

# エントロピーによる道路交通流情報

岩崎 洋一郎, 定方 希夫

## 1. はじめに

都市部街路を中心に道路網にはいたる所にボトルネックがあり、いわゆる交通渋滞が発生し、慢性的な待ち行列が形成されている。

交通渋滞の進行は一定の交通容量に対する車両需要の集中によるものであるが、交通管制の制御方式にも改善すべき点があるものと思われる。

現在の管制システムはその入力情報用交通流センサとして、ループ式あるいは超音波式車両感知器を用いているが、このような、いわば点のセンサは計測地点を通過する車両の単位時間当たりの台数を計数するため、渋滞の待ち行列が形成されると通過台数がかえって小さな値となってしまう、また、車両が正常に走行したとしても計数に時間を要するから、計測単位時間がそのまま制御の遅れにつながる。さらに、計測台数やパルス長から算出するパラメータ（交通量、オキュパンシーなど）は微視的かつ局所的な情報であるため、街路網における複雑な交通流の全容を把握することがむずかしい。

そのため、区間情報を捕えるイメージセンサを中心とした交通流画像計測システムの開発・研究[1][2]が活発となり、一部現場試験が行なわれているものもある[3]。

区間情報計測では区間内の存在車両台数、車頭間隔（車両分布）など地点の車両感知器では得られなかった多量のデータを瞬間に収集することができるが、この多量のデータを情報として活用することがいまの課題である。われわれは、経験ある人間(エキスパート)が区間内の車両分布、車群の形成状況などの画像を定性的に捕らえてこれを情報化し、かつ予測する能力に優れているこ

とに着目し、この概念に近い定量化の方法として、空間的確率現象としてのエントロピーについて検討してきた[4][5][6]。本論文はこれまで口頭発表した内容を整理し、さらに実測データを加えて体系化したもので、その概要は次のようなものである。

すなわち、街路網に分布し走行する車群のパターンをエントロピーを使って定量化することにより、従来のパラメータ（交通量、オキュパンシーなど）では不可能であった区間内の車両分布状況の情報化が可能であることを示した。この中で、空間平均速度（区間平均速度であるが、空間と慣用されている）が交通密度、エントロピーの関数として定義できることを示し、さらに、現実の交通流を観測して検証した。これにより、エントロピー評価によって瞬間画像のもつデータからその時点の速度の予測が可能であることを示した。これは時間遅れのない面的交通情報として有用であろう。

## 2. エントロピーによる面的情報の評価論

### 2.1 エントロピーによる車両分布パターン情報

図1に示すごとく、区間 $L(m)$ 内に存在する車両の分布をある一瞬の現象としてみると、 $n$ 台の車両相互の間隔（車頭間隔） $D_i(m)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) が確率現象であることに着目し、相互に関連のない独立事象としてみれば、そのパターンのエントロピー $H$  [7][8]を計算することができ、(1)式が得られる。

$$H = -\frac{D_1}{L} \log_2 \frac{D_1}{L} - \frac{D_2}{L} \log_2 \frac{D_2}{L} - \dots - \frac{D_n}{L} \log_2 \frac{D_n}{L}$$

$$= -\sum_{i=1}^n \frac{D_i}{L} \log_2 \frac{D_i}{L} \quad (\text{bit}) \quad (1)$$

(1)式より、すべての車両が等間隔( $D_i=L/n$ )に並んでいる場合にエントロピーは最大となり、これを $H_{\max}$ とする。また、それぞれの間隔が最小(Jam状態)で1つの車群が形成されている場合にエントロピーは最小となり、これを $H_{\min}$ とする。

(受付 63.2.25 受理 63.4.8)

いわさき よういちろう, さだかた まれお  
九州東海大学 工学部 情報システム工学科  
〒862 熊本市大江町渡鹿223

$H_{max}$  の状態は(2)式のごとく簡単に表現できる。

$$H_{max} = -\sum_{i=1}^n \frac{D_i}{L} \log_2 \frac{D_i}{L}$$

$$= -\log_2 \frac{1}{n} = \log_2 n \quad (\text{bit}) \quad (2)$$

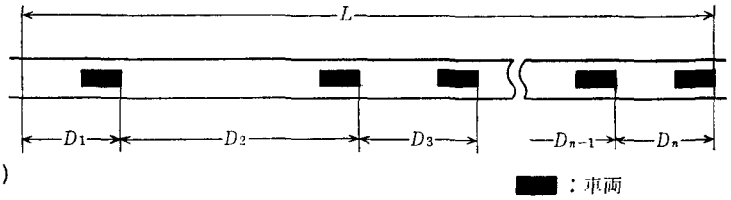


図1 車両分布の区間情報

$H_{min}$  の状態は車頭間隔が1台を除いてすべて最小車頭間隔  $D_j$  になるので(3)式が得られる。

$$H_{min} = -\frac{L-D_j(n-1)}{L} \log_2 \frac{L-D_j(n-1)}{L}$$

$$- \sum_{i=1}^{n-1} \frac{D_j}{L} \log_2 \frac{D_j}{L}$$

$$= -\frac{L-D_j(n-1)}{L} \log_2 \frac{L-D_j(n-1)}{L}$$

$$- (n-1) \frac{D_j}{L} \log_2 \frac{D_j}{L} \quad (\text{bit}) \quad (3)$$

ここで、コンピュータシミュレーションにより正規乱

数を発生させランダムな車両分布パターンを作成し、その各種パターンをエントロピーによって定量化した結果、図2を得た。

ただし、交通密度  $K$  は(4)式のごとく定義した。

$$K = \frac{n}{L} \quad (\text{Veh/m}) \quad (4)$$

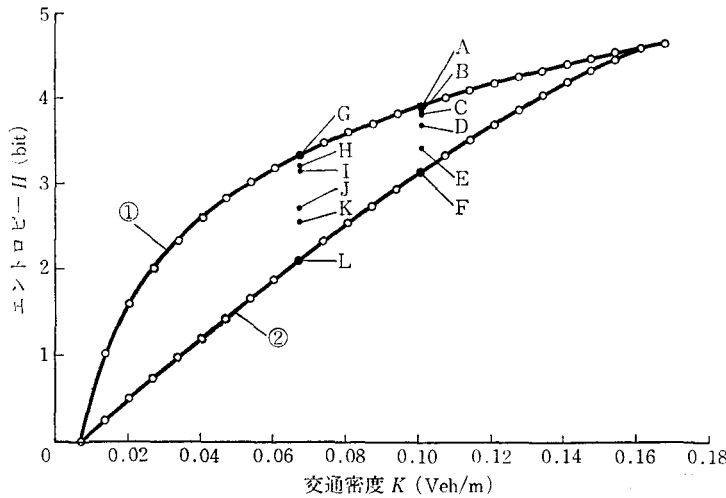
図2(a)のグラフは区間長  $L$  を仮に150mとし、 $x$ 軸に交通密度、 $y$ 軸にエントロピーをとって2変量をプロットしたものである。図中の①曲線は前述の  $H_{max}$  状態を、②曲線は  $H_{min}$  状態をそれぞれ示すものである。すべての車両分布パターンはこの①、②曲線で囲まれた中の部分に存在し、交通密度が増大すると、区間内の車両分布のかたよりが小さくなって、ついには①、②曲線が一致し飽和状態となる。なお、ここでは  $D_j$  は6mと仮定した。

図2(b)は乱数で発生した車両分布パターンの一例として、区間に15台 ( $K=0.1 \text{ Veh/m}$ ) および10台 ( $K=0.067 \text{ Veh/m}$ ) の車両が存在する場合の各6通りのパターンを示している。各パターンのエントロピー値をみると、A、B、CパターンやG、H、Iパターンのごとく車頭間隔が均等なほど①曲線に近づき、これが定常流と呼ばれる。逆に、E、FパターンやK、Lパターンのように車群が形成され待ち行列となっているほど②曲線に近づいている。

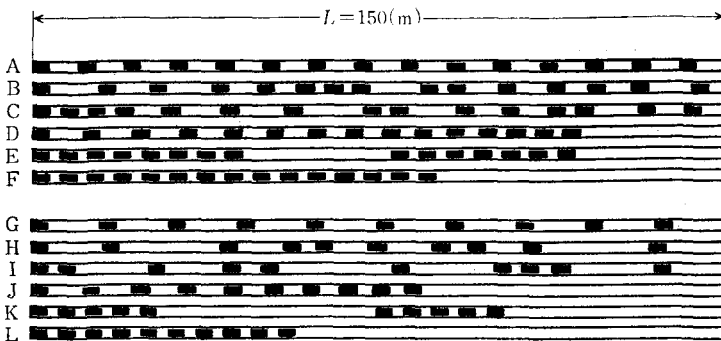
このようにエントロピーを使うことによって、区間内の車両分布状況を人間の感覚に対応した形で定量化することができる。

ここで、 $H_{max}$  状態と現実の状態 ( $H$ ) との差をとり(5)式のごとく  $H_d$  とおき、これをエントロピー相対値と呼ぶことにする。

$$H_d = H_{max} - H \quad (\text{bit}) \quad (5)$$



(a) 密度・エントロピーの関係



(b) 発生パターン図

図2 密度・エントロピーの関係とランダムパターンの発生

この  $H_d$  と交通密度の関係を図3に示すが、図中のA~Lは図2(b)の発生パターンに対応した点である。ここでE, F, K, L点のように車群の形成が顕著なほど  $H_d$  の値が大きくなる。

次に、計測区間長と  $H_d$  の関係を考察してみよう。

まず、図4A)のごとく車両分布パターンが繰り返している場合  $a$  区間、 $b$  区間とも  $H_d$  が同一値となる。

また、図4B)では、200m区間を  $c$  は50m,  $d$  は150m,  $e$  は200mのみた場合で、それぞれの  $H_d$  の値を図の下に示しているが、 $c$  はほぼ定常流で  $H_d$  の値は小さく、 $d$  は一部車群が形成されているので  $H_d$  の値は大きくなり、 $e$  は  $d$  の後に定常流状態が連なっているため、 $d$  に比較して車群形成の割合が低くなって  $H_d$  の値は下がっている。

このように、エントロピー相対値は車群形成を検出するのに便利な情報である。

## 2.2 エントロピー相対値による空間平均速度の推定

エントロピーは車頭間隔のデータをもとにした車両分布の情報であるから、速度との相関を持ったパラメータであることが想像できる。そこで、区間に分布した車両の空間平均速度を、瞬時に計測したエントロピー相対値で推定することを検討した。

速度に関して、Greenshields は交通密度  $K$  と空間平均速度  $V_s$  との関係を図6)のごとく提案している[9]

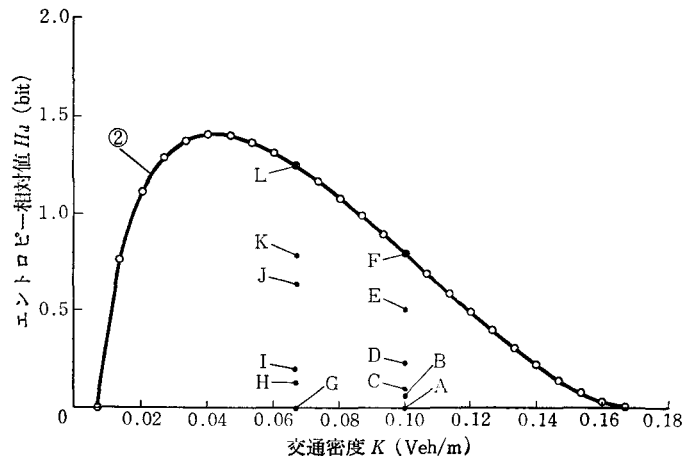


図3 密度・エントロピー相対値の関係

[10].

$$V_s = V_f \left( 1 - \frac{K}{K_j} \right) \quad (6)$$

ここに、 $V_f$  は自由速度で、交通量がきわめて少ない状態において、任意の車両が他の車両の影響をまったく受けないで、自由に走行する速度である。ただし、現実には道路条件および規制速度などの制約を受けている。

また、 $K_j$  は飽和交通密度で、区間内に車両がぎっしり詰まって停止した状態での交通密度のことである。

この式は定常流にて成立するもので、ボトルネックの影響を受けた街路交通流では一般的に使うことができない。

(6)式は区間に展開した車群についての平均速度であるが、前後2台の車両のみに着目して、その車頭間隔と瞬時速度との関係を見てみよう。

$K = L/D_i$  および  $K_j = L/D_j$  であるから、定常流の中の2台に着目すれば、これを(6)式に代入して、後続車両の瞬時速度  $V_i$  と両頭間隔  $D_i$  との関係(7)式を得る。

$$V_i = V_f \left( 1 - \frac{D_j}{D_i} \right) \quad (7)$$

この(7)式を使って車頭間隔からその瞬間の個々の車両速度を算出し、区間全体の空間平均速度を求めると(8)式が得られる。

$$V_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_f \left( 1 - \frac{D_j}{D_i} \right) \quad (8)$$

ここで、区間  $L$  内の  $n-1$  個の車

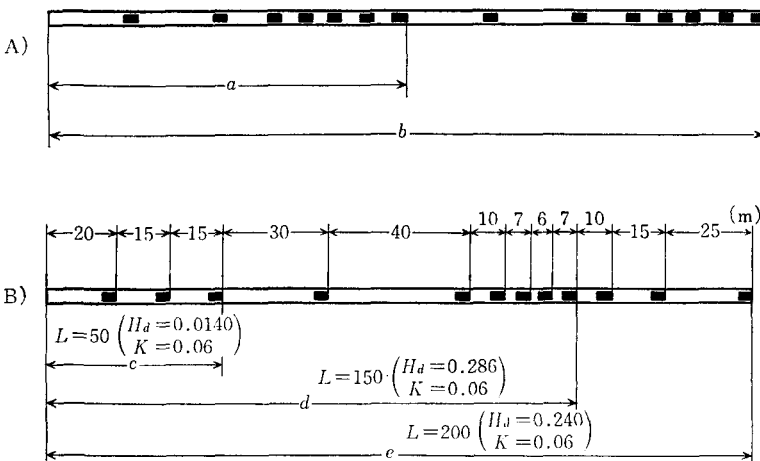


図4 エントロピー相対値の性質

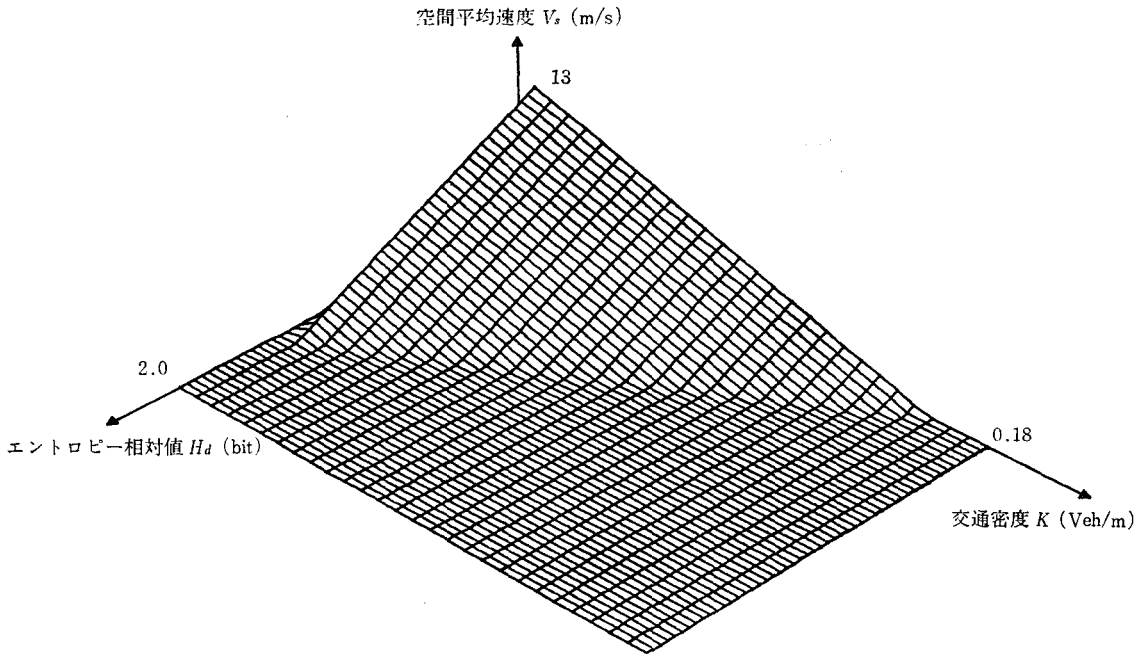


図5 密度・エントロピー相対値・空間平均速度の関係(シミュレーション結果)

両相互間隔(車頭間隔)が決まれば,そのパターンが確定するので, $n-1$ 個の間隔を正規乱数を使って規定する。

いま, $z_i$ を平均0,標準偏差1の正規乱数とすると,エントロピー相対値 $H_d$ は車両台数 $n$ ,区間長 $L$ , $n-1$ 個の平均車頭間隔 $\mu$ ,およびその標準偏差 $\sigma$ の関数として(9)式のごとく定義できる。ただし, $\lambda_i \equiv \sigma z_i / \mu$ とおく。

$$H_d = \log_2 n + \frac{\mu}{L} \sum_{i=1}^{n-1} (1 + \lambda_i) \log_2 \frac{\mu(1 + \lambda_i)}{L} + \frac{L - \mu(n-1)}{L} \log_2 \frac{L - \mu(n-1)}{L} \quad (9)$$

同様に,空間平均速度 $V_s$ は $n$ , $L$ , $\mu$ , $\lambda_i$ ,自由速度 $V_f$ ,最小車頭間隔 $D_j$ の関数として(10)式のごとく定義できる。

$$V_s = V_f - \frac{V_f \cdot D_j}{n \cdot \mu} \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{1 + \lambda_i} + \frac{\mu}{L - \mu(n-1)} \right\} \quad (10)$$

(9)(10)式の関係の数値的にみるため,正規乱数を使ってランダムな車両分布パターンを発生し,シミュレーション実験で空間平均速度,交通密度,エントロピー相対値の3変量間の関係を調べた。

なお,この実験では,空間平均速度算出のさい,車群の先頭車はその車群内速度と同等であるとみなした。また, $V_f = 16.7 \text{ m/s} (= 60 \text{ km/h})$ , $D_j = 6 \text{ m}$ とした。

車両分布は150m区間内に存在する車両が2台から24台(25台が飽和状態)までそれぞれ10通りずつ,計230パターンを発生させた。

次に,目的変数に空間平均速度,説明変数に交通密度とエントロピー相対値をあてはめ,重回帰分析を行なった結果,(11)式を得た。

$$V_s = -85.642K - 9.034H_d + 13.620 \quad (11)$$

ただし, $V_s < 0$ の場合は $V_s = 0$ とする。

図5は(11)式を使って,交通密度,エントロピー相対値,空間平均速度の関係を3次元表示したものである。

なお,ここでは使用していないが,空間平均速度が算出できれば(12)式により区間内交通量の推定値 $Q$ を算出することも可能である。

$$Q = K \cdot V_s \quad (\text{Veh/s}) \quad (12)$$

### 3. 現実交通流観測による実証

#### 3.1 交通流の実測とデータの算出法

図6に示すように,8階建て高さ32.7mの熊本市立市民病院屋上より直下を通る国道57号線東バイパス片側2車線で計測を行なった。

交通流撮影のためのカメラを病院ビル屋上に固定し,交差点信号機(図6の1)が青信号になると同時に撮影を開始し,5秒間隔で連続36コマ(175秒間)の画像を収集した。

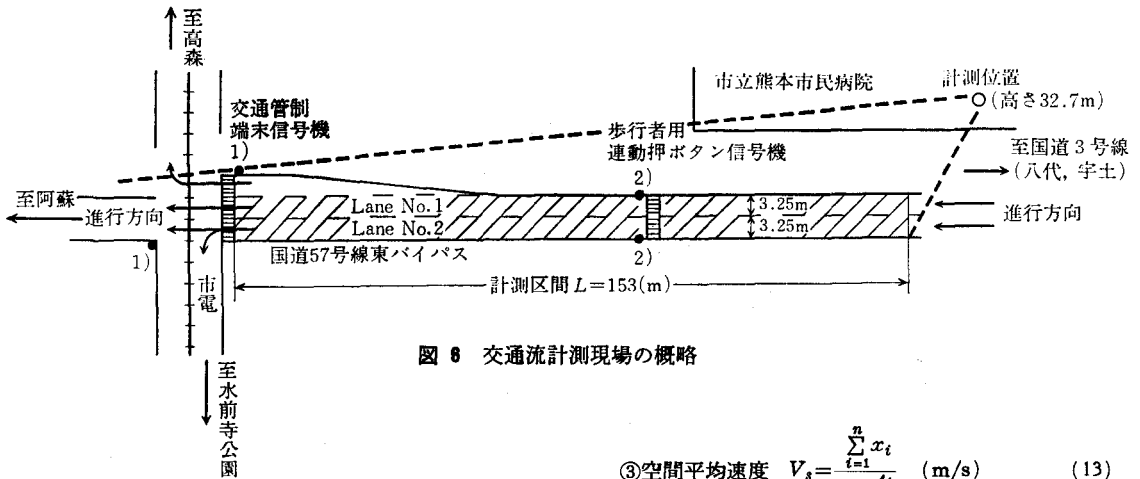


図 6 交通流計測現場の概略

1 回の計測は信号機の 1 サイクルを完全に含むので、1 サイクル内の各車両の動き、ショックウェーブの状態が捕えられる。

計測時刻としては表 1 に示すように、朝のピーク時 3 回、昼の閑散時 3 回、夕刻のピーク時 3 回の計 9 回で合計 324 コマの画像を収集した。

収集した画像はパソコンに連動したデジタイザより入力し、道路上の目印となる主要なポイント画像の座標位置を使って、入力した車両画像データの距離補正を行った。

また、空間平均速度を計測するために便宜上すべての車両に識別番号を付けて 5 秒間の移動距離が算出できるようにした。

以上の処理により計測、収集したデータは次のとおりである。

車両台数  $n$  (Veh)

各車両の車頭間隔

$$D_i (i=1, 2, 3, \dots, n) \text{ (m)}$$

各車両の 5 秒間の移動距離

$$x_i (i=1, 2, 3, \dots, n) \text{ (m)}$$

また、収集したデータ数は 1 回の計測当たり 35 個 (最後の 1 画像は 5 秒後の移動距離が算出不可能なために除く) 2 車線で 70 個、9 回の総計で 630 個となった。

次に、収集したデータを使って以下の各交通流情報を算出した。

①交通密度……………(4)式により算出

②エントロピー相対値…(5)式により算出

$$\textcircled{3} \text{空間平均速度 } V_s = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n \cdot \Delta t} \text{ (m/s)} \quad (13)$$

※この計測では  $\Delta t=5$ (s)である。

### 3.2 交通密度と空間平均速度との関係

図 7 は観測から得られた交通密度と空間平均速度をプロットしたものであるが、2.2 項で述べたように、現実には区間計測を行なうと同一密度上でも異なった車両分布パターンが多数存在し、車群の形成が顕著な場合には空間平均速度は交通密度に関係なく 0 に近づいている。

なお、図 7 で各密度に対する空間平均速度の上限値は(6)式の関係が成立し、定常流であることがわかる。また、観測値から  $D_j=6$ m が得られた。

### 3.3 交通密度、エントロピー相対値、空間平均速度の関係

図 8 は観測から得られた交通密度、エントロピー相対値、空間平均速度 (実線で示した曲線) の時間推移を表

表 1 計測の日時

	撮影日	撮影開始時間	信号のサイクル (s)			
			青	黄	赤	青
朝 (ピーク時)	1987年 10月9日(金)	7:35	0	70	73	162
		8:05	0	59	62	134
		8:30	0	79	82	163
昼 (閑散時)	10月8日(木)	12:05	0	52	54	118
		12:35	0	61	64	132
		13:00	0	51	54	126
夕 (ピーク時)	10月8日(木)	17:05	0	58	61	133
		17:20	0	66	69	150
		17:41	0	67	71	149

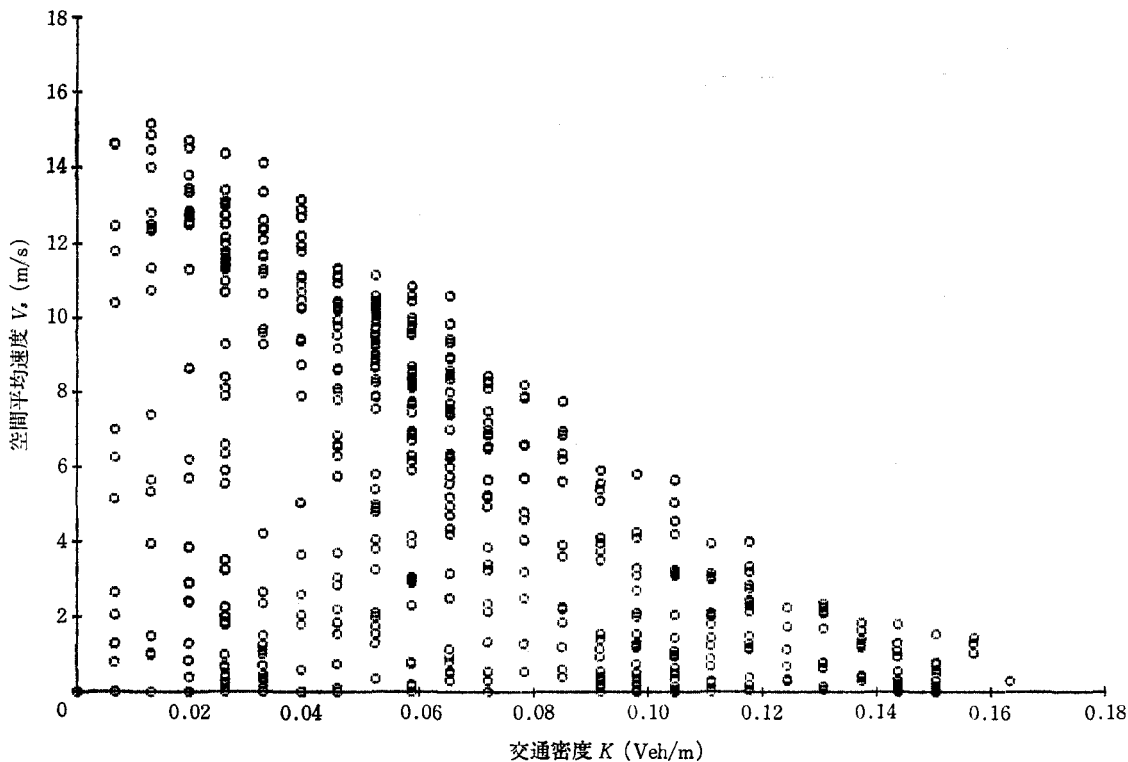


図 7 密度・空間平均速度の関係

わしたものである。

図 9 は交通密度，エントロピー相対値，空間平均速度の関連を 3 次元表示したものである。

図 8，9 より交通密度およびエントロピー相対値と空間平均速度との間には相関関係がみられるので，この情報相互間の重回帰分析を行なった。

なお，交通密度の小さい状態では，車両速度のバラツキが大きく車頭間隔と空間平均速度との相関が低いので，存在台数 5 台以下のデータ 185 個は無視し，結局 445 個のデータについて分析した。

重回帰分析の結果，重回帰式の各係数は次に示すごとく 2.2 項のシミュレーション結果に近い値となっている。

重相関係数  $R=0.916$

$$\text{重回帰式 } V_s = -92.237K - 8.704H_d + \frac{14.257}{(V_f)} \quad (14)$$

ただし， $V_s < 0$  の場合は  $V_s = 0$  とする。

図 10 は得られた重回帰式 (14) を使って，交通密度，エントロピー相対値，空間平均速度の関係を 3 次元表示したものである。

さらに，図 8 の点線で示した曲線は (14) 式に交通密度とエントロピー相対値の実測値を代入して算出した空間

平均速度の計算値をプロットしたもので，実線で示した空間平均速度の実測値と比較するとよく対応していることがわかる。

なお，実測値と計算値とのバラツキが生ずる主な原因は次のとおりである。

①大型車両混入率の変動。本研究のエントロピー評価は車頭間隔データのみで計算するために，車両長の変動が影響する。

②右左折車による交差点での減速（今回の計測地点では右折レーンは独立しているので右折車の影響はない）

③車両停止によるショックウェーブの影響

#### 4. 結論

交通流の区間情報をエントロピーを使って構築した。その結果，車両の区間分布を定量的に表現することができ，多くの車両分布パターンを作って評価してみると人間の渋滞感覚によく対応していることがわかった。

次に，あらゆる交通流状態に対し，交通流の瞬間画像のデータから交通密度とエントロピーを算出し，その 2 情報を用いることによって，その瞬間の空間平均速度を時間積分することなく推定できることがわかった。

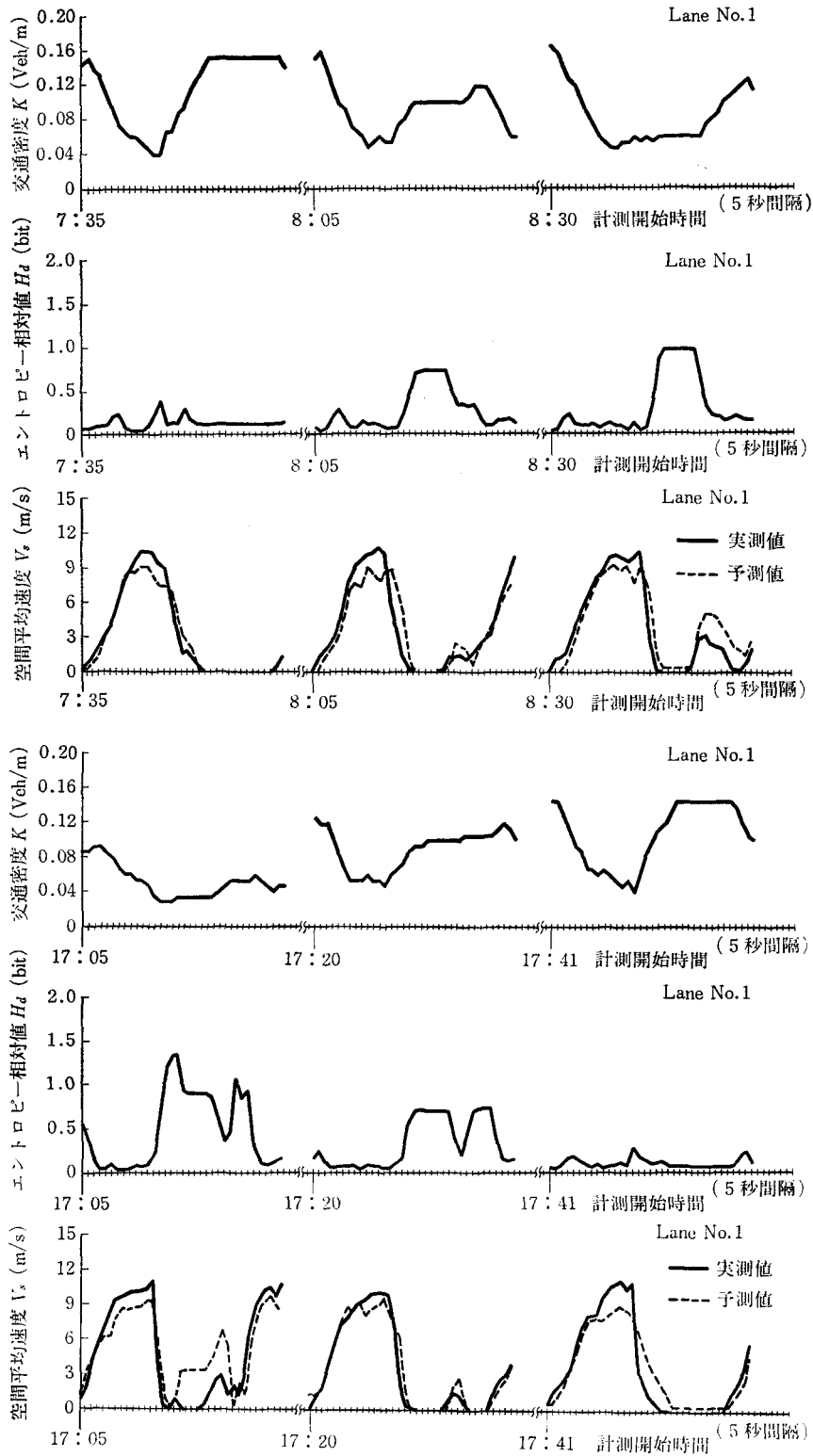


図 8 密度, エントロピー相対値, 空間平均速度の時刻変化

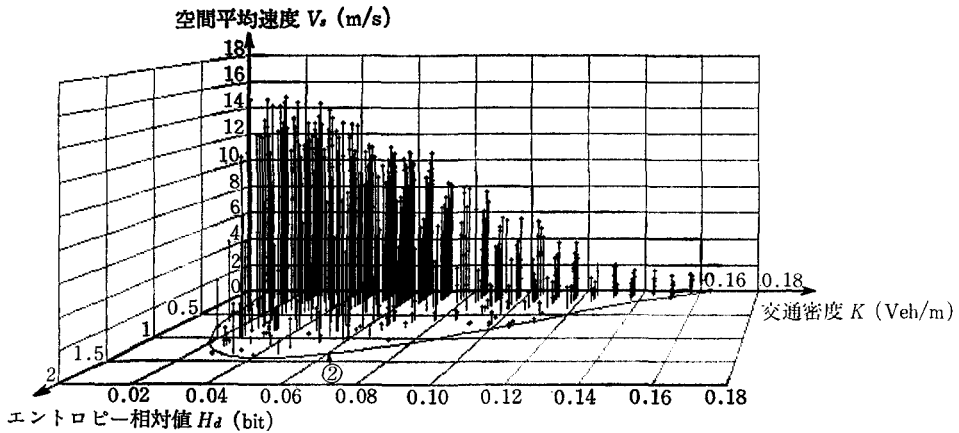


図 9 密度・エントロピー相対値・空間平均速度の関係 (実測結果)

したがって、走行軌跡を検出するための車両の識別や同定など高度な画像処理機能が不要となり、画像計測システム構築の負荷が軽減され、処理速度も向上することが期待できる。

また、本研究のエントロピーは画像計測による交通管制システムの新たな入力情報として、戦略的な管制を考えることも可能となろう。

今後の課題はリアルタイムでの処理方式の開発と道路ネットワーク画像計測システムの構築である。

### 参考文献

- [1] R.M. Inigo: Traffic Monitoring and Control Using Machine Vision: A Survey, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. IE-32, No. 3, pp. 177-185(1985)
- [2] 高羽禎雄, 関根富美, 鳥居桂: 固体イメージセンサを用いる交通流計測システムの改良, 生産研究, Vol. 37, No. 4, pp. 151-154(1985)
- [3] 高羽禎雄: 自動車交通流の画像計測, 計測と制御, Vol. 26, No. 8, pp. 689-690(1987)

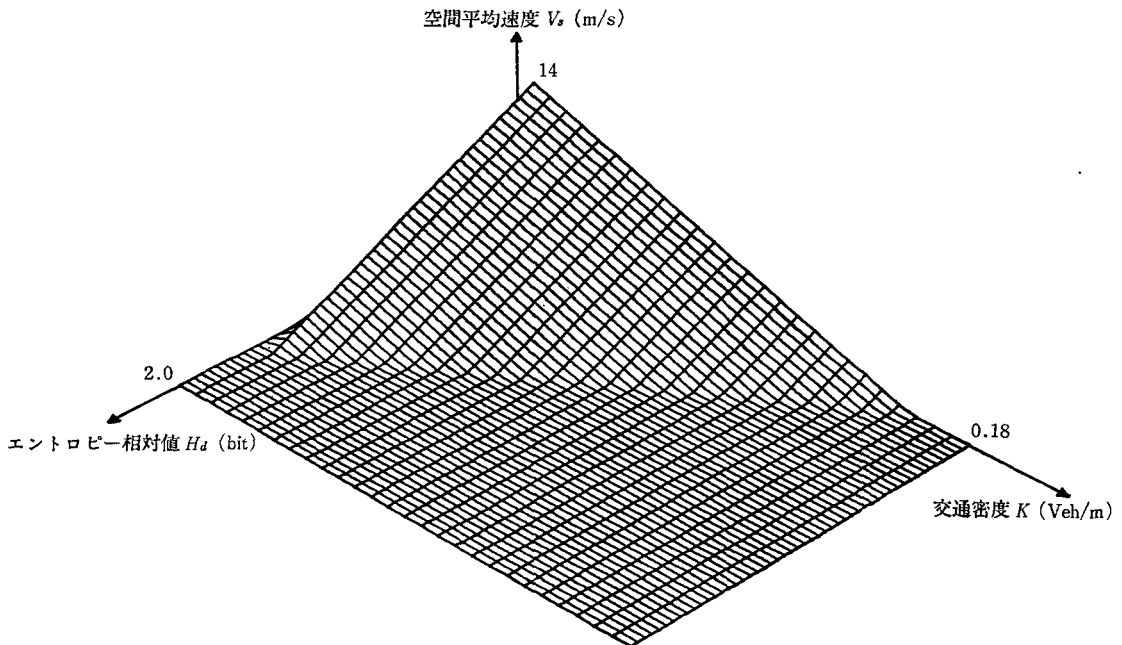


図 10 密度・エントロピー相対値・空間平均速度の重回帰分析結果



- [4] 岩崎洋一郎, 定方希夫, 高山秀造: エントロピーと交通密度による自動車交通流の評価について, オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, pp. 58-59(1986)
- [5] 岩崎洋一郎, 定方希夫: エントロピーと交通密度による自動車交通流の評価について(その2), オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集, pp. 117-118(1987)
- [6] 岩崎洋一郎, 定方希夫: エントロピーと交通密度による自動車交通流の評価について(その3), オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブ

- ストラクト集, pp. 24-25(1987)
- [7] 国沢清典: エントロピー・モデル, 日科技連, 1975
- [8] 国沢清典: 情報理論 I —— エントロピーと情報量 ——, 共立出版, 1983
- [9] B. D. Greenshields: A Study of Traffic Capacity, Proc. Highway Research Board, Vol. 14(1934)
- [10] Transportation Research Board: Special Report 209, Highway Capacity Manual-1985 交通工学研究会: 1985 道路の交通容量, コロナ社, 1987

●ミニミニ●

●OR●

### 3次元の表示の工夫

コンピュータ・グラフィックスによって2次元の表示はかなり自在にできるようになったが, 3次元の表示となるとそれほど容易ではない。それにもかかわらず, 3次元の表示がもし可能なら, 理解や発想に大いに役立つと思われる場面は少なくない。

原点に始点をもつベクトルの場合なら, 机の上に油粘土の塊を置き, これに棒を突き立ててベクトルに見立てればよい。線形独立, 線形従属の関係や, 直交化などの意味が一目瞭然になる。(図1)

関数関係もあり複雑なものを表示するのは難しいがいくつかのデータ

$$z_i = f(x_i, y_i) \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

を示す程度の単純なものなら, 次のような方法でも十分に役に立つ。

昨今では, どの事務所や研究所の隅にでも複写機用紙の段ボール箱がころがっているから, これを拾ってくる。大概は底にキレイな段ボールの板が1-2枚敷いて

あるから, 取り出して,  $x$ -軸やら  $y$ -軸やらその他必要なことを記入しておく。これを, 箱をひっくり返したその底にガム・テープで貼りつける。点  $(x_i, y_i)$  の所に千枚通しで穴を開け, そこに直径5mm程度の木の丸棒の先を鉛筆削りで尖らせたものを突き立てる。穴は数枚の段ボールを貫通する小さなものだから, 棒はどこでも止まる。高さが  $z_i$  になるようにすればよい。(図2)

仕掛けはこれだけだが, さらに凝ったものにしたければ工夫はいろいろできる。たとえば, ①棒の先端には螢光塗料で色をつけたり, ウッドビーズをとりつけたりしておけば見やすくなる。②箱をもう1つ用意して, カッターナイフで切り開き,  $xz$ -平面や  $yz$ -平面を示す衝立をつくる。(図3)...

大きさには, いささかうらみがあるが, セミナールや小規模の研究会ならば充分間にあう。使っているうちに穴が広がって, 棒が止まらなくなるかもしれないが, 材料費はまあタダだし, 作り直すにもさして手間のいるものではない。

(からくり堂主人)

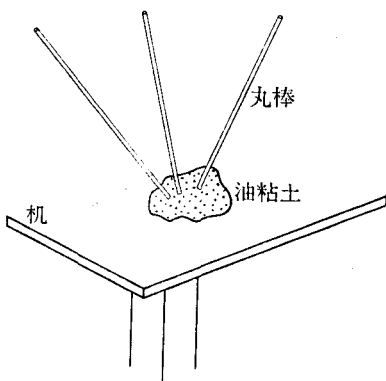


図1

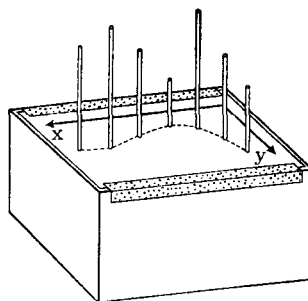


図2

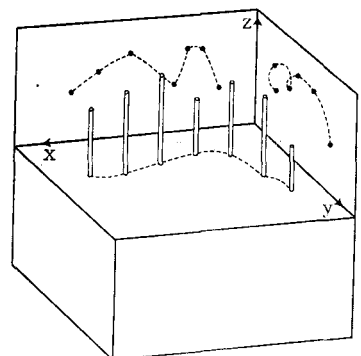


図3