

渋滞現象分析のための信号確率モデルによる車の信号停止回数の算定*

*Estimation of the amount of stopping times using signal probability model
for traffic jam analysis**

星 仰**・堀 勝也***・下荒地勝治****

By Takashi HOSHI **・Katsuya HORI ***・Katsuji SHIMOKOUJI ****

1. はじめに

都市域などの道路を移動する車を安全かつスムーズに走行させるためには、渋滞現象の解明が不可欠とされている。しかし、これまでの研究では信号による走行ないし停止に伴う確率モデルが導き出されていなかったため、都市区間などの車の信号停止回数を予測することが困難であった。本研究では、渋滞現象を分析するために信号確率モデルを提案し、これを用いて道路区間ごとの車の信号停止回数を1つの事例ルートで予測できることを示す。

2. 交通渋滞モデル

渋滞現象を把握するには、自動車交通流の特性を理解し、その交通流の三大要因である、交通容量 q 、交通速度 v 、交通密度 k を巨視的状態量と車頭間隔等の微視的状態量を用いて推定する。

流体理論のエネルギー保存の法則および連続の法則を適用するには、車の流れを交通密度と考え、車頭距離と走行速度の関数を現実に対応するものとして求められてきた。このようなモデル理論は、Lighthill、Whitham、Richardsや井上らによって解析されている^{1) 2) 3) 4)}。1990年代においても、前述のモデル理論に基づいて、G. F. Newell (1992)、John Grubba (1992)らによって、信号交差点付近における、交通流についてそれぞれの提案がなされて

いる^{5) 6)}。

本報告では、交通流における波動現象理論を用いて、車の流れと圧縮性流体の流れの類似性から、信号制御による交差点付近、交通事故や自然渋滞における車の軌跡を、波動現象の衝撃波の伝播速度および起動波の遅れ速度によって、渋滞距離・渋滞時間を簡易に推定するモデル図を作成したので、これについて論述する。

(1) 信号停止による渋滞メカニズム

安全状態で v_0 で走行している車体が信号停止位置 O において、 OA で時間停止するものとする、停止車の増加速度(衝撃波 I)は OB となる。

OA 時間後、自由速度で加速し、前車とは OE ライン上で追いつき、速度によって交点に変化する。起動波 AB は、スタートの遅れ時間によるもので、後方へ伝播し、後続車の走行速度に近似した地点が、ここで求める $k_0 = k_1$ 地点である。斜めの平行線は、車体として走行している v_0 走行線である。

渋滞距離は、 $OB \cdot OA$ の交差点 B プラス加速遅れ時間 δ 秒と仮定し、 C 地点とすると OC' が渋滞距離で、 OC'' が渋滞遅れ時間である(図-1)。

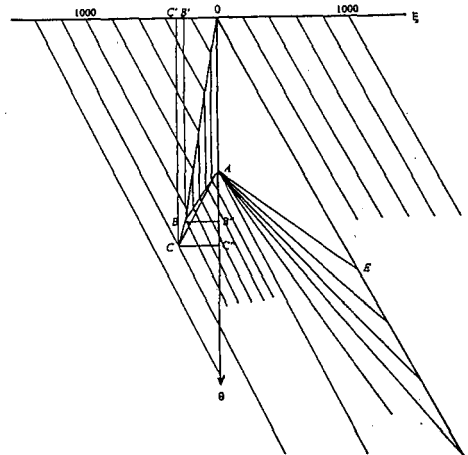


図-1 信号停止による渋滞のメカニズム

*キーワード：経路選択、交通流、交通容量、交通情報

**正員、工博、茨城大学工学部情報工学科

(茨城県日立市中成沢町 4-12-1、

TEL:0294-38-5133、FAX:0294-37-1429)

***正員、工修、茨城大学大学院工学研究科

(茨城県日立市中成沢町 4-12-1、

TEL:0294-38-5154、FAX:0294-37-1429)

****工修、日本ユニシステム(株)

(東京都千代田区三崎町 2-4-1、

TEL:03-3221-0811、FAX:03-3222-9190)

(2) 事故渋滞のメカニズム

信号停止と事故停止での差は、事故停止で通過可能台数があるか否かの違いであり、その差は衝撃波Ⅰ軌跡の速度勾配の角度によって表される。通過可能台数が大きければ渋滞台数が減少し衝撃波伝播速度は小さく、勾配が大きくなる(図-2)。

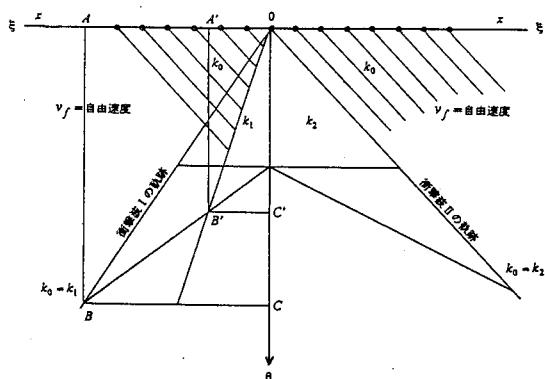


図-2 事故による車の軌跡図

(3) 自然渋滞のメカニズム

自然渋滞はボトルネック地点の通過可能容量によるもので、時間需要容量との差で需要容量の方が大きい場合に発生する現象である。渋滞が発生すると平均速度が低下し、その速度は車頭距離との関係で容量が決定される。すなわち、容量により速度も決定されることでもある。自然渋滞により時間需要容量が満足以通過できず、残留台数が後続時間需要容量に加算され、車頭距離に影響を与え、さらに走行速度に影響を与える(図-3)。これらの3種のメカニズムによって渋滞現象を考えることにする。

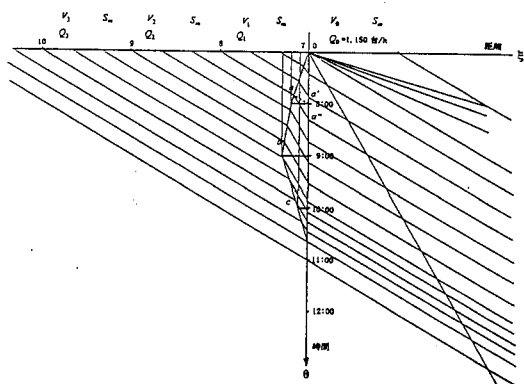


図-3 自然渋滞のメカニズム

3. 信号確率モデル

信号制御による渋滞に対して現在まで、信号交差点付近の現象解明に関した数多くの論文が発表されているが^{7) 8) 9)}、信号による遅れ時間または停止確率についてはほとんど述べられていない。ここでは信号制御における信号確率モデル理論を導き、信号停止確率を推定し、これらによって遅れ時間を推定する。とくに、信号数によって停止確率が増減するか、平均速度の変化に応じ青信号時間・赤信号時間の割合に対して相関関係が認められるかということも重要な問題である。

そのためには、停止確率理論に基づいて経路問題への適用を行い、各区分ごとの停止確率を求め、平均速度、赤信号時間(秒)、信号の数による各々の検討を行い、 n 個における信号停止確率を求める。

(1) 信号モデル

信号における停止(通過)する確率を求めるには、単純な信号モデルから一般性を見出すことが可能と思われるが、ここでは信号の個数を増加させたときの信号モデルを想定し、停止および通過するときの確率を算定してみる。図-4は、信号2個の場合のモデルである。

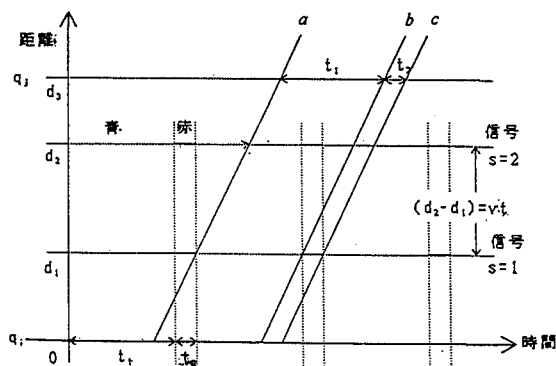


図-4 信号2個のときのモデル

このモデルでは、単純化するために以下のような交通の信号条件を定めることにする。第1の条件は、信号は同期していると仮定する。

第2の条件は、信号を青(黄を含む)と赤の2種にし、青の信号時間を t_1 、赤の信号時間を t_2 とする。

第3の条件は、移動体の速度を平均速度 V 、信号間の距離を d_i ($i=1 \sim n$)とする。この i は信号の番

号を表す。

第4の条件は、確率変数を $X_i(\omega)$ で表現する。この値は、0, 1 のいずれかをとり、0 は通過、1 は停止を表す。

ここで、確率 $P(X_1 + X_2 = k)$ は、次のように表現する。

$$\begin{aligned} P(X_1 + X_2 = k) \\ = \sum_{j=0}^i P(X_1 + X_2 = k | X_1 = j) * P(X_i = j) \end{aligned} \quad (4-1)$$

そこで、確率 $P(X_1 + X_2 = k | X_1 = j)$ ($j = 0, 1, k = 0, 1, 2$) を求める。

ここで、信号で停止する時間を T_{red} とすると、 T_{red} は信号到着時間 T によって、下記の3種類に区分される。

$$\left. \begin{aligned} T_{red} &= T & (0 \leq T \leq t_2) \\ T_{red} &= t_2 & (t_2 \leq T \leq t_1) \\ T_{red} &= t_1 + t_2 - T & (t_1 \leq T \leq t_1 + t_2) \end{aligned} \right\} \quad (4-2)$$

(2) 信号確率モデル

前節で述べた仮定条件・設定概念によって、第1番目の信号確率および第2番目の信号概念を用いて、順次前の確率関係を利用することにより、 n 個の信号をもつ区間の確率を求めた。確率式としては次のような一般式を導き出した。

$$\begin{aligned} P(X_1 + X_2 + \cdots + X_n = k) \\ = \sum_{j=0}^{n-1} (X_1 + X_2 + \cdots + X_n = k \\ | X_1 + X_2 + \cdots + X_{n-1} = j) \\ * P(X_1 + X_2 + \cdots + X_{n-1} = j) \end{aligned} \quad (4-3)$$

これを導き出す過程は、まず第1番目の信号で停止するか否かの確率を求め、次に第2番目の信号を停止するか否かの確率を求める。そして順次これらの確率を代入することにより最終的に n 個の信号確率を求めた。以下式(4-3)を導き出す過程の詳細を示す。

a) 信号が1個の場合

$$\left. \begin{aligned} P(X_1 = 0) &= t_1 / (t_1 + t_2) \\ P(X_1 = 1) &= t_2 / (t_1 + t_2) \end{aligned} \right\} \quad (4-4)$$

で表され通過確率は $t_1 / (t_1 + t_2)$ で、停止確率は $t_2 / (t_1 + t_2)$ であり、青信号時間、赤信号時間の割合による。

b) 信号が2個の場合

$$\left. \begin{aligned} P(X_1 + X_2 = 0 | X_1 = 0) &= 1 - T_{red1} / t_1 \\ P(X_1 + X_2 = 0 | X_1 = 1) &= 0 \\ P(X_1 + X_2 = 1 | X_1 = 0) &= T_{red1} / t_1 \\ P(X_1 + X_2 = 1 | X_1 = 1) &= 1 - T_{red1} / t_1 \\ P(X_1 + X_2 = 2 | X_1 = 0) &= 0 \\ P(X_1 + X_2 = 2 | X_1 = 1) &= T_{red1} / t_1 \end{aligned} \right\} \quad (4-5)$$

これは第1番目の信号を通過して、第2番目の信号を通過するか否かのすべてのケースを求めたものである。信号2個の場合の確率式(4-1)を展開し、式(4-4)、(4-5)を代入すると、次の結果を得る。

$$\begin{aligned} P(X_1 + X_2 = 0) \\ = (1 - T_{red1} / t_1) * t_1 / (t_1 + t_2) \\ + (t_1 - T_{red1}) / (t_1 + t_2) \\ P(X_1 + X_2 = 1) \\ = (T_{red1} / t_1) * (t_1 / (t_1 + t_2)) \\ + (1 - T_{red1} / t_1) * t_2 / (t_1 + t_2) \\ = T_{red1} / (t_1 + t_2) \\ + (1 - T_{red1} / t_1) * t_2 / (t_1 + t_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(X_1 + X_2 = 2) \\ = T_{red1} / t_1 * (t_2 / (t_1 + t_2)) = T_{red1} * t_2 / t_1 / (t_1 + t_2) \end{aligned}$$

信号が3個の場合、4個、5個、...、 n 個の場合と順次求められる。

b) 停止回数 E

各区間の信号停止回数 E とすると、次式となる。

$$E = \sum_{i=0}^n i * P(X_1 + X_2 + \cdots + X_n = i)$$

ここに信号停止確率を推定し、その分析区間での停止回数 E を試算する。このためには、経路モデルを設定し、各信号の位置を求める必要がある。その

各々の数値による演算の結果は5章で述べる。

4. 経路設定

茨城大学工学部正門を起点とし、常陸太田駅を終点とする経路モデルを設定した(図-5)。

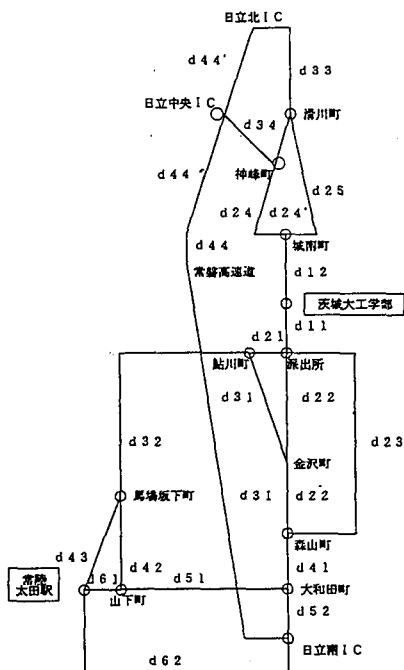


図-5 道路網略図

5. 計算結果

計算結果より信号停止確率は、信号の数、走行速度、信号停止時間に重大な影響を受けることが明らかになった。表-1の走行モデルによると経路モデルの各区間ごとの信号による車の停止回数が信号停止確率の一般式から求められた。このことは渋滞現象分析のため、信号停止確率を考慮することに意義があることを示している。

6. ま と め

本研究の信号確率モデルを用いることによって、最短経路問題で自然渋滞による遅れ時間を求めるための渋滞距離、渋滞解消時間が安易に推定できた。また、信号停止確率を導き出し、信号停止回数を推定することの意義が認められた。これに基づいて、

表-1 信号停止回数 E

区間 No.	信号数 n	$T_1 = 60 \quad T_2 = 50$		
		60km/h	50km/h	40km/h
d11	2	0.940	1.037	1.182
d12	4	1.765	2.027	2.390
d21	2	0.735	0.791	0.875
d22	13	5.990	6.225	6.069
d23	17	6.071	7.473	7.908
d24	17	3.975	4.679	5.735
d25	16	3.810	4.481	5.324
d31	17	6.113	6.853	7.535
d32	7	2.748	2.493	3.061
d33	11	4.265	4.155	3.743
d41	5	1.106	1.603	2.195
d42	3	1.843	1.754	1.516
d43	6	2.298	2.498	2.550
d44	1	0.455	0.455	0.455
d51	7	2.511	2.189	2.615
d52	1	0.455	0.455	0.455
d61	1	0.455	0.455	0.455
d62	5	1.831	1.984	2.520

実走行における実験を試みる予定である。

参考文献

- 1) M. J. Lighthill, F. R. S. and G. B. Whitham (Dpt. of Mathematics, Univ. of Manchester) : On Kinematic Waves A theory of traffic flow on long crowded road, 1955.
- 2) Jeno Rorbech (Technical Univ. of Denmark) : Determining the Length of the Approach Lanes Required at Signal-Controlled Intersections on Through Highways, 1968.
- 3) Paul I. Richards (Tech. Operations, Inc., Arlington, Massachusetts) : Shock Waves on The Highway, 1955.
- 4) 井上矩之 : 都市間高速道路の交通管制に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, 1973.
- 5) G. F. Newell : A Aimplified Theory of Kinematic Waves in Highway Traffic, Part I, General Theory, Institute of Transportation Studies, Univ. of Calyf., pp.281-287, 1993.
- 6) John L. Grubba, et al. : Combining Real Time, Adaptive Traffic Control and Machine Vision Detection for Advanced Traffic Management Systems, ITE Compendium of Technical Papers, pp.298-302, 1993.
- 7) 織立雄樹, 青木正喜 : 交通信号と高越流の相互関係解析, 電機学会道路交通研究会資料, RTA-95(1-12), pp. 65-70, 1995.
- 8) Kyte M. et al. : Saturation Headways at Stop-Controlled Intersections, Transp Res Rec, No.1457, pp. 111-117, 1994.
- 9) Hutchinson T. P. : The Continuous Flow Intersection, Traffic Eng. Control, No.36(3), pp. 156-157, 1995.