

経路選択交通流に及ぼす信号制御の影響

飛田和寛

静岡大学大学院 工学研究科 機械工学専攻

概要

2 経路系において経路上の信号群を通過する車両交通を研究する。車の前進運動に Nagel-Schreckenberg モデルを用いる。各車よりフィードバックされたリアルタイムのツアータイムを経路選択に利用する。各経路上の信号群はサイクルタイム及びスプリットにより制御される。シミュレーションの結果、ツアータイム及び密度は周期的かつ交互に上下動することが分かった。ツアータイムと密度は相互作用し互いに付随した時間変化を示す。ツアータイム及び密度は信号停止とそれによる渋滞の影響を受け、スプリットの減少により長周期化する。各経路のツアータイム、密度のスプリット及びサイクルタイムへの依存性を明らかにする。

Effect of signals on the route choice traffic flow with real-time information

Kazuhiro Tobita

Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University, Hamamatsu

Abstract

We research the effect of signals on the vehicular traffic in the two-route system with the tour-time feedback strategy. Nagel-Schreckenberg model is applied to the vehicular motion. The route decision is based on the real-time information. The traffic signals are controlled with cycle time and split. The tour-times and densities on each route fluctuate periodically and alternately. The tour-time on each route varies with time by synchronizing with the density. Their periods increase with decreasing the split.

1 はじめに

自動車で目的地を目指す際に予定の経路が混雑しており、目的地への到達時間が長くなることが予想される場合、多くのドライバーは別の経路から目的地を目指すことを考える。ドライバーが複数の経路から代替となる1つを選択する際に、各経路通過に要した時間(ツアータイム)、密度及び平均速度などの情報をリアルタイムにフィードバックする情報戦略がある。複数経路系における経路選択交通の研究はこれまで2経路系、3経路系及び交差経路系等においてなされ、情報返還戦略が経路選択交通流に及ぼす影響が明らかにされた[1-4]。前述の研究において、信号の影響を考慮したものはほとんどない。実際の交通では、一般道各交差点に信号機が設置されており、交通流は信号により制御される。経路選択交通において、密度が希薄限界である場合の信号群の影響について研究したものはある[5]。しかし実際には、信号群を通過する車は信号機手前での停止だけでなく、それに起因する渋滞の影響も大きく受けるため、渋滞の影響を考慮した研究が必要である。

本研究では、信号での停止に起因する渋滞の影響考慮のため、確率論的セルオートマトン(CA)モデルである Nagel-Schreckenberg(NS)モデル[6]を用いて、信号群を有す2経路系の経路選択交通を研究する。各車よりリアルタイムにフィードバックされた各経路のツアータイムを経路選択に用いる。各信号はサイクルタイム及びスプリットにより制御される。車両交通は経路上の信号群により制御され、各経路のツアータイム及び密度はサイクルタイム及びスプリットに大きく依存する。信号パラメータを変化させ経路選択交通のシミュレーションを行うことで、各経路のツアータイム及び車密度のスプリット及びサイクルタイムに対する依存性を明らかにする。

2 シミュレーションモデル

2.1 信号制御された経路選択交通モデル

信号制御された経路選択交通の道路モデルを図1に示す。地点1で経路A,Bに分岐し地点2で合流する2経路系である。両経路の道路長は L で等しいと

する。両経路は大きさ 1 のセル L 個で構成される。各経路上には流入流出部を除き一定の信号間距離 l で同数の信号機を設置する。各信号機には 1 つのセルを割り当てが、車は信号機を設置したセル上にも存在可能とする。各経路上に設置された信号機に上流から下流に向かって $1, 2, \dots, j, j+1, \dots$ と順に番号をつける。車は地点 1 から流入し地点 2 から流出する。境界は開放境界で車流出の有無に依らず車を一定の流入密度で流入させる。

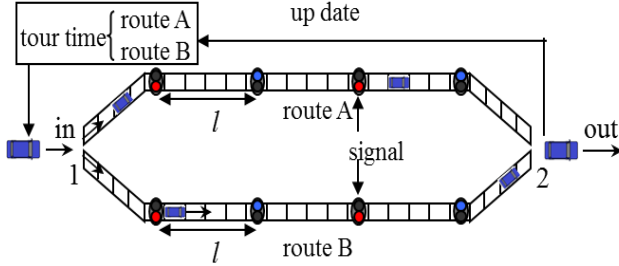


図 1. 信号制御された経路選択交通モデル

車が経路に流入するまでの流れを以下に示す。

1. 毎タイムステップ地点 1 に車を配置する。
2. 配置した車の運転手として情報利用者と非情報利用者を考え、それぞれ確率 s_{dyn} , $1-s_{\text{dyn}}$ で振り分ける。
3. 情報利用者は各経路のツアータイムを参照してより短いツアータイムの経路を選択する。ツアータイムが等しい場合は一定確率で経路を選択する。非情報利用者は常に一定確率で経路を選択する。経路 A の選択確率を s_{route} とする。
4. 選択した経路の流入部のセルが空いていれば流入させる。空いていなければ地点 1 の車を取り除き、次のタイムステップに新たな車を地点 1 に配置する。

経路に流入した車は赤信号及び渋滞の影響を受けながら前進する。地点 2 まで到達した車はツアータイムをフィードバックし、情報利用者に提供する情報を更新する。ツアータイム t_i は次式のように車の最高速度 v_{max} と各経路の道路長 L を用いて無次元化を行い、無次元ツアータイム T_i とする。

$$T_i = t_i / (L / v_{\text{max}}) \quad (1)$$

これは各車が最高速度で経路を通過した場合のツアータイムとの比を表している。

2.2 信号制御関数と信号制御された CA モデル

各信号は、簡単化のため青信号と赤信号のみを考え、周期的に変わるものとする。あらかじめ各信号の信号特性を決定し、統一の関数により全信号の制御を行う。時刻 t における各信号機の信号は(2)式の関数により決定される。

$$H(t) = H[t - \text{int}\{t/t_s\}t_s - s_p t_s] \quad (2)$$

(2)式の $H(t)$ は Heaviside 関数で、関数内が負である場合に 0、負でない場合に 1 と定義される。 t_s はサイクルタイムで、青信号と赤信号の時間の和である。 s_p はスプリットで、サイクルタイムに対する青信号時間の割合である。各信号は Heaviside 関数が 0 である場合に青信号、1 である場合に赤信号とする。本研究では各信号間に位相差は設けず、全信号を同時に変える。シミュレーション結果では下記のように定義した無次元サイクルタイム T_s を用いる。

$$T_s = t_s / (l / v_{\text{max}}) \quad (3)$$

車の最高速度 v_{max} 、信号間距離 l で無次元化することにより、 v_{max} , l が変化しても本研究結果は本質的に変わらず一般性を持つ。上記のモデルで制御される一連の信号群を車が通過する。各車は赤信号での停止と青信号での再発進のみを繰り返すものとし、各車は右左折を行わない。

車の前進運動モデルについて説明する。信号停止後の再発進時の加速の遅れを取り入れるため、確率論的 CA モデルである NS モデルを用いる。NS モデルは他の CA モデルと同様超離散モデルで、シンプルな数式で記述でき、車の速度回復や不規則な減速など、実際の交通に近い挙動を再現できる優れたモデルである。NS モデルを信号交通に適応する。各車に上流から $1, 2, \dots, i, i+1, \dots$ と順に番号を付ける。信号制御された道路を走行する車 i の時刻 $t+1$ における位置は、時刻 t における位置 $x_i(t)$ を用いて次式で表せる。

$$x_i(t+1) = \max[x_i(t), \min\{x_i(t) + v_{\text{max}}, x_{i+1}(t) - 1, 2x_i(t) - x_i(t-1) + 1\} - \xi_i(t)] \times \{1 - H(t)\} + \max[x_i(t), \min\{x_i(t) + v_{\text{max}}, x_{i+1}(t) - 1, 2x_i(t) - x_i(t-1) + 1, x_{s,i}(t) - 1\} - \xi_i(t)] \times H(t)$$

$$x_{s,i}(t) = [\text{int}\{x_i(t)/l\} + 1]l \quad (5)$$

(4)式の $H(t)$ は(2)式の Heaviside 関数である。 $\xi_i(t)$ はランダムな減速を表わしており、これにより各車は確率 p で速度 1 減速する。 $x_{s,i}(t)$ は時刻 t における車 i の直前方信号の位置で(5)式で表される。 $\max()$ と $\min()$ はそれぞれ最大値と最小値を返す関数である。前方の信号が青信号の場合は、右辺第 1 項により、 v_{max} までの加速と前方車 $i+1$ との衝突回避、及びランダム減速を行う。前方の信号が赤信号の場合は、右辺第 2 項により、青信号である場合の挙動に加え、信号機手前での停止を行う。

3 シミュレーション結果及び考察

シミュレーション条件を下記のように設定する。各経路は道路長 $L=2100$ で等しいとする。69 基の信号機を、地点 1, 2 を除き一定の信号間距離 $l=30$ で設

置する。毎タイムステップ地点 1 に 1 台の車を配置する。情報利用者の割合を $s_{\text{dyn}}=0.5$ とする。非情報利用者の経路 A 選択割合を $s_{\text{route}}=0.5$ とする。車の最高速度を $v_{\text{max}}=3$ 、減速確率を $p=0.25$ とする。シミュレーション時間を 200 万タイムステップとし、20 万タイムステップ以降のデータを有効とする。

図 2 は各経路の無次元ツアータイム、及び密度の時間変化を示したものである。各図中の黒の実線及び赤の点線が、経路 A 及び B についてのデータ。黒の太い実線及び赤の太い点線は、それぞれ経路 A 及び B についてのデータの平均値を表している。信号数や信号パラメータが、両経路で等しいため、平均値は等しい値となる。図 2(a)は、信号機を設置しない場合の、ツアータイムの時間変化である。全車ほぼ最高速度で走行でき、無次元平均ツアータイムは 1 に近い値となる。それに対し、信号群を設置した場合は図 2(b)のようになる。信号特性は経路 A,B ともに $s_p=0.7$, $T_s=3.0$ である。赤信号での停止と再発進時の速度回復、及び発生する渋滞により平均速度が小さくなる。そのため、各経路の無次元平均ツアータイムは、信号機を設置しない場合と比べて長くなる。ツアータイムの周期的な上下動について図 2(b), (c)を用いて説明する。図 2(c)は図 2(b)と同条件における各経路の密度の時間変化である。図 2(b)において、経路 A のツアータイムが経路 B のツアータイムを上回ると、情報利用者は全て経路 B へ流入する。これにより、図 2(c)において経路 A の密度が減少、経路 B の密度が増加する。経路 A の密度が十分減少すると経路 A のツアータイムは減少に転じる。このようにツアータイムと密度は相互作用し、付随した周期的上下動を示す。ツアータイムと密度の上下動のずれは、車が地点 2 に到達し情報を更新するのにかかる時間にほぼ等しい。変動周期は平均ツアータイムと比べ非常に大きい。変動周期と振幅は、信号機を設置しない場合に比べ大きくなる。これは信号により各車の平均速度が減少するため、車が地点 2 に到達しツアータイムを更新するまで大きく時間がかかり、情報利用者に与える情報と実際の交通状況が食い違うためである。それにより、実際は経路が混雑しているにもかかわらず、情報利用者がその経路に集中し、更なる混雑が生じる。

図 3(a),(b)は無次元サイクルタイム $T_s=3.0$ における経路 A,B の無次元平均ツアータイムと平均密度のスプリット依存性を示したものである。それぞれ縦軸は無次元平均ツアータイムと平均密度である。○が経路 A, ●が経路 B についてのプロットである。各図中の黒の実線は、非線形最小二乗法によるフィッティングカーブである。図 3(a)は指数関数、図 3(b)はシグモイド関数でフィッティングを行った。スプリットが小さくなると、信号での停止時間及び停止回数の増加(赤信号時間の増加による)、及び信号手前での大規模な渋滞などの相乗作用により、平均ツアータイムは指数関数的に増大する。平均密度の増

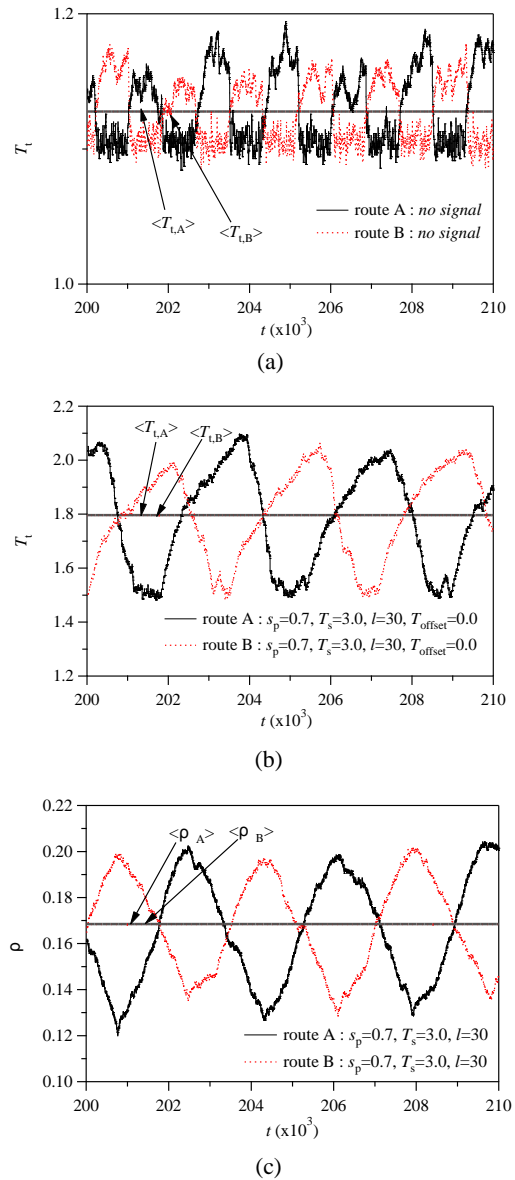


図 2. 各経路の無次元ツアータイム及び密度の時間変化 (a)信号機を設置しない場合のツアータイム変化, (b),(c)信号群を設置した場合のツアータイム変化及び密度変化. $s_p=0.7, T_s=3.0, l=30$ とする。

加の傾向は、ツアータイムの傾向と大きく異なる。 $s_p=0.4$ にかけては、各車の信号停止回数の増加と発生する渋滞の大規模化により、平均密度は急激に増加する。 $s_p < 0.4$ では、各車は全信号で停止し、これ以上停止回数は増加しない。また各経路の流入密度は入口付近の信号に大きく依存するため、スプリットが小さくなると流入密度も小さくなり、平均密度は緩やかに増加する。

図 4 は各経路の無次元平均ツアータイムのサイクルタイム依存性を示したものである。縦軸は無次元平均ツアータイム、横軸は無次元サイクルタイムである。経路 A,B 上の全信号のスプリットを $s_p=0.5$ とし、無次元サイクルタイムを一様に $T_s=0.2$ から $T_s=10.0$ の範囲で 0.2 ずつ増加させその時の各経路のツアータイムをプロットする。プロットはそれぞれ

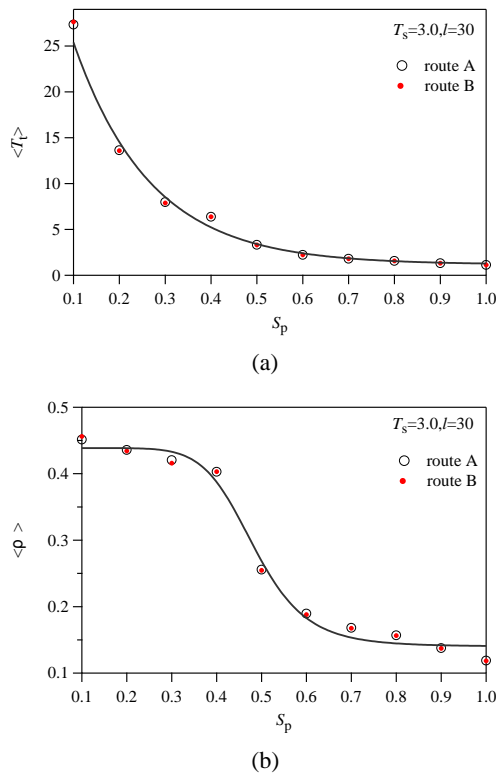


図 3. スプリット変化による各経路の平均ツアータイム及び平均密度への影響 (a)無次元平均ツアータイムとスプリットとの関係, (b)平均密度とスプリットとの関係.

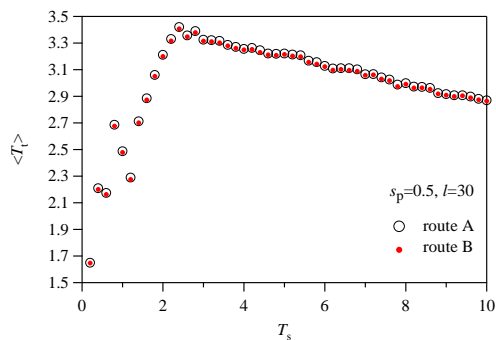


図 4. サイクルタイムの各経路の無次元平均ツアータイムに与える影響, $s_p=0.5, l=30$ とし $T_s=0.2 \sim 10.0$ で変化させる.

○が経路 A, ●が経路 B についてである. ツアータイムはサイクルタイム変更により大きく変化する. また, $T_s=2.4$ 近傍を境界として大きく 2 つの領域に分けることができる. $T_s \leq 2.4$ の領域では, 各経路のツアータイムは全体的にみて増加傾向である. $T_s > 2.4$ の領域では, サイクルタイムの増加に伴い各経路のツアータイムは減少する. このツアータイムの変化には, 赤信号での停止回数と信号での待ち時間が大きく関係している. $T_s \leq 2.4$ の領域では, 青信号時間は $s_p T_s \leq 1.2$ である. 赤信号での停止状態からの加速及びランダム減速により, 平均の無次元信号間移動時間は 1.2 より大きくなるため, この領域では各車毎回信号で停止する. この領域でのツアータイム増加の原因は, 赤信号での停止時間である. $T_s=2.0$ では, 車が信号機手前に到達したとき, 信号

は赤信号に変わってしばらく経過しているため, 停止時間は比較的短い. $T_s=2.4$ では, 車が信号機手に到着するのとほぼ同時に信号が赤信号に変わるため, 待ち時間が最大になる. この時のツアータイムが最大である. $T_s > 2.4$ の領域において, 渋滞が発生しない場合は, 青信号中に各車 1 基以上の信号機を通過する. サイクルタイムの増加により, 赤信号での停止時間が長くなるが, 信号による停止回数が減少するため, 全体では信号での停止時間が短くなり, ツアータイムは減少する. 現実の交通では無次元サイクルタイムは 1~5 の間で設定される. したがって, $s_p=0.5$ で同期戦略の場合, $T_s=1.2$ 近傍でツアータイムは最小となる.

4 まとめ

一連の信号群により制御された経路選択交通の, CA モデルを用いた研究を行い, 信号制御が経路選択交通に及ぼす影響を明らかにした. 各経路上の信号群のスプリット, サイクルタイムとツアータイム, 密度との関係について, 以下の結論を得た. 都市交通の信号制御を用いたコントロールに有用であると考えられる.

- 1) ツアータイム, 密度の時間経過に伴う周期振動は, 互いに付随したものとなる. 赤信号による停止と再発進時の加速の遅れが情報返還を遅延させる. 返還の遅延が情報と実交通との不一致を招き, 混雑を助長する.
- 2) スプリットが小さくなると信号での停止時間増加と, 停止回数増加及びそれに伴う大規模渋滞の発生により, 平均ツアータイム, 平均密度は増加する. 平均ツアータイムは指数関数的に増加する. 平均密度は $s_p=0.5$ 近傍で急増する.
- 3) サイクルタイムを変更することにより, ツアータイムを大きく変化させることができる. 現実的なサイクルタイムを考慮すると $T_s=1.2$ 近傍においてツアータイムは最小となる. サイクルタイムを適切に設定することで, 比較的スムーズな交通を実現できる.

参考文献

- [1] J.Wahle, A. Lucia C. Bazzan, F.Klugl, M.Schreckenberg. Physica A 287 (2000) 669 - 681.
- [2] C.Dong, X.Ma, B.Wang, X.Sun. Physica A 389 (2010) 3274 - 3281.
- [3] Y.Yokoya. Phys. Rev. E 69 016121 (2004).
- [4] M.Fukui, K.Nishinari, Y.Yokoya, Y.Ishibashi. Physica A 388 (2009) 1207 - 1212.
- [5] T.Nagatani, Y.Naito, Physica A 390 (2011) 4522.
- [6] K.Nagel, M.Schreckenberg, J. Phys. I France 2 (1992) 2221.