

車両の走行挙動計測システム

A MEASUREMENT SYSTEM FOR AN ANALYSIS OF VEHICLE MOTION

赤羽弘和・大庭孝之・桑原雅夫・越 正毅

By Hirokazu AKAHANE, Takayuki OHBA, Masao KUWAHARA, and Masaki KOSHI

This paper deals with a system which continuously measures speed, acceleration, following distance, and so forth of cars running on actual roads, and which processes the data measured. This system has been developed in order to analyze car-following behavior empirically. The functional merits of this system are (1) to observe car-following behavior precisely and continuously even in tunnels (2) to measure road surface luminance, accelerator pedal displacement, and so on together with the car-following behavior itself.

1. はじめに

事故あるいは故障車などの交通流に対する外的な支障がないにもかかわらず、都市間高速道路のトンネルやサグ(縦断線形の凹部の底部)を頭にして、いわゆる自然渋滞が発生する。これらのボトルネックの渋滞後の交通容量は、2車線合計で2,200~2,700台/時程度であり、これまで信じられていた可能交通容量4,000台/時と比べると6割前後に過ぎない¹⁾。トンネルやサグがこのようなボトルネック化することを避ける設計法を確立し、また既

存のボトルネックの交通容量を改善する方法を見出すことにより、交通渋滞を軽減することが重要な課題となっている。

このボトルネック現象は、個々の車両の走行挙動、特に追従挙動の集積として、交通流の内部で生成されるものである。これまでに追従挙動に関する実験や追従挙動モデルの提案は、少なからずなされてきている。しかし、Gazisら²⁾が提案した非線形追従モデル以降、モデル基本的構造において顕著な進展はみられず、上記のボトルネック現象を再現するには至らなかった。

近年になって、都市間高速道路における現象観測に基づき新たな追従挙動モデルが提案されているが¹⁾、ボトルネック現象を定量的に把握するためには、実測データによる検証がさらに必要である³⁾。また、車両の走行挙動を、照度の変化、その他の道路構造との関連においても解析する必要がある。

そこで、著者らは実走行状態における車両の走行挙動、特に追従挙動を解析するために、種々の計測・記録機材

* 正会員 工博 千葉工業大学講師 土木工学科

(〒275 千葉県習志野市津田沼2-17-1)

** 正会員 工修 建設省東北地方建設局

(〒980 宮城県仙台市二日町9-15)

*** 正会員 Ph. D. 東京大学助教授 生産技術研究所

(〒106 東京都港区六本木7-22-1)

**** 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所

(〒106 東京都港区六本木7-22-1)

を搭載した走行計測車、および計測車により収集した走行データを電子計算機により処理するソフトウェアからなる計測システムを開発し、改良を重ねてきた³⁾。

この計測システムは、写真解析あるいはビデオ画像解析により車両位置の時間変化を計測する方法と比較した場合に、以下のような特長を持っている。

- ① 特定の車両の走行挙動を、たとえトンネル内を走行しているときにも、連続して計測できる。
- ② 走行挙動の短時間変動を、高精度に計測できる。
- ③ 運転者のアクセルペダルの踏み込み量なども、直接計測できる。

本稿では、この計測システムの現状を報告する。

2. 計測装置の構成と走行実験の方法

主走行計測車および副走行計測車に各種計測装置を積載しており、表-1に示すような諸量の計測が可能である。以前は計測データを各計測車において別個のアナログデータレコーダに記録し、同時に記録したパルス信号により各車の計測値間の同期をとっていた。しかし、現在は副計測車の計測データを無線装置で主計測車に伝送し、すべての計測データを主計測車のデータレコーダに記録できるようになっている。

表-1 計測項目

計 測 項 目	主計測車	副計測車
走行速度	○	○
加速度	○	○
車間距離(先行車及び後続車)	○	—
相対速度(先行車又は後続車)	○	—
アクセルペダル踏み込み量	○	○
照度	○	—

走行実験には、2通りの方法がある。第1は図-1に示すように、副計測車、主計測車の順で一般車両に先行させる方法である。この方法によれば、一般車両の速度あるいは加速度が間接的に計測できるのみならず、一般車両がその先行車(主計測車)との間にとっている距離も直接計測できる。ただし、一般車両の運転者が、主計測車のトランクルーム内に取り付けられた車間距離計に

気がついてしまうと、運転操作に影響を与えたり、車線を変更してしまう恐れがある。



図-1 走行実験の方法(1)

第2は図-2に示すように、一般車両に続いて主計測車、副計測車の順で追従させる方法である。一般車両がその先行車との間にとっている距離は計測できないが、速度あるいは加速度は間接計測できる。主計測車の車間距離計が、先行する一般車両からは比較的視認されにくく、通常の走行挙動を計測しやすいことが特長である。



図-2 走行実験の方法(2)

諸量の計測方法などについては、以下のようにまとめられる。

- ① 走行速度 変速機からスピードメータへ伝達されている回転を分岐し、パルス発電機に入力することにより、車輪の回転数に比例する周波数出力を得る。この出力を周波数/電圧変換することにより、回転数に比例する電圧を得る。パルス発電機は車軸1回転あたり120パルスを発生するため、0.1秒程度の短時間の速度変動も計測できる。校正は、高速道路の路側に設置されているキロポストを利用し、一定距離を走行する間に発生した

パルス数に基づいて行なう。

② 加速度 歪ゲージ式一軸加速度計（最大負荷2g）により、車両進行方向の加速度に比例する電圧を得る。

③ 車間距離 レーザーパルス距離計を、主計測車の前部バンパーおよび後部トランクルーム内に取り付けている。この距離計は、長さ0.1μsのレーザーパルスを計測対象車両に向けて照射し、このパルスが車両間を往復するために要する時間に基づいて、車間距離に比例した電圧を出力するものである。最大計測距離は、計測対象車両の投影面積や反射面の形状にもよるが、乗用車でおおよそ50m、大型車でおおよそ70mである。計測精度は、設計仕様で±2m程度、主計測車および計測対象車両を静止させたまま実測したところでは約±1mであった。

④ 相対速度 ドップラーレーダを主計測車の屋根に取り付け、計測対象車両との相対速度に比例した周波数出力を得る。これを周波数／電圧変換している。電波ビームの水平幅は約3度、最大計測距離は乗用車を対象とした場合は約70m、相対速度の計測範囲はおおよそ0.1～50 km/時である。

⑤ アクセルペダル踏み込み量 歪ゲージ式変位計により、アクセルペダルの踏み込み量に比例した電圧出力を得る。

⑥ 照度 照度（測定単位lx）に比例した電圧を出力する照度計を、主計測車助手席のサンバイザーに取り付けている。主にトンネル進入時の照度変化と走行挙動との関連を解析するために設置している。

3. 走行データの平滑化

走行データを研究室内で12ビット精度でA/D変換し、電子計算機に入力する。サンプリング周波数は、現在のところ10Hzとしている。つづいてこのデータを、カルマンスムージングアルゴリズムにより平滑化する。このアルゴリズムを採用したのは、重み付き移動平均法などと異なり、計測諸量間の物理的相互関係、たとえば加速度の積分が速度変動であることなどを取り込んで、計測値の平滑化を行えるからである。平滑化の目的は以下の通りである。

① 各計測値に含まれるランダム誤差を低減する。
② 車間距離計の発するレーザーのビーム幅は、非常に狭い。このため、車両の走行位置の変化や車体の動揺などにより、レーザービームが計測対象車を正しく捉えられない状況が、少なからず発生する。このときに、速度

あるいは加速度などから車間距離を推定する。

③ ドップラーレーダの場合も、車両の走行位置の変化や車体の動揺などにより、電波ビームが先行車を捉えられない状況が発生することが希ではない。このときに、速度、加速度、あるいは車間距離により、相対速度の欠測を補完する。

④ 加速度の計測値には、加速度計の取付精度および縦断勾配の影響で、偏りが含まれる。この偏りを補正する。

離散時間カルマンスムーザは、次式のように差分式で表されるシステムの状態の最小二乗推定量を与える⁴⁾。

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{F}(k) \mathbf{x}(k) + \mathbf{w}(k) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{H}(k) \mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (2)$$

ここに、 k は時間、 $\mathbf{x}(k)$ はシステムの状態を示すベクトル、 $\mathbf{y}(k)$ は計測値ベクトル、 $\mathbf{w}(k)$ および $\mathbf{v}(k)$ は白色雑音ベクトル、そして $\mathbf{F}(k)$ 、 $\mathbf{H}(k)$ は要素の値が既知の係数行列である。カルマン固定区間スムージングにより、0～ N までの計測値 $\mathbf{y}(0)$ 、 $\mathbf{y}(1)$ 、…、 $\mathbf{y}(N)$ に基づいて、システムの状態 $\mathbf{x}(0)$ 、 $\mathbf{x}(1)$ 、…、 $\mathbf{x}(N)$ の最小二乗推定量を推定できる。

2台の相前後して走行する車両の挙動を例にとると、それらの速度、加速度、車間距離の間の物理的關係、および計測値と真値との関係は、式(1)、(2)および次式により表わされる。

$$\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} d(k) \\ v_2(k) \\ v_1(k) \\ a_2(k) \\ a_1(k) \\ p_2(k) \\ p_1(k) \\ b_2(k) \\ b_1(k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{w}(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ w_2(k) \\ w_1(k) \\ u_2(k) \\ u_1(k) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$F(k) = \begin{bmatrix} 1 & \Delta & \frac{\Delta^2}{2} & \frac{\Delta^2}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta & \frac{\Delta^2}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta & \frac{\Delta^2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} D(k) \\ V_2(k) \\ V_1(k) \\ A_2(k) \\ A_1(k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$v(k) = \begin{bmatrix} e_d(k) \\ e_{v2}(k) \\ e_{v1}(k) \\ e_{a2}(k) \\ e_{a1}(k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$H(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

ここに、

- k : 時刻
- d : 車間距離
- v₂ : 後続車の速度
- v₁ : 先行車の速度
- a₂ : 後続車の加速度
- a₁ : 先行車の加速度
- p₂ : 後続車の加加速度
- p₁ : 先行車の加加速度
- b₂ : 後続車加速度のバイアス
- b₁ : 先行車加速度のバイアス

- w₂ : 後続車加加速度の時間変動成分
- w₁ : 先行車加加速度の時間変動成分
- u₂ : 後続車加速度バイアスの時間変動成分
- u₁ : 先行車加速度バイアスの時間変動成分
- Δ : サンプル周期
- D : 車間距離の計測値
- e_d : 車間距離の計測誤差
- V₁ : 先行車の速度の計測値
- V₂ : 後続車の速度の計測値
- e_{v1} : 先行車速度の計測誤差
- e_{v2} : 後続車速度の計測誤差
- A₁ : 先行車加速度の計測値
- A₂ : 後続車加速度の計測値
- e_{a1} : 先行車加速度の計測誤差
- e_{a2} : 後続車加速度の計測誤差

である。加加速度は加速度の1次微分であり、アクセルペダルまたはブレーキペダルの踏み込み速度に対応する。また、各変動成分は平均値が0の白色雑音であると仮定している。さらに、式(5)において、Δの3次以上の項は無視してモデル化している。

レーザービームが計測対象車両からはずれたときには、車間距離の計測誤差分散を非常に大きくとり（通常時の200倍）、速度および加速度の計測値により車間距離の変動を推定している。

相前後している3台の車両の挙動も、同様に表わせる。また、相対速度の計測値を平滑処理に用いることも容易であるので、今後改良する予定である。

4. 適用事例

図-3に、先行車(副計測車)および後続車(主計測車)の加速度、速度、そして車間距離の実測値を示す。また図-4には、これらの実測値を式(1)～(8)に示す運動方程式および観測方程式に基づき、カルマン smootherにより平滑化した結果を示す。ただし、車間距離のみは、実測値をプロットで、平滑結果を実線で示している。また、このとき加速度の計測値の偏りは直接補正せず、便宜的に加速度の計測誤差分散を10倍にとっている。

図-5は、図-4と同じ方法で実測値を平滑した結果である。図-4と同じく、車間距離についてのみ実測値をプロットで、平滑結果を実線で示している。同図のほぼ中央に車間距離計のねらいがはずれ、プロットが大きく乱れている部分がある。しかし、前章で述べた通り、

実質的にはこの部分の計測値は平滑処理に用いられず、速度あるいは加速度により補完されている。したがって、車間距離の平滑曲線に乱れはみられず、ほぼ妥当な結果が得られている。また、このとき加速度および速度の平滑値への影響もないようである。

図-6は、図-3に示した計測値を、加速度計測値の偏りを補正しながら平滑化した結果である。先行車および後続車の偏りがほぼ同期して変動しており、偏りが良好に補正できていると考えられる。ただし、このデータを収集した地点の最大縦断勾配は約3.7%であるので、それによる加速度の車両進行方向成分の大きさは約 0.38m/s^2 となるはずであるが、推定値はこれを上回っている。また、後続車の偏りが先行車の偏りより大きい。これは、この偏りに加速度計の取り付け不正、あるいは走行時の車体の姿勢変化などの影響も含まれているためである。

図-7は、副計測車に主計測車を追従させたときの、主計測車の追従挙動(平滑値)、運転者のアクセル操作、および照度変化を示している。計測地点は、中央高速都夫良野トンネルの下り線入口付近である。図-8には、同じ運転者の、都夫良野トンネル上り線入口付近における運転操作を示す。両図において中央付近でトンネル内に入り、照度はほぼ同レベルになっている。図-7の下り時の方が、図-8の上り時に比べて進入速度が 20km/h 程度低かったにもかかわらず、トンネル進入時の速度低下は大きくなっている。これは、下り時のトンネルの内外における照度差が、大きかったためであると考えられる。トンネル進入後は、先行車との距離が増加するにつれて加速し始め、やがて進入前に匹敵する速度で定常走行に移っている。また、このときの車間距離は、トンネル外よりも短い傾向にあることもわかる。一方、図-8の上り時には、トンネル内の照度は同じであるにもかかわらず、トンネル進入時の照度変化が小さいために、

大きく急激な速度変化は見られなかった。ただし、このような運転挙動には、照度以外の要因も少なからず影響している可能性もあり、さらに解析を進める必要がある。

5. まとめ

本稿においては、実走行状態における車両の走行挙動を計測する走行計測車、その計測値の処理システム、および若干の適用事例を報告した。今後は、相対速度の計測値を平滑化処理に取り込めるようにしたうえで、さらに実測データを蓄積し、ボトルネックにおける車両の走行挙動を解析して行きたいと考えている。また、追従挙動の基本的構造は高速道路に限らず一般道路における交通流にも共通のものであるので、この解析により交通流の本質に対する理解を深め、新しい交通流モデルを確立したい。

本システムを開発するにあたり、東京大学生産技術研究所の西川功技官ならびに大学院生の中島猛男君に多大な協力を得た。厚く謝意を表する。

また、本稿が昭和62年度文部省科学研究費一般B「高速道路の隘路現象の研究」の成果の一部であることを付言し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 越 正毅：高速道路のボトルネック容量，土木学会論文集第371号/IV-5，1986。
- 2) Gazis, D.C., Herman, R., and Rothery, R.: Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow, Operations Res., Vol. 9, No. 4, pp. 545-567, 1961.
- 3) 大庭孝之：車両の追従挙動に関する実験的研究，東京大学修士論文，1988。
- 4) 片山 徹：応用カルマンフィルタ，朝倉書店，1983

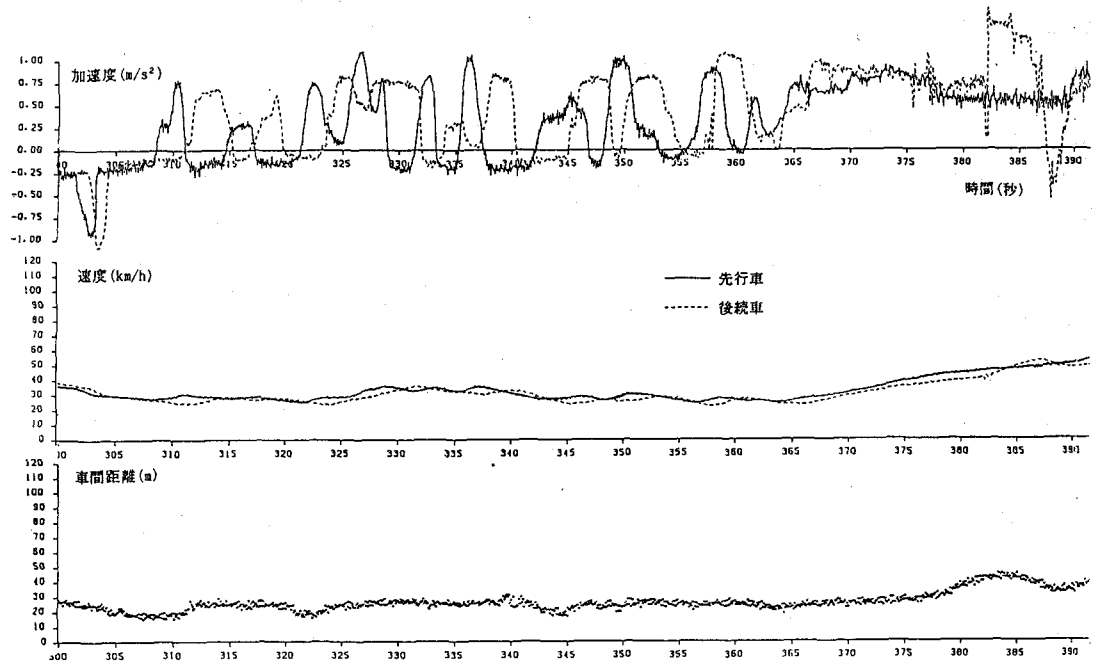


図-3 走行挙動の実測例

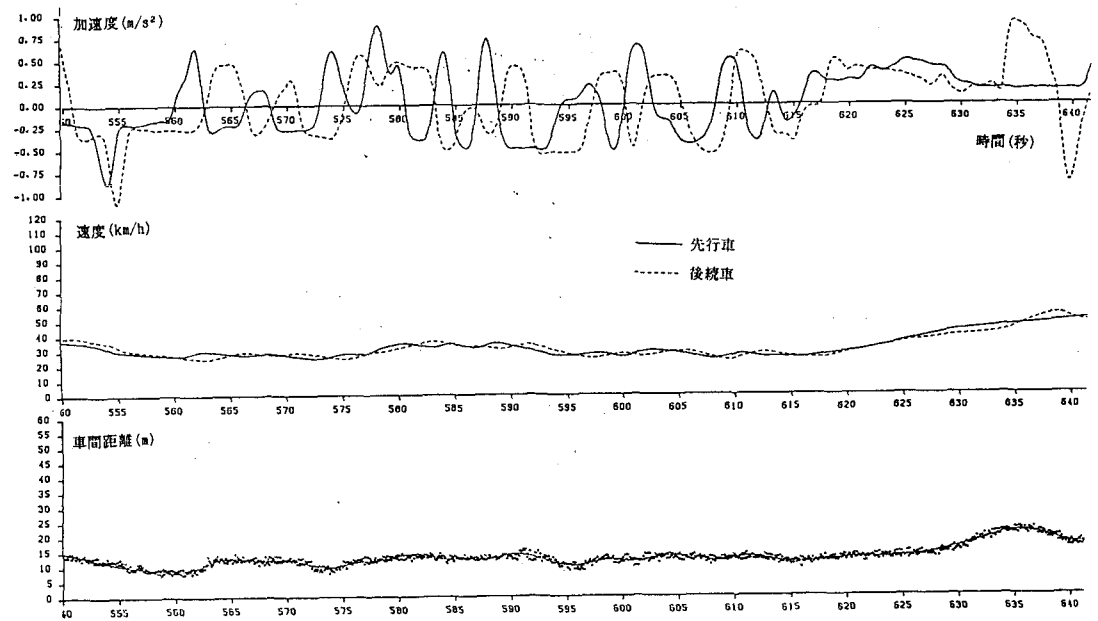


図-4 平滑結果

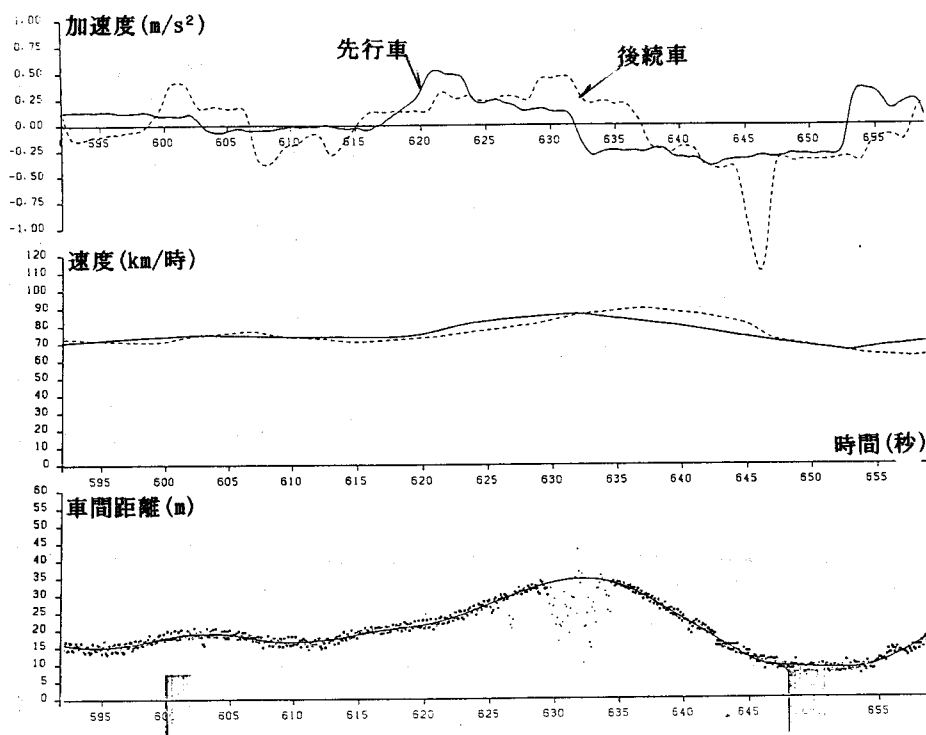


図-5 車間距離欠測時の平滑例

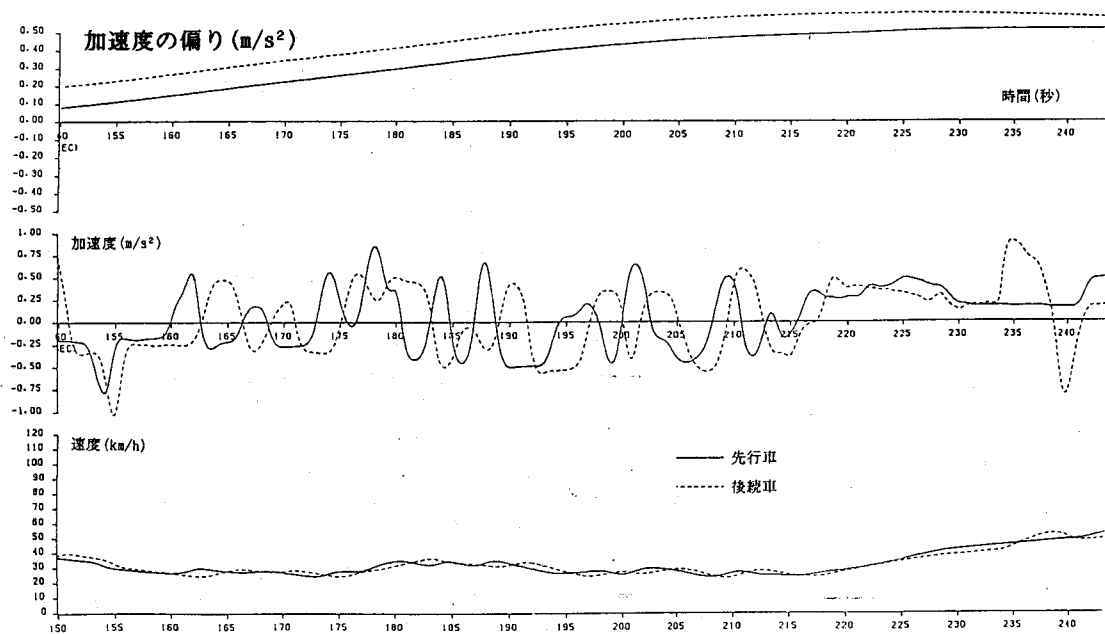


図-6 加速度の偏りの推定例

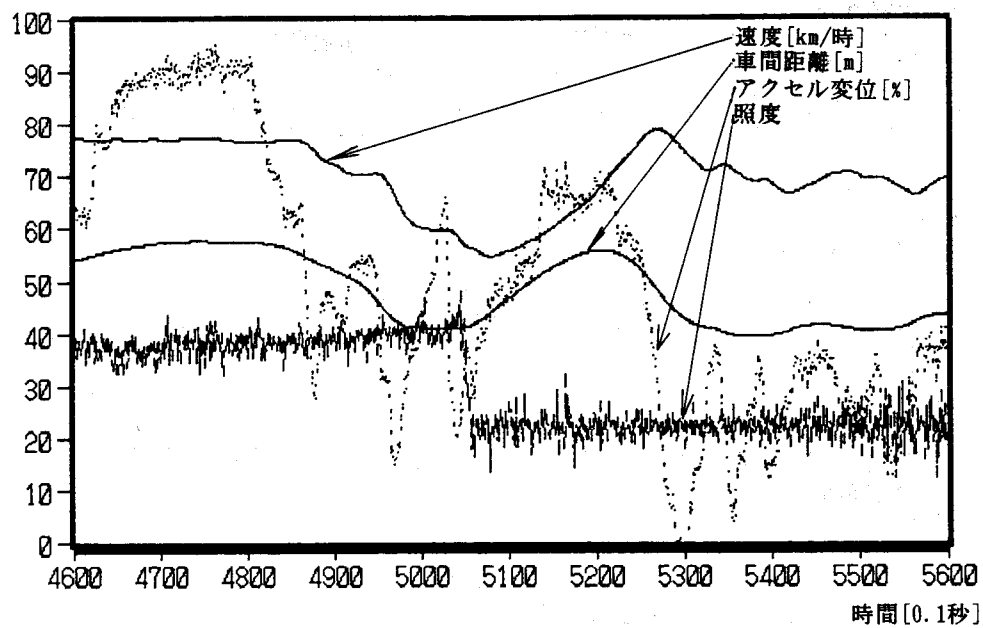


図-7 トンネル進入時の走行挙動 (中央高速都夫良野トンネル下り)

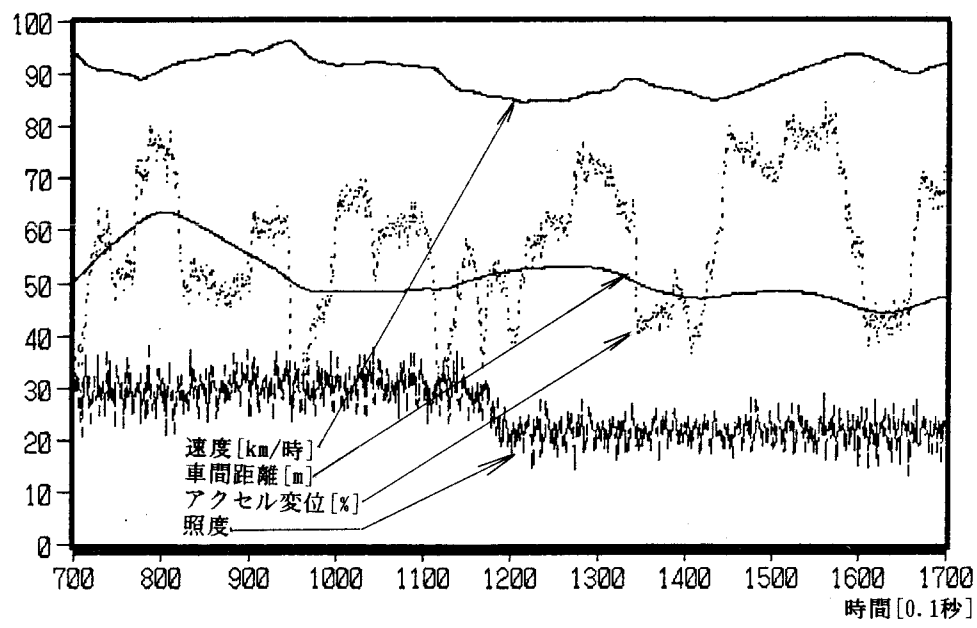


図-8 トンネル進入時の走行挙動 (中央高速都夫良野トンネル上り)