

# 車両の短時間平均速度と車頭時間に着目した交通流の測定と解析

## Road Traffic Measurement and Analyses from Viewpoint of Short Term Averaged Vehicle Speed and Time Headway

鈴木祥介\*, 谷口正成\*, 高木相\*\*

Shosuke Suzuki\*, Masanari Taniguchi\*, Tasuku Takagi\*\*,

\*東北文化学園大学, \*\*東北大学名誉教授,

\*Tohoku Bunka Gakuen University, \*\*Tohoku University(Emeritus),

キーワード: 車頭時間 (time-headway), 道路交通流 (road traffic flow), 交通予測システム (traffic forecasting system), 短時間平均パラメータ (short-time averaged parameters), 移動平均 (moving average)

連絡先: 〒981-8551 仙台市青葉区国見6-45-1 東北文化学園大学 鈴木祥介

Tel.: (022)233-9990, Fax.: (022)233-6419, E-mail: ssuzuki@ait.tbgu.ac.jp

### 概要

短時間平均化した車速と車頭時間の測定から流量( $q$ )と密度( $k$ )を求め、その時間変動から $q, k$ , 速度( $v$ )の相互関係を明らかにした。測定データは各短時間( $\tau$ )(今の場合30秒間)ごとに平均化され、平均化されたデータは再び各 $n\tau$ (この論文の場合は $n = 5$ )毎の移動平均によって再度平均化している。交通流の挙動を流量 $q$ と速度 $v(q-v)$ ,  $k$ と $v(k-v)$ , および $k$ と $q(k-q)$ の間の関係をグラフで示し、データの時間変動は矢線によって示した。また、 $q, k, v$ それぞれの時間変動を時間 $t$ に関するグラフとして示すことができた。これらからより明確に $q, k, v$ の相互関係を定量化することができた。本研究により、交通流の最適化と予測について

新しいシミュレーションツールの開発に新しい展望を開くことができた。

### 1. はじめに

今日の自動車社会の最大の課題は、渋滞の問題で、これは環境公害、経済活動に負の効果をもたらしている。交通渋滞を解消するために従来から多くの施策がとられ、また道路交通現象に関する研究やそれらのシミュレーションがなされて来ている。Papageorgiouらは、一般道とフリーウェイについての、交通理論とシミュレーションについてのこれまでの研究状況についてレビューを行っているが<sup>1)</sup>、これによれば、これまでの渋滞に対する戦略は必ずしも十分な技術として実現してはいないという

ことである。すなわち、理論と実際にはギャップが存在するというのである。

道路交通は一般に $k$ (車両密度), $q$ (交通流量), $v$ (車速度) 3つのパラメータによって特性づけられ,これらの相互関係は $q-k$ 相関(この論文では $(k-q)$ 関係)と $k-v$ 関係によって示されている<sup>2)</sup>。しかし,これらの関係は今まで交通流のシミュレーションや制御,予測などのために使用されてはいない。その理由は $q, k$ が単なる測定値として定義されてきているため理論的展開ができなかったためと考えられる。

本論文において,著者らは,新しく $q$ と $k$ を短時間車頭時間平均と速度によって定義した。これらは互いに独立な変数である。我々は,時間変動を示すために矢線によって $k-v, q-v, k-q$ の時間変化を示すことを試みた。これにより,われわれはある特定の時間間隔( $\tau$ )(この論文では $\tau=30$ 秒)におけるパラメータの動きを見ることが出来るようになった。これにより将来の新しい交通流シミュレーションと交通制御の最適化問題への展開が期待できる。

## 2. 交通流の挙動

本文に入る前に,1つの交差点をもつ道路の単純なモデルで考察してきた筆者らの研究を要約して,基本的な交通流の概念を得ることとしよう<sup>3,4)</sup>。

Fig. 1 は,1つの交差点をもつ道路のモデルである。図中,Aは赤信号時の交通流を,またBは青信号の場合を示す。赤信号のときは,車両はFig. 1 のAのような待ち行列ができる。待ち行列の長さ $\lambda$ は,点Pから点Fまでの距離である。点Fはある速度 $V_F$ で後退する。点Fはショックウェーブ理論<sup>5)</sup>では波頭(wave front)である。点Fは赤信号の間,後退し続ける。青信号では,Bに示すように待ち行列は速度 $V_T$ でそのトップ

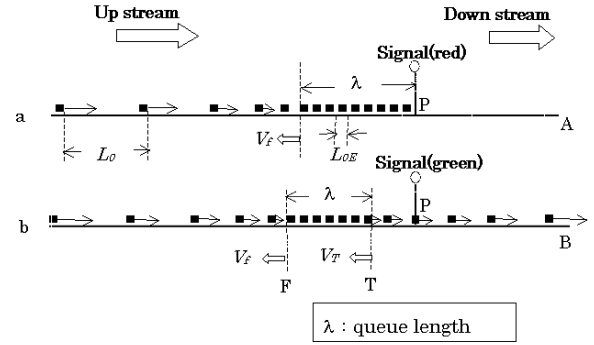


Fig. 1 Road traffic model for theoretical consideration of flow dynamics

Tから解消し,長さ $\lambda$ は点Tから点Fまでの距離になり,長さ $\lambda$ は速度の差 $V_T - V_F$ によって定まる。もし $V_T - V_F > 0$ なら, $\lambda$ は時間と共に短くなりもし $V_T - V_F < 0$ ならば, $\lambda$ は長くなる。 $V_T$ は青信号時間通過容量(青信号時間に通過する車両の台数)と車両速度によって決定される。一方, $V_F$ は,交通需要(流入する車両の台数およびそれらの速度)によって,決定される。

## 3. パラメータの定義

われわれの,一般的な興味は微視的な(ミクロな)すなわち瞬間的な交通流の挙動よりは,むしろある巨視的な(マクロな)交通流の挙動を知ることの方が実用的である。もしわれわれが,比較的短い例えば,2,3分以内の交通状況を巨視的に(平均的に)知ることができれば,きめ細かい交通流制御や交通流の予測などの可能性が期待できると考えられる。このようなことを念頭において,筆者らは交通信号状態を把握するために,新しく時間平均化されたパラメータを使用することとした。すなわち,信号の赤または青の状態を気にするのではなく,平均化された交通流のみに着目することとした。従って,我々はFig.1のような詳細なモデルを用いる上記のような詳細な解析とは異

なる. ここで,我々は,時系列のパラメータとして車頭時間と速度の2つを測定パラメータとして取り上げた.

### 1. 時系列パラメータ

ここで我々が採用する2つの測定パラメータは平均車頭時間と平均車両速度である.これらをそれぞれ $T_{0i}$ ,  $V_{0i}$  と記述し, これらの移動平均値をそれぞれ $T_{0im}$ ,  $V_{0im}$ と記述する. サフィックス $i$ は時刻に対応する. Fig.2はこれらが出来される時間関係を示している. すなわち,  $T_{0i}$ と $V_{0i}$

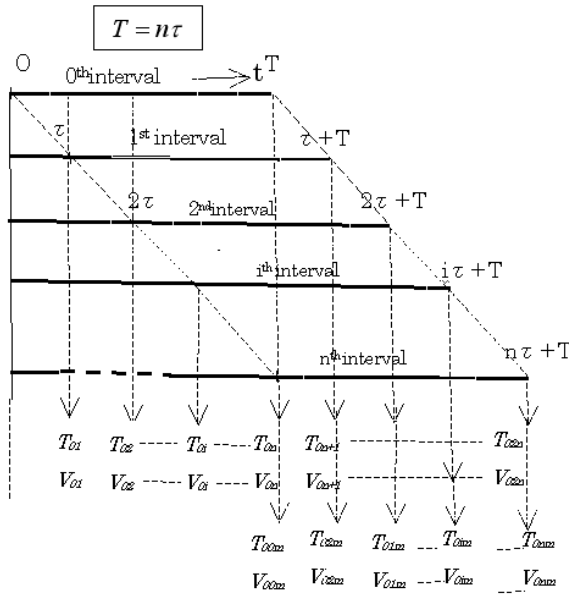


Fig. 2 Parameter value obtaining procedure by moving averages

は,  $\tau$ 秒ごとのタイミングで現れる.  $T_{0i}$ ,  $V_{0i}$  は,  $\tau$ 秒間(この論文では $\tau = 30s$ )道路上のある点を通過した車両のそれぞれの車頭時間と車速の測定値を平均したものである.  $T_{i0m}$ と $V_{i0m}$ は,  $i\tau + T(i = 1, 2, 3, \dots)$ のタイミングで現れる. 以下これらの細部について述べる.

### 2. $T_{0i}$ と $V_{0i}$

この2つは, それぞれ各 $\tau$ の間の平均化された車頭時間と車速度である.  $\tau$ 秒の間には, 道路上に設定した点を何台かの車両が通過する. ここで,  $\tau$ 秒間の車両の台数を $K + 1$ 台とし, それぞ

れの車頭時間を,  $T_{i1}, T_{i2}, T_{i3}, \dots, T_{ij}, \dots, T_{iK}$ とする.これらは測定値である.そうすると, $T_{0i}$ は,

$$T_{0i} = \frac{\sum_{j=1}^K T_{ij}}{K} \quad (1)$$

によって計算され,  $V_{0i}$ に関しては, (2)によって求められる.ここに各車速度の測定値は $V_{i1}, V_{i2}, V_{i3}, \dots, V_{ij}, \dots, V_{iK}, V_{iK+1}$ である.

$$V_{0i} = \frac{\sum_{j=1}^{K+1} V_{ij}}{K+1}. \quad (2)$$

### 3. $T_{0im}$ と $V_{0im}$

これらのパラメータは, 移動平均化された車頭時間と車速度である. 最初に,  $\tau$ の整数倍のある周期 $T$ を設定しこれを

$$T = n\tau \quad (3)$$

と表す. ここに,  $n$ は実用的な観点から定まる整数である(本文では $n = 5$ としている). 周期 $T$ の間,  $n$ 個のそれぞれのデータ  $T_{0i}$ と $V_{0i}$ は Fig. 2 に示されるように, 移動平均化される. 最初の $T_{00m}$ は $T_{0i}(i = 1, \dots, n)$ の値の平均値である.すなわち, Fig. 2 から

$$T_{00m} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{0i}}{n}. \quad (4)$$

$i$ 番目の $T_{0im}$ は,

$$T_{0im} = \frac{\sum_{j=i-n}^i T_{0j}}{n}. \quad (5-1)$$

$V_{0im}$ は

$$V_{0im} = \frac{\sum_{j=i-n}^i V_{0j}}{n}, \quad (5-2)$$

と求められ,これらの値は $\tau$ 秒ごとに得られる.

### 4. 流量( $q_{0im}$ )

交通流量は,上記のような移動平均化されたパラメータによって(6)のように定義する. ここで流量を  $q_{0im}$  で表す.

$$q_{0im} = \frac{1}{T_{0im}}. \quad (6)$$

$q_{0im}$  は道路上の観測地点を通過する,移動平均化された車両の台数(次元は  $s^{-1}$ )であり,  $i\tau + T(i = 1, 2, 3, \dots)$  毎に現れる.

#### 5. 車両密度( $k_{0im}$ )

$i$ 番目の時間区間における車両密度を  $k_{0im}$  で表す. 従来,車両密度は,1km (または1 mile)当たりの車両の台数として定義されている.これは,測定が困難だから,多くは,占有率(occupancy)<sup>6)</sup>が用いられているが,しかし,これも測定は容易ではない. よって,筆者らは(7)で示すように定義する. すなわち,

$$k_{0im} = \frac{L_{0E}}{L_{0im}} = \frac{L_{0E}}{T_{0im}V_{0im}}, \quad (7)$$

ここに,  $L_{0E}$  は極限的最小の車頭距離を表す.つまりどの車両も動くことができない状態の待ち行列における車頭距離である(Fig.1).  $L_{0im}$  は移動平均化された車頭距離で

$$L_{0im} = T_{0im}V_{0im}. \quad (8)$$

と書ける. (7)の定義は正規化された密度を表す.一方従来の密度はある距離(多くの場合1kmまたはmile あたり)の車両数の実数である.  $k_{0im}$  は交通流が疎の場合は(7)から得ることができるが,密度が増加して車両がほぼ停止状態になると  $T_{0im}$  と  $V_{0im}$  を得るのが困難になる.この状態で,  $L_{0i}$  ( $i$ 番目のタイミングにおける  $\tau$ 秒間の平均化された車頭距離)の測定を実行し  $L_{0im}$  を

$$L_{0im} = \frac{\sum_{j=i-n}^i L_{0j}}{n}, \quad (9)$$

によって求め,(7) から  $k_{0im}$  を得るという手段を取るのが良いと考えられる.

## 4. $q - k$ 関連の考察

$q - k$  関連はよく知られている交通流の表現法である.  $q, k, v$  の間には

$$q = kv \quad (10)$$

なる関係がある. ここに,  $q$  は, ある時間, 例えば従来,1時間あたりの車両の数で(次元は  $(\text{time})^{-1}$ )で表されている.  $k$  は例えば1 km内の実際の車両数(次元は,  $(\text{distance})^{-1}$ )である.  $v$  は速度 ( $\text{km/hour} = \text{distance} \cdot (\text{time})^{-1}$ ) である. (7)における  $k$  の我々の定義では,  $k_{0im}$  は正規化された密度だから,その値は0から1 ( $0 \leq k_{0im} \leq 1$ ) の間の値をとる. 我々の場合,流量は(6)のように,そして密度は(7)のように書かれている. (10)は正規化されていないから,そのまま(10)にあてはめると

$$q_{0im} \left( = \frac{1}{T_{0im}} \right) \neq k_{0im} \left( = \frac{L_{0E}}{T_{0im}V_{0im}} \right) V_{0im} \quad (11)$$

のように(10)が成立しなくなる. そこで, (11)は,正規化の因子( $L_{0E}$ )をつけ加えて(12)のように記述することとなる.すなわち,

$$q_{0im} = k_{0im} \left( \frac{V_{0im}}{L_{0E}} \right) \quad (12)$$

である. (12) 内の  $\frac{V_{0im}}{L_{0E}}$  の逆数は, 1 台の車両が最小平均車頭距離を進むのに必要な平均時間である.

## 5. 流量の測定

### 1. 測定地点と方法

Fig.3は,測定地点を示す.ここでビデオ映像を連続的に記録することによりこの場所における交通流量を測定した. 車頭時間は,点Pを通過する各車両の時刻をビデオ画像から求めることができた. ビデオは,30秒毎に区切り( $\tau = 30s$ ) 連続して通過する車両の時間差を測定し



Fig. 3 Site of measurement

これを(1)における  $T_{ij}$  とした。これを用いて、(1)から30秒間の  $i$  番目の周期に対する車頭時間  $T_{0i}$  を求め、これを  $T(=n\tau)$  秒後の移動平均  $T_{0im}$  を得るためのデータとした(5-1)。  $V_{ij}$  は、点Pから点Qまで車が移動する時間の測定から求めた。PとQの距離は24m である。  $V_{0im}$  は、(2)から計算された  $V_{0i}$  を用いて(5-2)から計算した。

## 2. 測定結果

### 1) 密度( $k$ ) と速度( $v$ )の相関( $k-v$ 関係)

測定された  $k-v$  相関を、Fig.4とFig.5 に示す。それぞれ  $n=1(\tau=T=30s)$  と  $n=5(T=150s)$  の場合である。各矢線の先端は各測定値の座標を示す。これらの図から我々は、交通状態のダイナミクスを見ることができる。Fig.4は  $n=1$  のときで、これは移動平均はとられていない。それ故  $k_{0im}$  は  $k_{0i}$  である。これで見ると、この場合は矢線の動きが激しい。Fig.5は  $n=5$  (150秒間の平均値) としたときの動きで、Fig.4に比して、より滑らかな動きを示している。Fig.5は、 $k_{0im}$  と  $v_{0im}$  の変動(ただし、 $i=1, 2, 3, \dots, 70$ ) の  $k-v$  平面上の結果である。各矢線は  $\tau(=30s)$  ごとのタイミングで現れる。Fig.4とFig.5を比較すると、移動平均法を用いたFig.5の方が、より明確に挙動の把握ができていることが分かる。Fig.5の点線は、密度と速度の関係の傾向を示している。Fig.5から、矢線

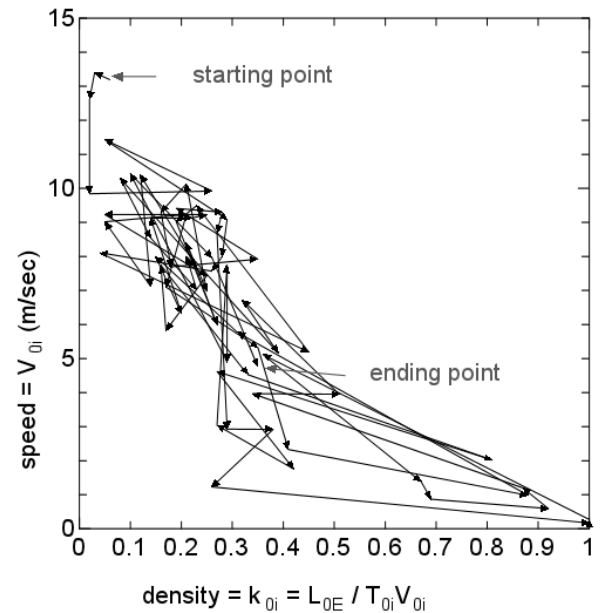


Fig. 4 Variation of  $k_{0im}$  (when  $n=1$  ( $k_{0im}=k_{0i}$ :no moving average)) (arrows show the movements of  $k_{0i}(i=1, 2, 3, \dots)$  during 30 seconds)

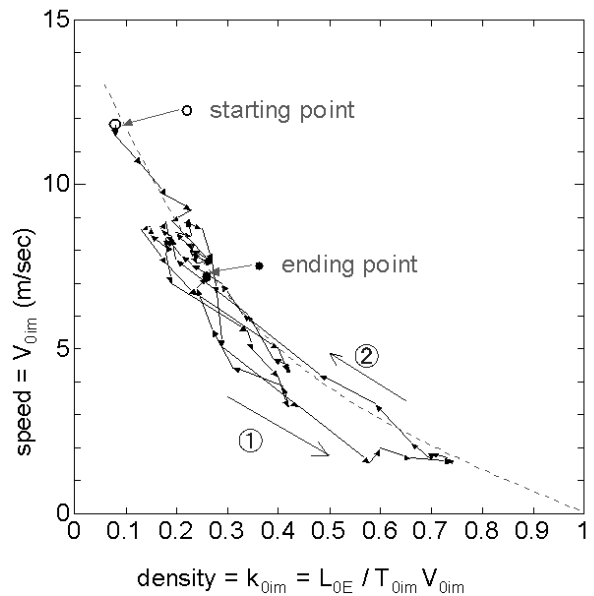


Fig. 5 Variation of  $k_{0im}(n=5)$ (each arrow shows the movement during 150 seconds)

① によって示されているように交通が渋滞に向うとき、速度の低下が、矢線⑤によって示される渋滞が解消に向う場合より、より小さい密度で起こるというのは興味深い。今後調査・研究してみたい課題である。

## 2) 流量( $q$ )と速度( $v$ )の相関

Fig.6は  $q - v$  関係を  $n = 5(T = 150s)$  の場

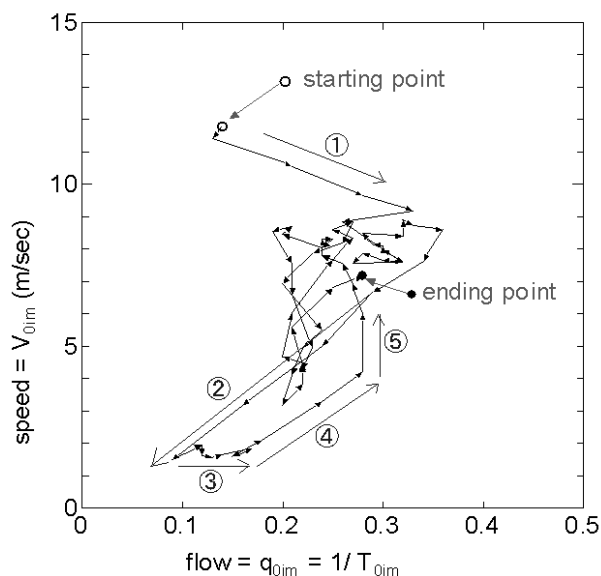


Fig. 6  $q - v$  relationship ( $n = 5$ )(each arrow shows the movement during 150 seconds )

合, $q-v$ 平面上に $i = 1, 2, 3, \dots, 70$ に対して $q_{0im}$ と $v_{0im}$ を描画したものである。矢線①は、疎な交通流の状態における流量の動きを示している。そして最大交通流の状態ではランダムな様相を示している。最大流量の後で矢線②が示すように車流は渋滞へ向かう。Fig.6から、我々は興味深い現象を見出すことができる。つまり、矢線②によって示されるように、交通が渋滞に向かうとき、流量と速度は流量の減少状態では、殆ど直線的である。そして、渋滞状態は継続するが、矢線③によって示されるように速度は大きく変化しないにもかかわらず流量は独立に増加している。また、矢線④に示されるように渋滞が解消に向かうとき、速度と流量は比例して増加し、その状態は②と殆ど同じ傾きである。そして矢線⑤によって示されるように速度が増加しても流量の変化がない状態が存在する。

## 3) 密度( $k$ )と流量( $q$ )の相関

Fig.7は, $n = 5$ における密度と流量の間の相関

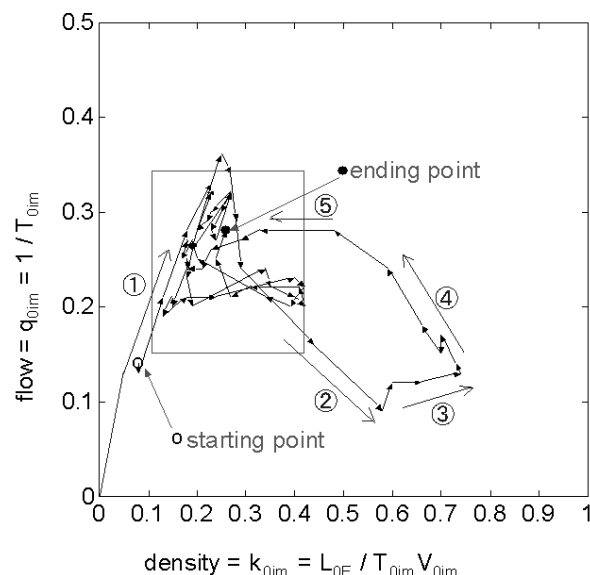


Fig. 7  $k - q$  relationship ( $n = 5$ )(each arrow shows the movement during 150 seconds )

を示す。この図から、我々は、交通現象のもっと詳細な挙動を知ることができる。矢線①は疎な交通流の状態であり、殆ど直線である。そしてあるランダムな状態(点線で囲まれた矩形の領域)の後で、交通は矢線②によって示されるような渋滞に入る。これはFig.5の①に、Fig.7の③はFig.6の②に対応している。矢線③で示される状態は、Fig.6の②に対応する。しかし、Fig.7におけるこの状態はFig.6におけるよりももっと詳細である。渋滞状態は、④に示されるように流量 $q$ は②と殆ど同じ速度でしかし大きい流量で、解消に向かう。⑤の状態の後で、再び、ランダムな状態に入る。ランダムな状態は、この場合、 $k = 0.15$ から $0.5$ の間で大きい交通流の場合である。以上の議論から、我々は最も豊富な情報は $k - q$ 関係に含まれているとよいと考えられる。何故ならば、流量( $q$ )は我々の最も優先順位の高い興味の対象であり、密度( $k$ )は実感できる量であるからである。従来 $k - q$ 関係の形には実験的に2つの型の $k - q$ 曲線が提案されている。1つは円形で<sup>7)</sup>で、他は、三角形かまたは台形である<sup>8,9)</sup>。しか

し, Fig.7 を見ると,  $k - q$  関係の形は,  $k < 0.25$  の領域にあるときは, 殆ど線形であり,  $k > 0.25$  の領域にある場合は円形である. 上記の結論から, 我々は, この形は, 三角形と円形の組み合わせたもののように見えることができる. しかしこの問題に関しても今後の調査をもっと行う必要がある.

## 6. 流量の時間解像度

交通流は  $q, k, v$  によって状態把握ができる. 本文におけるこれまでの議論で, 筆者らは  $k - v, q - v, k - q$  の関係を見て来た. これらの図で時間変化を矢線で示すことを試み, これによってかなり多くの情報抽出ができることが明らかにされた. しかし矢線表示のみでは十分とは言えず, やはりそれぞれの時間変動がひと目で分かるグラフ表現が希求される. 筆者らの本文の手法によればこの表現が可能となる. Fig.8 は, 時間  $t$  に対する  $q, k, v$  の変動を示したものである. この図から, 我々は, これらのパラメータ

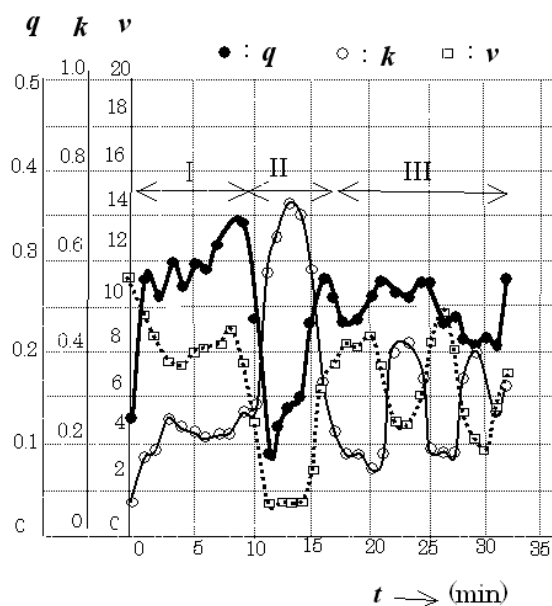


Fig. 8 Time variations of  $v, k$  and  $q$

の全体の変動を, Fig.5,6,7 特に Fig.7 ( $k - q$ ) と

比較して見るることができる. 最も豊富な情報をもつ Fig.7 と Fig.8 を対比してみよう. Fig.8 は, 数字 I, II, III によって示された 3 つの領域に分けられる. 我々は, これらの領域と Fig.7 の ①, ..., ⑤ の数字で順番づけられた流れの方向の間の対応をみてる. 対応は以下のとおりである.

- 1) 領域 I は, Fig.7 の ① に対応し, 流量が疎から最大になることを示す.
- 2) 領域 II は, ② に対応する. 流量は, 密度の増加および流量の低下と共に (③ と ④) 急速に渋滞に入る.
- 3) 領域 III は, ⑤ に対応し, 非渋滞の流量である.  $k$  と  $v$  の関係は, Fig.5 に対応している. 領域 III において,  $k$  と  $v$  は, 激しく上下に変動するがしかし, 流量はそれほど上下に変動しない. この領域における流量は自然流で, 渋滞のないところである.

## 7. 結論

我々はこの論文から次の結果を得た.

- 1) 2 つの基本的な測定パラメータ (短時間の平均化された車頭時間  $T_{0i}$  と速度  $V_{0i}$ ) は, 密度  $k$  (0 から 1 の間に正規化され, 無次元) と交通流量  $q(s^{-1})$  を得るのに十分なパラメータである.
- 2) 巨視的な (マクロな) 流量, 密度および速度が, それほど長くない時間変動を移動平均の方法によって (この論文では, 30 秒毎に平均化されたデータを 150 秒間に亘って移動平均した) それぞれ得られた. この方法を採用することにより, 交差点における交通信号のような短時間のボトル

ネックの影響を平均化して,交通状態を知ることができるようになった.

- 3) パラメーター間のお互いの関係のみならず時間変動による関係も得られるようになったことから流量,密度,速度それぞれの関係が明確に把握できるようになった.

以上の結論から我々は今後,交通流の解析のみならず交通流の最適化(制御)あるいは交通予測(予報)のための新しい交通流シミュレーションのツール開発の展望を得ることができた.

#### 引用文献

- 1) MARKOS PAPAGERGIOU, CHIRISTINA DIAKAKI, VAYA DINOPOULOU, APOSTOLOS KOTSIALOS, AND YIBING WANG, "Review of Road Traffic Control Strategies," PROCEEDINGS OF THE IEEE. VOL.91. NO.12 pp.2041-2067, DEC. 2003
- 2) Wilhelm Leutzbach, "Introduction to the Theory of Traffic Flow," Springer-Verlag, 1988
- 3) Tasuku Takagi, Masanari Taniguchi, Sumiyoshi Fujiki, Shinichi Kamimura, Nobuo Suzuki, "A Theoretical Approach to Analysis on the Downstream and Upstream Road Traffic Flow Rate of a Single Intersection," SICE Annual Conference in Osaka, WA19-3, Aug. 2002, Osaka.
- 4) Shousuke Suzuki, Masanari Taniguchi, Tasuku Takagi, "Theory of Road Traffic Flow at a Bottleneck," SICE Annual Conference in Sapporo, FAI-17, Aug. 2004.
- 5) Adolf D. May, "Traffic Flow Fundamentals", Prentice Hall, 1990.
- 6) Chapter 6 in 5)
- 7) Chapter 10 and 11 in 5)
- 8) PAUL HSU AND JAMES H. BANKS, "Effects of Location on Congested-Regime Flow-Concentration Relationships for Freeways," Transportation Research Record, No.1398, Traffic Flow and Highway Capacity, NATIONAL ACADEMY PRESS WASHINGTON, D.C. 1993.
- 9) FRED L. HALL, ANNA PUSHKAR, AND YONG SHI, "Some Observations on Speed-Flow and Flow-Occupancy Relationships Under Congested Conditions," *ibid.*