

エントロピーを用いた道路交通流制御用情報

岩崎 洋一郎, 定方 希夫

1. はじめに

都市街路部における慢性的渋滞の緩和のために、交通信号制御システムの高効率化が急がれている。それには従来の系統制御を基本としたマクロな交通管制に加え、ボトルネックになっているクリティカル交差点を交通処理能力限度まで使用するきめの細かな動的地点制御などミクロな制御方式の確立が必要である[1][2][3]。交差点固有の交通容量を低下させない柔軟な制御の実現を目標に、いくつかの地点信号制御ロジックが考案されているが、それらの制御効率、信号現示切り替えの意思決定に使用される入力情報の種類と信頼性に依存する。従来、地点信号制御では、主として車両感知器から得られる車頭時間を直接、あるいはその値を別の状態量に換算し、入力情報として使用している。しかしながら、計測地点を通過する前後2台の車種(大型、小型など)の組合せによって車頭時間はばらつき、そもそも2台の車両の通過時刻差から交通流状態を推定するために信頼性の低い情報であり、そのために制御効率の飛躍的な向上が望めない。アプローチにおける到着・発進車両の流動パターンすなわち短時間交通量およびその変動を時間遅れなく、高精度に推定できる情報が得られれば、制御の最適化もそれほど困難な問題ではないと言われている[4]。しかし通常、交通量を計測するためにはある程度の長さの積分時間が必要で、ある瞬時に交通量情報を得ることは不可能である。また、その積分時間内が平均化されるため、変化の激しい複雑な街路交通流の場合、積分した交通量から短時間の動的特性を知ることはむずか

しい。近年、交通流の空間的分布を眺めるためのデジタル画像処理手法の研究・開発が活発となっている[5]。この技術を用いることにより対象空間内の車両存在など従来のセンサでは計測の困難な空間的データを瞬時に得ることができるようになってきた。

われわれは、先にエントロピー状態量としての道路交通情報[6][7]を提案したが、今回その応用として、交通流の瞬時画像から得られるエントロピー(H)と交通密度(K)から空間平均速度(V_s)および交通量(Q)を推定する汎用的な関数方程式を提案する。本関数方程式は、前述の信号制御用入力情報としての利用を主目的とするものである。すなわち、交差する2道路の各停止線上流部の交通流をTVカメラで俯瞰するように撮像し、画像処理装置を用いてその交通流画像を処理し、得られた車両分布パターンから本論文で提案するエントロピー関数により交通量を推定し、その値によって青信号時間の延長・打ち切りを判定する。以上の一連の過程を1~2秒のサイクルで繰り返す画像情報による地点全感応信号制御の入力情報として、前述の車頭時間に代わる信頼性の高い情報としての利用を想定している。推定交通量を用いたこの地点制御は、単独交差点の制御効率を向上させることを目的としているが、面制御下で異なるサブエリアの境界に位置する交差点における周期の異なるくけい波交通流の到着に対しても柔軟な制御が期待できるもので、先に述べた街路交通流のボトルネックにおけるミクロな制御方法の確立手段として有用であろう。なお文献[6][7]の中でも重回帰分析により空間平均速度の推定式を提示しているが、その推定式中の各係数は個々の観測現場固有のもので、計測区間長にも依存する。推定式各係数決定のためには、それぞれの現場ごとに大量の交通流データの計測・処理が必要となり、汎用的ではなかった。今回提案する関数は数10m程度以上の計測距離において信頼性の高い推定値を提供でき、さらに異なる観測現場においても同一の関数式にて推定できる汎用性があることを理論的に確かめ、また、それぞれ実交通流計測にて検証したので、ここに報告するものである。

いわさき よういちろう

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

さだかた まれお

東海大学 工学部 経営工学科

〒259-12 平塚市北金目1117

受理 1991年12月5日

2. エントロピー状態量

[6][7]

計測区間（区間長 L ）内の n 台の車両分布パターンのエントロピー H は、各車頭距離（車両長を含めた車両相互の間隔） $D_i (i=1, 2, \dots, n)$ から(1)式で計算できる。

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

なお、本エントロピーに関する特性および定義事項は以下のとおりである。

①(2)式を満足させるために区間内の最後尾車両から区間終端までの間隔は区間先頭車の車頭距離に加算し、補正する。

$$\sum_{i=1}^n D_i / L = 1 \quad (2)$$

- ② $n=0$ のとき、 $H=0 \cdot \log_2 0 = 0$ とする。
- ③ $n=1$ のとき、 $H=-1 \cdot \log_2 1 = 0$ とする。
- ④ $D_1, D_2, D_3, \dots, D_n$ の順序を入れ替えても H の値は不変である。

すなわち、 H の値は車群の形成位置には依存しない。(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(3)式のごとく M_{max} とする。これは、その交通密度において流量が最大となり、区間内車両の活動力最大というエントロピー一般概念に合致する。

$$H_{max} = \log_2 n \quad (\text{bits}) \quad (3)$$

また、それぞれの間隔が最小で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(4)式のごとく H_{min} とする。これは、後続車が追いついて全車両が停止し（先頭車1台のみが活動の可能性を有している）、区間内車両の活動力最小というエントロピー一般概念に合致する。

$$H_{min} = -\frac{L-(n-1)D_j}{L} \log_2 \frac{L-(n-1)D_j}{L} - (n-1) \frac{D_j}{L} \log_2 \frac{D_j}{L} \quad (\text{bits}) \quad (4)$$

ここで、 D_j ：最小車頭距離。

同一交通密度における車両分布パターンを比較した場合、各車頭距離が均等で定常流に近づくほどエントロピー

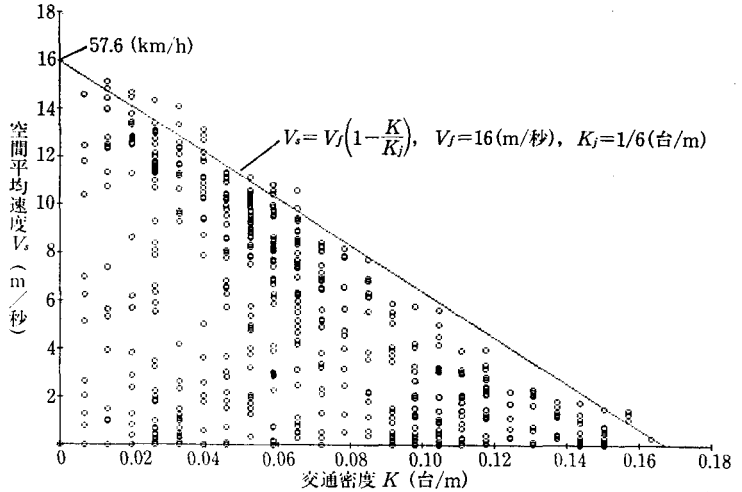


図1 交通密度—空間平均速度の関係

一値は高くなり、逆に車群の形成が顕著になるほどエントロピー値は低くなる。このように、エントロピーは区間内交通流の円滑さを瞬時値で示す状態量である。

3. エントロピーによる空間平均速度・交通量推定関数

街路交通流は信号制御や突発事象などの影響により、車群の形成・展開が繰り返され、あわせて発進波・停止波の伝搬も影響して、車両の空間的分布パターンが時々刻々と変動している。図1は、文献[6]で報告した空間平均速度と交通密度の関係の実測値である。空間平均速度は交差点上流側153m区間内の交通流を付近のビル屋上に設置したカメラを用いて5秒間隔で連続的に撮影し、その連続する写真を相互に比較して各車両の移動距離を計測し(5)式にて算出したものである。

$$V_s = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n \cdot \Delta t} \quad (\text{m/秒}) \quad (5)$$

ここで、 x_i ：計測間隔時間における各車両の移動距離、 Δt ：計測間隔時間（本計測では5秒）。

また、交通密度も同時に計測し(6)式にて算出した。

$$K = \frac{n}{L} \quad (\text{台/m}) \quad (6)$$

図1のプロットに見られるように空間平均速度・交通密度両状態量間の相関は認められず、車群の形成が顕著な場合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、交通密度と空間平均速度の関係は(7)式に示す Greenshields の式[8]が提案されているが、この

データの上限值(直線)は(7)式で定数が $V_f=16(m/秒)$, $K_j=1/6(台/m)$ に近似している.

$$V_s = V_f \left(1 - \frac{K}{K_j}\right) \quad (m/秒) \quad (7)$$

ここで, V_f : 自由走行速度, K_j : 停止車群交通密度.

これらのデータをもとに考察を進めた結果, 次のような結論を得ることができた. すなわち, 同一交通密度上でのエントロピー最大値(空間平均速度最大: 定常流)と最小値(空間平均速度 0: 停止車群)の間の交通状態における空間平均速度をエントロピーの関数として係数化することが可能であることである. エントロピー係数は Greenshields の式と組み合わせて(8)式のごとく新たに提案するものである.

$$V_{se} = V_f \left(1 - \frac{K}{K_j}\right) \frac{H - H_{min}}{H_{max} - H_{min}} \quad (m/秒) \quad (8)$$

エントロピー係数 $\frac{H - H_{min}}{H_{max} - H_{min}}$ の各値は, 区間内各車両の車頭距離からエントロピー H が(1)式にて算出され, 同時に計測される区間内車両台数 n から H_{max} , H_{min} をそれぞれ(3)式, (4)式で求めることができる. この係数はエントロピー H の値により 0 から 1 の間に分布することがわかる. なお, 区間内車両台数 n が 0, 1 および飽和状態 ($n=L/D_j$) の場合は, $H=H_{max}=H_{min}$ となる. このため, $n=1$ の時はエントロピー係数は 1 とみなす. $n=0$ および飽和状態の場合はエントロピー係数に関係なく速度は 0 である. 図 2 はいずれも同一交通密度 K_a である 5 つの車両分布パターン a) ~ e) の推定空

V_{se} (予測空間平均速度)

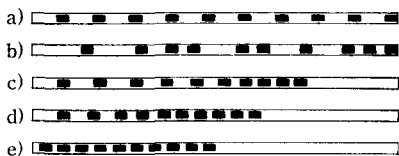
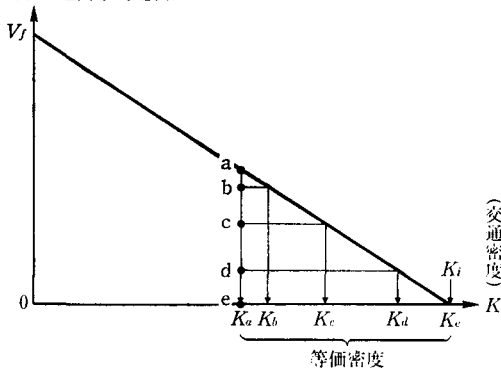


図 2 エントロピーによる交通密度の補正

間平均速度を(8)式により算出した結果, グラフ上の a ~ e 点にそれぞれ相当することを示している. 相互の車頭距離が縮まった車群内における個々の車両はその車群内交通密度に反比例した同一速度にて追従走行すると考えられ, 車群先頭車はその前方車両との間隔が空いていても, その間隔に比例した速度ではない. このことは実測結果の観察からも明らかであるが, このように考えると車群形成が顕著になるにつれて前述のような車両速度に有効ではない空間の割合が増加し, 車群内の実質的な交通密度は増加すると見せる. すなわち, パターン a) は全車頭距離が均等ですべての車両が前方車両との間隔を有効に活用して走行しているため, 車両走行上の実質的な交通密度は区間内交通密度と等価と見なすことができ, エントロピーによる補正は必要なく, その係数は 1 である. これに対して, パターン e) は最小車頭距離による 1 つの車群が形成され, 区間内交通密度に関係なく車群内交通密度は停止車群交通密度 K_j と等価となり, 係数値は 0 である. パターン b) c) d) の順に車群形成が顕著になり, 走行上の実質的な交通密度は増加する. パターン a) ~ e) の車両走行上の実質的な交通密度は $K_a \sim K_e$ にそれぞれ相当すると考えられる. これまで提案された $K-V_s$ 相関式はすべて定常流下でのみ成立するものであったが, ここで提案したエントロピー係数による走行上の交通密度補正を行なうことにより, 街路交通流の瞬間判断が可能になる. 以上の考察をもとに, 本エントロピー係数を「エントロピー等価密度係数」と名づける.

以上の議論をもとに短時間交通量の推定値を Q_{se} とおけば, (9)式にてその推定値が算出できる.

$$Q_{se} = K \cdot V_{se} = K \cdot V_f \left(1 - \frac{K}{K_j}\right) \frac{H - H_{min}}{H_{max} - H_{min}} \quad (台/秒) \quad (9)$$

4. 現実交通流観測による検証

ここでは, 提案した関数方程式の精度を検証するために, 実交通流計測結果との比較・検討を行なう.

4.1 車両分布パターンの計測法

理論検証のための交通流パターンデータは前述のステールカメラを用いた方法によって得られたものを用いた. また新たに, 以下に述べる TV カメラを用いた簡易計測によって得られたものを用いた. この簡易計測は, 現実の信号制御における画像処理装置によって処理する場合を想定して行なったもので, 以降に説明するような

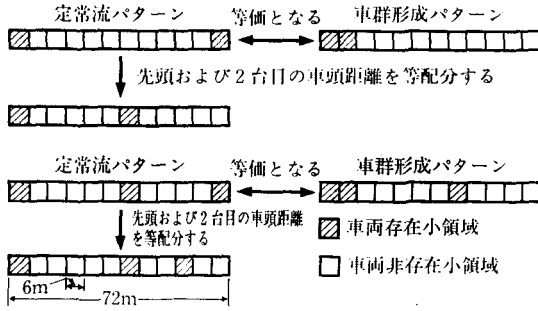


図3 低交通密度における一部車両分布パターンの補整

低解像度の計測手法でも実用的には問題とならず、TVカメラと画像処理装置による自動計測が可能な入力情報であることを検証することを目的としている。

空間平均速度の実測を行なう場合は、短時間の車両移動量を厳密に計測する必要があるので、スチールカメラのような解像度の高い機器を用いてm単位で計測を行なう必要があるが、車両分布パターンの計測自体は、実用的にはそれより粗い精度でも十分である。

図3に示すように、72mの道路区間内を普通車両が並んだ場合の最小車頭距離に相当する6mの小領域に区切って、連続する12の小領域からなる計測区間を設ける。各小領域に車両が存在するか否かを判定し、車両存在非存在のパターンを作成する。それをもとに各車頭距離および車両台数を計測する。なお、現実の計測においては各小領域間に車両がまたがって存在する場合が一般的であるので、その場合はいずれかの領域に振り分ける。また、大型車両の場合は、2小領域以上を連続して占有する場合がある。この計測法では最小車頭距離は6m、停止車群交通密度は1/6(台/m)であり、車頭距離は6m単位で変動する。したがって、スチール写真を用いた計測とは異なり、最小車頭距離が6m未満になることはなく、それが原因となって発生するエントロピー値のバラツキを回避できる利点もある。小領域の長さを6mより大きく設定すると、小型車両が連続する場合、1つの小領域に複数台の車両が存在する場合が発生する。また、6m未満では、停止車群の場合にも車両間に空領域が出現してしまう。

4.2 空間平均速度推定値の検証

前述の図1スチール写真实測データをもとに、空間平均速度実測値(5秒間) V_s のデータ群と瞬時車両分布パターンから(8)式を用いて算出した推定空間平均速度 V_{se} のデータ群との相関を区間内車両台数6台以上の445の

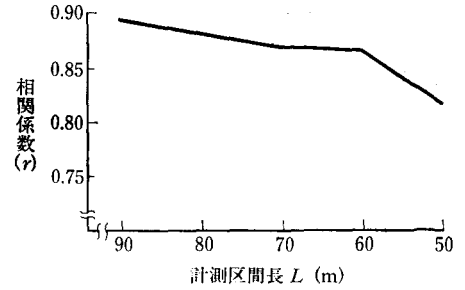
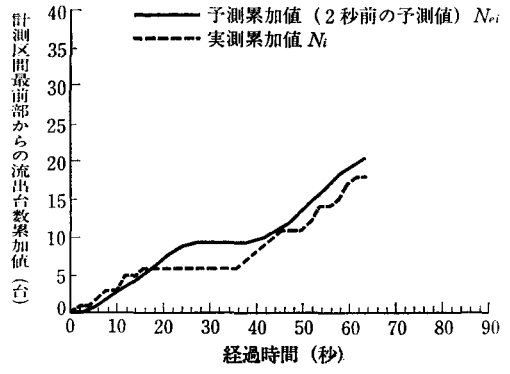
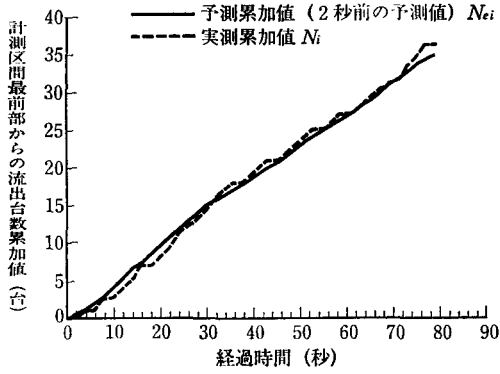
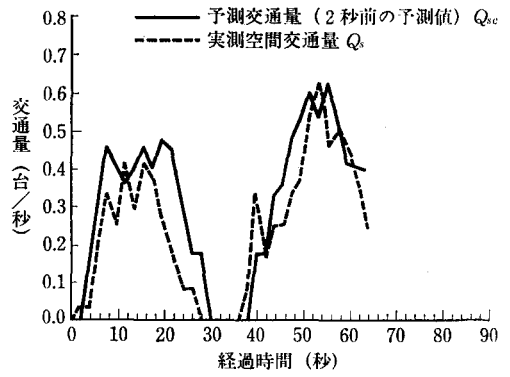
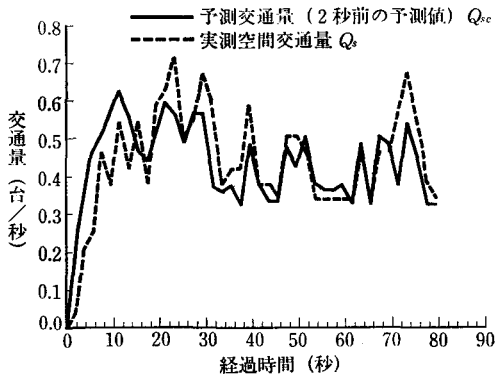


図4 計測区間長と空間平均速度実測値・推定値相関係数の関係

パターンデータにより検証した。その結果、両データ間には相関係数 $r=0.906$ という高い相関があることがわかった。なお、(8)式で、 V_f は16(m/秒)、 K_f は1/6(台/m)を使用した。また、区間内車両台数5台以下のデータを除いたのは、交通密度の小さい状態では個々の車両速度のバラツキの影響が大きいためである。

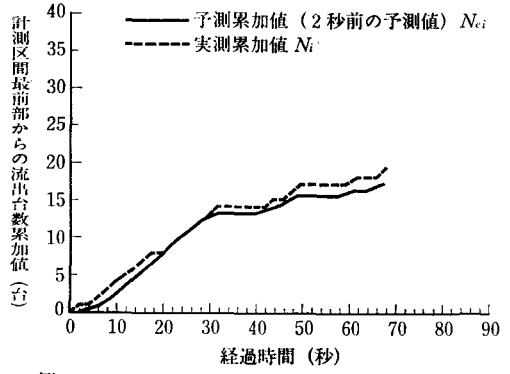
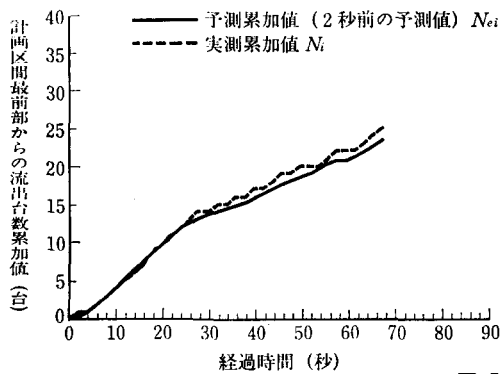
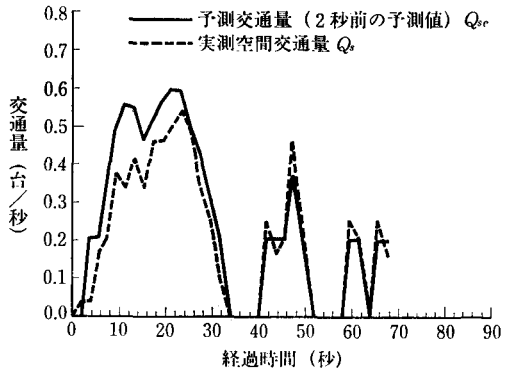
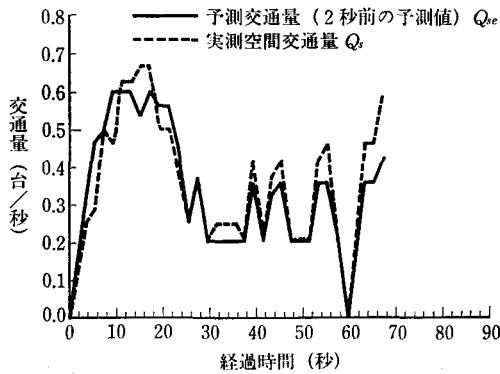
図4は、445個のデータのうち、直進専用車線における青信号期間中の131個のデータの空間平均速度実測値とその推定値をプロットした散布図である。直進・左折混合車線では、左折車の交差点直前での減速、あるいは、左折車の歩行者待ちによる直進車の進行妨害および減速が原因となって、車頭距離と速度との相関のばらつきが増し、推定精度の低下をまねくことになる。前述のように本推定値は当該信号が青信号中の流入交通流変動を感知するための、地点全感応制御入力情報としての使用を目的としており、その際、以上の理由により原則としてより推定精度の高い直進専用車線における交通流を計測対象とする。したがって、図4では、信号制御入力情報として特に参考となる直進専用車線で得られたデータをプロットした。なお、この限定されたデータは相関係数 $r=0.971$ である。

図5は計測区間長 L (x軸)と前述の相関係数(y軸)との関係をプロットしたものである。この結果、計測区間を短くしていった場合、区間長60m程度まで相関係数が0.85以上という値になり、実用上問題のない精度が得られることがわかった。すなわち、歩道橋程度の高さから計測可能な区間長でも精度の高い推定値が得られることになる。なお、前述の理由により、この検証には朝夕混雑時の比較的交通密度の高いデータを使用している。このグラフには示されていない区間長50m未満になると、交差点直近の一部の情報しか得られず、平均的な車



(a)

(b)



(c)

(d)

図 5 実測結果の一例

両分布特性の感知が困難になり、推定値の信頼性が低下する。と同時に、存在車両数が減少し、個々の速度のバラツキが影響することになる。

4.3 交通量推定値の検証

(1) スチール写真データを用いた交通量推定値の検証
 前述の空間平均速度の検証に用いたデータを利用して交通量の推定精度を検証する。

信号制御用入力情報として必要なのは、「1.はじめに」の項でも述べたようにアプローチにおける単位時間当たりの流出車両台数（交通量）とその変動パターンである。ここでは、計測区間最前部を基準とした流出車両台数の累加値を用いて検証を行なった。一連のデータのうち、青信号表示開始にて先頭車両が発進する直前から赤信号にて車両停止直前までのデータを使用した。1つの信号サイクルにおける t 秒ごとの流出車両台数の累加値 N_i ($i=1, 2, 3, \dots, m$)は(10)式となる。ここで、 $m=1$ つの信号サイクル内の計測時間/ t 。

$$N_i = \sum_{k=1}^i q(t)_k \quad (\text{台}) \quad (10)$$

ここで、 $q(t)_k$: k 番目の観測期間 t 秒間の流出車両台数。

これに対する推定累加値 N_{ei} ($i=1, 2, 3, \dots, m$)は(11)式で求められる。

$$N_{ei} = \sum_{k=1}^i (Q_{se})_k \cdot t \quad (\text{台}) \quad (11)$$

ここで、 $(Q_{se})_k$: k 番目の観測期間開始時の瞬時交通流画像から計測されたエントロピー、交通密度を(9)式に代入し、算出された推定交通量。

このデータにより流出車両台数の実測累加値 N_i と推定累加値 N_{ei} との相関分析を行なった。なお、(9)式中、 V_f は16 (m/秒)、 K_f は1/6 (台/m)を使用した。なお、 t は5秒である。その結果、昼間の閑散時を含んだ244パターンデータにおいて相関係数 $r=0.957$ 、朝夕ピーク時のみの168パターンデータにおいて $r=0.963$ が得られ、高い推定精度であることがわかる。

(2) 簡易計測法による交通量推定値の追加検証

前述の簡易計測法を用いて、熊本市内の3カ所の交差点にて実交通流の計測を行なった。計測場所および日時は次のとおりである。

① 国道57号線東バイパス宏和ビル前交差点上り直進専用車線 (以降、現場Aとする)

1990年8月31日(金)8時50分から約2時間

② 国道57号線東バイパス神水交差点上り直進専用車線 (以降、現場Bとする)

1990年12月25日(火)14時40分から約2時間30分

③ 国道3号線水道町交差点下り直進専用車線 (以降、現場Cとする)

1991年10月23日(水)16時00分から約1時間30分

3カ所とも、計測距離は72m (12小領域)である。計測対象は各信号サイクルの内、青信号表示開始にて先頭車両が発進する直前から赤信号にて車両停止直前までとし、計測は2秒間隔で行なった。4.3(1)項と同様に、流出車両台数の実測累加値 N_i と推定累加値 N_{ei} を算出した。本計測において、計測間隔 t を2秒に設定したのは、飽和流(最大流量)の場合2秒に1台の車両通過といわれており、交通量計測の精度を考慮したためである。また、連続する2枚の画像を比較し、全車両の2秒間の移動距離をもとに算出された空間平均速度((6)式) V_s に交通密度 K を掛けて算出された交通量((12)式)も同時に計測した。移動距離は6m単位で計測されているために、厳密な実測値とは言い難いが、1つの目安としては十分である。なお、本文交通量は区間内の平均移動距離をもとに算出されており、計測地点の流出車両台数をもとに算出される交通量と区別するために、以降これを「空間平均交通量 Q_s 」という。

$$Q_s = K \cdot V_s \quad (\text{台/秒}) \quad (12)$$

なお、エントロピー、交通密度算出にあたっては連続して小領域を占有するような大型車両の車両長は補正した。さらに、図3に示すように、交通密度の低いときに計測区間内の最前部および最後部に共に車両が存在するような場合には、定常流にも関わらず先頭車両の車頭距離が最小となりエントロピーが低下し、交通量推定に誤差を生じる。このような場合、2台目の車両の車頭距離にて先頭車両の車頭距離を補整し、その誤差を回避した。

本計測では、軽交通から、先詰まりが発生し一時進行不能になる重交通までの多くの交通流パターンが計測できた。解析に使用された全交通流画像パターンは756である。その中から典型的な4例を図5に示す。図5(a)~(b)の各上側の図は実線が(9)式による瞬時画像から推定された交通量 Q_{se} 、点線がその後2秒間の全車両の移動距離をもとに計測された空間平均交通量 Q_s の推移を示す。また、各下側の図は、実線が流出車両台数の推定累加値 N_{ei} を、点線は実測累加値 N_i をそれぞれ示す。

図5(a)は交通量の極端な低下が見られず、飽和流が青信号中継続している状態を示す(現場Bにて計測)。(b)は途中先詰まりが発生し一時車両進行が不能になった例であり、その後、先詰まりが解消したことを示している(現

場Aにて計測). (c)(d)は青信号途中で飽和流が終了し, その後はポアソン流の到着になったことを示している ((c)は現場A, (d)は現場Cにてそれぞれ計測). いずれの例も実測値と推定値が近似し, さらに, 異なる計測現場においても1つの推定式で推定できる汎用性があることが理解できる. なお, 図5(b)のように先詰まりによる停止波の伝搬の場合には, 現実には車群形成以前に先頭車両の流出が停止するために, 車群形成までは実測値と推定値とに時間的なズレが見られる.

次に, 流出車両台数の推定累加値 N_{ei} を x , 実測累加値 N_i を y とし, 相関・回帰分析を行なった. その結果は次のとおりである.

①現場A, Bで得られた合計423パターンデータにおいて

相関係数 $r=0.968$

回帰式 $y=1.012x+0.313$

②現場Cで得られた333パターンデータにおいて

$r=0.983$

$y=1.080x+0.452$

③全体 合計756パターンデータにおいて

$r=0.971$

$y=1.033x+0.431$

これより, 回帰式は $y=x$ に近似することがわかり, 設定した V_f, K_f, D_f の各値が適切で, 本推定関数値が実測値によく対応していることが理解できる. なお, スチール写真データによる相関係数が本計測結果よりも若干低い理由は次のように考えられる.

- ①間隔時間 t が5秒と長いこと.
- ②大型車の車両長の補正をほどこしていないこと.
- ③図3に示した低交通密度時のパターン補正をほどこしていないこと.
- ④直進・左折混合車線のデータを含めて検証に使用していること.

5. おわりに

今回, 先に提案したエントロピー状態量を応用して, 車両走行上の実質的交通密度を推定するエントロピー等価密度係数を提案し, $K-V_s$ 式, および $K-Q$ 式と組み合わせた汎用的な V_s, Q 推定関数方程式を構築した. 次に, 現場データによる検証を行なった結果, 本関数を用いることにより, 瞬時に得られた交通流画像を用いて, V_s あるいは Q を推定できることが明らかになった. 空間平均速度の推定にあたって, 計測区間長と推定精度との関連を検討し, 60~70m程度の計測長でも0.85を越える

相関係数が得られ, 横断歩道橋程度の高さから観測できる実用的な計測区間長でも推定可能であることが示された. また, 計測区間を6mの小領域に区切って, その各小領域ごとの車両存在(1), 非存在(0)のパターンを作成し, それをもとにエントロピーを計測する簡易方式を提案し, 実用的には十分な精度があることを検証した. さらに, 3箇所の異なる現場で収集したデータのいずれにおいても1つの関数方程式で高精度に交通量を推定できることが確認され, 本関数が汎用的であることが検証された. 本関数から得られる交通量推定値を入力情報として用いれば流量の変動に感応した高効率の信号制御手法の開発が可能となろう.

参考文献

- [1] 越正毅: 道路交通の渋滞対策 1. 総論, 交通工学, Vol. 25, No. 1 (1990), pp.44—49.
- [2] 赤羽弘和: 道路交通の渋滞対策 2. 渋滞のメカニズムと診断, 交通工学, Vol.25, No. 2 (1990), pp.41—50.
- [3] 上高塚耕一: 道路交通の渋滞対策 3. 交差点の渋滞対策 (その2), 交通工学, Vol.25, No. 4 (1990), pp.49—54.
- [4] たとえば, F. B. Lin and S. Vijayakumar: Adaptive Signal Control at Isolated Intersections, *Journal of Transportation Engineering ASCE*, Vol.114, No. 5 (1988), pp.555—573.
- [5] たとえば, J.M. Blouffeville, V. Motyka and S. Espie: Video Sensors, In: *Concise Encyclopedia of Traffic & Transportation Systems (M. Papageorgiou, ed.)* (1991), pp.610—616, Pergamon Press, Oxford.
- [6] 岩崎洋一郎, 定方希夫: エントロピーによる道路交通流情報, オペレーションズ・リサーチ, Vol.33, No. 8 (1988), pp.408—416.
- [7] Y. Iwasaki and M. Sadakata: An Informational Quantification by Entropy for Spatial Road Traffic Flow, *Operational Research '90 (H. E. Bradley, ed.)* (1991), pp.379—392, Pergamon Press, Oxford.
- [8] たとえば(株)交通工学研究会編: 交通工学ハンドブック, p.144, 技報堂出版, (1984).