

# トンネル部と単路部における車両の追従挙動の比較

A Comparative Study of Car-Following Behaviour in a Tunnel Section and in an Ordinary Section

大口 敬・赤羽弘和・桑原雅夫・越 正毅

by Takashi OGUCHI, Hirokazu AKAHANE, Masao KUWAHARA, Masaki KOSHI

In this paper, car-following behavior in a tunnel section is compared with that in an upstream adjacent ordinary section based on analyzing vehicle running data which were collected by data-gathering cars. The reaction time lag of a vehicle to relative velocity between the vehicle and the vehicle ahead was found to be shorter in the tunnel section than in the ordinary section. The gain of the reaction was also found to be stronger in the tunnel section than in the ordinary section.

## 1. はじめに

名神高速道路の彦根トンネル～米原トンネル間の事故率は59件/億台キロであり、平均事故率の34件/億台キロと比較して約1.7倍も高く<sup>1)</sup>、問題となっている。

図-1に同トンネルの長さ、位置、及び縦断勾配等を示す。名神高速道路を東京から神戸方向へ向かうと、彦根トンネルは、長さ430m、北陸自動車道へ分岐する米原JCT.と彦根I.C.との間約7kmの区間に位置している。また、同トンネルの約1.5km手前には、長さ150mの米原トンネルがある。この付近の縦断線形は、米原トンネル出

口付近までが上り勾配であり、その先は彦根トンネルを含む3km以上にわたる下り勾配区間である。

この付近では、車両の走行挙動にはまず、上り勾配区間で速度低下と車間距離の減少が生じ、その先の下り勾配区間での速度増大の結果トンネル進入直前に速度及び車間距離の調整が行われ、これが交通の乱れを生んで、交通事故の要因になっているのではないかと推測されている。そこで、同トンネル部において、トンネル内の照度の増大、デリニエーターの設置、トンネル進入前の速度の注意喚起といった事故対策工事が計画され、これまでにその一部が実施されている。

我々は、走行実験車を用いてこの彦根トンネル付近における車両の走行挙動を測定し、事故対策工事が走行挙動に及ぼす影響の評価を行っている。事故対策工事実施以前の調査は、昨年12月に実施した。昭和63年度施工の第一段階工事では、彦根トンネル手前の明り部における注意喚起の看板の整備と、トンネル内のデリニエーターの設置及び内装板のペイントが実施された。この第一段

- ・ 学生会員 東京大学大学院 工学系研究科
- ・ 正会員 工博 千葉工業大学講師  
(〒275 習志野市津田沼2-17-1)
- ・ 正会員 Ph.D 東京大学生産技術研究所 助教授
- ・ 正会員 工博 東京大学生産技術研究所 教授  
(〒106 港区六本木7-22-1)

階工事後の調査を、本年6月～7月にかけて実施した。  
本稿では、この2回にわたる走行実験車を用いた調査に

より得られた走行データの解析結果から、トンネル部と  
単路部との追従挙動特性の比較を行う。

2. 実験及びデータ処理方法

都市間高速道路におけるトンネル  
出入口部やサグを先頭として、自然渋滞が発生することが指摘されている<sup>2)</sup>。このようなボトルネック現象は、個々の車両の追従走行挙動に起因していると考えられる。

そこで東京大学生産技術研究所越研究室では、車両の追従走行挙動を測定するための、走行実験車及びデータ処理システムを開発した<sup>3) 4)</sup>。本実験においてもこの走行実験車及びデータ処理システムを用いている。

走行実験では、米原JCT. から彦根I.C. の調査区間において、車群中を2台の実験車に相前後して走行させ、それらの走行挙動、主に後方実験車の前方実験車に対する追従走行挙動を測定する。測定項目は、前車及び後車の加速度・速度・アクセルペダルの変位量、そして2車間の距離である。さらに、後車には照度計も搭載している。前車における測定データは、テレメータ装置によって後車に送られ、後車の測定データとともにアナログデータレコーダーに記録される。また、キロポストの通過あるいはトンネルへの進入等を、トリガー信号及びメモアナウンスにより記録する。こうして記録されたデータは、後日研究室内でA/D変換を行い、測定値の欠落を補いノイズを除去するため、カルマンフィルターによる平滑化処理を行う。

表-1に、事前・事後調査で得られた昼夜別・方向別の走行データ数を示す。

表-1 昼夜別・方向別走行データ数

|                 |   | 方向    | ケース数 |
|-----------------|---|-------|------|
| 事前調査(1988年12月)  | 昼 | 神戸方向  | 6    |
|                 |   | 名古屋方向 | 5    |
| 事後調査(1989年6・7月) | 昼 | 神戸方向  | 6    |
|                 |   | 名古屋方向 | 5    |
|                 | 夜 | 神戸方向  | 5    |
|                 |   | 名古屋方向 | 5    |

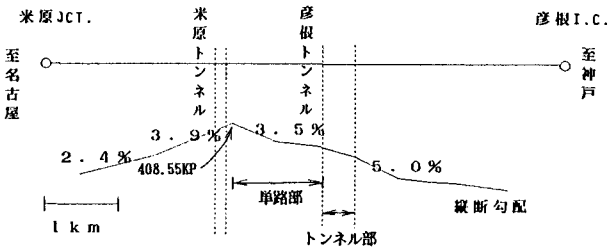
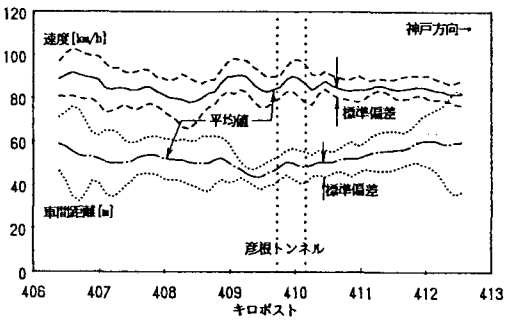
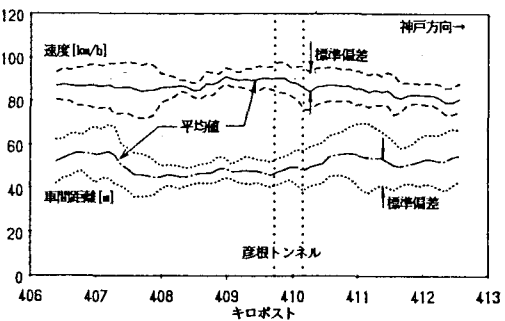


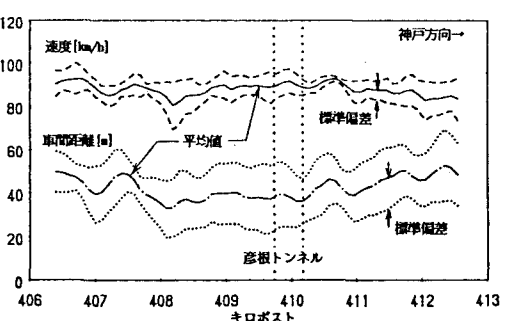
図-1 彦根トンネルの概要



(a) 事前調査昼間走行



(b) 事後調査昼間走行



(c) 事後調査夜間走行

図-2 地点速度及び車間距離

### 3. 走行挙動の概観

走行実験区間全体における走行挙動の傾向を調べるため、各走行ケースについて100m毎に地点速度をとり、速度プロファイルを調べた。図-2には、(a)事前調査（昼間走行）、(b)事後調査（昼間走行）、および(c)同（夜間走行）毎に、神戸方向の地点速度及び車間距離の平均値及び標準偏差を示した。

図-2 (a) 及び図-2 (b) に示す昼間の走行ケースをみると、事前調査時及び事後調査時に共通して、408.55KP付近までの上り勾配区間における速度のケース間変動が、それ以降の下り勾配区間と比較して大きくなっている。また、彦根トンネル通過後の速度の時間変動についても、共通して小さい傾向がみられる。車間距離については、ケース間変動が極小となる点が彦根トンネル進入前に、対策工事前後に共通してみられる。但し、対策前の極小点より上流側でのケース間変動は、対策後と比較して多少大きいことが見受けられる。

これら神戸方向の昼間の走行ケースと比較して、図-2 (c) に示す同方向の夜間の走行ケースでは、総じて上り勾配区間における速度のケース間変動は小さくなっている。また、ケース間平均速度は、全区間を通じて夜間の方が概ね高い。車間距離については、昼間に比べて夜間の方が相対的に短い傾向がみられる。従ってこの区間では、同じ速度に対する車間距離が昼間に比べ短くなっていることになる。また、車間距離のケース間変動は、夜間の方が昼間に比べて大きい。

### 4. 追従挙動モデル

自由流における追従モデルとして、次式が提案されている<sup>2)</sup>。

$$\begin{aligned}
 Af(t) = & \frac{\alpha}{D(t-T_1)^2} [V_1(t-T_1) - V_f(t-T_1)] \\
 & + \frac{\beta}{D(t-T_2)^n} \{D(t-T_2) - f[V_f(t-T_2)]\} \\
 & + \gamma \sin \theta \\
 & + \frac{\lambda}{D(t-T_3)^n} [V_{exp} - V_f(t-T_3)] \quad \text{----- (1)}
 \end{aligned}$$

ここに、

$Af$  : 追従車加速度

$V_1$  : 前車の速度

$V_f$  : 追従車速度

$D$  : 前者と追従車との車間距離

$f(V_f)$  : 運転者の目標車間距離を表す速度の関数

$\theta$  : 縦断勾配

$V_{exp}$  : 運転者の目標速度

$\alpha, \beta, \gamma, \lambda$  : 定数

$q, m, n$  : パラメータ

$T_1, T_2, T_3$  : 時間遅れ

第1項は、車間の伸縮速度または前車との相対速度に比例し、車間の $q$ 乗に逆比例する加速度成分である。第2項の $f(V_f)$ は、速度に応じた目標車間である。第2項の意味は、実車間距離と目標車間距離との差に比例し、実車間距離の $m$ 乗に逆比例するような加速度成分である。第3項は、道路の縦断勾配による速度抵抗の増分に比例する負の加速度成分である。第4項は、希望速度と実速度との差に比例する加速度成分である。これまでの解析で、時間遅れ $T_1, T_2$ 、及び $T_3$ に関しては、 $T_1 < T_2 < T_3$ の関係があることがわかっている。これは、すなわち速度差の検出はすばやいが、速度の検出あるいは車間と速度との関係の目標値からのずれの検出、そして速度の目標値からのずれの検出には、かなり大きな時間遅れがあるためである。

本解析においては、自由流において最も卓越していると考えられる第1項に関してパラメータ $\alpha, q$ 及び $T_1$ を推定し、それに基づいてトンネル部及び単路部における車両の追従挙動を比較した。

### 5. 追従モデルパラメータの推定

トンネル部と単路部とにおける車両の追従挙動の比較のために、図-1に示すように、トンネル部として彦根トンネル内約400m、単路部として彦根トンネルの名古屋側約1200mを取り上げ、全走行ケースにおける後車の前車に対する追従走行挙動データについて、トンネル部、単路部それぞれ独立にモデルパラメータの推定を行った。

第1項の遅れ時間 $T_1$ 及び乗数 $q$ の推定に関しては、 $T_1$ は0.0秒～10.0秒まで0.1秒きざみ、また $q$ は0.0～3.0まで0.1きざみで変化させて $[V_1(t-T_1) - V_f(t-T_1)]/D(t-T_1)^2$ の値を計算し、これと加速度 $Af(t)$ との相関係数が最大とな

る $T_1$ 、 $Q$ の組合せを探索した。係数 $\alpha$ の値は、この $T_1$ と $Q$ の組合せを用いた線形回帰によって推定した。

表-2 パラメータの推定結果

(a) 神戸方向

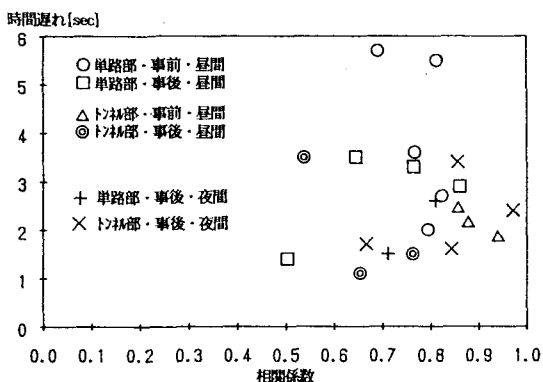
|      |             | 単路部            |          |      | トンネル部          |          |      |
|------|-------------|----------------|----------|------|----------------|----------|------|
| ケース名 |             | T <sub>1</sub> | $\alpha$ | 相関   | T <sub>1</sub> | $\alpha$ | 相関   |
| 事前   | <u>DKB1</u> | 5.5            | .0510    | .812 | 2.5            | .0486    | .857 |
| 昼間   | <u>DKB2</u> | 3.6            | .0625    | .767 |                |          |      |
|      | <u>DKB4</u> | 2.7            | .0152    | .823 |                |          |      |
|      | <u>DKB5</u> | 2.0            | .0152    | .795 | 2.2            | .0600    | .878 |
|      | <u>DKB6</u> | 5.7            | .0465    | .690 | 1.9            | .0486    | .941 |
| 事後   | <u>AKB1</u> | 2.9            | .0380    | .861 |                |          |      |
| 昼間   | <u>AKB2</u> | 1.4            | .0039    | .503 | 1.5            | .0202    | .762 |
|      | <u>AKB3</u> | 3.3            | .0531    | .765 |                |          |      |
|      | <u>AKB4</u> | 3.5            | .0375    | .646 | 1.1            | .0321    | .654 |
|      | <u>AKB6</u> |                |          |      | 3.5            | .0835    | .539 |
| 事後   | <u>NKB1</u> |                |          |      | 1.6            | .0544    | .843 |
| 夜間   | <u>NKB2</u> | 1.5            | .0282    | .711 | 3.4            | .0696    | .856 |
|      | <u>NKB3</u> | 2.6            | .0331    | .810 | 2.4            | .0412    | .972 |
|      | <u>NKB4</u> |                |          |      | 1.7            | .0392    | .666 |

(b) 名古屋方向

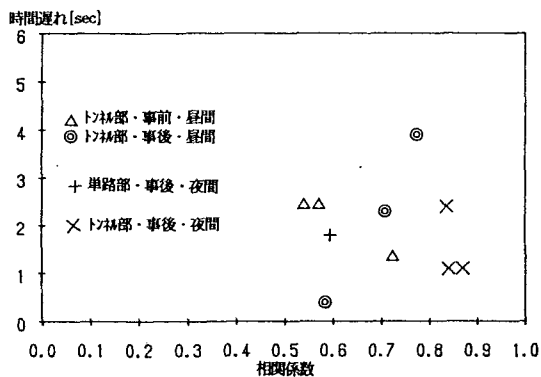
|      |      | 単路部            |          |      | トンネル部          |          |      |
|------|------|----------------|----------|------|----------------|----------|------|
| ケース名 |      | T <sub>1</sub> | $\alpha$ | 相関   | T <sub>1</sub> | $\alpha$ | 相関   |
| 事前   | DNG2 |                |          |      | 2.5            | .0590    | .541 |
| 昼間   | DNG4 |                |          |      | 1.4            | .0412    | .724 |
|      | DNG5 |                |          |      | 2.5            | .0543    | .572 |
| 事後   | ANG1 |                |          |      | 3.9            | .0291    | .774 |
| 昼間   | ANG3 |                |          |      | 0.4            | .0066    | .584 |
|      | ANG4 |                |          |      | 2.3            | .0315    | .708 |
| 事後   | NNG1 |                |          |      | 2.4            | .0645    | .837 |
| 夜間   | NNG2 |                |          |      | 1.1            | .0088    | .839 |
|      | NNG3 |                |          |      | 1.1            | .0485    | .869 |
|      | NNG5 | 1.8            | .0222    | .596 |                |          |      |

注) パラメータ $Q$ に関しては、全てのケースについて、推定値は3.0となった

その結果、相関係数が充分高くないケースが存在した。その原因の一つとして、これらのケースにおける速度や加速度の変動が、パラメータの推定に不充分であったことが挙げられる。また、 $\alpha$ が負の値をとったり、時間遅れ $T_1$ がゼロあるいは負の値をとるようなケースがあった。追従モデルが現状では直前を走行する車両の挙動に対してのみ反応する構造になっているが、実際には2台あるいはそれ以上前方の車両からも影響を受けていることが、このようなことの一因であると推測される。これに関しては、走行挙動の計測システムを拡張・改良し、それにより収集した走行データの解析に基づいて、追従挙動モデルをさらに発展させる必要がある。



(a) 神戸方向



(b) 名古屋方向

図-3 相関係数と時間遅れ

表-2にパラメータの推定結果を示す。但し相関係数が0.5以上かつ $T_1$ 、 $\alpha$ の推定値が正となった走行ケースについてのみ示しており、空欄は推定できなかった走行ケースである。これによれば、トンネル部と単路部の双方でパラメータが推定された走行ケースは、全て神戸方向であり、全部で7ケースであった。

## 6. パラメータの推定結果の比較

図-3に、推定された全走行ケースについて、時間遅れ $T_1$ と相関係数の関係を示す。同図(a)をみると、神戸方向の昼間走行について、トンネル部における時間遅れの方が明り部における時間遅れよりばらつきが少なく、値も小さくなる傾向がみられる。これは、トンネル部では単路部より運転者の緊張度が高いことを示しているものと考えられる。一方、夜間走行においては、トンネル部と単路部とで時間遅れに顕著な差異は認められない。このような昼間走行と夜間走行における差異は、主にトンネル部と単路部における照度変化の違いにより生じているものと思われる。

式(1)の第1項における $\alpha/D(t-T_1)$ は、相対速度に対する反応強度を表している。図-4に、代表車間距離(50m)に対する反応強度と時間遅れとの関係を示す。同図には、トンネル部と単路部の双方共パラメータの推定された7ケースについてのみプロットされている。従ってすべて神戸方向の走行ケースである。同図(a)に示す昼間走行をみると、トンネル部の方が単路部よりも総じて反応強度が大きい傾向がみられる。一方同図(b)に示す夜間走行においては、このような差異はみられない。これも上記と同様に、主にトンネル部と単路部における照度変化の違いにより生じているものと思われる。

また、図-4においては、時間遅れと反応強度との間に比例関係がみられる。このことは、反応強度が車間距離の関数であることから、時間遅れ、車間距離、及び反応強度との間の相互依存関係についても解析の必要があることを示唆している。この点については、今後の課題としたい。

## 7. まとめ

名神高速道路彦根トンネルにおいて走行試験を行い、トンネル部と単路部における追従挙動を比較した。その

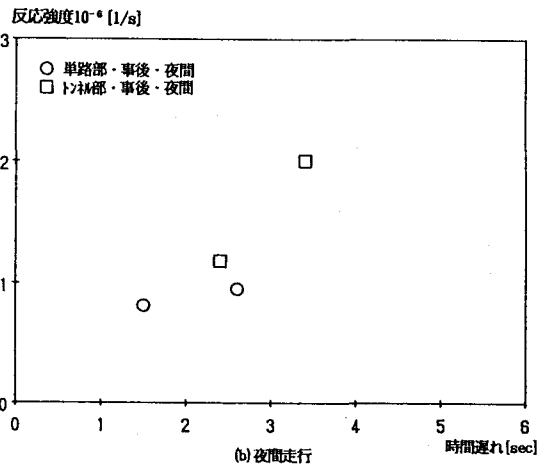
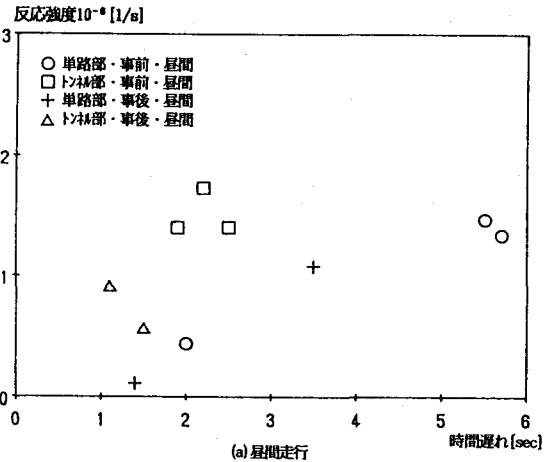


図-4 代表車間距離(50m)における反応強度と時間遅れ

結果は、以下のようであった。

- (1) 同一の区間において、夜間走行において昼間走行に比べて速度が高く、車間が短くなる傾向がみられる。
- (2) 現状では追従モデルは、直前を走行する車両の挙動に対してのみ反応する構造となっているが、実際には2台あるいはそれ以上前方の車両からも、少なからず影響を受けている可能性がある。
- (3) 昼間走行では、トンネル部における時間遅れは単路

部における時間遅れよりも小さく、運転者の緊張度が相対的に高いことを示していると考えられる。

(4) 夜間走行では、トンネル部と単路部で時間遅れに大きな差はない。

(5) 昼間走行では、トンネル部における反応強度は単路部における同じ車間距離に対する反応強度よりも相対的に大きい。しかし、夜間走行では、トンネル部と単路部で反応強度に差はない。

(6) 時間遅れと反応強度とに比例関係がみられることから、時間遅れ、車間距離、及び反応強度との間には相互依存関係が存在すると考えられる。

今後は、特に上記(2)及び(6)に関連して、計測システム、実験方法、及び解析方法の改良を検討していく予定である。

本研究は日本道路公団名古屋管理局及び(株)千代田コンサルタントの協力のもとに行われたことを付記し、深謝を表す。また、走行実験及びデータ処理において

は、東京大学生産技術研究所西川功技官、同大学院生中島猛男氏(現東京都)、中村英樹氏、山本平氏から多大な協力を受けた。ここに謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 日本道路公団名古屋管理局：名神高速道路彦根トンネル(下り線)事故対策調査計画書，1989.1.
- 2) 越 正毅：高速道路のボトルネック容量，土木学会論文集No. 371/IV-5，1986.7.
- 3) 赤羽弘和、大庭孝之、桑原雅夫、越 正毅：車両の走行挙動計測システム，土木計画学研究・講演集vol.11，1988.11.
- 4) 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.