運用
バス	①	30	63
	②	18	30
一般車	①	423	133
	②	423	503
	③	376	351
	④	229	209
	⑤	125	125

表-4 一般車の左折分岐率

バスレーン		非運用	運用
⑥ 左折:直進	38	62	100
⑦ 左折:直進	86	14	—
⑧ 左折:直進	0	100	40

表-7 バス停停車時間

	広小路	片町	香林坊
非運用時	43.8	68.1	71.8
運用時	37.9	48.9	37.5

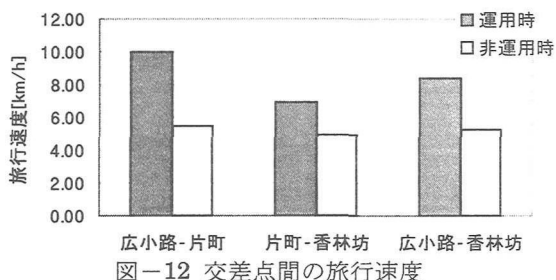


図-12 交差点間の旅行速度

R)/R で誤差表示したものである。

バスの旅行速度は、バス専用レーン運用時には、非運用時の約50%増と、優先策の効果を示す結果が得られた。しかし、実測調査では、サンプル数が2ではあるが、非運用時で7.1と9.6(km/h)であった。シミュレーションでは、それらは運用時の値に近く、非運用時は実測の50%減に近い値となっており、バスの走行性が低めになっている。表-7 の停車時間は、表-5 に示した乗降サービス時間の平均値より大きく、乗降サービス待ちがかなり発生している。広小路-片町には、信号が2機でバス停はない。一方、片町-香林坊には信号が1機でバス停がある。図-12 と表-6 の結果は、バス停の影響を示している。

非運用時には、2つの区間でのバスの走行性に差は出ていない。そして、運用時に大きな差が出ている。これは、バスと同一の道路時空間を走行性する一般車の規制効果が、道路形態によって異なることを示すものといえよう。

表-8 を見ると負の値が多く、これからも全般にシミュレーションではバス・一般車ともに走行性が低

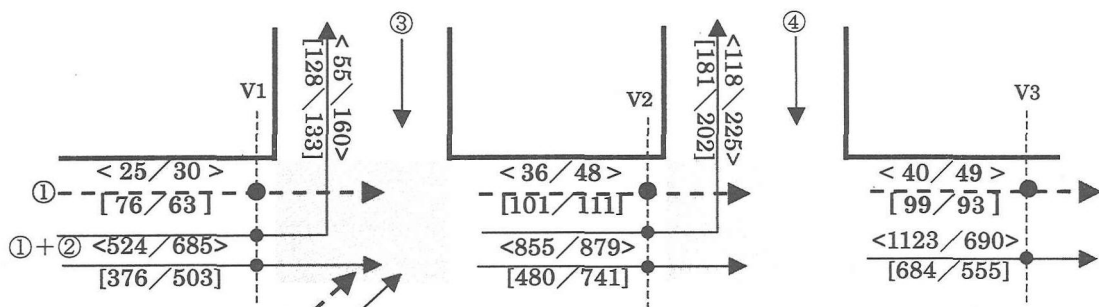


図-13 断面交通量の比較図 (- - ➡: バス ➡: 一般車)

表-8 断面交通量の誤差表

バスレーン	広小路交差点			片町交差点			香林坊交差点	
	バス	一般車		バス	一般車		バス	一般車
	直進	左折	直進	直進	左折	直進	直進	直進
非運用時	-0.17	-0.66	-0.24	-0.25	-0.48	-0.03	-0.18	0.63
運用時	0.21	-0.04	-0.25	-0.09	-0.10	-0.35	0.06	0.23

い結果となっている。個別に見ると、バス・一般車ともに非運用時の誤差が大きくなっている。特に左折車の交通量は半分程度に留まっている。これには3つの問題点が考えられる。一つは、表-3の発生交通量の想定で、実データの不足のために、一般車の発生を①(路側)と②(中央)を1:1としたが、バスも走行する路側レーンではバス分の交通量が多くなり、しかもバス停留所があり、走行性がさらに低下させられているという問題である。これには、何よりも調査の充実が必要となる。

いま一つは、シミュレーションネットの構成上の問題である。特に、第一交差点での誤差は、バス停と発生部までの距離が短いネットとなっており、発生ブレースにまで渋滞長が及び、当該区間への到着車速が15(km/h)になり、時間当たりの流入量を減らす結果となっている可能性がある。また、バス停車時に路側レーンから中央レーンへの車線変更が一地点でのネットのため、追い越しギャップが取れず、渋滞が発生することも原因である。この部分が、表-8を負にしている根子である。従って、車両発生部から交差点部までのネット長を拡張し、車線変更も中央レーン走行車の寛容度を組み入れたネットに精緻化することが、まず必要となる。表-8の最後の欄では、シミュレーション結果が実測値を大幅に越えている。これは、本シミュレーションネットでは右折流出が組み入れられておらず、直進のみになる香林坊交差点でその分が集約された結果であり、検証に際しては、この点の組み入れも必要となる。

さらに、バス・一般車の走行特性を規定する加速更新表、Vptimer.txtの問題がある。表-2に示したように、本研究では、最高速度を40km/hとしている。また、更新確率も緩やかな設定となっており、より現実的な設定を検討することも必要である。

5. あとがき

本研究では、著者らの交通流ペトリネットシミュレータを、バス交通のシミュレーションに適用化するための基礎的研究と、若干の再現性検証の考察を試みた。既開発のシミュレーションでは、一般車の走行を扱っていたが、まず、大型車であるバスを取り扱うために、一般車の2閉塞区間を占めるブレース、p(-3)を導入することで、一般車・バスの混合流の空間対応型のネットを考案し、可変ブレースタイマの更新表にp(-3)用のものを追加することで、大型車の道路時空間の占有性と、走行特性を組み入れたネット化の基本技法が示せた。

次に、この基本ネットをベースに、実道路でのシミュレーションネットを構築した。そこでは既開発の技術を応用することで、さまざまな要素の組み入れが可能となり、しかも、構築したネットが直ちに視覚的な出力系となり、プログラムの修正なしで実行に移せることを実証した。

シミュレーション結果については、実行回数、解析項目を含めて不十分であり、4.で整理したように、実調査そのものを含む検証が今後さらに必要となる。特に、限定な調査データの下で、検証レベルのシミュレーションには至らなかったが、バス専用レーン運用時と非運用時とでのバス走行性の差を、相対的レベルではあるがシミュレート出来たこと、バス・一般車の走行性の低下は、ネットの構成面と可変ブレースタイマの更新表の両方に課題があること等、実用化に向けた成果が得られたと考えている。

今後の課題は、まず、本研究の対象区間の実交通流調査を行い、それに基づきネットを再構成し、更新表をパラメータとして、より詳細な再現性シミュレーションを実行することである。さらに、本方式

の特徴を活用し、文献 1)や 2)で提案されている部分的なバス専用レーンの導入策や、バスターミナルの入出流部におけるバス優先化策の発想支援とネット開発を具体化したいと考えている。

6. 参考文献

- 1)Jianping Wu, Nick Hounsell: Bus Priority Using Pre-Signals, Transpn. Res. A. Vol.32, No.8, 563-583, 1998
- 2)D.Turner: Red Routes in London - not just red lines, Proc. Instn. Civ. Engrs. Transp., Vol. 123, 151 ~ 162, 1997.
- 3)小原, 坂本, 久保田, 他: tiss-NET によるバス優先方策の効果分析, 土木計画学研究・論文集, 16, 927-932, 1999.
- 4)鈴木, 坂本, 久保田: tiss-NET によるバス優先策総合評価システムの開発, 土木計画学研究・論文集, 17, 885-892, 2000.
- 5)佐野, 松本, 野沢, 他: 交通シミュレーションモデルを用いた優先施策の評価, 土木計画学研究・論文集, 17, 933-939, 2000.
- 6)木俣, 高木, 黒川: 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.
- 7)木俣, 千田, 白水, 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.
- 8)木俣, 岸野, 白水: 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, 19, 31~40, 2000.
- 9)N.Kimata, K.Kisino, Y.Siromizu: Development of Practical Software for Micro Traffic Flow Petri Net Simulator, J. of Civil Engineering Information Processing System in 2001, 239-248, 2001.
- 10)木俣, 横山, 西村: 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, 土木計画学研究・論文集, 118, 755-762, 2001.9.
- 11)近藤政市, 「基礎自動車工学」, 養賢堂, 1965

バス交通流シミュレーションへのペトリネットシミュレータの適用化研究

木俣昇, 西村武敏, 四藤一成

バス優先策の検討には、対象地域に応じた実空間との対応性を意識し、発想することが肝要となる。本論文は、視覚性と空間対応性を特徴とするペトリネット型交通流シミュレータを、この課題に適用するための基礎研究を行っている。まず、従来のペトリネット型交通流シミュレータでは、一般車のみを取り扱うものであり、大型車であるバスのサイズと走行特性を表現する工夫が必要であるとし、前者については、一般車の2倍の空間を占める-3の型のプレースを導入し、閉塞区間を、“バスの存在”, “一般車の存在”, 及び“空間の空き”を示す3つのプレースで記述するネットに対応し、後者については、Vptimer.txtに-3型のプレースに適用する車速更新表を付加することで対応し、バスと一般車の混合流ネットを開発している。次に、このネットに、バス停での乗降サービスネット等を結合化させたバスシミュレーションネットを構築し、金沢市の約1kmの実道路に適用し、バス専用レーンの運用・非運用時のシミュレーションを実行し、実測調査との比較を行い、実用化に向けての課題を整理している。

Application Study of Petri-Net Simulator to Bus Traffic Simulation

Noboru KIMATA, Taketoshi NISHIMURA, Kazunari YOTSUFUZI.

For planning on bus priority systems, we need sensible to constrain from the real space on site. In this paper, we try fundamental study to apply Petri-net Traffic Simulator, which use visual net description of planning alternatives on the real space, to bus priority problem. The simulator has dealt with traffic flows of regular sized cars only. As buses are large sized cars, we first expand description net of traffic flow by introducing new type places denoted P(-3), which correspond to “bus presence in the block” and occupy two blocks of regular sized cars. Next, we expand Vptimer.txt., which rules renewal of vehicle's desired speed in simulation, and add the renewal table for buses.

We success construction and demonstration of mixed traffic flow net of regular and large sided cars using our software of Petri-net Traffic Simulator. We apply this expanded net to bus traffic simulation by adding other sub-nets like on-and-off service at bus stop. Finally, we construct simulation nets of both cases of on-and-off of bus priority lane at real road in Kanazawa and do some verification discussion.