

## 第22章 信号・無信号交差点のモデル化(B)

Rod Troutbeck (Queensland University of Technology)

### 1. はじめに

この章では、交差点での交通運用を反映した運転者挙動の数学的モデル化を扱う。交差点部のモデル化の目的は、容量、遅れ時間、燃料消費量、排出ガス量などの予測を行うことにある。ただし本稿では、容量、遅れ時間のみを扱う。

### 2. 容量と遅れの定義

容量は2つの定義がある。

- 条件一定の状況に置ける方向別の最大流入量
- 交差点容量、すなわち全方向の交通量が同率で増加している場合の最大スルー  
プット

また、遅れは以下に分類できる。

- geometric delay : 道路線形・車線の条件に伴う速度の低下による遅れ
- traffic delay : 車両間の相互作用による遅れ
- control delay : 制御による遅れ (信号、「止まれ」表示など)
- incident delay : 事故による遅れ

総遅れは上記の和であるが、交差点のモデリングでは通常、制御による遅れが評価の対象となる。

### 3. 無信号交差点

#### 3.1 方向別優先順位

交差点では方向別の優先順位がある。交差点のモデル化では、方向別の優先順位を決定することが重要となる。

#### 3.2 優先方向への流入機会 (Availability of opportunities 訳注)

opportunitiesは交差点での優先方向の車両間の通過時間間隔である。主方向の道路に従

---

訳注 : gap と同じような意味だが、gap が車間時間なのに対し、opportunities は車頭時間である

方向から流入する場合、opportunitiesは主方向道路の車頭時間になる。Hyper-Erlang分布は最も現実的で代表的な車頭時間分布であるが、実際に利用するのは難しく、より単純なモデルが用いられる。

Cowan(1975)のM3モデルがよく用いられる。

$$F(t) = 1 - \alpha \exp[-\lambda(t - t_m)] \quad , t \geq t_m。$$

ただし、 $t_m$  : single headway、 $\lambda$  : 交通量 $q$ に関するdecay function、 $\lambda = \frac{\alpha q}{1 - t_m q}$

$\alpha=1$ 、 $t_m=0$ の場合、指数分布になる。また、Tanner(1962)の車頭時間分布モデルでは、 $\alpha=1-qt_m$ として与えている。より使いやすい式形としては、 $\alpha = \exp(-aq)$ というのがある。Brilon(1997b)によると、 $a$ の値は6~9程度とされる。

### 3.3 流入機会の順番

遅れ時間を評価する上でopportunitiesの順番も重要である。多くのモデルでは車頭時間は独立であるとしている。Tanner(1962)のモデルでは、最小車頭時間が $t_m$ となるような指数分布となっている。この場合、車群 (=車頭時間 $t_m$ で走行する車両群) の長さはBorel-Tanner分布となる(Haight and breuer, 1960)。

### 3.4 流入車両による流入機会の利用可能性

クリティカルギャップ $t_c$ は最短許容opportunityと定義される。運転者によって幅があるのが普通だが、多くのモデルでは平均の $t_c$ が用いられる。クリティカルギャップが人によって異なる場合は均質と仮定した場合に比べて容量は減少する。一方、ドライバーが個々のopportunityを独立に見ると考える場合、容量は増加する。したがって、個々のドライバーがconsistentで均質だと仮定したモデルでリーズナブルな推定値が得られると考えられている。

クリティカルギャップは重要であるが、測定するのが難しい。Brilon et al.(1997a)は最尤推定法による推定方法を提案している。

### 3.5 交差点における交通の優先関係

交差点における優先関係には以下の2つがある。

- ・「絶対優先(absolute priority)」: 主道路の交通が従道路からの流入交通に全く影響を受けない場合。
- ・「限定優先(limited priority)」: 従道路からの流入により主道路の交通が減速を強いられる

場合や、従道路間で流入できるように譲り合う場合など。

### 3.6 絶対優先の場合の単純合流容量

流入容量は主道路の車頭時間とクリティカルギャップに依存する。モデリングに際して、一般に以下の仮定が用いられる。

- ▶ 流入部において車両は垂直に蓄積される。
- ▶ 加速度は無量大
- ▶ すべての運転者は同様に行動し、consistentである。

さらに、主道路の車頭時間分布にCowanのM3分布を仮定し、主道路の交通が従道路からの流入により減速しない場合（絶対優先の場合）、容量 $q_{e\max}$ は以下の通り表される。

$$q_{e\max} = \frac{\alpha q e^{-\lambda(t_c - t_m)}}{1 - e^{-\lambda t_f}}$$

### 3.7 限定優先合流とラウンドアバウト流入の容量

限定優先の場合、主道路側の車両の前の出発車頭時間は $t_m$ 、従道路側の車両の前の出発車頭時間は $t_f$ になると仮定する。これにより、主道路側の車両の減速によりその後ろの車頭時間が減少し、容量に影響する。この場合の容量は以下の通りとなる。

$$q_{e\max} = \frac{\alpha q C e^{-\lambda(t_c - t_m)}}{1 - e^{-\lambda t_f}}$$

ただし、修正係数 $C$ は、

$$C = \frac{1 - e^{-\lambda(t_c - t_m)}}{1 - e^{-\lambda(t_c - t_m)} - \lambda(t_c - t_m - t_f) e^{-\lambda(t_c - t_m)}}$$

### 3.8 絶対優先の場合の単純合流の遅れ

遅れ時間は一般にM/M/1などの伝統的な待ち行列理論や、ギャップアクセプタンス理論の延長で算出される。ここで計算される平均遅れはcontrol delayである。これは、待ち行列中の滞在時間、サービス時間、自由走行速度までの加減速時間である。Adamsの遅れ時間は、孤立した従道路の運転者の平均遅れ時間である。OpportunitiesにCowanのM3モデル、車頭時間独立を仮定すると、Adamsの遅れ時間 $D_{\min}$ は、

$$D_{\min} = \frac{e^{\lambda(t_c - t_m)}}{\alpha q} - t_c - \frac{1}{\lambda} + \frac{\lambda t_m^2 - 2t_m + 2t_m \alpha}{2(t_m \lambda + \alpha)}$$

さらに、この場合平均遅れは、

$$D = D_{\min} \left( 1 + \frac{\gamma + \varepsilon x}{1-x} \right)$$

$\gamma$  は、従道路側がランダム到着の場合0、車群を形成する場合は0以上になる。また、 $\varepsilon$  はBrilon et al. (1997b)によって与えられた定数である。多くの場合、 $\gamma=0$ 、 $\varepsilon=1$ 。また、 $x$  は飽和度である。

### 3.9 M/M/1待ち行列理論に基づく遅れの推定

多くのモデルでは、平均遅れの計算にM/M/1型の待ち行列モデルが用いられる。以下はPollaczek-Khintchine式の縮小型であり、

$$D = \frac{1}{q_{e\max}} \left( 1 + \frac{Cx}{1-x} \right)$$

ただし、

$$C = \frac{1 + C_w^2}{2}$$

$C_w$ はサービス時間の変動係数、 $q_{e\max}$ は容量である。ランダムサービス時間の場合、 $C_w=1$ となり、

$$D = \frac{1}{q_{e\max}} \left( \frac{1}{1-x} \right) = \frac{1}{q_{e\max} - q}$$

$q_{e\max}-q$ はドイツでは“reserved capacity”と呼ばれる。

図1 (M/M/1待ち行列を仮定した場合の流入交通量と遅れとの関係) -省略-

### 3.10 過飽和状態における遅れ

過飽和な状態における非確率的な遅れは、

$$D = \frac{1}{q_{e\max}} + \frac{L_0}{q_{e\max}} + (x-1) \frac{T}{2}$$

非確率的でも定常的でもないような状況下の遅れ時間を分析する方法としては、coordinate transform methodがよく用いられる。これは、定常的な遅れ曲線と非確率的な遅れ曲線を用いて新たな変換曲線を作成するものである。ある遅れ時間 $D$ を与える定常的、非確率的それぞれの飽和度を $x_s$ 、 $x_d$ とすると、変換後の飽和度 $x_t$ は $1 - x_t = x_d - x_s$ で表され、これと上の2式を組み合わせて変換後の遅れ時間の式を定式化する。

### 3.11 単純合流における待ち行列長

非飽和で、対象時間帯のはじめと終わりの待ち行列長が0のとき、平均待ち行列長 $L$ はLittleの式： $L=q_e D$ で表される。なお、 $q_e$ は従道路側の流入交通量、 $D$ は平均遅れ。一般に非飽和時の待ち行列長は幾何分布をとる。過飽和の場合は、この式は成立せず、時間とともに待ち行列長は増大する。

### 3.12 3枝以上の交差点の分析

3方向以上ある交差点の場合、例えば、3方向で優先順にrank1,2,3としたとき、最も優先度の低いrank3の容量、遅れ等を計算するときrank1、rank2の到着による妨害のみを考慮するのでは不十分で、rank2の待ち行列の影響も考慮する必要がある。これをimpedanceという。impedanceは $f_{rank3}=1-x_2$ として表され、この場合rank3の容量は $q_{emax}=q'_{emax} f_{rank3}$ となる。

4方向以上の場合にはもっと複雑になる。

### 3.13 2段階横断時の待ち行列

無信号交差点では、従道路を2段階で横断させた方がより望ましい。中央帯における待ち行列分だけ有利になるためであるが、中央帯には滞留させるためのスペースは限られている。このような2段階横断の場合の容量についてはWu et. al.(1996)による研究がある。

## 4. 信号交差点

### 4.1 有効赤および有効青時間

車両は信号が青に変わってもすぐには出発できないため、はじめの数台は飽和時の車頭時間よりも長い車頭時間となる。また、赤に変わるときも同様。従って、モデル化に当たっては有効青時間に車両が移動し、有効赤時間に車両が停止すると仮定する。

### 4.2 信号交差点における遅れ時間の定義

信号交差点の運用は累積図を描くと最もよく説明できる(図2)。図中、到着曲線と出発曲線があり、太い線が理論線である。ここでは個々の車両の挙動は省略されている。到着曲線の傾きが到着流率、出発曲線の傾きが飽和流率である。

図2は待ち行列長と遅れ時間の情報を与える点でも重要。ただし、ここで得られる遅れ時間には加減速状態も含まれる。これは図3で説明できる。

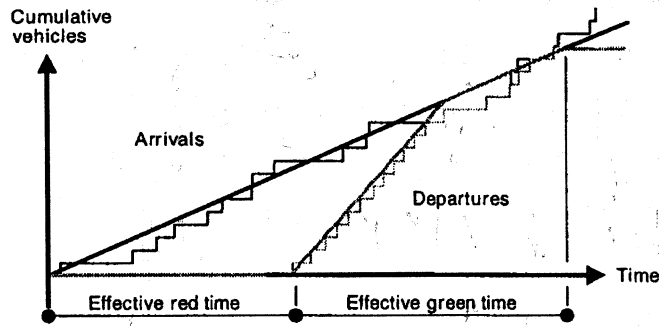


図2 到着・出発パターン

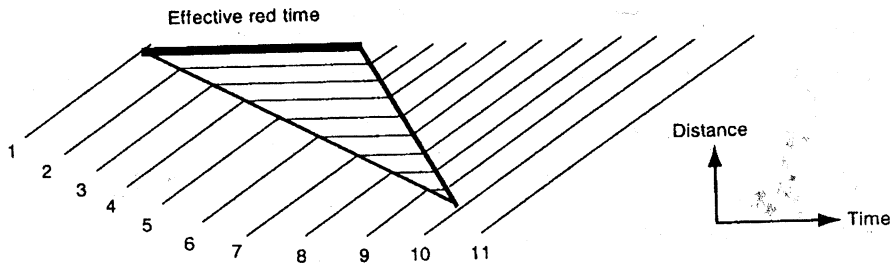


図3 車両軌跡の時空間図

#### 4.3 非飽和時の遅れ時間モデル

非確率的なアプローチで考えると、遅れ時間は、図2の到着曲線、出発曲線で囲まれた面積。総遅れ時間 $D_t$ 、平均遅れ時間 $D$ は、

$$D_t = \frac{c^2 q (1 - g/c)^2}{2 \left[ 1 - (g/c)x \right]}, \quad D = \frac{c (1 - g/c)^2}{2 \left[ 1 - (g/c)x \right]}$$

平均遅れ時間の式としてはWebsterの式が有名である。理論的に求めた第2項までにシミュレーションで得られた補正項(第3項)を加えて定式化した。なお、第1項は上記の確定項と同じである。

$$d = \frac{c (1 - g/c)^2}{2 \left[ 1 - (g/c)x \right]} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0.65 \left( \frac{c}{q^2} \right)^{1/5} x^{2+5(g/c)}$$

McNeil(1968)は捌け残り行列： $Q_0$ に伴う平均遅れをより正確に計算する方法を示した。Miller(1968)はさらに $Q_0$ の効果的な算出方法を開発した。

#### 4.4 時間依存する遅れの評価

時間依存する遅れの評価（近飽和、過飽和）に対しては、co-ordinate transform methodが信号交差点でも用いられる。Akcelik(1980)は平均捌け残り式に基づくco-ordinate transform techniqueを開発し、Fambro and Rouphail(1997)が改良した式が1997HCMに掲載されている。

$$d = d_1 \times PF + d_2 + d_3$$

$$d_1 = \frac{c \left(1 - \frac{g}{c}\right)^2}{2 \left[1 - \left(\frac{g}{c}\right) \min(1, x)\right]}$$

$$d_2 = \frac{T}{4} \left( (x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{8klx}{q_{e\max} T}} \right)$$

$d_3$ は分析区間のはじめと終わりの捌け残り行列に依存する。分析の終わりが過飽和でなければ、 $d_3=0$ となる。PFは青時間における到着を考慮したprogression factorsである。最もひどい状況ではPFは1以上、ランダム到着の場合は1となる。Iは到着台数の分散、 $k$ は到着およびサービス時間分布に関する量である。

#### 4.5 信号交差点における右折交通のモデリング

信号が青に変わってから待ち行列が捌けるまでは右折車は発進できない。待ち行列が捌けて交通流率が飽和流率から到着流率まで減少すると右折できる可能性がある。この場合の右折可能台数は、無信号の場合の議論(3.6)から計算可能である。なお、これに加えて黄色の間の右折可能台数を考慮する必要がある。

(担当：小根山 裕之)

#### 参考文献

- Akcelik, R. (1980) "Time-dependent expressions for delay, stop rate and queue length at traffic signals", Australian Road Research Board, Internal Report AIR 367-1.
- Akcelik, R. and R.J. Troutbeck (1991) "Implementation of the Australian roundabout analysis method in SIDRA", in: U. Brannolte, ed., *Highway capacity and level of service. Proceedings of the international symposium on highway capacity*. Rotterdam: Balkema.
- Brilon, W., R. Koenig and R.J. Troutbeck (1997) "Useful estimation procedures for critical gaps", in: M. Kyte, ed., *Proceedings of the third international symposium on intersections without traffic signals*. University of Idaho.
- Brilon, W., R. Troutbeck and M. Tracz (1997) "Review of international practices used to evaluate unsignalized intersections", Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, Transportation Research Circular 468.
- Catchpole, E. A and A.W. Plank (1986) "The capacity of a priority intersection", *Transportation Research B*, 20(6):441-456.
- Cowan, R.J. (1975) "Useful headway models", *Transportation Research*, 9(6):371-375.

- Fambro, D.B. and N.M. Rouphail (1997) "Generalized delay model for signalized intersections and arterial streets", *Transportation Research Record*, 157:112-121.
- Haight, F.A. and M.A. Breuer (1960) "The Borel-Tanner distribution", *Biometrika*, 47(1/2):143-150.
- Kimber, R.M. and E.M. Hollis (1979) "Traffic queues and delays at road junctions", Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Report LR909.
- Kyte, M., Z. Tian, Z. Mir, Z. Hameedmansoor, W. Kittelson, M. Vandehey, B. Robinson, W. Brilon, L. Bondzio, N. Wu and R. Troutbeck (1996) "Capacity and level of service at unsignalised intersections", National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Project 3-46, Final Report. Volume 1 (available at <http://www.nap.edu/readingroom>, under "Transportation").
- Luttinen, R.T. (1999) "Properties of the Cowan M3 headway distribution", *Transportation Research Record*, in press.
- McNeil, D.R. (1968) "A solution to the fixed-cycle traffic light problem for compound Poisson arrivals", *Journal of Applied Probability*, 5:624-635.
- Miller, A.J. (1963) "Settings for fixed-cycle traffic signals", *Operations Research Quarterly*, 14:373-386.
- Newell, G.F. (1982) *Applications of queueing theory*, 2nd edn. London: Chapman & Hall.
- Tanner, J.C. (1962) "A theoretical analysis of delays at an uncontrolled intersection", *Biometrika*, 49(1/2):163-170.
- Teply, S. (1989) "Accuracy of delay surveys at signalized intersections", *Transportation Research Record*, 1225:1-8.
- Transportation Research Board (1997) *Highway capacity manual*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, Special Report 209.
- Troutbeck, R.J. (1988) "Current and future Australian practices for the design of unsignalized intersections", in: W. Brilon, ed., *Intersections without traffic signals*. Berlin: Springer-Verlag.
- Troutbeck, R.J. (1999) "Capacity of a limited priority merge", *Transportation Research Record*, in press.
- Troutbeck, R.J. and M. Blogg (1998) "Queueing at congested intersections", *Transportation Research Record*, 1646:124-131.
- Wu, N. (1998) "Impedance effects for streams of higher ranks at unsignalised intersections", presented at: Third international symposium on highway capacity, Copenhagen.
- Wu, N, W. Brilon and K. Lemke (1996) "Capacity at unsignalized two-stage priority intersections", *Transportation Research Record*, 1555:74-82.