

微視的交通流シミュレーションの作成と その交通流管理への適用

宮本 直樹 (大学院学生, 知能情報システム工学専攻)

吾郷 弘 ((株)ジャステック)

久井 守 (知能情報システム工学科)

渡辺 隆治 (神田通信機(株))

水野 高志 (日立公共システムエンジニアリング(株))

Development of a Microscopic Simulation of Traffic Flow on a Signal Network and Its Application to Traffic Operation

Naoki MIYAMOTO(Graduate Student of Computer Science and Systems Engineering)

Hiroshi Ago(JASTECo.,Ltd.)

Mamoru HISAI(Department of Computer Science and Systems Engineering)

Ryuji WATANABE(KandaTsushinki,Ltd.)

Takashi MIZUNO(Hitachi Government & Public Corporation System Engineering, Ltd.)

In this paper, a microscopic simulation of traffic flow on a traffic signal network is developed. Its purpose is to apply to evaluation of signal control and various traffic operations such as right-turning lane. In this simulation, the speed and location of individual vehicle are renewed every short time period. Detailed behaviors of each vehicle such as deceleration and stoppage at red signal, departure and acceleration at green signal and car-following are reproduced. Turning traffic at signalized intersections and lane-change to adjacent lane or to right-turning lane are taken into consideration. It was found that it is possible to reproduce traffic situation on 4-lane streets of about 10 km length at the same computation speed as real time by using personal computer, and that it is possible to evaluate signal control and right-turning lane.

Key Words : deceleration, acceleration, car-following, lane-changing, signal control

1. はじめに

本研究は信号交差点からなるネットワークを対象として微視的交通流シミュレーションを作成し、その理論的再現性を検証したものである。また交通流管理への適用例として、右折レーン設置効果の検討例を示しその適用性についても検証した。ここで微視的交通流シミュレーションというのは、車1台1台を個別に扱う離散モデルによるシミュレーションであり、各車両について赤信号による減速停止、青信号による発進加速、および前車への追従走行などの細かい動きを再現するシミュレーションである。さらに交差点では右左折現象を再現し、複数車線からなるリンクでは車線変更を扱い、また右折レーンへの車線変更を扱う。

本シミュレーションでは、車1台1台の速度と位置をスキューニングタイムごとに更新するという演算が必要である。したがって大規模なネットワークに大量の交通流を流すというような大規模なシミュレーションをパソコンで実行するには演算時間の点でいくぶん無理がある。ただしパソコンでも往復4車線で総延長10km程度の系統信号路線であれば実時間と同じ演算速度で交通状況を再現することは十分可能である。

本研究は、筆者らが作成し改良を重ねてきたものである^{1),2),3),4)}。現在もなおバージョンアップの努力をしているが、今後はむしろ実際への適用例を増やしていきたい。

なお本シミュレーションとは別に、地方中小都市

規模の信号ネットワークを対象とした離散モデルによるシミュレーションもすでに開発している⁵⁾。このシミュレーションでは、パソコンを用いて200ノード600リンク程度の規模のネットワークを実時間よりかなり速い演算速度で実行可能である。ただし演算速度を速くするために車両は定速走行か停止の2モード走行としている。

2. シミュレーションの詳細

(1) 本シミュレーションの概要と特徴

本シミュレーションの概要と特徴を列挙すると次のとおりである。

- ①ネットワークはノードとリンクで表す。上りと下りはそれぞれ別の有向リンクとする。ノードはリンクとリンクの接点である交差点中央の点を表す。
- ②リンク下流端ノードは原則として信号交差点とする。交差点は最大4枝とする。オフセットなどの信号制御パラメータは指定することができる。サイクル長、現示率および損失時間はいずれも交差点ごとに異なる値を指定することができる。
- ③リンクごとに異なる車線数を指定することができる。左折レーンや右折レーンなどの専用レーン長も指定することができる。
- ④交差点の交角は直角以外の交角を指定することができる。
- ⑤交通需要は対象ネットワーク境界の流入端から流入させる。ネットワーク内部からの発生吸収は考慮しない。流入端まで渋滞が波及して流入できない場合は交通需要を正しく再現できない。
- ⑥流入は原則としてポアソン分布とする。
- ⑦交通需要の時間変動を扱うことはできない。
- ⑧交差点の右左折直進率は指定する。
- ⑨信号は右折専用信号などの矢印信号や時差式信号など多現示を扱うことができる。
- ⑩スキヤニングタイムは1秒程度以下とし、任意に設定することができる。
- ⑪車の移動をアニメ表示することができる。画面表示にデジタル地図を用いることができる。

(2) リンクデータの与え方

リンク長、車線数および停止線位置はリンクデータによって指定することができる。

(3) オフセットの与え方

各信号の青開始時刻は、基準信号の青開始時刻との時間ずれをサイクル長比で表した絶対オフセットによって指定する。

(4) 右左折の決定

交差点における右左折はリンクごとに設定された分岐確率により決定する。車両はネットワーク流入時に最初に流入するリンクとその次に流入するリンクの2つのリンクについて、下流端交差点における進行方向(右左折直進)が決定される。それ以降、新たなリンクに流入するたびにそのリンクの次のリンクにおける進行方向が決定される。

(5) 追従と加減速の詳細

車両は前車との車頭距離が追従最大車頭距離未満であれば追従し、そうでなければ等加速運動を行う。減速はすべて追従で行う。例えば赤信号で減速する先頭車は、停止線位置で停止している車長0mの仮想の車両に追従するものと考えて速度を決定する。追従モデルとしては、式(1)によって示される藤井⁶⁾の最小安全車頭間隔の式を用いる。

$$S = 0.00818V^2 + 0.139V + 4.62 \quad (1)$$

ここで、Sは最小安全車頭間隔(m)、Vは車速(km/h)、4.62は停止時の最小車頭間隔(m)である。式(1)をVについて解き、単位を秒速に変換すると式(2)を得る。

$$v = 17.0 \times \sqrt{0.03272 \times [x(i+1) - x(i) - b + 0.01932]} - 2.36 \quad (2)$$

ここで、 $x(i+1) - x(i)$ は前車*i*+1との車頭距離、*b*は停止時の最小車頭距離である。

(6) 先詰まり

行き先リンクが渋滞して車両が流入できない状態を先詰まりという。行き先レーン最後尾車両が先詰まり判断区間において、かつ停止または減速状態にあるとき、このレーンは先詰まりと判断する。ここで先詰まり判断区間はレーン始端の前後10m合計20mの区間とする。

(7) 車線選択

ネットワーク境界の流入端からの流入需要は車線別に流入させ、車線選択はしない。したがって先詰まりがある場合には流入待ちとする。交差点では、直進および右左折後の行き先リンクにおける車線はデータで指定し固定する。指定された車線が先詰まりの場合は他の車線が流入可能でも停止線において流入待ちをする。現在のリンクよりも行き先リンクの車線数が少ない場合についてはリンクデータで適正な車線構成を指定しなければならない。

(8) 車線変更

交差点で左折するときはあらかじめ外側車線に入り、また右折するときは内側車線に入る必要がある。このため複数車線のリンクでは車線変更の必要が生じる。本研究では停止線に到達する前に車線変更が完了するようにした。車線変更の可否は後続車までの距離のみで判断する。ただし隣接車線に併走する車両があるなどの理由で車線変更ができない場合には、リンク終端から手前一定距離の地点（これを車線変更限界位置ということとする）で停止して割込みを行うこととする。車線変更処理の流れを Fig.1 に示す。ここで、車線変更限界位置は Fig.2 に示すように右折レーンがある場合は右折レーン進入位置の手前に設定し、右折レーンがない場合は停止線の手前に設定する。左折車については右折車と同様の流れで車線変更処理を行う。

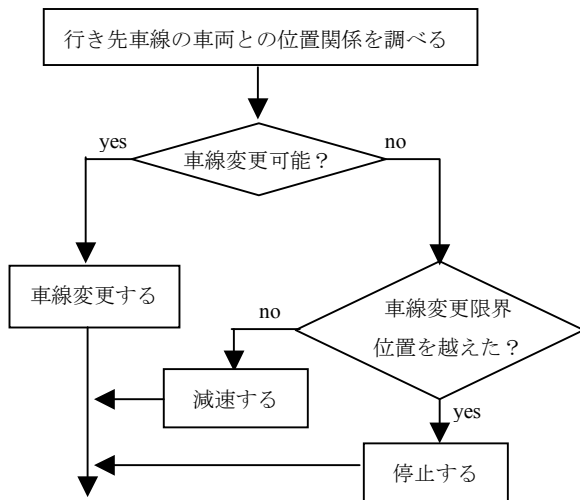


Fig.1 Flow chart on lane changing behavior

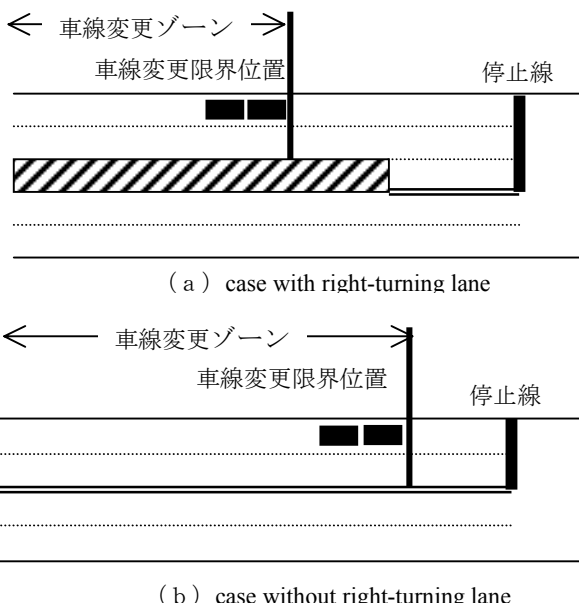


Fig.2 Downstream limit for vehicle to change lane

(9) 右折挙動の再現

右折レーンがある場合、右折車は右折レーン進入位置の手前 30m まで来た時点で減速を始め、20km/h まで減速する。この速度を上限とし、前車があればこれに追従する。右折レーン進入後も同様である。ここで、右折レーン進入位置と右折レーン内の最後尾車両の位置が最小車頭間隔+車長以上あれば右折レーンに入る。入れない場合は Fig.3 のように右折レーン進入位置で停止する。

右折しようとする車両がリンク下流端右折待ち位置に到達した時点で対向車(これには左折車も含む)の位置と速度から右折の可否を判断する。対向車との距離が 30m 以上ある場合、あるいは対向車の速度が 10km/h 以下の場合はその位置に関係なく右折する。右折できない場合は交差点中央の右折待ち位置で停止する。信号が黄になった時点で停止線を越えている右折車両は、信号が赤になってもすべて右折する。

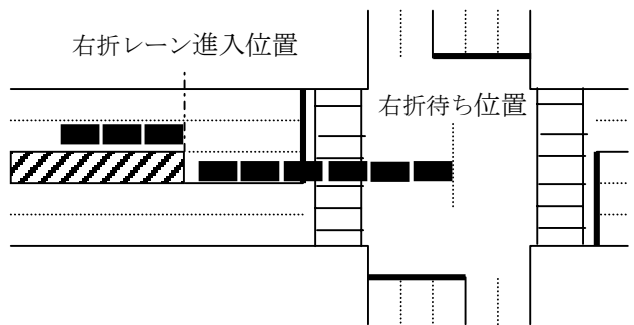


Fig.3 Waiting queue to enter right-turning lane

(10) 遅れ時間

信号制御や交通流管理の評価では、遅れ時間を評価指標として用いることが多い。本シミュレーションでは車両ごとの遅れ時間は式 (3) で求める。

$$D_i(k) = O_i(k) - I_i(k) - x_k/v \quad (3)$$

ここで、 $D_i(k)$ は i 番目車両がリンク k でこうむる遅れ時間、 $I_i(k)$ は i 番目車両がリンク k に流入した時刻、 $O_i(k)$ は i 番目車両がリンク k を流出した時刻、 x_k はリンク k のリンク長、 v は自由速度である。車両が一台流出するごとに各リンクの遅れ時間と通過台数を記録し、その累積値より 1 台当たりの平均遅れ時間を算出する。シミュレーション終了時にデータファイルにより指定されたレーンについて、上りリンクと下りリンクに分けて集計し、上り下りの総平均遅れ時間を計算する。

(11) 渋滞回避車線変更

複数のレーンを有するリンクについては、走行時

間を短縮し、また渋滞を回避するために車両の多いレーンから少ないレーンに車線変更を行うようにした。これを渋滞回避車線変更ということとする。この渋滞回避車線変更を行うことができる車両は車線変更限界位置に達していない直進車のみとし、また隣接の直進可能レーンにおける台数が 10 台以上少ない場合とし、この条件を満たす場合には、いつでも車線変更を試みることができる。

(12) 割込み

複数のレーンを有するリンクの下流端交差点で、右左折を行う車両はあらかじめ外側または内側のレーンに車線変更しなければならない。しかし、行き先レーンが渋滞し車線変更できない場合には、車両は車線変更限界位置まで進んで停止する。行き先レーンの後続車両は減速停止可能なら停止し割込みをさせる。その場合の減速度の絶対値は指定された加速度と同じ値とする。外側車線の右折車と内側車線の左折車が併進して同時に割込みを行うこととなった場合には、両車両が停止させあう状態となってしまうので、その場合に限り両車両の車体を便宜上同時に入れ替えるという処理を行う。

(13) 自由速度の与え方

すべての車両に共通の自由速度を与えるか、車両ごとに異なる自由速度を与えるかの両者からどちらかを選ぶことができる。シミュレーションの検証では共通の自由速度を用い、実際のネットワークに適用する場合には異なる自由速度を用いるというような使い分けをすることもできる。自由速度が異なるようにすると、隣接する車線の車両が互いに併走し同じ走行挙動をとるといようなことがなく、現実味のあるシミュレーションとなり、また割込みが多発するという特異な現象を回避することができるようになる。

(14) 横断歩行者による影響

本シミュレーションでは、右左折車が横断歩行者から受ける影響を考慮できるような機能をもたせている。この機能は、横断歩道の長さや歩行者交通量を条件として与えた上で、青信号開始からの経過時間と左折可能確率との関係をモデル化することによって実現している。

(15) 感知器機能

指定されたリンクの各レーンに感知器を設定することができる。1つのレーンに3つまで感知器を設置することができ、それぞれの感知器位置はデータ

ファイルにより指定することができる。感知器からは交通量と時間オキュパンシーを計測し、その計測値は下流端交差点の信号1サイクルごとに集計される。

(16) シミュレーション全体の流れ

シミュレーション全体のフローチャートを Fig.4 に示す。シミュレーションはタイムスキニング法とし、スキャンサイクルごとに交通状況を更新する。

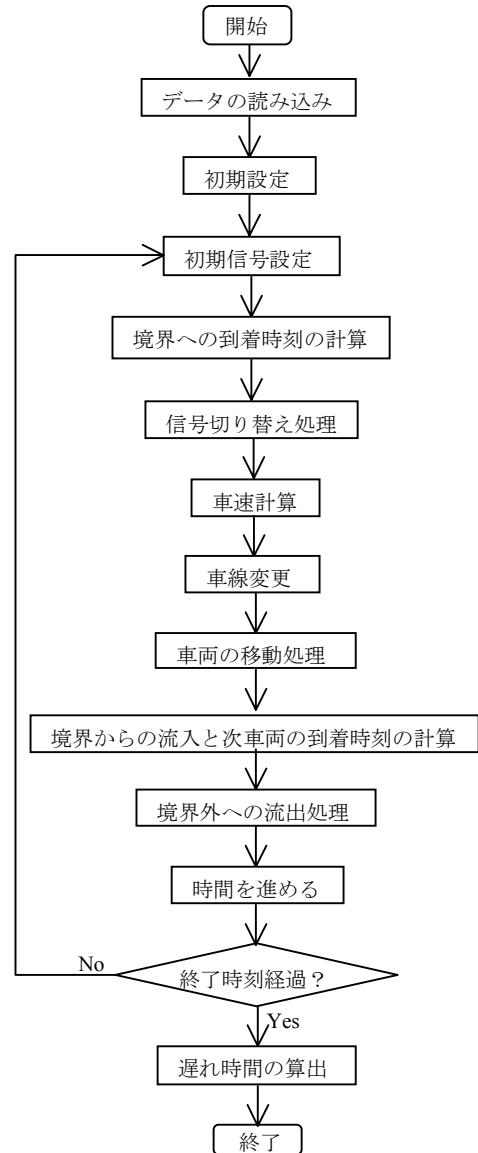


Fig.4 Flow chart of simulation

3. シミュレーションの検証

(1) 走行軌跡

走行状態の確認を行うために、まず2信号1リンク路線を対象とし、次の条件で走行軌跡を求めた。その結果の一部を Fig.5 に示す。

- スキャンタイム：0.03 秒
- サイクル長：100 秒
- リンク長：300m

- 計測時間：200 秒

図の横軸は距離，縦軸は時間であり縦方向の実線は赤信号を示す．この図より①において車両の軌跡が不規則に並んでいることから，車両がランダムに発生していることが分かる．また，②において車両が赤信号で停止し，青信号開始時に発進していることから信号状態に応じた走行挙動を示していることがわかる．さらに③において車頭距離に応じて加減速および追従挙動を行っていることが確認できる．

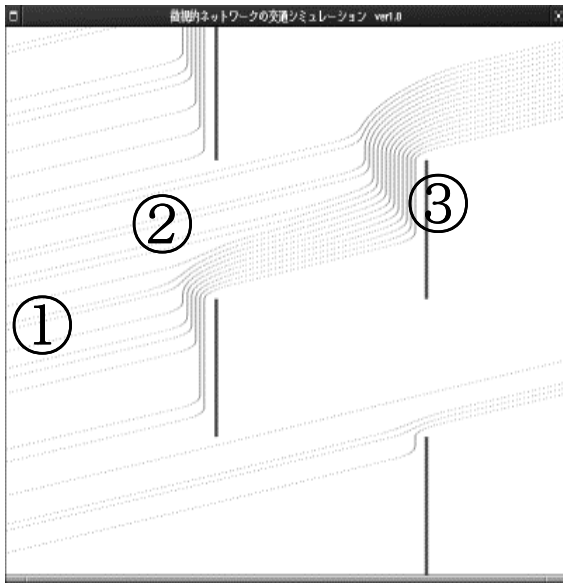


Fig.5 Trajectories of running vehicles⁴⁾

(2) 飽和交通流率

本シミュレーションは飽和交通流率を外生的に与えるものではない．加速度やスキャニングタイムなど車両の走行挙動を規定するパラメータから結果的に決まる性質のものである．したがって，シミュレーションから飽和交通流率を求め，それを確認することが必要となる．実際にシミュレーションを行い，得られた飽和発進間隔の計測結果を Fig.6 に示す．図の横軸は青開始後の通過車の順番である．この図から，3 台目以降 20 台目までの平均車頭時間は 2.05 秒である．飽和交通流率は飽和発進間隔の逆数であるから飽和交通流率は 0.488 台/秒となる．なおシミュレーション条件は次のとおりである．

- 加速度：1.0m/s²
- 追従距離：23m
- スキャニングタイム：0.1 秒

(3) 遅れ時間とオフセットの関係⁷⁾

2 信号を両端にもつ 1 リンク内の遅れ時間を考えると，遅れ時間とオフセットの間には一定の理論的な関係がある⁷⁾．本シミュレーションでこの理論的な関係を再現できるかどうかを検証 (Verification)

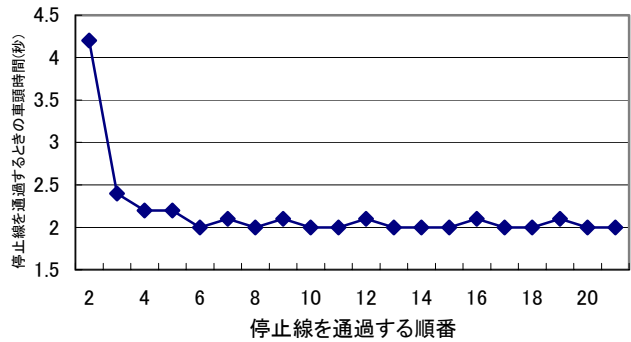


Fig.6 Time headway of vehicle passing a stop line

する．そのために 2 信号 1 リンク路線を対象とし，第 1 信号と第 2 信号間の相対オフセットを 0 から 1 まで 0.05 刻みで変化させてシミュレーションを行い，系統内リンクの平均遅れ時間を求めた．シミュレーション条件は次のとおりである．

- リンク長：700m
- サイクル長：50 秒($\tau=0.875$)，100 秒($\tau=0.438$)
- 主道路方向現示率：0.5
- 損失時間：0.0 秒
- 交通量：0.3 台/秒
- 加速度：1.0 m/s²
- 自由速度：16.0m/s
- 右左折直進率：直進 100%，左折 0%，右折 0%
- 交差道路からの流出入なし
- 助走は 2 サイクル，計測時間は 10 サイクル
- 車両の発生その他で用いる乱数は各オフセットにつきシミュレーション開始時に初期化
- スキャニングタイム：0.1 秒

シミュレーション結果を Fig.7 および Fig.8 に示す．

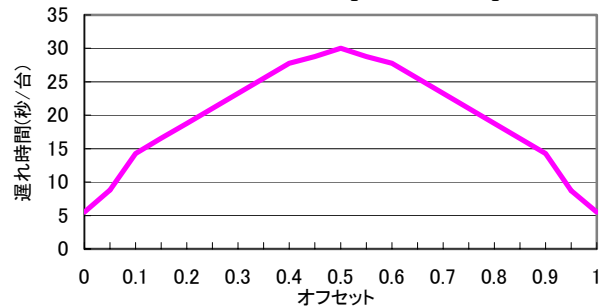


Fig.7 Relationship between offset and delay (case of $C=50s$ and $\tau=0.875$)

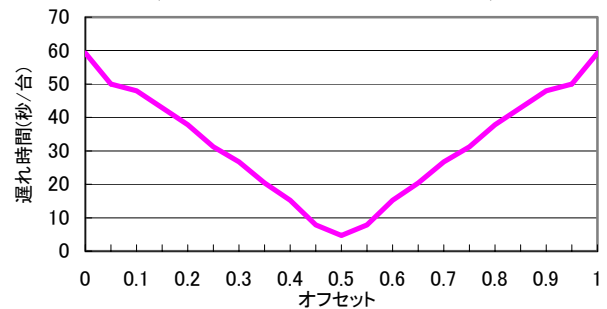


Fig.8 Relationship between offset and delay (case of $C=100s$ and $\tau=0.438$)

理論的には、最適オフセットはリンク長の時間距離（対サイクル長比） $\tau=1.0$ 付近のとき同時式オフセット、 $\tau=0.5$ 付近のときは交互式オフセットとなる。Fig. 7 および Fig. 8 では $\tau=0.875$ のときオフセット 0 で遅れ時間が最小となり、 $\tau=0.438$ のときはオフセット 0.5 で遅れ時間が最小となっている。このことからオフセットと遅れ時間の関係は、ほぼ理論に従っているといえる。

(4) 遅れ時間とサイクル長の関係⁸⁾

2 信号を両端にもつ 1 リンク内の遅れ時間については、遅れ時間とサイクル長の間にも一定の理論的な関係がある⁸⁾。本シミュレーションがこの関係を再現できるかどうかを検証する。そのために、2 信号 1 リンク路線を対象とし、サイクル長を 20 秒から 180 秒まで 2 秒刻みで変化させ、それぞれのサイクル長について同時式オフセットと交互式オフセットを与えて 2 通りのシミュレーションを行い、両者のうち系統内リンクの遅れ時間の小さい方を遅れ時間として求めた。シミュレーション条件は次のとおりである。

- リンク長：400m
- 主道路方向現示率：0.5
- 損失時間：0.0 秒
- 交通量：0.3 台/秒
- 自由速度：16.0m/s
- 加速度：1.0m/s²
- 右左折直進率：直進 100%，左折 0%，右折 0%
- 交差道路からの流出入なし
- 停止線位置は 0 m，すなわちリンク終端に一致
- サイクル長ごとのシミュレーションにおいて乱数は初期化する
- スキャニングタイム：0.1 秒

シミュレーション結果を Fig.9 に示す。理論ではリンク往復旅行時間 T ，および $T/2$ で遅れ時間が極小値をとり、 $2T$ より大きいサイクル長ではほぼ一定となる。この計算条件ではリンク往復旅行時間 $T=60$ 秒である。計測結果をみると 60 秒と 30 秒付近で極小値をとり、140 秒以降は遅れ時間がほぼ一定とな

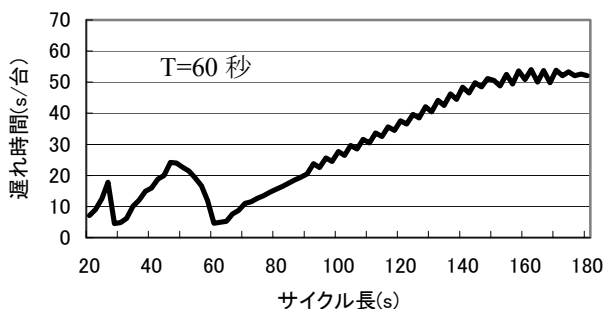


Fig.9 Relationship between cycle length and delay

って、全体の傾向としては理論と同様の傾向を示している。部分的に理論と一致しない点があるのは、理論では車群の拡散はないものとしているのに対して、シミュレーションでは車両の加減速により車群が拡散するためであると考えられる。

以上のことから、本シミュレーションモデルでは遅れ時間とオフセットの関係、および遅れ時間とサイクル長の関係のいずれもほぼ理論と同様の傾向を再現できることがわかった。

4. 実際のネットワーク交通流の再現

国道 190 号宇部市西割交差点を中心に厚東川から流川交差点まで約 2 km の区間を対象としてシミュレーションを行った。この区間内の信号交差点は重要交差点である東割交差点を含め、西割交差点、流川交差点の 3 交差点である。

画面表示にはデジタル地図を用いた。西割交差点を中心とした地図を縮尺 1/3125 で 7 枚取り込んだ。シミュレーション中はキー操作により上述の 7 画像を切り替えるようにした。これにより重要交差点を含む区間およびそれ以外の区間というように区間ごとの車両の挙動を拡大して見ることができる。

5. 右折レーン設置効果の検討例

(1) 3 信号のモデル路線の検討例

はじめに Fig.10 に示すような単純化した 3 信号片側 1 車線のモデル路線を用いて右折レーンと右折専用現示の設置効果を検証した。シミュレーションでは渋滞が発生するような交通条件を設定した。その他の計算条件は次のとおりである。

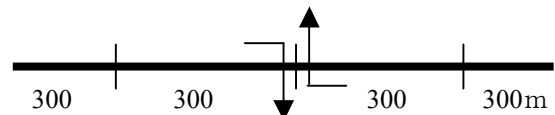


Fig.10 Study section to evaluate the effect of right turning lane

- 加速度：3.0m/s²
- 自由速度：16.0m/s
- スキャニングタイム：0.1 秒
- サイクル長：100 秒
- 計測時間：300 秒から 800 秒まで 500 秒間
- 発生交通量：0.25 台/秒
- 右折レーン：路線中央の交差点に設置
- 右折レーン長：0 m から 102m まで 6 m 刻み
- 右折率：10，30，50% の 3 通り
- 右折車以外はすべて直進車両
- 交差道路からの流入なし

右折専用現示がない場合の結果を Fig.11 に示し、また 5 秒間の右折専用現示を設けた場合の結果を

Fig.12 に示す。

この結果から右折率に関わらず、30m程度の右折レーンを設置すれば遅れ時間が十分に減少することが分かる。また、右折専用現示を設けると遅れ時間をさらに減少することができる。

右折レーンも右折専用現示もない場合に対する遅れ時間の減少率を Table1 に示す。この表から、右折率が大きいほど右折レーンおよび右折専用現示の設置効果が增大することが確認できる。

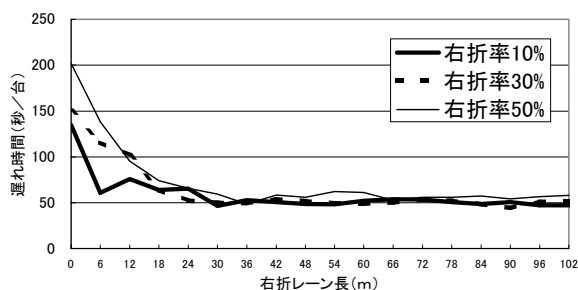


Fig.11 Effect of right-turning lane⁴⁾

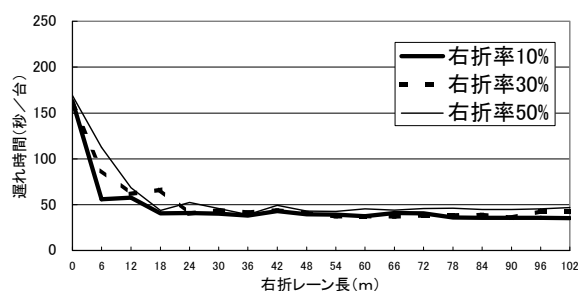


Fig.12 Effect of right-turning signal⁴⁾

Table1 Reduction of delay resulting from right-turning lane and right-turning signal

右折専用 現示	右折率 10%	右折率 30%	右折率 50%
なし	61%	68%	76%
5秒設置	72%	73%	81%

(2) 実際の交差点の検討例

モデル路線を対象とした計算例のほかに、国道190号宇部市西割交差点および宇部市工学部通り沼交差点を対象として、右折レーンおよび右折専用現示を設置した場合の効果を検証した。

西割交差点の計算条件

- 加速度：3.0m/s²
- 自由速度：16.0m/s
- サイクル長：84秒
- スキャニングタイム：0.1秒
- 計測時間：300秒から800秒まで500秒間

- 右折率：対象リンクの右折率は20%
- 発生交通量：流入地点ごとに与え一定とした
沼交差点の計算条件
- 加速度：3.0m/s²
- 自由速度：16.0m/s
- スキャニングタイム：0.1秒
- 計測時間：10サイクル
- 助走時間：5サイクル
- 発生交通量：流入地点ごとに与え一定とした
- サイクル長は観測データをもとに92秒とする

西割交差点のシミュレーション結果から40m程度の右折レーンを設置し、4秒程度の右折専用現示を設置すれば遅れ時間が40%程度減少する可能性があることがわかった。

また、沼交差点に右折レーンを設置した場合の検証結果から、右折レーン長が42mのとき遅れ時間が最小となり、右折レーン長が36mのときに交差点通過台数が最大になるという結果が得られた。本シミュレーションでは、交差点を実際に通過した車両についてのみ遅れ時間を計測しているため、シミュレーション終了時にリンク内に残った待ち行列車両の遅れ時間は考慮されない。したがって過飽和条件下では、遅れ時間ではなく交通処理量である通過台数を評価の基準とするのがよいかもしれない。いずれにしても40m程度の右折レーンを設置すると効果的であることがわかった。

6. まとめ

本研究では加減速、追従および車線変更などの挙動を再現する微視的シミュレーションモデルを作成し、その理論的再現性を検証した。また国道190号宇部市西割交差点を中心とするネットワークを対象として交通流の再現を試みた。また、右折レーンおよび右折専用現示の設置効果についても検討した。シミュレーションの画面表示については、電子地図を背景に用いて、車両の走行状況をアニメ化してわかりやすく表現した。

今後の課題としては、交差点内の車両挙動の再現性を向上すること、および信号制御、各種の交通流管理方策、道路整備効果の検討など実際への適用例を増やすことなどが挙げられる。

参考文献

- 1) 久井守, 田村洋一, 山崎徹也: ゲーミングシミュレーションによる信号制御戦略の探索と学習, 山口大学工学部研究報告, Vol.49, No.2, pp.57-64, 1999
- 2) 水野高志: 系統信号システムの微視的交通流シ

ミュレーションを用いた信号制御戦略の探索, 山口大学修士論文, 平成 13 年 2 月

3) 渡辺隆治: 微視的交通流シミュレーションの作成と交通制御への適用, 山口大学工学部卒業論文, 平成 12 年 2 月

4) 吾郷弘: 微視的交通流シミュレーションの作成と交通流管理への適用, 山口大学工学部卒業研究, 平成 13 年 2 月

5) 岩永和大, 久井守: 道路網からみた混雑時の系統信号制御に関する一考察, 第 21 回交通工学研究発表会論文報告集, pp.281-284, 2001

6) 米谷栄二, 渡辺新三, 毛利正光: 交通工学, オーム社, pp.117-121, 1965

7) 久井守: 系統信号区間における車群と遅れ時間に関する一考察, 土木計画学研究・講演集, No. 8, pp.121-127, 1986

8) 越正毅: 系統交通信号におけるサイクル制御の研究, 土木学会論文報告集, No.241, pp.125-133, 1975

(平成 15 年 12 月 26 日受理)