

人一車系の挙動に関する考察

中島 源雄*

交通の環境にかかわる人一車系の挙動を明らかにするために、国際交通安全学会の研究プロジェクトとして、車間距離・尾灯・前照灯に関連した諸問題の研究を行ってきた。この研究を展開するにあたり、その挙動を、一方において、車社会を構成する面から、一対の人一車系間の相互作用、団塊となった人一車系群の相互作用、あるいは昼夜間といった環境条件の影響等によって説明し、他方において、基本的な単位である人と車の挙動を、運転者の心理的・生理的特性と、車の機械的機能から説明することを意図してきた。この論文においては、この人一車系の挙動について、これまでに他の研究者によって明らかにされた研究を参照しつつ、われわれの研究から得た知見から、前者に存在する諸問題について考察を行った。

A Study on Drivers' Behavior due to the Interaction of Man and Vehicle

Motoo NAKAJIMA*

To clarify drivers' behavior due to the interaction of man and vehicle in the traffic environment, various matters, such as the distance between cars, taillights and headlights, have been researched as project themes at the International Association of Traffic Safety and Sciences. To develop this theme on drivers' behavior, some explanations have been made from the aspect of the relationship between man and vehicle, such as the phenomena caused by the interactions of man and vehicle, or the grouped vehicles on the road, or by some changes in the daytime and nighttime. On the other hand, it has been intended to say that those behaviors would be caused simply either by a driver's psychological and physiological distinctions, or the mechanical functions of vehicles. In this report, displaying some studies or theories developed by the other researchers, we tried to study a little bit further how the external elements, such as the interactions of man and vehicle or the grouped vehicles on the road, affect drivers' behavior.

1. まえがき

6台の車両が玉突衝突して、150台近い車両が炎上した日本坂トンネル事故(1979. 7. 11)はまだ記憶に新しいが、高速道路のこの種の事故はその後も跡をたたない。本年(1982. 1. 20)にも、名神高速道路の関ヶ原町で、大型トレーラの自損事故から、後続する車50台が約2 kmにわたる区間で、3つのグループに分かれて次々に衝突し、11名の重軽傷者がでるといふ事故が発生した。事故が発生するたびにさまざまな角度から原因が推測され、反省がなされている。しかし、この種の事故が再発する可能性が大幅に減少したとは考えられない。高速道路における安全問題について多くの議論がなされ、種々の提

案がなされているが、妥当な唯一のアプローチは、高速道路における車の実際の挙動を観測し、基礎的なデータを集積していくことである。

この論文は1977年に当学会の研究プロジェクト214が発足してから今日まで、抱き続けてきた問題意識とこれまでに得た解答の一部を要約して、将来の研究方向と展望を示そうとしたものである。

2. 車の交通流

車の交通流に関しては、これまでも Lighthill & Whitham (1955)、Edie (1961)、Edie, Herman & Rothery (1967)、Hida (1972) などいくつかの研究が流体力学や熱力学の手法を用いてアプローチしている。最近、Harberman (1977) は応用数学の見地から、これらの諸問題についてすぐれた解説を行っている。

Herman & Gardels (1963) は、高速道路の交通

*本田技術研究所次席研究員
Executive Chief Engineer, Honda R & D. Co., Ltd.
原稿受理 昭和57年10月7日

の流れを研究する際に、研究者達がとる見解を次のように要約している。その一つは、車の流れを「圧縮可能な流体（個々の車は、その流体の一部であるが、個別的には考えられていない）であるか、または気体中の分子の集合（個々の車は離散的なものと考えられているが、純粋に統計的な見地からとり扱われている）だと見なす」ものである。

彼らはさらに、「巨視的、全般的な観点に立つ第1のアプローチは、いくつかの特徴を備えている。追い越しの余裕のない単一車線上の交通流は、その流量が密度に依存する流れに近いものである。ある点までは、流量は車の密度が増すにつれて増加する。その後も密度が増し続けると、流量は低下する。しかしながら、交通の流体または気体分子によるたとえば、あくまで表面的なものでしかない。交通の基本的な単位である人—車系は、分子と違って個々に意志決定を行っているからである」と述べている。

この見地から、Prigogine (1961)、Prigogine & Herman (1971) は、当該運転者にとって望ましい速度分布関数という形で、分子とは異なる人—車系の挙動を、後に述べるような先行車追従説として体系的に説明しようとしたのである。

最近、古谷 (1976 I・II、1977 III) はその方向をさらに進めた。彼は Herman たちの先行車追従説を批判し、それは「行動モデルとしては不完全なものである。……そのモデルの平衡は初期条件に依存しており、個々の車の追従行動を正しく表現することはできない」とした。彼は Hall (1959、60) のプロキシミクス（近接学）の概念を人—車系に適用し、後続車の挙動を運転者の Z 感覚（安全感覚）に基づいて、自由、追跡、追従、防御の4種の走行モードに分類した。そして、追従から防御への移行をカスプカastrophe（カスプ型の破局の理論）によって説明する追従—防御モデル（F—D モデル）を提唱した。また、第II論文において、車の交通流の特性を個々の車の相互作用によって説明するために、車の前方と後方のテリトリーという概念を使用し、後方の車に対する回避—逃走モデル（E—F モデル）を構成し、これらを組み合わせることから、車の群化行動や定常的な交通流などを説明した。第III論文では、運転者の操縦の行動を説明するために、4種類の心理状態によって影響される W—感覚（心理的感覚）を導入し、バタフライカastrophe（バタフライ型の破局の理論）を適用している。

古谷の研究は、プロキシミクス、カastrophe

イーなど、隣接の学問領域における新しい発展をとり入れて、交通行動の諸問題を個々の人—車系の挙動から演繹的に説明しようとする特異な業績である。しかしながら、運転者の Z—感覚、W—感覚などの定量的ではない概念に立脚して理論が構成されている。

われわれの基本的な立場は、交通行動の定量的なシステム理論を構成することである。交通の基本的な単位である人—車系の挙動を、一方においては、その上位システムである車社会、すなわち交通流、車群、先行車と後続車との間の相互作用によって上から説明し、他方においては、そのサブシステムである運転者、車両の特性から、下から説明することである。このような定量的な交通システム理論を構成するためには、観測と実験データを積み重ねる必要がある。

3. 先行車追従説

交通問題を考える際に、人—車系ではなく、そのサブシステムである運転者、車両を個別の基本的な単位として、その生理的、心理的、機械的な問題に集中するのが一般的に多くみられるアプローチであった。たとえば、運転者を基本的な単位と考えることで、交通問題の社会心理学的な観点からの研究について概観した Wilds (1976) は、運転者におよぼす社会的な影響を、情報の取得と期待、危険の主観的な評価、意志決定、人口統計変数などに分けて論じている。

このアプローチは、運転者よりも上位のシステムである人—車系に焦点を合わせたわれわれの立場とは異なるものである。ここでわれわれがとり上げようとしているものは、人—車系の挙動であり、他の人—車系に与える効果を説明することである。

3-1 車の追従法則

高速道路を走行していて、他に車がないとき、または前後の車との距離が非常に大きいときには、任意の速度で走ることができる（自由走行）。しかし、いっそう遅い速度で走っている車が前方に出現して、その距離が70~60mに近づくと、先行車の存在が影響をもち始め、たとえば、先行車と安定した追従関係に入るために加速する（追跡）。やがて車頭距離が20m前後に縮少すると、その車は安定した追従関係を維持するために減速するとか、またはさらに接近して追い越すなどである（Fig. 3, 4 参照）。

先に言及した Herman & Gardels はかなり過密

な交通量の単一車線で、先行車を追従する後続車の挙動を詳細に記述しようとして、先行車追従説 (Follow the Leader theory) を唱えた。われわれの高速道路における車の挙動の研究も、高速道路で他の車の後を走っている車は、ある安定した状態で追従または追い越しを行うと考え、その際における挙動を明らかにすることから出発するのが適当だと考えて研究を行ってきた。そのような研究の過程であって遭遇した問題点のいくつかを述べる。

適度に過密で追い越し不能な単一車線で先行車の後を走る車は、ある状態で安定した挙動を示す。

Fig. 1 は、某バス会社の貸切りバス同志の追突事故における先導車 A と追突車 B の追突事故直前のタコグラフを示す。B 車のチャートをわずかに回転させると、両図は完全に重なり合う。すなわち、B 車はわずかなタイムラグで A 車の加減速に完全に追従していることがわかる。

Herman & Gardels (1963) は、このような安定した挙動を車の追従法則 (Car-following law) と名付け、後続車の挙動 (反応) を測定可能な環境刺激 (先行車の速度の変化) に対するタイムラグを伴う後続運転者の感受性係数を用いて、次式を表した。

$$\frac{d^2 X_{n+1}(t+T)}{dt^2} = \frac{G}{S(t)} \left(\frac{dX_n(t)}{dt} - \frac{dX_{n+1}(t)}{dt} \right)$$

X: 距離 t: 時間 T: タイムラグ

G: 追従する運転者のゲイン定数

S(t): 時間 t における 2 車の間隔

n: 車の列の n 番目の車

n+1: n 番目の後の車

この左辺は後続する車の反応が表現されている。

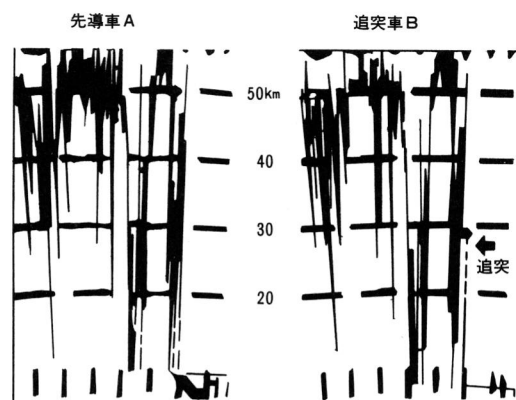


Fig. 1 先導車 A と後続車 B のタコグラフチャート
Tachograph chart of vehicle ahead (A)
and following (B)

注) 図は、船津孝行「追従挙動について」1980 (第16
回日本交通科学協議会総会) より引用

この反応はアクセルとブレーキを通して、運転者により決定される。単一車線の追い越し不能事態では、それが刺激の変化に対する唯一の反応手段である。その項は、その反応をあるタイムラグをもった加減速として表現したものである。右辺の G/S(t) は、各運転者の単位刺激当りの反応の強度 G を t 時における車頭距離で割ったものである。船津(1977) はタクシー運転者の急激な運動動作に固有の水準があり、また、急加速型、急減速型、急旋回型という固有のパターンが存在することを明らかにしているが、それは、本質的にはこのゲイン定数を分析しようとしたものである。このように個人は一定の反応強度特性をもっているが、それを S(t) で割ることによって、車頭距離が狭くなるにつれて運転者の感受性が增大するという、彼らの先行車追従実験の結果が組み込まれている。また、括弧内の項は t 時における両車両の相対速度を表す。すなわち、この式は後続する車は先行の車との相対速度の変化に対して、固有の強度とタイムラグをもって反応するという事実を表している。

その事實は、彼らが先行車追従実験と呼ぶ実験において、テストコースで前後 2 台の車を細いピアノ線で連結し、特殊な滑り摩擦クラッチを用いて、先行車が急加減速をしても常に緊張した状態を保つようにして、「安全だと思ふような具合に先行車に追従しよう」指示を与えた。後続車には車頭距離を示すメータをとりつけ、車頭距離を一定に維持するよう命じた。この実験の結果は、要するに後続車の反応を開発している刺激は、車両の相対速度を最小に保つことであって、車頭距離を一定に保持することではなかった。前に式述したように、後続車の反応は、相対速度とそれぞれの運転者のタイムラグを伴った反応感受性と、その変化 (車頭距離に逆比例する) によって決定されるというのが、車の追従法則と呼ばれるものに外ならない。

3-2 ヘッドウェイ

運転者は走行しているとき必然的に、すぐ前方に扇形に広がる空間とのかかわりをもつ。このことは、いわゆる「知能自動車」(津川、1980) の通路パターンの認識領域によって端的に理解することができる。この場合の認識領域は、車の前方 5m から 20m で、視角は約 40度の台形の領域である。しかしながら、運転者が乗っている車、すなわち人-車系は知能自動車と異なり、このような直前の領域はさらに前方まで広がる地帯に対しても、見込み的なかかわりをも

っている。前に高速道路を走行しているとき、70～60mの距離に接近すると先行車の影響が現れると述べたが、昼夜間、交通密度、地形その他の状況下では、このような見込み的なかわりの領域は遠近さまざまに変化する。古谷は、このような領域をHallの近接学概念を用いて明細化している。しかし、その領域はZ感覚を用いて測られており、物理的な目盛は付されていない。

いま、後続車がこのような見込み的なかわりをもちつつある空間内に障害物が現れたとすると、衝突を避けるためには、通路を変更するか、速度をゆるめるか、最終的には停止するしかない。その障害物がたまたま同じ方向に走る車である場合には、いわゆる追従事態 (Following situation) が存在することになる。このような事態において、先行車と後続車の間の間隔を、後続車の車頭間隔 (Headway) という。この車頭間隔は両車両の距離、車頭距離 (Distance headway) として表すことも、後続車が先行車の現在地に到着するに要する時間、車頭時間 (Time headway) として表すこともできる。

車頭距離は直観的に把握し易く、また、高速道路における多数の車の走行状態を写真にとる等の方法によって、一時に多量のデータをとるには便利であるが、先行車と後続車の相対速度によっては、安全に対する意味が異なるという欠点をもっている。その意味では、車頭時間の方がいっそう有効な概念であるが、直観的には理解し難い欠点がある。このようにそれぞれ長短はあるが、多くの研究者が直観的とはいえない車頭時間を使用していることには、次のような理由によるものである。

まず第1に、車頭時間は容易に追突といった事態に関連させることができる。Rockwell (1972) によれば、一般的に運転者は最小2秒の車頭時間を維持しながら追従を行っているという。いわゆる反応時間は典型的に0.7～1秒のものであるから、2秒の余裕があれば運転者は、突発的な事態に対して、中枢的な処理その他に約1秒を使用することができる。われわれが調査した東名高速道路での車頭距離の分布は、ほぼ18～23mにピークをもっている。いま、平均時速を70kmとすれば秒速は約20m弱で、車頭時間は約1秒でしかない。先行車が急制動をかけたときには、まず追突は免れない。車の追従法則で言及したように、車頭距離が狭くなるにつれて、運転者の感受性が増大することを考慮しても、状況に大きな変化は生じない。実際には、このような数字

から予想されるほどに追突災害が多くないのは、運転者が直前ではなく、数台先の車の挙動に反応しているという事実によるからである。

車頭時間がつもう1つの利点は、それが先行車との関連において、後続する人一車系の全体的な統合された反応、すなわち運転パフォーマンスを表していることである。この反応は車の追従法則に示されているように、後続する運転者の反応の速さ (タイムラグ) と敏感さによって変化する。このような反応特性は、必ずしも従来の微視的な運転の適性である必要はないのである。

3-3 フォローイング・エピソード

車頭時間を研究しようとする際の問題の1つに、どのような行動を追従と呼ぶか、換言すれば、追従と呼ばれる挙動には、どのようなタイプが含まれているかということがある。

Fuller その他 (1978) は接近事態を次のように区別している。第1形式は単一車線で追い越し不能の事態で認められるような、比較的定常状態の追従でペアー状態 (Coupled state) と呼ばれるものである。第2形式は移動している先行車、または信号などで停止している車への接近である。そして、第3形式は追い越しに先立つ接近である。これらの形式ごとに明らかに許容された接近量は変化する。

また、追従の事態が何時から始まったとするかについては、研究者ごとにその規準は異なっている。Rockwell (1972) はペアー事態は約9秒の車頭時間で始まり、10秒以上ではオープニングドライビングであるとしているが、両車両の速度がわからないと、この車頭時間がどの位の車頭距離であるかをいうことはできない。

われわれは、Fig. 2 に示すような車頭距離、車頭時間を測定・記録する装置を開発して、高速道路における追従、追い越し挙動を研究している¹⁵⁾。

この装置を用いて得られた、追従の場面の典型的な例を掲げよう。

Fig. 3 は昼間の3分間にわたる連続記録であるが、追従開始、接近、距離の増大、追い越し、車線変更といくつかの場面が混在している。この例では車頭距離60mで追従挙動に入っているが、時速70kmで車頭時間は約3秒である。追従開始後90秒の時点で車線を変更し、110秒で再び他のターゲットの追従に移っている。Fig. 4 は車頭距離70mから28mに縮めてから、約5mほど間隔をあける。このように一度間隔をあける挙動を、古谷は接近しすぎに対する補正

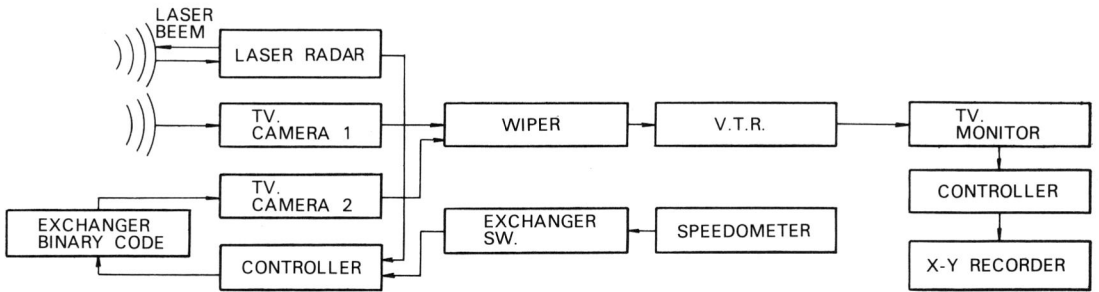


Fig. 2 測定と解析システムのブロック図
The block diagram of the laser rader system used for the measurement and the analysis

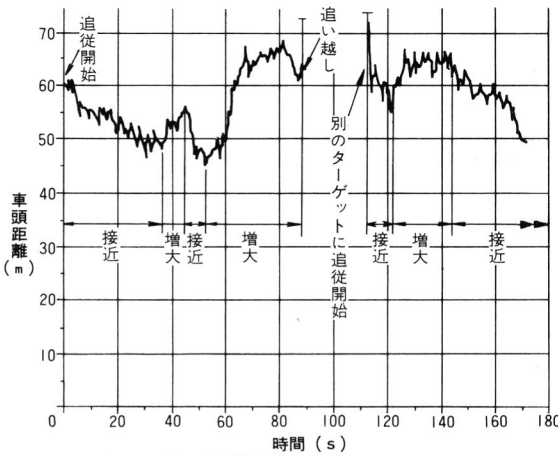


Fig. 3 一般的な追従挙動(昼間)
Regular following behavior (daytime)

得たものであるが、このような接近のパターンは相対接近速度と関係しているようである。データからは相対接近速度が3km/h付近で、このようなステップパターンが出現することを物語っている。

要するに高速道路では追い越し不能な単一車線と違って、Fuller その他によるフォローイング・エピソードの分類とは異なるものがある。また、Rockwell のペアー事態とオープニングドライビングを区別する指標も適切だとはいえない。われわれのデータは、追従—接近—追従または追い越しといった一連の挙動に、スムーズなものとステップ状のものがあって、その差は追従する運転者が入手できる情報量と関係があることを示唆している。

3-4 オーバーテイキングとクリアランス

一般に道路上の車の走行状態を観察していると、前方の車が明らかに後方の車より遅くない限り、後方の車はあえて追い越そうとはせずに追従していたり、また、反対に対向車が接近しているのに、無謀とも思える追い越しをするのをしばしば見かける。Forbes & Matson (1939) は、このような追い越しと追従の臨界的な速度差、対向車が存在するときのクリアランスを問題としている。そのために彼らは追い越しを自由なフライングタイプと、いったん速度をゆるめて前方の車に追従し、その後追い越して行くものと分類している。われわれのデータでは、フライングタイプのは認められなかった。これは特定の運転者の特性によるものか、実験車が大型車の陸送車のためか、または高速道路の条件によるものかは現時点では不明である。彼らのデータに関する限り、先行車との速度差が6.5mph (≒10 km/h) 以上でなければ、後から速い速度で接近してそのまま追い越して行くフライングタイプは生じていない。この臨界的な速度差はカーブの多いニューイングランドの道路と、中西部のまっすぐな道路と

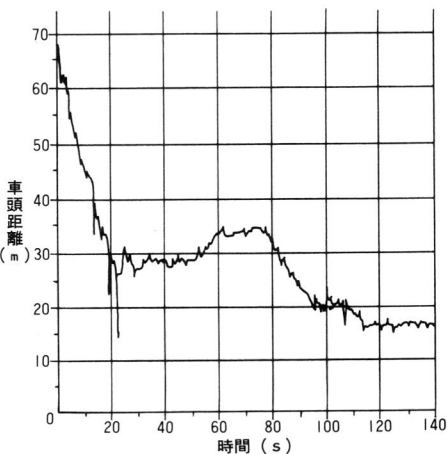


Fig. 4 典型的な追従挙動(夜間)
Typical following behavior (nighttime)

反応として防御と呼んでいる。この例に示す実験車は速度82km/hを保って、相対接近速度3km/hで車頭距離を34mから15mまで接近して追従する。この間100秒付近に、一定間隔で追従するステップが見られる。これらのデータはいずれも1名の運転者から

いった地域的な違いはあるが、およそ似通ったものである。

このような追い越しのための最小の速度差という概念は、地域差は別としても、高速道路を走行している車のグループ化と関連において特に興味深い。その場合には、車が連なって走らなければならない条件は何も存在していない。明らかに運転者はある臨界的な速度差以下では、あえて追い越そうとはしないのである。この事実がやや遅いペースで走っている車の背後に2、3台の車が連なったり、また、そのグループが障害となって、たとえその後の車が大きな速度差をもっている、追い越して行くことを妨げているのである。単一の追い越し禁止の車線の場合に、このような状況でどれ位の速度差が後続の運転者のいらだちを生起して、クラクションなどによる攻撃的な行動を誘発するかといった問題は興味深いところである。

クリアランスという問題は、片側1車線の道路を走行していて、対向車線に車が見えるときに、運転者は対向車と自分の車の間にどの位の間隙があれば、先行車を追い越すかということである。彼らは実験車をいくつかの速度レベルで安定走行させ、これを追い越す車の尾端が実験車の先端を通過した直後から、対向車の先端が実験車と並ぶまでの時間を計測した。彼らは相対速度、地形などの効果を含む統合的な指標としてクリアランスタイムを使用した。データは1秒以上のクリアランスタイムで追い越しを行ったものが80%であった。残りの20%は1秒以下で、そのうちの10%は対向する車線に侵入して対向車を車線の端の方に回避させて、明らかに危険な状態で追い越していることを示した。

彼らはこのようなクリアランスについての運転者の判断には、大きな不確実性があることを指摘している。すなわち、運転者が追い越しを断念して対向車が通りすぎるのを待って追い越した66例のクリアランスタイムの調査から、その半数は追い越しを断念することが妥当であったが、残りの半数は十分なクリアランスを使うことが可能であった。また、ニューイングランドの運転者の方が、中西部のものよりも短いクリアランスタイムで追い越しを行うという地域差も存在した。

無理な追い越しというのはクリアランスタイムが短すぎることに外ならないが、もっとよく研究してみる必要がある。

4. 昼夜間における人一車系の挙動の差

これまでに述べたような人一車系の相互作用の諸形式は、昼夜間といった環境条件の違いによって大きく変化する。この問題については、われわれはある程度の知見をもっている。

東名高速道路の44.5キロポストの見通しのよい直線区間で、昼夜間における走行車両の車頭距離を測定した。追い越しや割り込みのために一時的に車頭距離を変化しつつある車を除いて、車線に沿って先行車を追従している車両群を、道路沿いの高台の上に設置した35mmカメラを用いて、14時から翌朝の3時まで、一定時間ごとに撮影し、その中から大型、小型車別、昼夜間別に、それぞれ500台を目安に抽出して、拡大したフィルム上で車頭距離を測定した。

Fig. 5, 6に大型、小型車別に昼夜間における車頭距離の分布を示す。これらの図から気付くことは、分布が著しく一方に偏るものごとである。われわれは基本的には、この分布はAllport (1934)による同調の2重のJ曲線として解釈されるものと考えている。しかもこの場合の同調の規準は、フォーマルな高速道路における車頭距離の規準（たとえば、時速のkmの値をmで読みかえた車頭距離）で

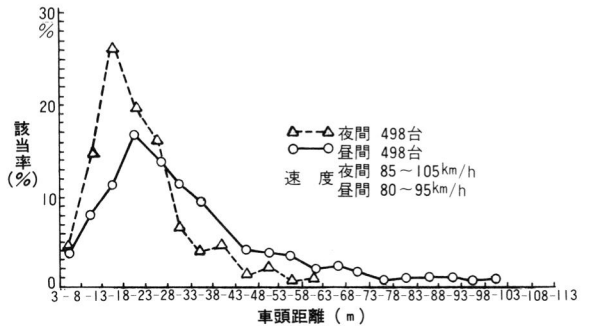


Fig. 5 大型車両の車頭距離
Distance headway of large sized vehicles

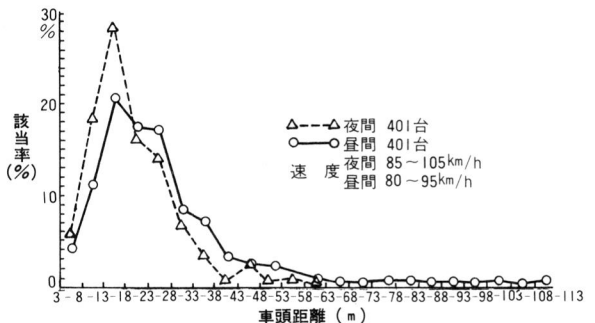


Fig. 6 小型車両の車頭距離
Distance headway of small sized vehicles

はなく、東名高速道路を走行する運転者の間に存在するインフォーマルな規準(約18~23m)である。このようなインフォーマルな規準が成立するまでには、心理的、生理的ないくつかの要因が存在しているが、その問題はここでは立入って考察しようとは考えない。しかし、いったんそのようなインフォーマルな規準が成立し、存在する以上、そこを走る運転者はそれに同調せざるを得ない。その結果、このような分布型が示されるのである。

現在われわれが関心を抱いているのは、夜間における接近現象である。その現象は大型、小型車のいずれの場合にも認められるが、大型車 (Fig. 5) において特に顕著である。常識的には、昼間よりも夜間の方が運転が困難であるので、追突などの危険を避けるために、運転者は車頭距離を大きくとると考えられるが、データはその反対が正しいことを物語っている。このことは先行車の挙動に関する情報の入手の難易度と関係があると考えられる。そのことについては、すでに中島その他 (1980) で述べた。

要するに前照灯の到達距離と先行車のかかわり合いから、昼間よりいっそう近づかねばならない。このような情報獲得の難易度が、追従挙動の経過曲線を規定していることは、すでに示唆しておいたが、そのことを別の角度からとらえたものが Fig. 7 である。一般的にいって、夜間における先行車の運動の知覚の最も有力な手掛りは尾灯間隔の変化である¹⁹⁾。相対的な接近速度が速い場合には、その指標は急激に変化し容易に認識できる。これと反対の場合には、別の方法で情報を補強しなければならない。Fig. 4 に最も典型的に示された接近に際してのステップ状の経過曲線は、そのような情報を補強する1つの手法といえる。Fig. 7 から夜間走行では、相対接近速度が追従車の速度の6~7%付近に相当する6km/hの場合と、3~4%付近の3km/hという2グループが存在している。そして、6~7%グループは、昼間走行データの分布と一致している。現在までのところでは、データが少なく、多分に推測的な要因を含んでいるが、車の接近、追従、追い越しの挙動には昼間型と夜間型があって、夜間でも相対接近速度が大きい場合には、昼間と同様な接近挙動がなされるということはいえそうである。

5. 交通環境内における人—車系の相互作用

3節で扱った問題は、先行車追従説というカップリングの事態で、先行車が後続車に与える一方の

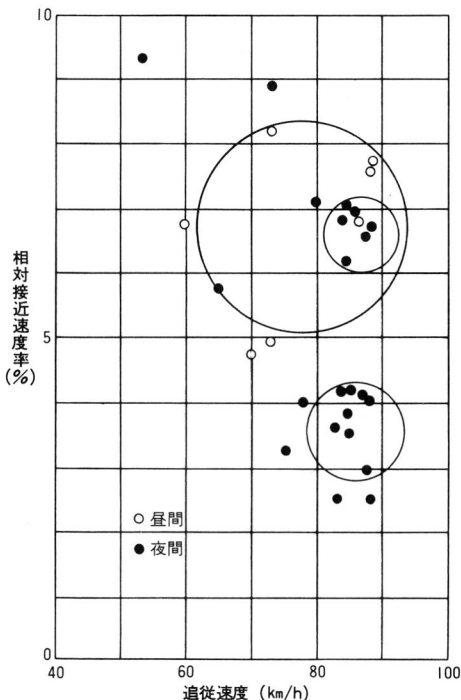


Fig. 7 追従速度に対する相対接近速度率の分布
Distribution of relative closing rate against tracking speed

影響であった。当然のこととして、後続車の挙動が先行車に影響する。ある車の挙動は前後の車によって影響され、そして、前後の車の挙動に影響する。さらに、個々の車はすぐ前の先行車だけでなく、より大きな交通流または走行グループの影響を受ける。Herman & Gardels のいう車の追従法則に述べられている感受性係数が、テストコースと現実の交通場面 で相違したことは、まさしくこのような大きな走行グループの影響を物語っているものである。ここでとり上げる問題は、追い越し不能な単一車線の交通流の中における車の相互作用の問題である。これらの諸問題について、現時点ではわれわれ自身のデータは持ち合わせないので、ブロッキシミクスに立脚した古谷 (1976, II) の概念化と、Herman & Gardels (1963) の研究を中心に述べることにする。

5-1 人—車系のブロッキシミクス

ブロッキシミクスはHall (1959, 60) が人間が個人的、文化的に必要とする空間、および人間や動物が周囲の空間に対して持つ関係を考察するために考えたものである。古谷はこの概念を人—車系という統合有機体に拡大して適用した。

近接学によれば、人間はその触、嗅、聴、視覚の感覚とさまざまな活動に結びついた自己を中心とし

た奥行方向に、密接 (1.5ft 以内)、個体 (4ft まで)、社会 (10ft まで)、公衆 (10ft 以上) 距離に広がる一連の地帯をもつ。これらの地帯の各々は近い相、遠い相に 2 分されている。古谷は防御、追従、追跡、自由走行という走行モード (人-車系の活動様式) を近接学的な一連の地帯と関連させた。この最初の防御という走行モードは、比較行動学でいう臨界距離内での逃走に当るもので、これまでのわれわれのフォローイングエピソードの中では言及しなかったものである。先行車追従説やわれわれの場合には、車頭距離がある程度変化しても、ペアー関係が維持されている場合には、それを追従として 1 つにまとめている。古谷が追従をさらに区分し、追従から防御への移行にカストロフィーの概念を適用していることは、全く新しいアプローチと言わねばならない。

しかしながら、この理論化に全面的に賛同しているわけではない。第 1 に行動科学における応用カストロフィーについては、Sussman & Zahler (1978) が批判しているようなさまざまな問題が存在している。追従から防御への変化をカस्पカストロフィーを用いて説明しても、そこから新しい知見が得られるわけではない。第 2 に物理的世界から心理的世界への変換を 1 次的なものと仮定して、距離感覚 x 、速度感覚 y を推定した。もし、そのような仮定が成立するならば、物理的世界に対して心理的世界を区分することは不要であろう。第 3 に近接学という地帯は、Z-感覚 (安全感覚) という抽象的な尺度によって測られている。すでに述べたように、Hall の近接学では、地帯は観測データに基づいて物理的に測られている。われわれの目的は、フィールドにおける人-車系挙動の観測に立脚して、近接学を再構成することである。

5-2 人-車系の相互作用

先行車追従説では、カップリング状態にある 2 台の車の関係は先行車から後続車への一方向のものであった。古谷は後続車が先行車に与える影響をも組み入れて、交通流の中における車の相互作用を論じている。「A、B、C 3 台の車が続いて走っていると。先頭車 A は次の車 B の行動に注意する。B が接近すれば安全のために A は回避する (回避行動)。それでもなお B が接近してくると、A は驚いて急加速する (逃避行動)。B は後続する車 C にも注意する。C が接近すると B は回避するが、他方では依然として A を追従する」。換言すれば、「A と B の車間

は主として B の意志によって決定されるが、B と C の車間は主として C の意志によって決定される」。

このようなモデルの組み合わせを用いて、過密交通における防御追従 (Protecting following) 車群、定常的な交通流、ショック波などの諸問題を個々の車の挙動とその相互作用によって、一貫した体系化を試みている。しかしながら、その理論は抽象的、観念的な段階に止まっている。

5-3 交通の状態方程式

理論的な最大の交通流は、道路の特性に応じてすべての車がバンパを互いに接して、最高の速度で走行する場合に生じると考えられる。しかし、運転者の相互作用によって、実際にはそのようなことは起こらない。交通流の中での人-車系の相互作用の仕方は、交通の状態方程式とでも呼ぶことができる数式によって表現することが可能である。その方程式は、車線上に全く車が存在しない流れゼロの極端と、過密状態のために流れゼロである極端の中間に最大の流れが存在するという事実を表現するものである。定常状態の流れは、密度と平均交通速度の積である。流量が最大のときの平均交通速度を典型的な速度という。この典型的な速度は運転者、車両、道路、交通法規、天候、日時などを含んだ全体の交通事態を反映するものである。

このような予想の下に、Herman & Gardels は単一車線で交通量が多く、追い越しが禁止されているニューヨーク地区の 3 つのトンネル内の実際の交通場面を使って実験を行っている。

その一つは、トンネル内という実際場面での感受性係数 G を決定するための先導車追従実験で、前に述べたピアノ線で連結した 2 台の車が使用された。この場合には、両車両がトンネル内の交通流によって必然的に影響されているので、先のテストコース上の実験とは異なっている。この両方の結果を比較することによって、車の追従法則で述べた式中の G が車頭距離に反比例することが明らかになり、そのことが $G/s(t)$ という形で表現されている。

次に、3 つのトンネルのそれぞれの典型的な交通について測定がなされた。すなわち流量、密度、車速などの変数について、トンネルごとの異なった測定値が求められた。ある測定ではトンネル内の車線中央の天井に、2 個のフォトセルを取付け、10 日間にもわたる記録によって、24,000 台の多量のサンプルについてのデータが得られた。そのようなデータの分析によって、そのトンネル内の典型的な速度が

19mph (≒30km/h) であることが判明した。

これらの事実は、彼らの先行車追従理論からの予測とよく一致するものであった。単一車線の交通において、車の密度が小さいときには、運転者は自分の望む速度で走行する。その車線の流量はしばらくの間は、その流れの中の車の数が増すにつれて増大する。換言すれば、この時期において密度と流量の間にはほぼ線形の関係が存在し、3つのトンネルには差はない。明らかに典型的な運転者は広さ、明るさ、道路の形状といったトンネル内の環境がどのように違っていても、ある交通密度に達するまではどのトンネルも同じように走行する。しかしながら、人-車系の間に相互作用が生じるようになると、状況は顕著に変化し、運転者は違ったトンネル環境に対しては異なる反応を示し始める。そして、流量と密度の関係を表す曲線は、トンネルごとに異なった最大値を経由して、異なった率で下降するようになる。

5-4 ショック波

前に述べたような最大の流量と渋滞の間で、なお車の密度が上昇し続ける事態において、人-車系の相互作用はショック波としてかく乱を生起する。車線を走る1台の車が何かの理由で減速すると、必然的に2台目の車も減速しなくてはならない。2台目の車があまりにも遅く、または過剰に反応すると、多くの場合にそのかく乱はその車線に沿って、ある距離にわたって後方へと波及する。そして、このかく乱は瞬間的であっても2、3台の車が完全に停車するまでに進行する。最初の車と2台目の車が再び速度をとり戻すようになると、その波はおさまるが、影響を受けた後続の運転者はしばらくの間は急加速、急減速といった極端な運転を強いられる。これが、単一車線条件下で生じる、周知のアコーディオン効果に外ならない。高密度の流れの中では、その現象は繰返し生じて道路の生産性を損なう。

このようなショック波は、上り勾配のような道路の特性によっても生じる。運転者が坂を登っていることに気付かなかつたり、速度を維持できなかつたりすると、結果としてショック波が発生する。混雑する単一車線で追い越しが禁止されているところでは、こうした特徴をもつ部分は慢性的な隘路となる。

5-5 ギャップの導入によるショック波の吸収

トンネル内の交通流の研究によって、典型的な隘路の一つが上り勾配をもつ場所に存在していることを見出した。ここを管轄する港湾局のメンバーたち

は、そのショック波を吸収するために、交通流の中にギャップを導入することを思いついた。依然としてショック波は発生するであろうが、車の流れはギャップによってグループ化されているので、その波は一つのグループで吸収され、次のグループには波及しないはずである。そのことによって、トンネル内の全体的な車の流れはいつそうスムーズになることが予想される。それによって、そのトンネルは交通量の多いピーク時に、より多くの車を通すようになることが期待できる。

この考えを確かめるために簡単な実験を行った。車線の入口に一人の観察者を配置して、車を数え2分ごとに44台に制限させた。この値は、トンネル内の最適の流量として、前もって測定して求めたものである。2分以内に44台の車がトンネルに入ると、車を停めて、2分に達するまでは車が入らないようにした。これによって、交通流の中に普通の場合は約10秒程度のギャップが導入された。そのような簡単な規制の結果によって、それまでは時間当りの流量が1,176台であったのが、1,248台へと上昇して、大きな効果が出現した。時には1,320台にも達し、さらにトンネル内の汚染度は低下し、車の故障は25%も減少した。また、排気ガスを増加する加減速の回数が減ったので、トンネル内の換気の必要性が大幅に減少した。このようにして、その後、全自動の信号システムが採用されることになった。

6. むすび

われわれの研究は、人-車系の挙動をフィールドで観察し、実験的条件分析を行って、その結果を再びフィールドにおける人-車系の管理にフィードバックすることを目指している。なお、この論文は国際交通安全学会プロジェクト214、517のメンバーとの討論に負うところが大きい。研究メンバーの下記の諸氏に深く感謝するものである。

末永一男 (久留米大学名誉教授)

鈴木昭弘 (愛知医科大学教授)

船津孝行 (九州大学教授)

松永勝也 (九州大学助教授)

参考文献

- 1) Lighthill, M. J. & Whitham, G. B.: On kinematic waves, II, A theory of traffic on long crowded roads, Proceedings of the Royal Society, 1955, A229, pp. 317

- 2) Edie, L. C.: Car-following and steady-state theory for non-congested traffic Operations Research, 1961, 9, pp. 66
- 3) Edie, L. C., Herman, R. & Rothery, R.: Vehicular traffic science, New York, Elsevier, 1967
- 4) Hida, K.: A new approach to kinematic waves in traffic flow, J. of physical of Japan, 1972, 33, pp. 817
- 5) Harberman, R.: Mathematical Mode-Traffic flow, Prentice Hall, Inc., 1977 (R. ハーバーマン著, 竹之内監修, 中井訳, 交通流の数学モデル, 現代数学社, 1981)
- 6) Herman, R. & Gardels, K.: Vehicular traffic flow, Scientific American, 1963, vol. 209, 6, pp. 35~43
- 7) Prigogine, I.: A Boltzman-like approach to the statistical theory of traffic flow, In Herman, R., Ed., Theory of traffic flow, Amsterdam, Elsevier, 1961
- 8) Prigogine, I. & Herman, R.: Kinetic of Vehicular Traffic, New York, Elsevier, 1971
- 9) Furutani, N.: A new approach to traffic behavior,
 - I. Modelling of "following-defence" behavior, Int. J. Man-Machine Studies, 1976, 8, pp. 597-615 (古谷直道: 車の運転とカタストロフ, 数理科学, 1979, 10, pp. 36~42)
 - II. Individual car and traffic flow, Int J. Man-Machine Studies, 1976, 8, pp. 731~742
 - III. Steering behavior and the butterfly catastrophe, Int. J. Man-Machine studies, 1977, 9, pp. 233~254
- 10) Wilds, G. J. S.: Social Interaction Patterns in Driver Behavior, An Introductory Review, Human Factors, 1976, 18 (5), pp. 477~492
- 11) 船津孝行: 人-車系の挙動の測定と管理, 国際交通安全学会誌, 1977, vol. 3, No. 4, pp. 248~258
- 12) 津川定之: 知能自動車, 計測技術, 1980, vol. 8, No. 12, pp. 63~69
- 13) Rockwell, T.: Skills, Judgment and information acquisition in driving, In T. W. Forbes (Ed.) Human factors in highway traffic safety research, New York, Wiley-Interscience, 1972, pp. 133~164
- 14) Fuller, R. G. C., McDonald, N. J., Holaham, P. A. & Bolger, E. P.: Technique for continuous recording of vehicle headway, Percept and Motor Skills, 1978, 47, pp. 515~521
- 15) 中島源雄, 末永一男, 鈴木昭弘, 船津孝行, 松永勝也: 動的な環境における視感覚の特性, 国際交通安全学会誌, 1981, vol. 7, 増刊号, pp. 49~59
- 16) Forbes, T. W. & Matson, T. M.: Driver judgment in passing on the highway, J. of psychol., 1939, 8, pp. 3~11
- 17) Allport, F. H.: The J-curve hypothesis of conforming behavior, J. soc. psychol., 1934, 5, pp. 141~183
- 18) 中島源雄, 末永一男, 鈴木昭弘: 視覚反応における後部灯火器の検討, 国際交通安全学会誌, 1980, vol. 6, 増刊号, pp. 49~57
- 19) Janssen, W. H., Michon, J. A. & Harvey, L. O.: The perception of lead Vehicle movement in darkness, accid. Anal. & prev., 1976, vol. 8, pp. 151~166
- 20) Hall, E. T.: The silent language, Doubleday & co., 1959 (E. T. ホール著, 国弘, 長井, 齊藤訳: 沈黙のことば, 南雲堂, 1966)
- 21) Hall, E. T.: The hidden dimension, Doubleday & co., 1966, (E. T. ホール著, 日高, 佐藤訳: かくれた次元, みすず書房, 1970)
- 22) Sussman, H. J. & Zahler, R. S.: A critique applied catastrophe theory in behavioral sciences, Behavior Science, 1978, Vol. 23, pp. 383~389