

遅れとNOx排出量に基づく平面交差点制御方式の評価

名古屋大学工学部 学生会員 ○吉岡 慶祐

名古屋大学大学院 正会員 中村 英樹

名古屋大学大学院 学生会員 馬淵 太樹

1. はじめに

自動車で交差点を通過する際に、交通量が少ないにも関わらず信号で長時間の停止を強いられることがあるが、これにより時間の損失や無駄な燃料消費、利用者のイライラ感を招いている。日本で信号機が設置される際には、こういった不効用はあまり考慮されていないのが現状である。もし交通量に応じて不効用を最小化できる基準ができれば、効率的な交差点運用ができるはずである。

近年欧米では、交通量の比較的少ない交差点の制御方式として、ラウンドアバウトが導入されている。ラウンドアバウトでは、交差点の通過時に他に交通が存在しなければ、停止をする必要がなく車両の遅れが抑えられる。また車両軌跡の交錯点が少なく、事故が発生したとしてもその程度が軽減される。

本研究では、自動車の遅れ時間と自動車走行に伴う環境負荷に着目し、交通量条件に応じてこれらを推定することによって、不効用を最小化することのできる平面交差点の制御方式を提示することを目的とする。

2. 遅れ時間の算出

本稿では最も単純なシナリオとして、交差点を通過する車両はすべて直進し、対向の交通量は等しいと仮定する。また、算出の過程で必要となるギャップパラメータなどの値はドイツでの実測調査結果¹⁾を用いる。

2.1 ラウンドアバウト(RBT)

ラウンドアバウトの遅れ時間を考える際、遅れが生じる状況として、(i)譲れ線から環道に進入する際に被る遅れ、(ii)待ち行列から譲れ線に到着するまでの被る遅れ、の2つに分ける。まず(i)について、譲れ線に到着した車両が環道のギャップが臨界ギャップより大きいときに流入できるとすると、譲れ線で停止して t (sec)以内に流入できる確率 $V(t)$ は、Adams. W.F.²⁾により理論的に式(1)として求められている。

$$V(t) = 1 - \{1 - e^{-\lambda'(t_c - t_0)}\} e^{-\lambda e^{-\lambda'(t_c - t_0)} \cdot t} \quad (1)$$

停止時間の確率密度関数 $v(t)$ は、式(2)のようになる。

$$v(t) = \frac{dV(t)}{dt} = \{1 - e^{-\lambda'(t_c - t_0)}\} \lambda e^{-\lambda'(t_c - t_0)} \cdot e^{-\lambda e^{-\lambda'(t_c - t_0)} \cdot t} \quad (2)$$

平均停止時間 $\bar{w}$ は式(3)となる。

$$\bar{w} = \int_0^{\infty} t v(t) dt = \frac{1}{\lambda} \{e^{\lambda'(t_c - t_0)} - 1 - \lambda'(t_c - t_0)\} \quad (3)$$

次に(ii)について考える。待ち行列理論よりある車両が到着したとき待ち行列に n 台の車両が存在する確率

$P(n)$ は、式(4)となる。

$$P(n) = (q_e \bar{s})^n (1 - q_e \bar{s}) \quad (4)$$

よって、ある車両が待ち行列に到着したとき前方に並んでいる車両の平均数 $\bar{n}$ は式(5)のように求まる。

$$\bar{n} = \sum_{n=1}^{\infty} (n-1) P(n) = \frac{(q_e \bar{s})^2}{1 - q_e \bar{s}} \quad (5)$$

$\bar{s}$ は平均のサービス時間で、交差点においては平均待ち時間と平均追従時間の和で表せるものとする。

$$\bar{s} = \bar{w} + t_f \quad (6)$$

これより待ち行列に並ぶ車両の、待ち行列での平均待ち時間 d_{que} は式(7)のようになる。

$$d_{que} = \frac{\bar{n} \bar{s}}{1 - P(0)} \quad (7)$$

2.2 信号交差点(Sig)

信号交差点の遅れはWebsterの式で求める。サイクル長は最適サイクル長を用いるが、最小値を30秒、最大値を180秒とする。

$$d_{sig} = \frac{(1-g)^2}{2(1-\lambda)} C + \frac{X^2}{2q(1-X)} - 0.65 \left(\frac{C}{q} \right)^{1/3} X^{(2+5g)} \quad (8)$$

2.3 無信号交差点(Uns)

無信号交差点では、主道路については遅れ時間は生じないので従道路のみ考える。従道路の車両は停止線で必ず一旦停止するものとし、主道路の双方向のギャップが同時に臨界ギャップより大きいときに横断できるものとする。つまり、停止線で主道路の車両を見送り、すぐには横断できない確率は式(9)となる。

$$1 - \{V(0)\}^2 = 1 - e^{-2\lambda'(t_c - t_0)} \quad (9)$$

ラウンドアバウトと無信号交差点について、車両挙動の発生確率と平均停止時間は、表1のようになる。

2.4 遅れ時間の試算結果と比較

主道路の交通量をそれぞれ固定し、全車両の1台あたりの平均遅れ時間の比較を行ったものを図1に示す。主道路の交通量に関わらず、従道路の交通量が150台/h程度以下のときは無信号交差点で遅れが最小となり、一方、主道路と従道路の合計交通量が1,700台/h程度以上まで増えると信号交差点で遅れが最小となる。それ以外ではラウンドアバウトで遅れが最小となることがわかった。これらの結果から、最も有利な制御方式の領域を主従道路の交通量により示したものが図2(左)である。ラウンドアバウトが有利となる領域の主道路の交通量が1,200台/hまでとなり、交通容量に近い値まで広がっているが、これは右左折車両を考慮しておらず、環道交通量が少なくなっているためである。

表1 車両挙動ごとの集計 (RBT, Uns)

	車両挙動	発生確率	平均停止時間
RBT	停止なし	$P(0)V(0)$	0
	譲れ線で停止	$P(0)\{1-V(0)\}$	$\bar{w}/\{1-V(0)\}$
	待ち行列あり	$1-P(0)$	$\bar{w}+d_{que}$
Uns	待ち時間なし	$P(0)\{V(0)\}^2$	0
	待ち時間あり	$P(0)\{1-V(0)\}^2$	$2\bar{w}/\{1-V(0)\}^2$
	待ち行列あり	$1-P(0)$	$2\bar{w}+d_{que}$

3. NOx排出量の算出

3.1 排出量推計の考え方

自動車からのNOxなどの排出量を推計する研究は数多く行われており、主なものとして平均旅行速度を説明変数とするものや、シミュレーションを用いたものなどがある。しかしこれらの手法は、加速、減速などの細かな車両挙動を十分に考慮できず、交差点単位での排出量を推計するには不適切である。一方、小根山³⁾は、エンジン回転数やトルクなどのエンジン状態と排出量の関係から、ディーゼル車の瞬間のNOxなどの排出量を、速度と加速度の関数として表している。このモデルは、加減速による排出量を詳細に推計できるため、今回の研究に適したモデルである。

3.2 排出量の推計式

小根山の排出量推計モデル式は、式(10)のように走行状態ごとに分割することができる。 $f(g/sec)$ は瞬間の排出量、 $F(g)$ は区間での排出量である。

$$f = \frac{dF}{dt} = \begin{cases} c_1v + c_2v^3 + c_{4r+} & \text{定速状態} \\ c_1v + c_2v^3 + c_{3a}\alpha v + c_{3b}\alpha + c_{4r+} & \text{加速状態} \\ c_{4r-} & \text{減速状態} \\ c_{4ri} & \text{アイドリング} \end{cases} \quad (10)$$

今回は全車両が交差点を直進し、また簡単のためラウンドアバウトの環道走行による排出量は無視できるほど小さいと仮定する。このため停止あるいは減速の有無により、図3の3つの速度プロファイルの車両挙動について考え、走行状態ごとに式(10)より計算した。

3.3 排出量の試算結果と比較

NOx排出量の比較をしたものを図4に示す。また、NOx排出量からみた最も有利な制御方式の領域を主従道路の交通量により示したものが図2(右)である。従道路の交通量が150台/h程度以下、あるいは合計交通量が700台/h程度以下のとき、無信号交差点が有利となり、それ以外では信号交差点が有利となる。ラウンドアバウトは遅れ時間では有利な領域が多いが、すべての車両が減速を強いられるため、特に加速時のNOx排出量が多くなったと思われる。今回は信号交差点において最適サイクル長を用いており、右左折の影響を無視しているため、さらに詳細な検討が必要である。

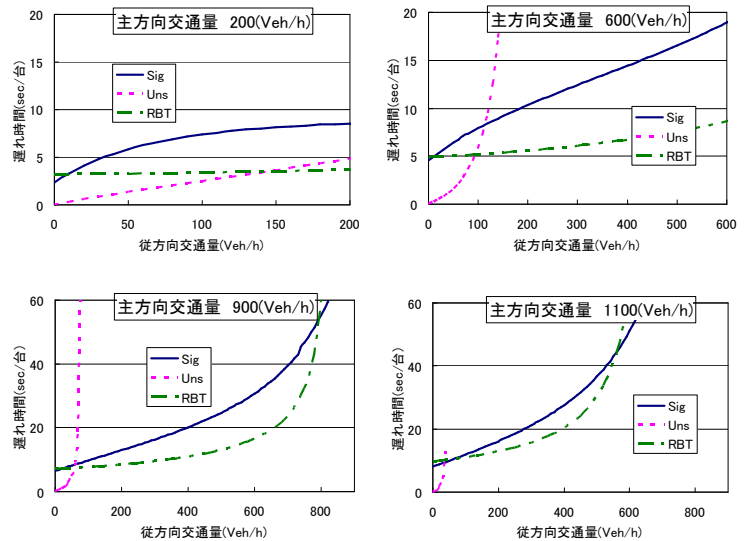


図1 遅れ時間(車両1台あたり)の比較

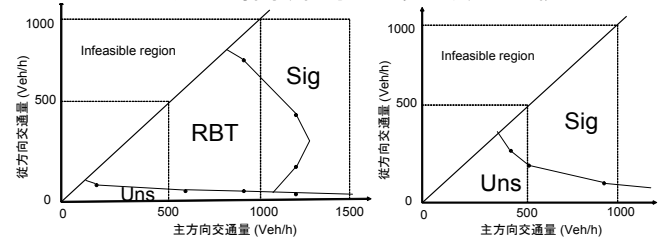


図2 遅れ時間(左)とNOx排出量(右)に基づく最適制御方式

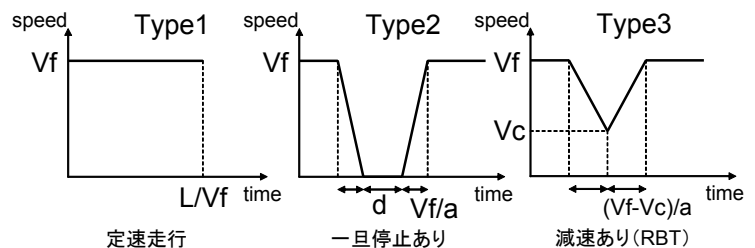


図3 車両挙動ごとの速度プロファイル

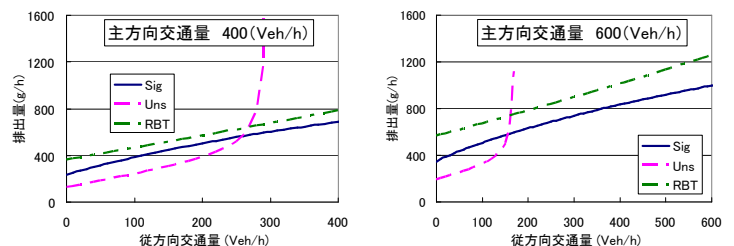


図4 NOx排出量(1交差点あたり)の比較

4. おわりに

今回は直進車両のみのケースを考えたが、今後は右左折車両の影響を含めて比較をする予定である。また、遅れ時間、NOx排出量の観点のみの比較をしたが、ほかの排出物質、建設段階でのコストや、事故による損失などの観点からも比較を行う予定である。

参考文献

- 1) 平成17～18年度科学研究費補助金 研究成果報告書：合理的な道路幾何構造設計と交通運用実態に関する海外学術研究, 2007.
- 2) 佐佐木綱, 飯田恭敬: 交通工学, pp129-138, 1992.
- 3) 小根山裕之: 交通の動的変化に対応した自動車からの排出ガス推計方法の研究, 東京大学博士論文, 2003.
- 4) 社団法人 交通工学研究会: 改訂 交通信号の手引き, 2006.