

道路交通流の物理的性質 (IV)

— $k-V$ 特性と $V-L$ 特性—

Physical Properties of Road Traffic Flow (IV)

- $k-V$ and $V-L$ Characteristics-

高木 相

東北大学名誉教授

Tasuku Takagi

Professor Emeritus, Tohoku University

キーワード：交通流、 $k-V$ 特性、 $V-L$ 特性、指数則

連絡先：〒981-0952 仙台市青葉区中山 5-2-20

E-mail: tasuku@sirius.ocn.ne.jp

1. はじめに

これまで次の内容で発表してきた^{1) 2) 3)}。文献 1) では、交通流の挙動を観測し、交差点での車の発進特性、加速特性などの大まかな測定値ないしは推定値から、交差点スループットを求めた。2) では $t-s$ ダイアグラム (Time-Space Diagram) による交通流の表示と一般的な速度—車頭時間 ($V-T$) 特性と車流の交差点での挙動をショックウェーブ (SW) を介して述べた。特に、複雑な交通流を平均化と線形化した $t-s$ ダイアグラム (平均化線形 $t-s$ ダイアグラム) とすれば、解析は容易になることを明らかにした。そして 3) では、平均化線形 $t-s$ ダイアグラムをモデルとして、先行車が速度を変化したとき追従車はその影響をうけて生じる SW をモデル的に解析した。ここでは若干の測定例から速度—車頭距離 ($V-L$) の関係が

$$L = L_0 \exp(\beta V) \quad (1)$$

(L : 車頭距離(m)、 L_0 : 最短車頭距離(m) (車列停止時)、 β : 定数、 V : 速度 (m/s))

なる関係にあることを仮定して SW の伝搬速

度を一般的に求めた。ここで得られた SW の伝搬速度は変化前の車速度と変化後の車速度のみで表わされることを明らかにした。そしてこれを交差点にあてはめて導出した SW 伝搬速度は、以前幾何学的に求めた結果と一致したことを述べた。

本文は文献 3) で用いた $V-L$ 指数関数関係が指数則として一般的に成立するかどうかを明らかにすることを目的に、高速道路 (東北道) を含む市内の道路交通流について解析した結果を、測定法を含めて述べ、(1) 式は確かに成立することが明らかになったこと、従来検討してきた密度—速度 ($k-V$) 関係の指数関数との関係、 $V-L$ 指数則の展望、などについて述べることにする。

2. $k-V$ 特性と $V-L$ 特性

$k-V$ (密度—速度) 特性については古くから研究されている^{例えば 4)}。この特性を数式モデルとして検討したものも多いが、中でも文献 5) には多くの研究者のモデルがサーベイされている⁵⁾。

筆者はこの関係は明確に指数関数関係にある

ことを多くの測定から検証している。この指数関数関係は

$$V = V_M e^{-\alpha k} \quad (2)$$

と書けるものである⁶⁾。ここで V_M は $k=0$ のときの速度（自由走行時の平均速度）である。

$V-L$ （速度－車頭距離）特性についても過去に調査研究がなされている^{例えば7)}。ここでは L は V の2次関数関係とする例が示されているが、筆者が本文で後述するように、この関係はやはり(1)式、あるいは次のような指数関数関係にある。

$$L = L_0 e^{\beta V} \quad (3)$$

この関係の検証が本文の目的であるので後述する。

さて、(1)（または(3)式）式と(2)式はどのような関係にあるのかを明らかにしなければならない。筆者が(1)式の関係を導出するにあたって定義した車密度の定義は

$$k = \frac{L_0}{L} = \frac{L_0}{VT} \quad (4)$$

である。(1)式と(2)式をみれば明らかに

$$k = e^{-\beta V} \quad (5)$$

である。つまり、 $k-V$ 特性と $V-L$ 特性は同じものであることが明らかになったが、(2)式についての議論は後述(7.)する。しかし明かに(3)式の方が分かりやすい。(2)式では走行中の車列の密度（パラメータ(k))は直接測定することは不可能で容易に知覚できない量であるからである。

以下 $V-L$ 特性を検証するための測定法から記述することとする。

3. 測定

3.1 概要

交通流の解析にはパラメータとして T (車頭時間)、 V (速度)のデータが必要である。これらのデータはループなどのセンサで常時得られているようであるが、当面研究用に適した

場所のデータは自分で取得しなければならない。よって、ここでの測定は測定場所を定めて、ビデオ撮影を行い、これから T と V のデータを取得することにした。

車頭時間 T はストップウォッチで簡単に測定できるが、速度 V は道路上のある距離（普通道路では10m、高速道では渋滞時は10m、通常走行時は20m程度）を走る時間を測定しなければならない。これもストップウォッチを使うのが便利である。しかし、2個のストップウォッチを同時に作動させて異なる量を測定するのはマニュアルではできない。そこで3.6で述べるような時計駆動装置を開発した。

以下測定パラメータ T, V の $t-s$ ダイアグラム上の意味と測定法について述べ最後に時計駆動装置について述べることにする。

3.2 測定パラメータ T, V

すでに、文献2)で詳しく説明したように、 T (車頭時間)は平均化線形 $t-s$ ダイアグラム(車の走行軌跡)(図1)の線間の水平距離(時間(s))で、 V (速度)は走行軌跡線の傾斜(m/s)である。

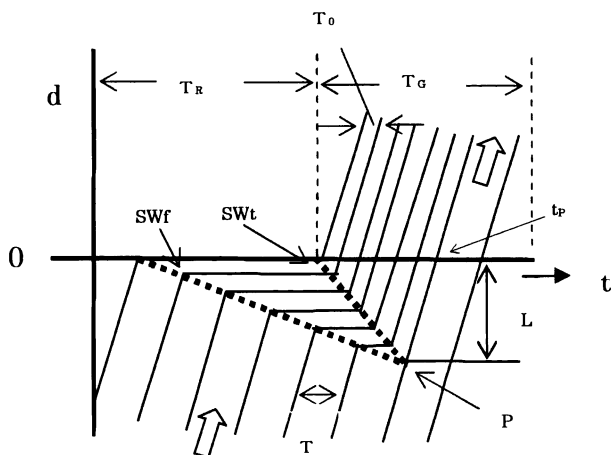


図1. 交差点の $t-s$ ダイアグラム

T は交差点に入る時(入力)(上流)を T , 出

る時（出力）を T_0 としているが、以下の説明ではこれを区別する必要がないので、本文では T （入力側）と T_0 （出力側）をともに車頭時間 T として扱う。

図2は道路を走行する車列のモデル図である。

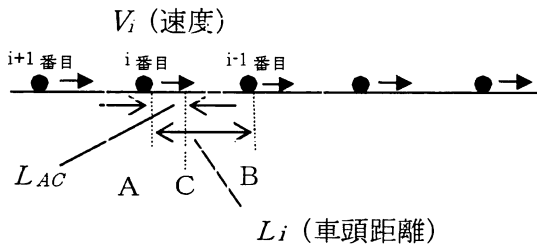


図2. 走行車列のモデル

われわれが知覚できるのは図2の V と L の二つである。車頭時間 T は L なる距離を V なる速度で走る時間である。動く車列の中で L を各車について直接測定するのは極めて厄介であるが、 V , L , T の間には

$$L = VT \quad (6)$$

の関係があるから、 L を知るには T と V を測定して算出するのがよい。

3.3 T の測定

T の測定は容易である。車列は定点（例えば図2のA点）に車が到達するごとに計時すれば、続いた計時値間が T である。第 i 番目（A点）と $i-1$ 番目がA点に来た時刻 t_{i-1} と i 番目がA点に来た時刻 t_i （この時点で $i-1$ 番目はB点に来ている。 $t_{i-1} - t_i = T_i$ である。 T_i の積算値は経過時間であるから、それぞれの T_i ($i=1,2,3,\dots$) はスプリット (split) である (図3)。

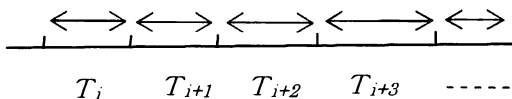


図3. スプリットとしての車頭時間 (T)
 T の測定はしたがってメモリ付きストップウ

オッチによる通常のマニュアル操作で十分可能である。

3.4 V の測定 (L_{AC} の走行時間 T_V から)

前述のように、速度 V を知るには、各車が定点 (A点) から一定の距離 (C点) までを走る時間から求めるのが上策である。AC間の距離 (L_{AC}) を走る時間を T_V とする。 V は

$$V = \frac{L_{AC}}{T_V} \quad (7)$$

から求められる。

L_{AC} は2.1の概要で述べたように、比較的低速 (一般道路) では10m、高速道路では高速時は20mとし低速時は10mとした。

3.5 T と T_V の同時測定

T に比べて T_V の時間は短くなる。1台の車について、 T と T_V を同時に計測しなければならない。2個のストップウオッチを同時にマニュアルで異なる時間を測定することは極めて困難で、通常の技術では不可能である。よってここでは2個のストップウオッチを一つのレバー操作で同時に作動させて、 T と T_V を同時に計測できる時計駆動装置を開発した。

3.6 T と T_V の同時計測のための時計駆動装置

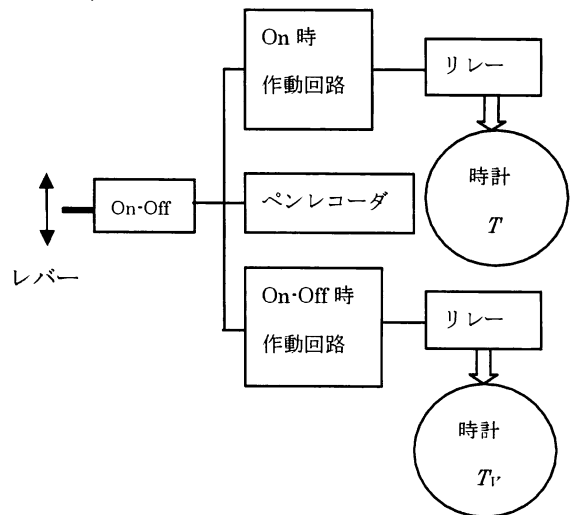


図3. 時計駆動装置

図3は装置のブロック図である。レコーダ

はレバー操作 (On-Off) を波形として記録する。記録波形は図 4 に示すように得られる。

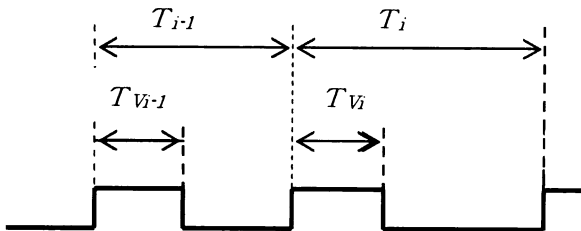


図 4. レコーダの波形と意味

ここに示すように、図 3 のレバーによるスイッチの On-Off に対応した方形波のシーケンスがえられる。図 2 で A 点に $i-1$ 番目の車の車頭がきた瞬間にレバーを引く (On)。次にこの車の車頭が C 点に着いた瞬間レバーを戻す (Off)。この On-Off のパルス幅が $T_{V_{i-1}}$ である。つぎに i 番目の車が来る。同様に T_{V_i} が得られる。以下同様である。

ストップウォッチのひとつは T ($\dots, T_{i-1}, T_i, \dots$) を計測し、もう一つは T_V ($\dots, T_{V_{i-1}}, T_{V_i}, \dots$) を計測する。つまり、 T 用ウォッチは On 時のみに反応し、 T_V 用は On にも Off にも反応するようになっている (図 4)。

使用したストップウォッチ (SEIKO Super Athlete) では 300 個のデータをメモリすることが出来る。よって、測定車数は最大 300 台以内に制限される。

レコーダの T と T_V の情報は時計のメモリを読みだして記録する。

当面はビデオから目視により信号検出をしているが、これを自動的に行える可能性はすでに検討済みである。筆者の古い研究はこれに役立つものである^{8) 9) 10)}。

4. 測定結果と指数則の検証

4.1 仙台市内の交通流の測定結果

例として、仙台市東 2 番町通り、SS30 ビル

からのビデオ映像 (撮影者: 鈴木祥介文化学園大学准教授) を上記時計駆動装置により T と T_V を測定した結果を述べる。 T_V から速度 V を算出して (6) 式の関係から車頭距離 L を算出し $V-L$ 関係を調べた。図 5 にその結果の例を示す。

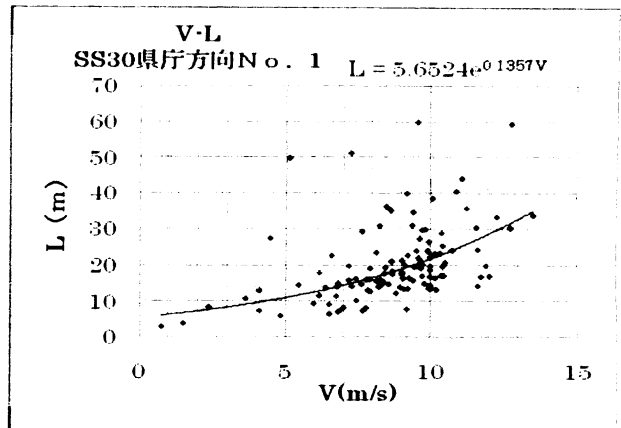
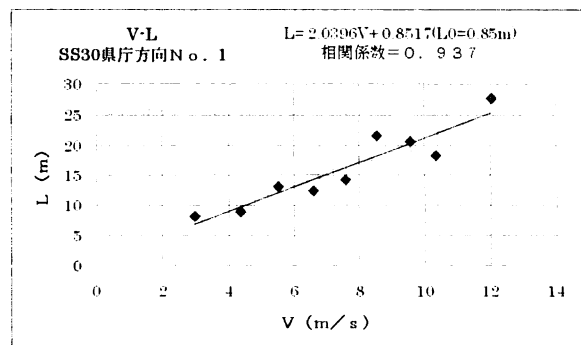


図 5. 仙台市内道路の $V-L$ 特性

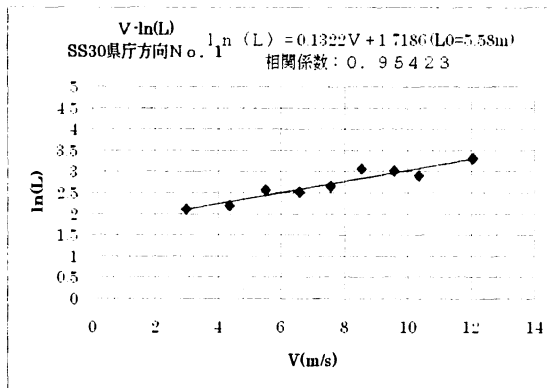
図 5 には指数関数の近似式が示されているが直線近似としても十分成立しそうである。よって、いずれが実態に近いかを検討することが必要である。

4.2 近似式の検討 ($V-L$ 特性の指数則)

測定した全てのデータの $V-L$ 特性は図 5 のような、指数関数近次でも線形近似でも大差はないように見える。いずれが交通流の実態を反映しているかをいろいろな測定データから決定しなければならない。図 5 は分散が大きいので、平均化した図を示す。



(a) $V-L$ 特性 (直線近似)



(b) $V \ln(L)$ 特性

図6. 平均化した(a) $V-L$ 特性と(b) $V \ln(L)$ 特性

図6は $V-L$ 関係でも $V \ln(L)$ 関係でも共に相関係数からみて、直線近似でも指数関数近似でも十分通用する。しかし、注目すべきは図中に示した L_0 の値である。(a)では $L_0=0.85\text{m}$ 、(b)では約 5.6m となった。 L_0 の値は $V=0$ 、すなわち車列停止時の車頭距離である。この距離は車の大きさより小さくなることはできない。よって、図6(a)の特性線(線形)は実態を反映していないと言える。なお、図5の原データ(平均化前)では線形近似では $L_0=2.32\text{m}$ 、指数関数近似では $L_0=5.7\text{m}$ となっていて(図6(a))、線形近似では大きく変化している。指数関数近似では平均化しても大きい変化がない(図6(b))。平均化の影響をどう解釈すべきかについては今のところ不明である。

以上は仙台市内の一般道路の例について述べたが、同様な多くの例についての検証から $V-L$ 特性は指数関数関係が実態と矛盾しないことがほぼ明らかになった。文献7)には一つの近似式として V の2次式

$$S = 5.7 + 0.14V + 0.00V^2 \quad (8)$$

の形が示されている(00 は数値であるが落丁している)。この式は単に多項式で近似したもので、物理的意味は全くないが、 $V-L$ 特性は

直線ではないということを示している点で参考になる。

なお、図6(b)の直線の傾きは(1)式(あるいは(3)式)の β である。 β は道路の走りやすさの程度に関するものと考えられるが、これを明らかにするには多くのデータの蓄積が必要で今後の主要な課題である。

5. 高速道の指数則

5.1 実測データ

東北自動車道について渋滞を含む交通流を測定した。測定場所は吾妻PAである。ここでの測定結果を図7に示す。

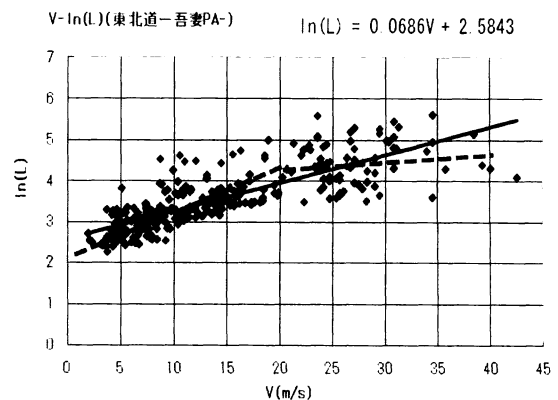


図7. 東北道の $V \ln(L)$ 特性

東北道も一見市内の一般道での測定(前章(4章))のように、指数関数で近似してもよいように思える(実線)。しかし詳しく見ると点線で示すような2つの直線で近似するのがより妥当と思われる。

このことは一般道と高速道の違いを明らかにする上で重要である。以下これについて考察することとする。

5.2 高速道 $V-L$ 特性の2段性

図8は図7を平均化したものである。この図を二つに分けて、 $V=0\sim 16\text{m/s}$ と $V=16\sim 40\text{m/s}$ について別々に β を求めてみる。

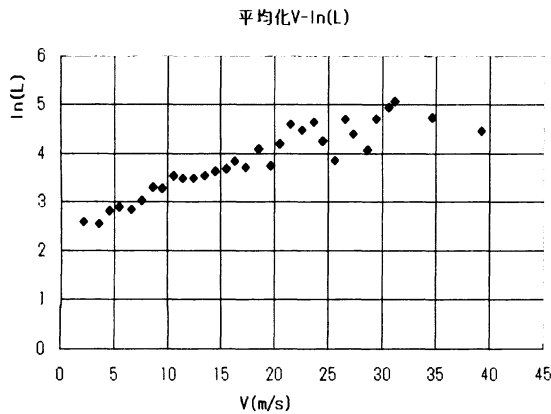


図8 平均化 V-ln(L)特性

図9は $V=0$ から 16m/s (約 60km/h)までを平均化した図である。図中に示すように、 $V=0$ での L の値 L_0 は 10.88m である。傾き定数 β は 0.0905 である ($\beta=0.0905$)。

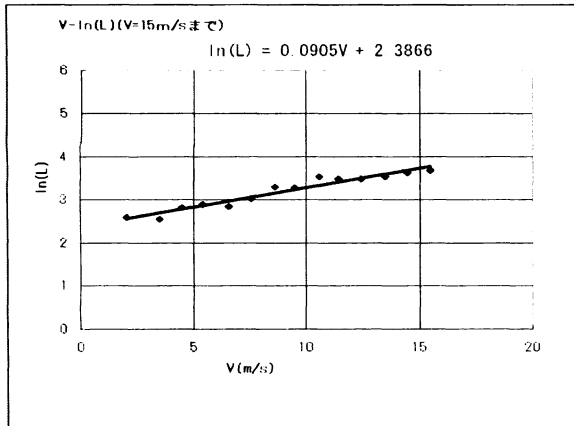


図9. 速度 16m/s (約 60km/h)までの特性

次に $V=16\sim 40\text{m/s}$ (約 $60\sim 145\text{km/h}$)について同様に計算する。

図10にこれを示す。この範囲では β 値は 0.0453 ($\beta=0.0453$)となった。つまり、高速道は一般都市道路とは異なり、高速領域では速度の割に車頭距離は広がらない傾向があるということである。渋滞状態では一般道とあまり変わらないであろうことは容易に理解できる。今後の課題として β 値が道路状態によ

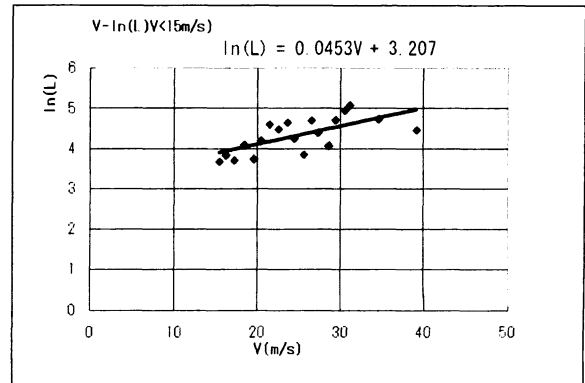


図10 $V=16\text{m/s}$ (約 60km/h)以上の平均化 V-ln(L)特性

てどう変わるかを精査しなければならない。

6. 速度-車頭時間 ($V-T$) 関係の $V-L$ 指数則からの解釈

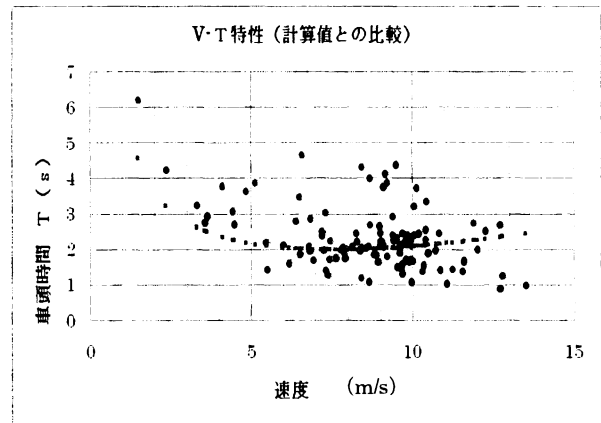


図11 $V-T$ 関係の測定結果と計算結果

車速度 (V) と車頭時間 (T) の関係は交通流で最も基本的な量である。 T の逆数 ($1/T$)は流量の基礎量である。図11に図5のデータの $V-T$ 関係の結果を示す。ここで $V-L$ 関係式である(3)式と(6)式から T は

$$T = \frac{L_0}{V} e^{\beta V} \quad (9)$$

と書ける。ここで β は図5中にあるように 0.1322 ($\beta=0.1322$)、また L_0 は 5.6m ($L_0=$

5.6m) である。よって、(9) 式は

$$T = \frac{5.6}{V} e^{0.1322V} \quad (10)$$

となる。これを計算して原データと重ねると図 11 のようになった。計算値は平均値であるから V の小さいところを除いてほぼよく実態を表わしている。 T の最小は速度 V の範囲 6~10m/s (21.6~36km/h) でおよそ 2 秒である。多くのデータから最大流量時の平均車頭時間 T は 2 秒であることは交差点の車列発進時でも確認できている¹¹⁾。図 11 の計算結果は仙台市内の交差点のある一般道路の例である。車頭距離にすると $L=12\text{m} \sim 20\text{m}$ ($V=4 \sim 10\text{m/s}$) である。車間距離にすると乗用車でこれから平均 5~6m 差し引いた値になる。高速道での難所 (小仏トンネル) では時速 40km では車間距離 25m 以上を確保するよう勧めている¹²⁾。渋滞を回避するための指針としてこれは十分と考えられる。ちなみに、この場合の車頭時間は 2.7 秒になる。

上記の 2 秒というのは平均値であることに注意する必要がある。最頻時の交通流の車頭時間のばらつきの影響については今後研究する必要があると考えられる。

7. 車密度をベースとした考え方

筆者はこれまで、交通流には $k \cdot V$ 特性の指数則 (2) 式) があり、また本文で $V \cdot L$ 特性にも指数則 ((1) または (3) 式) についても指数則があることを述べてきた。従来車密度 k は 1 km あたりに存在する車数で扱われているので k は数式的パラメータとしての意味をもたない単なる数値であったため、多く提案されている (文献 5) 参照) 車流の $k \cdot V$ 関係の数式モデルには一般性がなく、したがってこれらのモデルによる数式展開からの発展はなかった。筆者は k を (4) 式で定義して、密度を無次元量としたので、数式的展開が可能となっ

た⁶⁾。これにより V と T の測定から $k \cdot V$ 特性を調べて、(2) 式で示した指数則が成立することを知った。そして (2) 式から、従来最も重要とされる密度・流量特性 ($k \cdot q$) を数式処理から q を k の関数として導くことができた。

$k \cdot V$ 指数則を示すデータの一例は図 12 に示すようなものである。

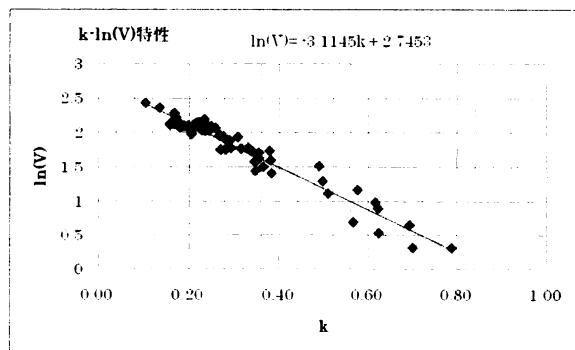


図 12 仙台市中山団地内道路の $k - \ln(V)$

$k \cdot V$ 指数則 ((2) 式) は密度 $k=0$ における速度 ($V=V_{11}$) を基準にしている。この点では意味のあるモデルである。

しかし残念ながら、 k は直観的に知覚できる量ではないのでこれを変数パラメータとしたモデル ((2) 式) では単に数式的表現にとどまり実用問題への展開が進まない状況にあった。冒頭述べたように、 k は $V \cdot L$ 特性と同じものである。これまで k を変数パラメータとする不便から解放されて、(3) 式から $k \cdot q$ 特性を数式的に導出してこれを解析すれば新しい展開が可能となるものと期待される。

8. 終りに

本文では道路交通流における速度・車頭距離関係 ($V \cdot L$ 関係) に指数関数関係が存在することを中心に述べた。走行中の車列において前車に後車が追従する現象は人間 (運転者) の感覚によっているものであるから、この現象を単なる物理現象とすることはできないが、少なくとも

も物理量として測定した速度 V と車頭時間 T のデータ整理から導出されたもので、この指数則は人間工学的あるいは運転者の心理物理学の意味を持つものである。

従来筆者が導出した $k-V$ 特性の指数則は、密度 k を無次元化したことに意味があったが、 k は速度を決めるパラメータではないことから、指数則モデルからの数式的展開は成功しなかった。しかし、7. で述べたように、 $k \ln(V)$ 特性からは疎な交通流の状態での速度 (V_M) が推定できるということで意味のあるデータ整理法の一つである。ここで明らかにした $V-L$ 特性は速度 V と車頭距離 L の関係である。車頭距離 L は運転者には知覚できないが、車間距離は最も必要な量であるから、 L を車間距離に置き換えて考えれば实际的である。

謝辞

本論文のシリーズは筆者の過去の研究発表の誤謬を正すとともに、内容の整理をする目的で始めたものであるが、新しい $V-L$ 特性の発見の機会にもなった。筆者が日本大学で始めた研究を東北文化学園大学に引き継ぎ、その後現在に至るまでお世話になっている谷口正成先生、鈴木祥介先生には格別のご配慮を頂いている。ここに厚く御礼申し上げる次第である。

文献

- 1) 高木相：“道路交通流の物理的性質 (I) —挙動の調査—”、SICE 東北支部第 246 回研究集会 (2008. 11. 19)
- 2) 高木相：“道路交通の物理的性質 (II) —t-s ダイアグラムによる交通流の表示—”、同上 247 回 (2008.12.19)
- 3) 高木相：“道路交通の物理的性質 (III) —t-s ダイアグラムから見た交通流のショックウェーブの性質—”、同上、第 250 回、(2009.6.19)

4) 伊吹山四郎ほか：道路交通工学、金原出版 (昭和 39 年 12 月)、第 3 章交通流の要素と現象 3.7 節、p 67.

5) 安部幸康、荻野治雄：“地方部 2 車線道路における交通流モデルについて”、土木試験所月報 No.381, pp.1-15 (1985.2)

6) Shosuke Suzuki, Masanari Taniguchi, Tasuku Takagi: “Characterization of Road Traffic Flow from Measured Data of Speed and Time-Headway Relationship between Density (k), Flow Rate (q) and Speed (V)” , SICE Annual Conference 2007, Sept.17-20, Kanagawa Univ., Japan

7) 4)3.2 車頭間隔 (Headway) p.597

8) Tasuku Takagi: “Optical Sensing and Size Discrimination of Moving Vehicles Using Photocell Array and Threshold Devices”, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol.25, No.1, pp.52-55 (March 1976)

9) Tasuku Takagi: “Structural Consideration of a New Type of One- and Two-dimensional Fourier Transform System”, IEEE Trans. of Systems, man, and Cybernetics, Vol.6, No.5, pp.360-366 (May.1976)

10) Tasuku Takagi: “An Analog Parallel Fourier Transform (PFT) and its Application to the Moving Vehicle Size Detection in a Spatial Frequency Domain”, IEEE Trans. on IM, Vol.IM-27, No.3, pp.215-219 (Sept. 1978)

11) 角田雅樹、鈴木祥介、谷口正成、高木相：“交差点交通流の測定”、電気関係学会東北支部連合大会、2J24、(2008.8)

12) JAF Mate (2009.6)