

交差点における車両の挙動のモデル的解析と青信号スループット

高木 相[†] 谷口 正成[†] 藤木 澄義[†]
神村 伸一[†] 鈴木 伸夫[†]

道路交通の緩和対策には多くの施策や措置がとられているが、交差点信号の最適化も重要な手段の1つである。本論文はこの点に着目した基礎的な問題として実道路における車両の挙動に関する諸量の測定から、交差点における車両の動きをモデル化し、交差点の車両列が青信号によって変化する様子を、それぞれの車両の発進特性から解析的に求めた。その結果として青信号通過容量（青信号スループット）が計算でき、実交差点での計測値と対比し、ほぼ合理的であることを確かめた。

Analysis of Vehicle Behaviour at an Intersection and Green Signal Throughput

TASUKU TAKAGI,[†] MASANARI TANIGUCHI,[†] SUMIYOSHI FUJIKI,[†]
SHINICHI KAMIMURA[†] and NOBUO SUZUKI[†]

Among many trials for relaxation of congesting road traffic, an optimal signal control is deemed to be one of the most effective way. This paper is dealing with such a viewpoint of traffic problem. In this paper, adopting related measured data, a dynamics of vehicle movements at an intersection were analyzed to show the model of vehicle queue behaviour: vehicle queue diminishes during a green signal period, and it grows during a red period. Each vehicle's analytic trajectory was shown. Using such results obtained, a throughput, that is, number of cars passing through during green period, was calculated and measured.

1. ま え が き

交通は人間社会の発展とともに発達してきた。特に、道路交通は経済活動の生命線といえ、また、観光などの新産業、レジャーに欠くことのできないものであり、多く語られているように、道路交通自体は文化そのものであるとともに環境問題、エネルギー問題など解決すべき多くの問題をかかえている¹⁾。

交通信号の有効な制御法の確立を目的に、筆者の1人（高木）は1965年、都市の複数の隣接する交差点の系統的な交通信号の制御（面制御）の可能性を探ったが成功しなかった²⁾。その後、交通問題は道路の整備と交通規制が先行し、交差点の渋滞のダイナミクスや、信号制御のあり方の基本的、原理的調査研究は一部の研究者に委ねられていた感が強い^{3),4)}。

一方、近年、ITS（高度道路交通システム）のプロジェクトの中でも交通管理の重要課題として渋滞問題は真剣に取り組むべきものとして取り上げられている。

そこで、

- 渋滞はどのようにして起こるのか、
- 渋滞はどのようにして解消するのか、
- 信号はどのように制御すれば最も効果的か、

を明らかにすることが急務であると考えられる。しかしこの課題は複雑でまだ十分見通しの立つ状況には至っていない。筆者らの調査範囲ではこれに関連した文献は見つからないのが現状である。

そこで本論文では東北地方の主要国道の交差点を測定対象として上記の課題の検討の基礎となると考えられる、青信号時間内に何台の車両が交差点を通過できるか（青信号通過容量：ここでは青信号スループットという）を、車両の挙動の測定とデータ解析から算出し、これに係わる関連パラメータとの関係を明らかにすることとした。以下その結果を述べることにする。

2. 交差点車両列の挙動と最短車頭時間の測定

ここで車両の挙動について以下の4種類の測定結果を述べる。すなわち、

- (1) 青信号発進特性
- (2) 発進時の加速特性

[†] 東北文化学園大学

Tohoku Bunka Gakuen University

- (3) 停止時の減速特性
- (4) 定常走行時の最短車頭時間

である。なお、(4)の最短車頭時間とは、定常速度で走行するとき、危険を感じないで前車両に追従する場合の車頭距離(最短安全距離)を時間で表したものである。

2.1 青信号発進特性の測定

測定対象とした交差点は国道49号線(郡山市)の日大工学部入り口の交差点である(図1)。測定対象としては会津若松方面に向かう車両とした。ここでの制限速度は40km/hである。測定方法は次のとおりである。

- (1) 車両停止線より、5、10、25、40mの位置に計時員を配置する。
- (2) 青信号点灯時にそれぞれの距離に車頭が到達した時間を測定する。

なお、測定員の関係で停止車両の先頭車両から第4台目までの車両について同様の測定を行った。時間の測定にはストップウォッチを使用した。また、測定当日は晴天で交通量は比較的混雑の少ない14時から16時の間とした。

以上のような方法で測定した約250台の車両についての結果から求めた時間(t)と距離(d)の関係、すなわち(t-d)曲線を図2に示す。図中矢印は測定値のばらつきを示し、○印はその平均値である。図2においては後続車両との車間距離を7mとしている。これは停止車両が道路を占有する平均距離(L₀)である。これも同時に測定した結果、

$$L_0 \approx 7m \tag{1}$$

であったことを表している。

なお、先頭車両が交差点で停止するときの停止位置は平均的にはほぼ停止線上であることを確認した。

2.2 発進時の加速特性の測定

図2のt-d曲線では車両の発進時の特性(加速特性)の詳細を明らかにすることはできなかった。そこで、乗用車3台を用いて、運転者と計時員との連携で、加速特性を測定した。測定方法は次のとおりである。

- (1) 各車両には運転者(学生)と複数の計時員が同乗する。
- (2) 交差点で停止したとき、自車両が先頭車両から数えて何台目かを記録する。
- (3) 計時員は発進開始とともに計時を開始する。
- (4) 計時員は10km/hから60km/hまで、10km/hごとにそれぞれの速度に達した時間を計時する。

以上の方法で約80回測定し、時間-速度特性(t-v特性)を求めた。先頭車両から5台目までのそれぞれ

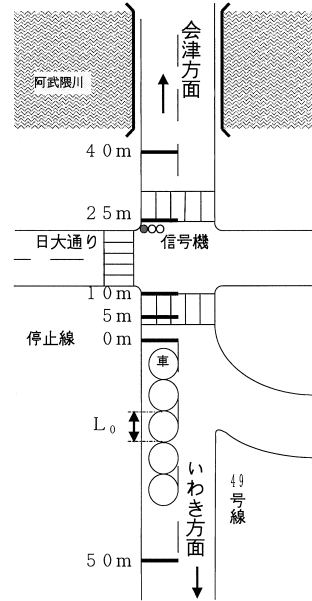


図1 測定交差点の概略図
Fig. 1 Load sketch at a measured intersection.

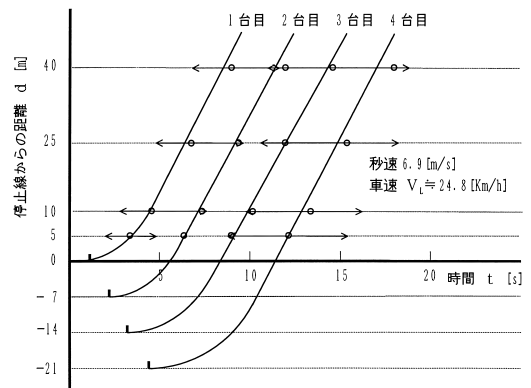


図2 青信号点灯時の車両列の発進特性の測定結果
Fig. 2 Measured results of vehicle starting characteristics after green signal turned on.

の加速特性の測定結果を図3に示す。図3の実線はそれぞれの平均を示す。

図3に示すように、先頭車両から3台目までとそれ以降との車両の加速度曲線に差が見られたが、これは車両列が長くなると大型車両(バス、トラックなど)が混入する率が大きくなってくるためである。

本研究ではすべての平均を考えるのが実際のと考えて5台目までをすべて平均したt-v特性を求めた。これを図4に示す。加速度はここに示す曲線の微分で示される。加速度特性(図4の微分特性)は、騒音特性には密接に関係するが⁵⁾、交通流解析には、加速度曲線の細部は当面重要な要因にはならないと考えられ

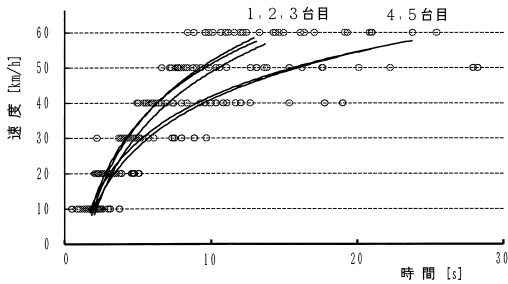


図3 車両列順加速特性の測定結果

Fig. 3 Measured results of vehicle accelerating characteristics at start.

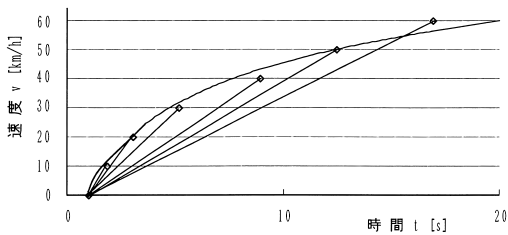


図4 平均的加速特性の測定結果

Fig. 4 Average accelerating characteristics of all measured vehicles.

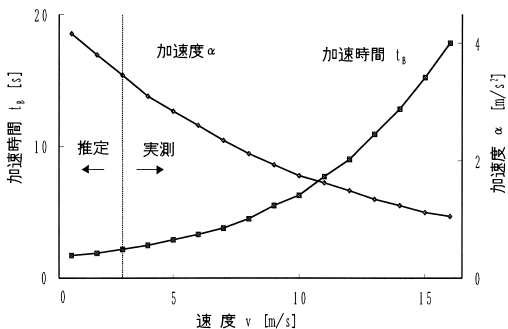


図5 車速に対する加速度 (α) と加速時間 (t_B) との関係

Fig. 5 Relationship between acceleration coefficient (α) and acceleration time (t) with respect to vehicle speed.

るので図中に示すように一定の加速度 ($t-v$ 特性で直線) と近似して以後取り扱うこととした。また、後で示すごとく (3章), $t-d$ 曲線を決定するためには、車両加速度 α と加速時間 t_B が重要であることから、図4 から α (図4の傾斜 m/s^2) と t_B ($t_B = v/\alpha$, $v =$ 速度) を求めた結果を図5に示す。

2.3 停止時の減速特性の測定

赤信号で車両が停止するときの減速特性についても、前述の加速度特性と同様にして測定した。図6にその結果の一例を示す。ここに示すように、多くの車両はほぼ直線的に減速して停止する場合が多いことが分

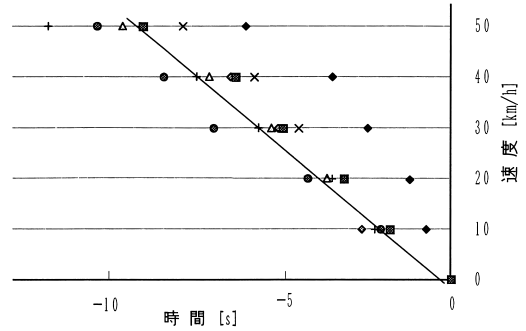


図6 車両停止時 (赤信号) の特性の測定結果

Fig. 6 Measured results of decelerating characteristics of vehicles after red signal turned on.

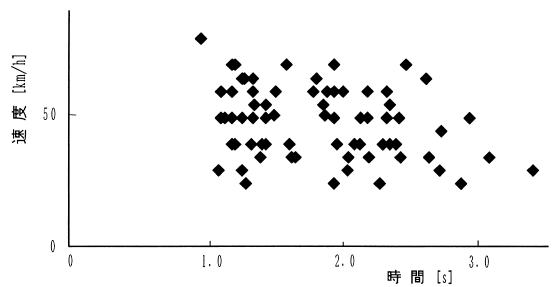


図7 最短車頭時間の測定結果

Fig. 7 Measured results of minimum time headway.

かった。そこで、減速時の $t-v$ 特性を図6の直線で近似することとした。

2.4 定常走行時の最短車頭時間の測定

車両を運転するとき、運転者は前の車両の後を、ある距離離れて走行し、安全を確保する。この安全確保のための最短車頭距離 (最短安全距離) を時間で表したものをここで最短車頭時間と称する。交差点で青信号で発進した車両列の個々の車両が、前車両のあと何秒後に通過するかを停止線の位置で測定した結果が公表されている⁶⁾。この測定は交差点を次々に発進する車頭時間の測定でやや似た測定であるが、これはここでいう最短車頭時間とみてよいと思われる。ここに示されている測定結果では、先頭車両から1台目で3秒、2台目で2.5秒、3、4台目以降は2秒前後の平均車頭時間である。図2に示すように今回の測定では、4台目までの車頭時間の平均は約3秒であった。

一方、筆者らの疑問としては、最短車頭時間は車両速度に依存するのではないかとということであった。そこで、乗用車4台を用いて国道49号線 (一般道路) と常磐高速道で測定した結果を図7に示す。最短車頭時間は以下の方法で測定した。

- (1) 各車両には計時員と記録員を同乗させる。

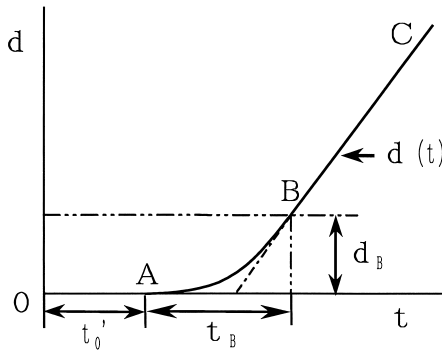


図8 $t-d$ 曲線のモデル. d : 走行距離 [m] (縦軸), d_B : 加速終了時の走行距離 [m], t'_0 : 発進遅れ時間 [s], t_B : 加速時間 [s]
Fig. 8 Model curve of $t-d$.

- (2) 運転者は最短安全距離で走行する.
- (3) 前車両がある目安(たとえば道路標識)を通過した時刻と自車両がその位置に達したときの時間差を測定する.
- (4) 同時に自車両の速度を記録する.

図7に示すように,ばらつきは相当あるが,最短車頭時間は車速にはほとんど影響されず1~3秒で,平均は約2秒である.したがって,最短車頭時間は,車速にはほとんど無関係としてよいであろうと考えられる.

3. 交差点車両列の挙動のモデル

3.1 車両発進特性($t-d$ 曲線)

1台の車両が青信号点灯と同時に発進して定常速度に達するときの時間 距離特性($t-d$ 曲線)のモデル化した曲線を図8に示す.

本モデル曲線では, $t=0$ を青信号点灯時とし,さらに,一般的には発進遅れ時間 t'_0 が存在するものとした.なお,図4の測定結果より加速時の立ち上がりに要する時間は約1秒であった.この値は青信号時間に対して小さいので以後はこれを無視することとした.

図8のモデル曲線 $d(t)$ のうち AB 間は車両が加速している部分である.このときの加速度 α と加速時間 t_B は図5のように実測から得られている. $d(t)$ のうち BC は直線で,この傾きは定常走行速度 V_L である.

以上のことから, $t-d$ 曲線 $d(t)$ は

$$d(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}\alpha t^2 & (t \leq t_B) \\ V_L(t - t_B) + d_B & (t > t_B) \end{cases} \quad (2)$$

と表すことができる.ただし, $d_B = \frac{1}{2}\alpha t_B^2$ である.これによって,定常走行速度 V_L が定めればこのモデル曲線を決定することができる.

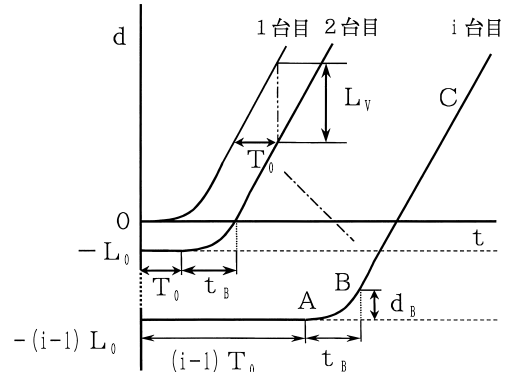


図9 待ち車両群の $t-d$ 曲線群のモデル. L_0 : 停車時の1台あたりの車両占有距離 [m], T_0 : 前車両との発進遅れ時間 [s], L_V : 定常走行時の車頭距離 [m]
Fig. 9 A model diagram of $t-d$ curves when vehicle queue resolving.

3.2 発進車両群の $t-d$ 曲線群

待ち車両列が先頭から順次発進するときの車両群の $t-d$ 特性曲線をモデル化した曲線群を図9に示す.図2と図7の測定結果から発進時の車頭時間 T_0 (最短車頭時間と考えてよい)の平均は約3秒,定常走行時は図7に示すように平均約2秒である.

一方,定常走行時の車頭距離を L_V とすると L_V は

$$L_V = V_L T_0 \quad (3)$$

と表される.また,第 i 台目の車両の停止位置 D_i と発進遅れ T_{di} は

$$D_i = -(i-1)L_0 \quad (4)$$

$$T_{di} = (i-1)T_0 \quad (5)$$

となる.これによって,第 i 台目の車両の $t-d$ 曲線 $d_i(t)$ は

$$d_i(t) = \begin{cases} D_i, & (t < T_{di}) \\ \frac{1}{2}\alpha(t - T_{di})^2 + D_i, & (T_{di} \leq t \leq T_{di} + t_B) \\ V_L(t - T_{di} - t_B) + D_i + d_B, & (t > T_{di} + t_B) \end{cases} \quad (6)$$

と表される.

3.3 減速停止時の $t-d$ 曲線と曲線群

交差点で赤信号(黄信号は赤信号に含める)点灯時に減速し,青信号で発進する車両の $t-d$ 特性をモデル化した曲線を図10に示す.図10に示すように,青信号発進時のモデル曲線(A-B-C)は式(2)と式(3)で定式化した.よって本節の課題は $C'-B'-A'$ の曲線を定式化することである.

図10において $C'-B'-A'$ の $t-d$ 曲線 $d'(t)$ は,

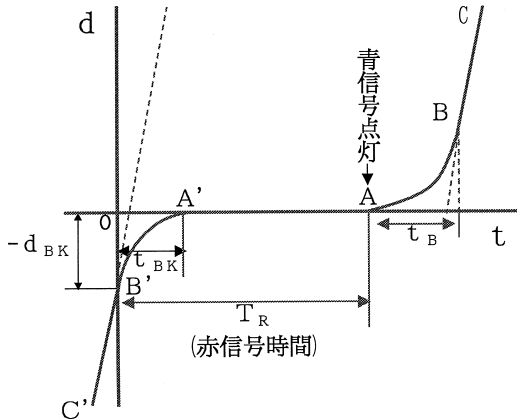


図 10 車両の赤信号による減速停止から青信号発進までの $t-d$ 曲線のモデル. d_{BK} : 減速開始から停止までの距離 [m], t_{BK} : 減速時間 [s], T_R : 赤信号時間 [s]
 Fig. 10 A model diagram of a vehicle at an intersection before red signal through after green signal.

$$d'(t) = \begin{cases} V_L t - d_{BK}, & (t < 0) \\ \frac{1}{2} \alpha_{BK} (t - t_{BK})^2, & (0 \leq t \leq t_{BK}) \\ 0, & (t > t_{BK}) \end{cases} \quad (7)$$

ただし, $d_{BK} = -\frac{1}{2} \alpha_{BK} t_{BK}^2$,
 d_{BK} : 減速開始から停止までの距離 (> 0),
 α_{BK} : 減速加速度 (< 0),

である.

3.4 赤信号停止から青信号発進までの曲線

図 11 は車両 n が図 10 のような $t-d$ 曲線を持つとき, 後続の車両 $n+1$ が, 車頭時間 T'_0 で交差点に進入してきたときの軌跡を概念的に図示したものである. もし, T'_0 が T''_0 のように十分離れて到着すると, 車両 $n+1$ は交差点の影響を受けず, 定常速度で通過することとなる. また, T'_0 が T_0 (最短車頭時間) に等しいときは図 12 のように, すべての車両の $t-d$ 曲線は第 n 台目まで同一の形となる.

交差点を通過する車両の一般的な $t-d$ 曲線 (図 11 の $n+1$) を定式化するにはいくつかの基礎考察が必要である. すなわち,

- (1) 前車両 (停止中) に追従して停止し, 以後式 (6) に従って前車両に追従する (T'_0 が比較的 T_0 に近いとき),
- (2) 停車中の前車両にある程度接近するが速度を落として走行する (T'_0 がかなり T_0 より大きいとき),

の 2 つの場合がある. (2) の場合は図 11 の $n+1$ の $t-d$ 曲線となるが, このとき必要な情報は

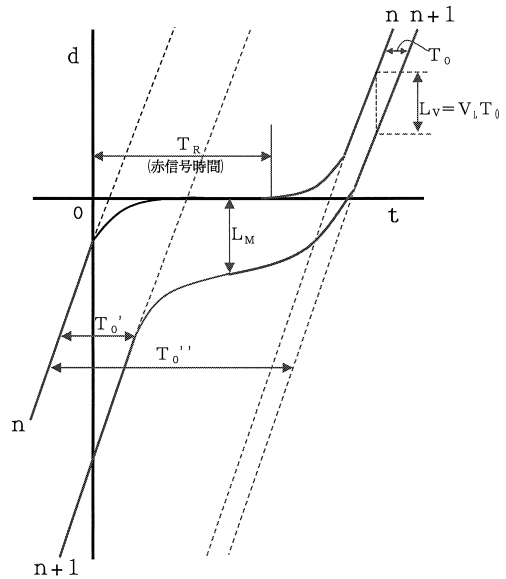


図 11 赤信号停止車両の後続車両の一般的 $t-d$ 曲線. T_0 : 最短車頭時間 [s], T'_0 および T''_0 : 交差点進入前の車頭時間 [s], V_L : 定常走行速度 [m/s]
 Fig. 11 $t-d$ curve showing a vehicle followed at any time headway (T'_0, T''_0).

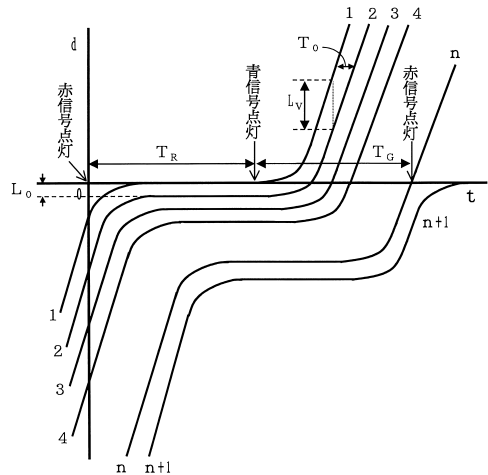


図 12 最短車頭時間 (T_0) で到着する車両列が形成する $t-d$ 曲線群. T_G : 青信号時間 [s]
 Fig. 12 $t-d$ curves when all vehicles follow with minimum time headway (T_0).

- (1) 最も減速したときの前車両との距離 L_M はいかなる値になるか,
- (2) 距離 L_M と速度の関係はどのようになるか, ということである. これらを直接測定することは難しいが, 今後の課題として興味あるところである.

3.5 青信号スループット (青信号通過容量)

青信号時間 T_G 内に信号待ち車両列のうち何台の車両が交差点を通過できるかを青信号スループットとい

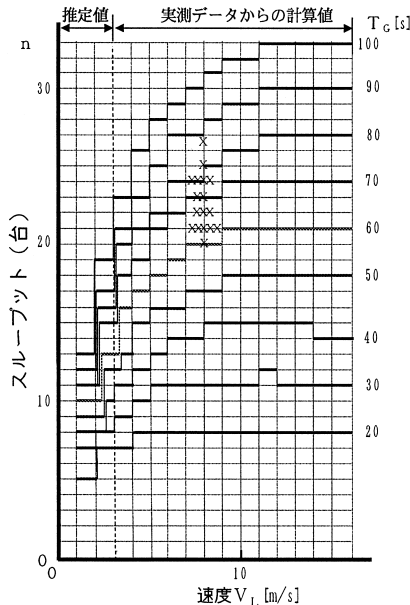


図 13 青信号スループットの計算値と実測
Fig. 13 Green signal through-put, calculation and measurement.

う。図 9 のモデル曲線において $t = 0$ を青信号点灯時とし、さらに、 $t = T_G$ で第 n 台目の車両が通過する ($t = T_G$ で赤信号が点灯とする。さしあたり黄信号は赤信号に含めて考える) とした場合、式 (6) で $i = n$ とすることによって、

$$d_i(T_G) = d_n(T_G) = 0 \quad (8)$$

が成立する。これから、青信号スループット n を算出すると

$$n = \frac{V_L(T_G - t_B) + d_B}{V_L T_0 + L_0} + 1 \quad (9)$$

と表される。

式 (9) に数値 ($L_0 = 7m$ 式 (1), t_B, d_B は図 5 から) を与えて計算した結果の一例を図 13 に示す。計算はこの交差点の定常速度 V_L を $8[m/s]$ (約 $30 km$) とし、最短車頭時間 ($T_0 = 2.2s$) としたときのものである。図 1 の交差点で会津若松方向について、晴天日の時間帯 (14:00 ~ 16:00) を選んでスループットを測定した。この結果を \times 印で示している。交通流は一般に一定ではなく、速度、車頭距離などは一定とは限らず、スループットの測定値も大きいばらつきがあるが、ほぼ計算値に近いとみてよいと考えられる。 \times 印は $T_G = 70$ 秒の交差点 (前述) における測定値を示す。

4. おわりに

本論文では、複雑な交通流のモデル的解析を交差点

における測定値、車両走行時の最短車頭時間などの測定値をもとに検討した。その結果を以下に要約する。

- (1) 交差点における車両の停止車両列の発進・停止特性の解析から、車両の動きのモデル表示とその定式化ができた。
- (2) 定常走行時の最短安全距離を時間で表した T_0 (平均最短車頭時間) は平均約 2 秒で車速にはあまり影響されないことが分った。
- (3) 青信号スループット (青信号通過容量) を発進時の加速度、加速特性などの実測結果を用いて算出した。この結果は実測値と照らし合わせてほぼ合理的であることが分かった。

青信号スループットと青信号時間との関係は、車両待ち行列ができる赤信号時間とこれが解消する青信号時間をどのように設定したらよいかという信号の制御問題に 1 つの示唆を与えるものである。さらに、これは渋滞の発生・解消の解析の基礎になるものと考えられる。

謝辞 本論文の内容は筆者の 1 人 (高木) が平成 8 年より 10 年にわたって、日本大学工学部情報工学科に在職中、卒業研究として行ったものにさらに詳細な検討を加えたものである。この間約 30 名の学生が本研究に携わった。なかでも、大学院学生植野文高君 (現クラリオン株式会社) は 3 年間のデータのとりまとめに大きく貢献した。あらためて植野君と卒研生諸君に深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 中村 実: おもしろ交通論, 学文社 (Apr. 1999).
- 2) 真野, 高木, 三浦, 高樹, 木村: 道路交通面制御に関する一考察, 東北大学交通問題研究会第 2 回資料 (1965).
- 3) 東京大学公開講座: 車, 東京大学出版会 (Apr. 1999).
- 4) Ozaki, H.: Reaction and Application in the Car-Following Behavior, Transportation and Traffic Theory, Transportation and Traffic Theory, Daganzo, C.H. (Ed.), Elsevier Science Publishers B.V. (1993).
- 5) 日本音響学会道路交通騒音調査研究会: 道路交通騒音の予測モデル ASJ Model 1998, 日本音響学会誌, Vol.55, No.4 (1999).
- 6) 日本道路協会: 道路の交通容量 (1984 年 9 月初版, 1998 年 9 刷).

(平成 12 年 12 月 18 日受付)

(平成 13 年 5 月 10 日採録)



高木 相 (正会員)

昭和 7 年生。昭和 30 年九州工業大学電気工学科卒業。昭和 35 年東北大学大学院博士課程修了。同年東北大学工学部通信工学科助手。昭和 38 年同助教授。昭和 51 年同教授。平成 7 年停年退官。同年日本大学工学部教授。平成 11 年東北文化学園大学科学技術学部長(応用情報工学科教授), 現在に至る。この間, 非線形振動, 電気接点の開閉時の接触と放電現象, 環境電磁工学(EMC)等の研究に成果をあげてきた。東北大学退官後, 主として高周波高出力トランジスタ発振器の研究および道路交通のダイナミクスの解析と交通信号の最適制御手法の開発研究を推進している。工学博士。IEEE Fellow, IEICE フェロー, IEEF, SICE 各会員。



谷口 正成

昭和 16 年生。昭和 39 年名城大学理工学部電気工学科卒業。同年名城大学理工学部助手。平成 3 年同講師。平成 12 年名城大学退職。同年東北文化学園大学科学技術学部教授, 現在に至る。この間, 機構デバイスやプリント配線板の接触信頼性, ホログラフィックパターン計測法, 光ファイバのスペckルノイズに関する研究に従事。最近, 赤外放射の応用とその計測, ならびに道路交通車両の自動計測に関する研究開始。工学博士。IEEE(SM), IEICE, IEEJ, SICE, JIEP, IEIJ(SM), JAST, ITE 各会員。



藤木 澄義

昭和 26 年生。昭和 51 年北海道大学物理学科卒業。昭和 57 年東北大学大学院博士課程修了。同年日本学術振興会奨励研究員。昭和 58 年 Dalhousie 大学 Postdoctoral Fellow。昭和 58 年 Dalhousie 大学 Research Associate。昭和 63 年東北大学工学部助手。昭和 64 年東北大学工学部講師。平成 5 年東北大学大学院情報科学研究科講師。平成 11 年東北文化学園大学科学技術学部応用情報工学科教授, 現在に至る。この間, ランダムスピン系の統計力学, 量子スピン系の基底状態, ニューラルネットワークの統計力学的研究等に成果をあげてきた。工学博士。日本物理学会, 電子情報通信学会, 日本神経回路学会各会員。



神村 伸一 (正会員)

昭和 34 年生。昭和 57 年東北学院大学工学部応用物理学科卒業。同年日立マイクロコンピュータエンジニアリング(株)入社。平成 2 年までマイコン開発支援システムの品質評価に従事。その後, 専門学校教員を経て, 平成 5 年東北科学技術短期大学情報工学科助手。平成 11 年東北文化学園大学科学技術学部応用情報工学科助手, 現在に至る。情報教育, 教育システム, 地域ネットワークに興味を持つ。平成 11 年本会山下記念研究賞受賞。日本教育工学会, コンピュータ利用教育協議会各会員。



鈴木 伸夫

昭和 45 年生。平成 5 年東北大学工学部応用物理学科卒業。平成 10 年東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻博士課程修了。同年東北大学大学院工学研究科助手。平成 12 年東北文化学園大学科学技術学部応用情報工学科助手, 現在に至る。量子スピン系の相転移, 磁性薄膜の磁気構造解析等, 計算機によるシミュレーションを行っている。博士(工学)。日本物理学会, 日本応用磁気学会各会員。