

## 人—自動車系における“あいまい”行動モデル

古川 修\*, 小口 泰平\*\*

人—自動車系において安全性や運転者のフィーリングの問題を議論するには、工学的分野を越えて人間本来の姿から出発することが必要と思われる。本研究は、ドライバーの安全性に対する欲求という基本的観点から人間のあいまいな運転行動のモデル化を試み、その妥当性および有用性を論じている。

## Formulation of a Fuzzy Behavior Model in Man-Machine System

Yoshimi FURUKAWA\* Yasuhei OGUCHI\*\*

To discuss the questions of safety and drivers' feelings, it would be necessary to approach them with a humanistic, and not merely technological, perspective. This study attempts to formulate into a model people's indefinite driving behavior from the fundamental standpoint of the drivers' pursuit of safety and discusses the validity and usefulness of the model.

## 1. まえがき

工学の分野において、人間の制御動作の特性を明らかにしようという試みは数多くなされてきた。自動車の操縦安定性についても、多くは人間を含む系として取り扱われ、人間と自動車の相互の特性のマッチングが重要だとされている。それらの中で人間は線形素子、非線形素子を組み合わせたロボットで置き換えられていて、知・情・意を持った生きものではなくっている。確かにこれらの数学モデルは現代制御理論を有効に活用して、人間の制御動作が制御理論でどのように表現できるかということ明らかにし、人間にとって制御しやすい機械の設計や人間を含むシステムの最適化には多くの貢献をしているといえよう。しかし、例えば近年の重大交通事故を調べてみると、人—機械系の安定性だけでは論じられないような、不可思議な原因のものが多い。いわゆる“魔がさした”としかいいようのないような、信じがたい行動を運転者がとる時に、重大事故につながる人が多いようである。

また、運転者の操縦に関するフィーリングの問題、運転による生理的・心理的疲労の問題等も、工学的手法を越えた多角的な研究によって初めて解明されると思われる。とにかく“人間”を“人間”として扱うことが一番重要であり、そのような観点のシステム一般論として川畑は「ヒューマン・エラボレー

ション原論<sup>\*\*\*</sup>を展開している。川畑は全体の研究分野を4つの認識レベルと4つのヒューマン・エラボレーションのレベルに分類し、解明されていない分野が多いことを指摘している。このような基本姿勢を規定している運転者の根本的欲求から考えを進めるのが必要と思われる。そこで、筆者等は心理状態を考慮に入れた“あいまい”行動モデルの一提案を行なってみた。

## 2. ドライバーの行動決定のための評価関数

人間の運転動作のモデル化は、近藤が「前方注視点モデル<sup>2)</sup>」を提案して以来、数多くの研究者によって研究されている。それらのモデルのほとんどは  
(i) 車速が一定である  
(ii) 目標コースが定まっている  
(iii) 人間は線形定常なフィードバック要素で表現されている

ということに一致している。しかし、実際人間が道路上で自動車を走らせる時には、ドライバーはその道路環境に応じて適当な車速を選び、適当と思われる操縦動作で適当なコースを走行する。そして、その操縦行動はドライバーの心身状態、走行目的、また自動車の状態等によっても大きく異なってくるはずである。

さて、このような多様な制御形態を人間が示すのは、安全であるということに対して自動車—道路系が大きな自由度を持つからであり、航空機のような安全を保つための制約条件が厳しいものの制御とは

\*\*\*ヒューマン・エラボレーション：川畑の造語であり、システムを人間の認識を通じて人間に再投影するという行為を通じて、そのシステム内の人間が十分納得することという。

\* 東京大学生産技術研究所・大学院生  
Graduate student, Univ. of Tokyo

\*\* 芝浦工業大学助教授（機械工学、人間—機械系）

Associate Professor, Shibaura Institute of Technology

原稿受理 昭和52年9月16日

異なっているからである。航空機の離着陸などでは、パイロットの制御動作はあまり自由度をゆるされず、条件に応じて決まったものとなり、パイロットの個性はあまり反映されない。しかるに、自動車の通常の走行では、ドライバーがかなり“いいかげん”な制御をしても安定を保てるので、物理的には同じ条件でも個人差、心身状態によって制御動作にかなりのバラツキがでてくる。これがかえって人間の個性を浮きぼりにし、このことが普通の道路を走行する自動車におけるドライバーの操縦動作の研究を興味深いものにしていく。

さて、このようなバラツキの多い制御動作を数学モデルで統一的に表現することは容易ではない。しかし、自動車にしても航空機にしても、操縦行動を規定している第一条件として“安全である”ということは不可欠なものである。そして、操縦者は“安全である”範囲内でできる限り好き勝手の操縦動作をしていると考えられる。このように考えると、人間というものは何段階かの色々な欲求を持っていて、それらの欲求が適宜満たされていくように行動を決定していく、というようなことが運転行動にも当てはまる事が納得される。そこで、このような運転行動を規定している「欲求」あるいは「評価項目」をモデル化の出発点と考える。非常に大ざっぱに考えて、これらの評価項目として次のことが挙げられる。

- (i) 安全であること
- (ii) 快適であること
- (iii) 走行目的に適していること

これらのうち最も重要なものは(i)の安全性であり、他の項目の決して犯すことの出来ない絶対的なものである。この欲求のもとにドライバーは適当なハンドル操作と適当な加減速を行ない、左右のガードレール、電柱、他の車両や歩行者等の障害物との接触を避けている。例えば、左右道路幅が変わるとそれに従ってドライバーが平均速度を変えろということ、この安全に対する感覚からきていると考えられる。このことに関して、ドライバーが道路幅に対してどのような車速を選んでいるか確かめた実験データをFig. 1に示す。これは100m区間の直線道路を左右両側に10mおきにパイロンを並べて造り、その幅を色々変えた時に被験者に普段と同じ感覚で車速を選んで走行してもらい、その車速を計測した結果である。被験者の選んだ車速は、車線幅が狭くなるにつれて下がってくるが、車幅+1.5mまではその傾向が少ない。

他の評価項目(ii)、(iii)は(i)に比べると2次的なものといえる。(ii)の快適性は、ドライバーが心理的、生理的に快適でありたいとする欲求であり、個人個人によってかなり異なるものである。横加速度、前後加速度、上下振動の少ない滑らかな運動を好むドライバーもあれば、加減速そのものに快さを感じているドライバーもいるであろう。(iii)は(ii)の欲求と重なっている部分もあるが、走行目的が緊急な用であればできる限りの速度で走行するのをよしとし、ドライブを楽しむこと自体が目的ならば、それはまた全然違う評価の仕方になるであろう。しかし、いずれにせよ移動という行為を行なうことによって生じる利益を得ようとする欲求ということができ、この利益を得るためにドライバーは自動車を運転して、ある場所から他の場所まで走行させる。

### 3. 運転行動に必要な情報

#### 3-1 認知系・操作系の情報

人間-自動車系の制御形態をブロック線図で表すとFig. 2のようになる。すなわち、ドライバーが $U(t)$ という操作をすると、自動車の状態ベクトル $x(t)$ は次の微分方程式に基づいて変化し、そしてドライバーは $x$ の関数である $y(t)$ というベクトルを観測する。

$$\begin{cases} \dot{x} = F(x, u) & \dots\dots\dots(1) \\ y = G(x - x_R) & \dots\dots\dots(2) \end{cases}$$

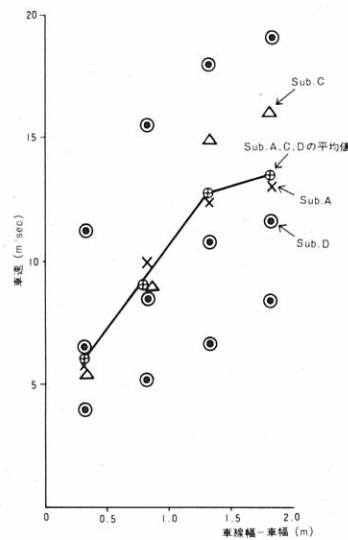


Fig. 1 車線幅と走行速度の関係  
Relationship between the lane width and automobile speed

ただし、 $x_R$ は道路形状を表すベクトルである。

そして、この観測値  $y$  によってさらに次の操作  $u$  が決定される。ここで、これ等の変数  $x, y, u$  は<sup>2)</sup> いったい何かという疑問がでてくる。前述の近藤の「前方注視点モデル」では操作ベクトル  $u$  はハンドル操舵量  $\alpha$  で、自動車の状態ベクトル  $x$  は車体重心位置の横方向の変位  $Y$ 、ヨー方向の姿勢角  $\psi$ 、およびそれ等の微分値  $\dot{Y}, \dot{\psi}$  であり、観測ベクトルは車体重心より  $L$  m 前方の横変位  $Y_L = Y + L\psi$  である。

実際には外界から人間が受け取る可能性のある情報は無限にあるので、どの情報が運転に必要なのか調べるのは容易でない。いま、Fig. 3 のようにドライバーの情報処理系を3つの部分に分けて、観測ベクトル  $y$  を受けとる機構を「認知系」、操作ベクトル  $u$  を出力する機構を「操作系」と呼ぶ。人間の身体を考えると、認知系は目・耳・皮膚感覚等いろいろなものがあり、ここに受け入れられる情報を大別すると、

- (i) 視覚情報： 車両の窓から見える外の景色の流れ、ハンドル・ギア等の状態、スピードメー

タ等の計器の読み等

- (ii) 聴覚情報： 機関音、ロードノイズ、他の車両の音、風切音、車体の振動騒音等
- (iii) 体感による情報： 横加速度、縦加速度、ロール角、ピッチ角、上下加速度等
- (iv) 操作のフィードバック感覚情報： 操作時の手足の移動量、ハンドルトルク反力、アクセル反力、ブレーキ反力、クラッチ反力、ギアシフト感覚等

また、操作系では大きく分けて

- (i) ハンドル操作に関するもの
- (ii) アクセル、ブレーキ操作等加減速に関するもの

の2種類の操作が考えられる。

認知系で特に運転行動決定のために必要な最も重要な情報は、視覚情報の中の“外の景色の流れ”である。これの中に含まれる物理変数は、自動車の重心点の前後左右方向の位置  $(X, Y)$ 、ヨー方向、ロール方向、ピッチ方向の姿勢角  $(\psi, \phi, \theta)$ 、及びそれらの微分値(時間に対する)  $\dot{X}, \dot{Y}; \dot{X}, \dot{Y}; \ddot{X}, \ddot{Y} \dots \dot{\psi}, \dot{\phi}, \dot{\theta}; \ddot{\psi}, \ddot{\phi}, \ddot{\theta}; \dots$  等である。これらのうち加速度  $\ddot{X}, \ddot{Y}$  は体感による情報としても認識されているはずである。

操作系では操作量を人間の出力とする見方と、それを産み出す操作力を出力とする見方がある。これはどちらともいえず、その両方の組み合わせであり、ドライバーがそのどちらを意識しているかによる。例えば、Fig. 4 (a) に示すようなバネ定数  $k$  のトルク反力、摩擦係数  $\mu$  のフリクションを持つ慣性モーメント  $I$  のステアリング系を操舵する場合を考えてみる。操舵角を  $\alpha$  とし、操舵に必要なトルクを  $T$  とすると、このシステムの信号線図は Fig. 4 (b) のようになる。図中で丸印は状態変数を表し、矢印は信号を流す素子を表しており、 $D^{-1}$  は積分素子である。もちろん、ドライバーが直接出力しているのはトルク  $T$  であり、トルク反力  $k\alpha$ 、フリクション  $\mu\alpha$  との差が回転角加速度を定め、それが積分されてゆき  $\alpha, \alpha$  となる。しかし、この図では実際の操舵システムで忘れていたものがある。それは人間の手の動きを司る筋肉系である。筋肉系をも含んだシステムを Fig. 4 (c) に示す。図に示すように、筋肉系を考慮することによって、ハンドル角も人間の出力と考えることができる。そして、操作量と操作角のどちらが人間の出力として意識されているかという議論は、図のステアリング系を表す下方のパスと、筋肉系の

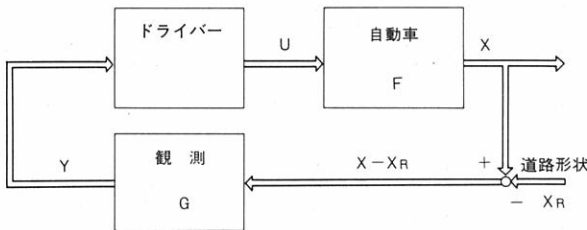


Fig. 2 人-自動車系のブロック線図  
Block diagram of the man-automobile system

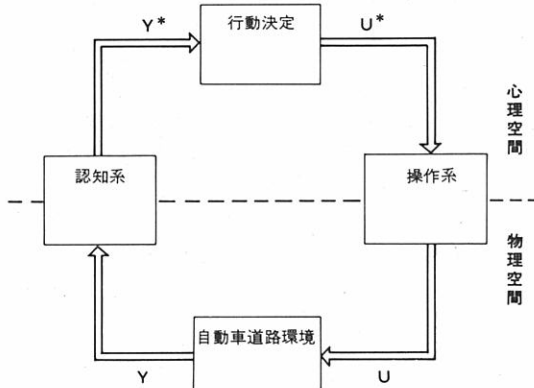


Fig. 3 人-自動車系の心理空間・物理空間での情報の流れ  
Diagram showing the information flow in the psychological space and the physical space of the man-machine system

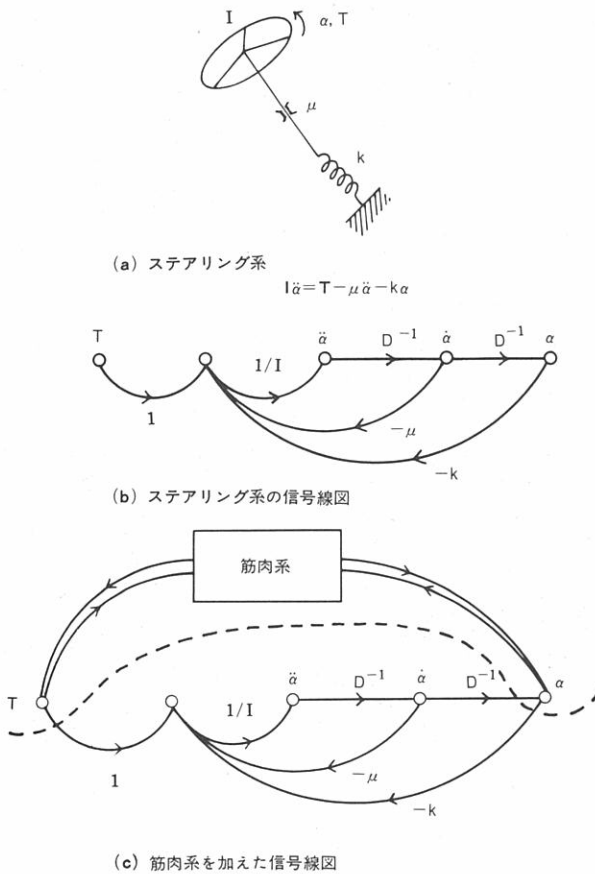


Fig. 4 簡単化したステアリング系のモデル  
A simplified model for the steering system

上のパスのどちらのダイナミクスが優先しているかということによって置き換えられる。すなわち、ハンドトルク反力が弱くイナーシャも小さい ( $k, I$  の小さい) ステアリング系では、筋肉系のダイナミクスが優先されて出力は操舵量  $\alpha$  になり、逆に  $k, I$  の大きなステアリング系では下方のパスが優先的となり、トルク出力になると思われる。このことを煮詰めてゆくとハンドリングに対するドライバーのフィーリングの問題になるが、本題をはずれるのでここでは論じないことにする。

3-2 物理空間・心理空間

前節で認知系、操作系の変数の種類を論じてきたが、これらの情報をわれわれ人間が寸分違わず受け取っているかということ、そうではない。例えば、高速道路の車線幅のちょうど中央を走っているとドライバーが感じていても、正確に測れば最低数センチは誤差があるであろう。また操作系でもいつもハン

ドル角を心に決めた量だけ切っているとはいえない。90度切るつもりが80度になったり100度になったりする。このように、実際この自然界に存在する物理量と、それに対しわれわれが心に描いている心理量とはずれがあるのが普通である。いま、物理変数  $y, u$  に対する心理量を  $y^*, u^*$  とすると、認知系・操作系はこの変数どうしを対応させる写像 (mapping)  $y \rightarrow y^*, u \rightarrow u^*$  を行なっていると解釈できる。そして、 $y$  と  $y^*, u$  と  $u^*$  はその属する空間の性質そのものが違っている。 $y, u$  の属する空間は多次元ユークリッド空間であり、 $y^*, u^*$  はもっとぼやけた空間に属する。われわれが運転行動決定のために情報処理しているのは、このぼやけた空間内である法則に基づいて変数を結びつけていることになる。この行動決定の法則を論じるには、“ぼやけた空間” がどのような性質のものか明らかにする必要がある。次節でその数学的構造を考察する。

3-3 パターン認識

実際に道路上を走行する時、ドライバーがどのような情報をどのように処理しているか考察してみると視覚情報だけでも非常に多くの情報量を含んでいるので、その中でどれをピックアップしているか判断するのは非常にむずかしい。われわれ自身の運転動作を考えてみても、自分がどんな情報を使っているか、確固たることはいえない。つまりわれわれは無意識のうち“何となく”外の景色を見て“何となく”操舵・加減速をしている。この“何となく”という所にわれわれ人間の行なう情報処理形態の大きな特徴があり、機械ではなかなか真似し得ないところがある。では、なぜドライバーがそのような情報処理を行なっているかを考えてみると、多大な情報量を短時間で処理するとき、その特徴をとらえることによって情報量を低減させているところにあるといえる。これは人間がパターン認識を行ない、パターンで情報をとらえて処理しているということである。すなわち認知系とはある時刻  $t$  において外界から得られた時間関数  $y(\tau), (t-T \leq \tau \leq t)$  をパターン  $y^*(t)$  に写す写像であり、この観測パターンの属するカテゴリーに従って操作パターン  $u^*(t)$  が決定され、操作  $u(\tau)(t \leq \tau \leq t+T)$  が行なわれるわけである。

このパターン認識の構造はドライバーの個性によって大きく違ってくる。例えば定常直線走行時の操舵パターンを見ても、常に連続して操舵を行なう人もあれば、たまにパルス状の操舵を行ない進路の修正を行なっている人もいる。このパルスを出力する

ということは、操舵パターンとして操舵量の積分値を意識しているわけで、出力における微分動作といふことができる。

4. 運転行動モデルの具体化

これまで、運転行動決定のためのドライバーの欲求とその処理する情報の種類について述べてきた。では、これらの欲求に基づいて観測パターン  $y^*(t)$  からどのようにして操作パターン  $u^*(t)$  を定めているのであろうか。これより、人と自動車の関係を考えながら運転行動決定モデルの具体化を行なってゆく。

4-1 自動車の応答の確率的予測

自動車の操舵系、加減速系は非常に複雑なメカニズムの組み合わせで構成されている。例えば、操舵角に対する重心位置の横方向の応答は、簡単化されたモデルでも2重積分系のダイナミックスをもつ。このような複雑な機械をなぜドライバーが自由に操縦できるのであろうか。その答えはドライバーは過去の経験から運転操作に対する自動車の応答を予測できるからである。すなわち、ある操作パターン  $u^*$  に対する自動車の応答  $x(\tau)$ 、 $t \leq \tau \leq t+tm$  をおぼろげながら予測することができる。これは、例えば自動車と道路環境に充分慣れた状態では、初めの数秒間目をつぶってもドライバーは適当な操舵をして車線変更等を行うことができる<sup>3)</sup> ことから理解される。

これが運転免許を持っていない自動車教習所に通い始めたばかりの人ではそうはいかない。また、長年パワーステアのついた大型車に乗っていた人が急にスポーツカーのようなシャープなハンドルの車に乗り換えた場合等も、初めの数日間はギクシャクして、とても目をつぶって車線変更等はできないであろう。すなわち、自動車運転を習い始めたばかりの人は自動車の応答  $x(\tau)$  がほとんど予測できず、自動車を乗り換えたばかりの人は以前乗っていた自動車の応答予測がまだ残っていて実際の応答の予測がはずれることになる。

では、このような予測を数学モデルで表現するとどうなるであろうか。あいまいな予測を表すには確率的な考え方をを用いるのが最も自然と思える。すなわち、ドライバーのある操舵パターン  $u^*$  を行なった時の自動車の応答  $x(\tau)$ 、 $t \leq \tau \leq t+tm$  の予測を次の条件付確率密度関数で表される確率分布で判断していると仮定する<sup>\*</sup>。

$$f(x | u^*) \dots\dots\dots(3)$$

この時、たとえば安全にある幅の道路内を走行でき

る応答  $x$  の集合を  $\Omega$  とすると、ある操舵パターン  $u^*$  に対して安全であるとする判断確率は

$$P(x \in \Omega | u^*) = \int_{\Omega} f(x | u^*) dx \dots\dots\dots(4)$$

と計算される。操作  $u$  に対する自動車の応答  $x$  は、3-1の(1)式の微分方程式の解としてデターミニスティックに与えられるはずである。にもかかわらず(3)式の確率的表現ができたのは、次に挙げる不確定要素があるからである。

- (i) 観測値の認知  $y \rightarrow y^*$  の際のあいまいさ
- (ii) 操作  $u^* \rightarrow u$  を行なう時の不正確さ
- (iii) 自動車のダイナミックスの予測のあいまいさ

このうち、項目(i)、(ii)は前節で論じたものである。また、観測値  $y$  から状態ベクトル  $x$  を推定する濾波(filtering)の問題も同時に入ってくる。すなわち(3)式の確率密度関数には、観測値  $y^*$  が与えられた時という前提条件があらかじめ存在しており、項目(i)~(iii)の不確定要素に  $y \rightarrow x$  の推定問題まですべて含んだものとなっている。ここで、この予測のあいまいさがどのように分布しているか簡単な実験を試みた結果を述べる。実験方法は次の通りである。

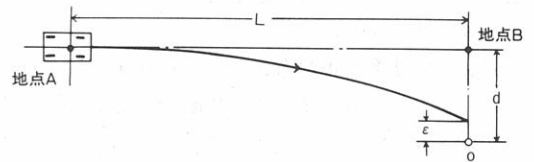


Fig. 5 確率予測の実験  
Sketch of an experiment on probabilistic prediction

Fig. 5 に示すように、テストコース上に長く引かれた直線  $AB$  に車体中心線が一致するようにして、被験者はスタート地点  $A$  で車面を停止させて待機している。 $A$  より前方  $L$  の距離の所に車体中心線より  $d$  だけ右方に離して目標物  $O$  を置く。被験者はスタート地点  $A$  でこの目標物を狙ってハンドル舵角をある量だけ切り、以後ハンドル固定で  $O$  まで走行した時に車体の左右中心点と目標物  $O$  の偏差  $\epsilon$  ができるだけ少なくなるようにと指示される。このとき、一回ごとに  $d$  をランダムに変えて、その時の  $\epsilon$  がどのようになるか計測するわけである。

ハンドル角を  $\alpha$  とし、実舵角を  $\beta$  とすると定常状態では  $\beta = (1/n) \cdot \alpha$  の関係がある。ただし、 $n$  はステ

<sup>\*</sup>  $f(x | u^*)$  の意味は、 $u^*$  があらかじめ与えられている時に、確率変数  $X$  が  $x \leq X \leq x + dx$  となる確率が  $f(x | u^*) dx$  になるということ、 $u^*$  をパラメータとした  $x$  の関数になり、すべての  $x$  について積分すれば1になる。

アリング・ギア比である。また、 $\alpha$ 一定、従って $\beta$ が一定の時は極低速では、車両重心点の軌跡は円弧となりその曲率 $1/\rho$ は実舵角 $\beta$ に比例する。すると、 $L \gg d$ であれば、ホイールベースを $l$ として

$$d - \epsilon \doteq \frac{L^2}{2l} \beta = \frac{L^2}{2l} \cdot \frac{1}{n} \alpha \quad \dots\dots\dots(5)$$

の関係がなりたつ。すなわち、ハンドル固定の極低速走行では前後方向に $L$ だけ進んだ時の左右方向の移動量は舵角に比例する。すると、特にこの実験に関してはハンドル操作パターン $\mathbf{u}^*$ を一定舵角 $\alpha$ に代表させ、状態ベクトル $\mathbf{x}$ のうち実験タスクに関する評価として表れるものは $d - \epsilon$ としてよい。また、このときの観測パターン $\mathbf{y}^*$ は与えられた $d$ の距離の感覚値になる。その時、制御対象である自動車は比例制御系となっていて、ゲイン $G = L^2/2l \cdot 1/n$ を用いて、

$$d - \epsilon = G \alpha \quad \dots\dots\dots(6)$$

のダイナミクスをもつ。被験者が充分このシステムの比例性を熟知していると仮定すると、(3)式の確率密度関数は実はこのゲイン $G$ の確率分布で置き換えられる。すなわち、目標値 $d$ が与えられた時、被験者は $G$ の推定値 $\hat{G}^*$ を用いて $\alpha = d/\hat{G}^*$ だけ舵角を切ることになり、この $\hat{G}^* = d/\alpha$ の分布でもって被験者の予測が代表される。

Fig. 6 に2名の被験者A、Bの $G^*$ の分布を示す。ただし、 $L = 7 \text{ m}$ 、 $d = 0 \sim 2 \text{ m}$ で横軸は $\hat{G}^*$ を実際のゲイン $G$ で割って無次元化してあり、 $\hat{G}^*/G$ が1に近いほど $\epsilon$ が小さくなる。A、Bの違いは、Bが比較的ゆるやかなピークのカーブを示すのに対して、Aは1.0付近のピークは尖っているが、裾の部分はBよりも広範囲に分散している。これは、Bは割と適当に作業をしていて、各回の成績ともいうべき誤差 $\epsilon$ は小さくはないが、あまり大きくなるというようなことはなく、それに対してAは良い時にはかなりの成績であるが、たまに大きくはずれることがあることを示している。また、これらの実験データにおいて、 $\hat{G}^*$ のばらつき方に規則性がでてくると単に確率的現象とはいえず、他に $\hat{G}^*$ の変動を規定しているものが表れる可能性がある。そこで、 $\hat{G}^*$ の各回を通じた経過に周期性があるかどうか、そのパワースペクトルをとって調べてみた。Fig. 7がその結果であるが、図に示されるようにあまり際だったピークは見られず、ホワイトノイズのそれに似ている。それゆえ、 $\hat{G}^*$ の変動は確率現象で表現してよいと思われる。

4-2 自動車のパラメータの推定

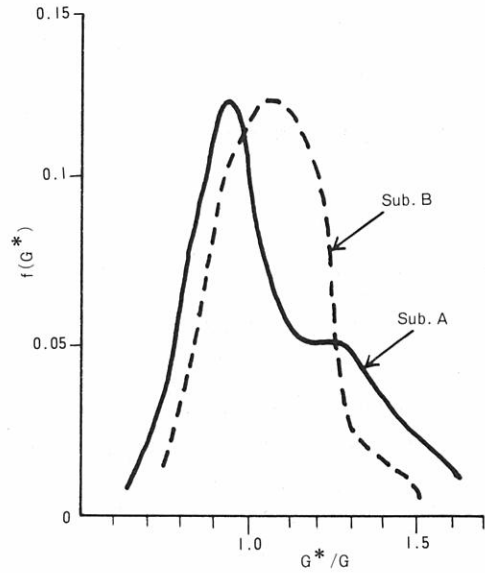


Fig. 6 変動ゲインの密度分布  
Density distribution of the varying gain

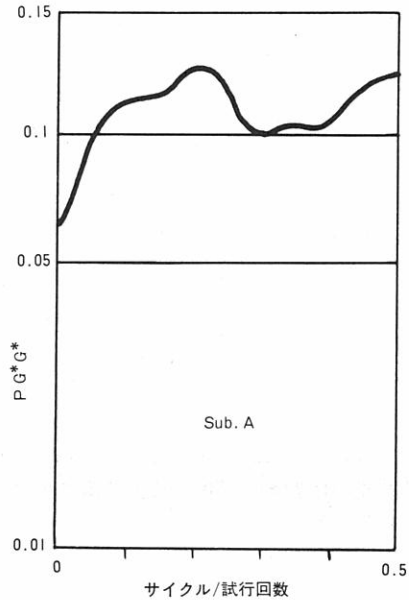


Fig. 7 変動ゲインのパワースペクトル密度  
Power spectral density of the the varying gain

以上のような考え方をさらに発展させると、ドライバーが自動車の応答の予測を形成していく過程は、まず自動車のダイナミクス(1)、(2)式に応じて経験により近似的なダイナミクス

$$\tilde{\mathbf{x}} = \tilde{F}(\tilde{\mathbf{x}}, \mathbf{u}^*; \tilde{\mathbf{A}}) \quad \dots\dots\dots(7)$$

の骨組みをまず作り、それからそのシステムパラメータ $\tilde{\mathbf{A}}$ の多次元確率分布の分散をせばめることによ

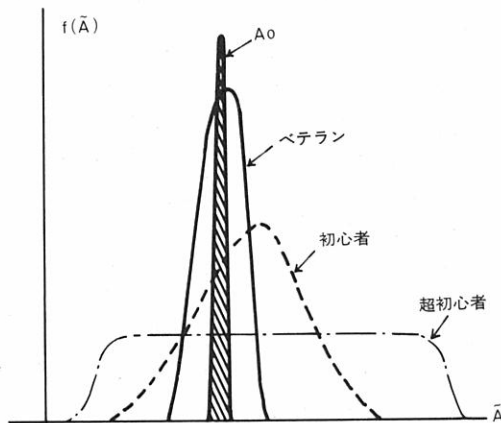


Fig. 8 システムパラメータ  $\bar{A}$  の予測分布  
Predicted distribution of the system parameter  $\bar{A}$

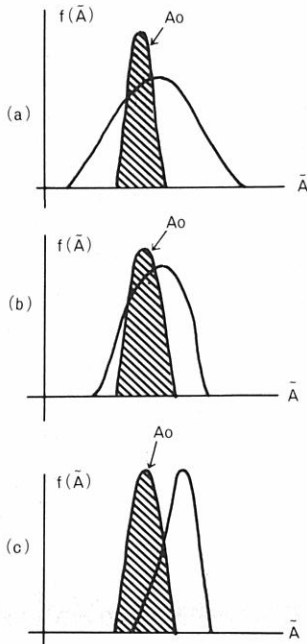


Fig. 9 パラメータ  $\bar{A}$  の分布の個人差による  
(a) 初心者：むだな操作が多い  
(b) かなり適確な操作が出来る  
(c) 過信しすぎ。事故につながる  
Distribution of the parameter  
(individual variations)

ってシステムを同定して行く学習過程と考えることもできる。このシステムパラメータ  $\bar{A}$  とは、前述の簡単な実験ではゲイン  $G^*$  に相当している。このパラメータ  $\bar{A}$  が実際の運転行動の中で何に相当しているのか明らかにするのは非常に困難なことであるが、多面的な実験の積み重ねを行えば推定不可能なことではない。とにかく、このようなパラメータ  $\bar{A}$  の

分布が自動車の運轉行動に個性を持たせる一因になっていると仮定して、それが安全面等にどのように影響するか考察する。

4-1 で挙げた例の自動車運轉を習い始めたばかりの人は、(7)式の数学的構造すら理解していない。それゆえ、パラメータ  $\bar{A}$  の分布がどうのこうのという以前の問題で、自動車の応答がよく分らずにゆるいカーブでも脱輪したりすることになる。これが、自動車教習所等で運轉の練習をしばらく行なううちに(7)式の変数  $\tilde{x}$  に何をとったらよく、関数  $\tilde{F}$  はどんな形をしているかということがわかってきて、あとはどのようなタイミングでどの程度の大きさの操作をしたらよいかということになる。これがパラメータ  $\bar{A}$  の同定である。そして免許を取る頃には  $\bar{A}$  の分布に大分ばらつきがなくなってくる。Fig. 8 に初心者からベテランまでのパラメータ  $\bar{A}$  の分布の違いを示してある。ただし簡単化のために  $\bar{A}$  は一次元にとっており、図中の  $A_0$  の曲線は自動車のダイナミクスを(7)式で近似した時のパラメータ  $\bar{A}$  が物理的にとる分散を示している。

さて、免許を取得して1年後ぐらいに軽い接触事故を起こす人が多い。車両同士の事故の時には色々な要因が重なって起こる場合が多いが、単独で例えば電柱に軽くこすったなどという時にはこのパラメータ  $\bar{A}$  の推定値の誤りに起因するものが比較的多いと思われる。免許取得後何ヵ月か運轉を続けていくとパラメータ  $\bar{A}$  の分散はかなり少なくなってくる。Fig. 9 (a) のようにバラツキの多かった人がだんだん (b) のように真の分布  $A_0$  に近くなり、運轉操作はより適確になり無駄な動きが少なくなっていく。しかし、これが自分の運轉技術を過信し過ぎて (c) のようになると、予測がはずれて事故につながることになる。また、長年ひとつの車に乗ってきた人が突然全く性格の違う別の車に乗りかえると、最初はギクシャクして運轉しにくいのは Fig. 10 のように考えられる。すなわち、最初  $A_0$  の自動車に乗っていて  $\bar{A}$  のように推定していた人が急に  $B_0$  のパラメータの自動車に乗り換えたとする。最初のうちは (b) に示すように推定値は  $\bar{A}$  のままであり、なかなか自分の意のように自動車は応答してくれない。これが、何度か運轉動作を重ねて行くうちに推定値も  $\bar{B}$  になり、再びスムーズな運轉ができるようになる。

このように、パラメータ  $\bar{A}$  の分布は安全や運轉フィードバックの面で大きな役割をもつ。また、濡れた路面等で車両が急に意に反した応答をすることがあ

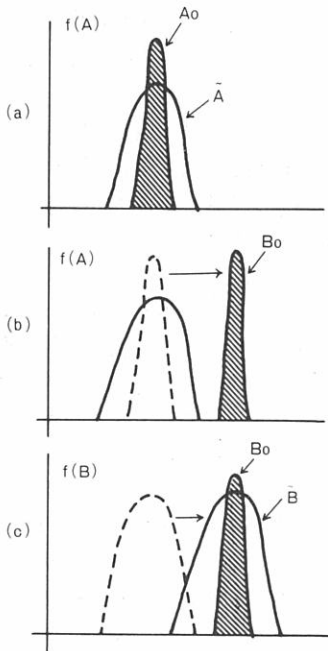


Fig. 10 新しい自動車に乗り換えた時の慣れの過程  
Process of becoming used to a new car

るが、これらも  $A_0$  が乾いた路面とは異なった分布になるためである。このときは、例えば速度を下げ乾いた路面の応答とそれ程変わらないようにパラメータを規定して走行するのが安全ということになる。

4-3 あいまい運転行動モデル

モデルの具体化を述べる前に、もうひとつ人-自動車系の安全に大きくかかわると思われる事柄がある。それは人間の情報処理速度の問題である。これは、人間を情報の通話路と見た場合にその通話路容量がどれだけかということで、これが限られているために情報処理の余裕がなく、事故につながるといった例も多い。この容量は Fig. 3 の上部の運転行動決定の為の情報処理  $\mathbf{y} \rightarrow \mathbf{u}^*$  に必要となる時間だけから決まるものではなく、認知系  $\mathbf{y} \rightarrow \mathbf{y}^*$  の認知時間、操作系における操作可能速度等にもよる。Fig. 4 に示したように、操作系の運動は人間の筋肉運動系と自動車のステアリング系に支配されるので、通話路容量には人間だけでなく自動車のパラメータも含まれることになる。

とにかく、このような単位時間当たりの最大情報処理量が決まっているということは、ある運転操作をして自動車の状態を違う状態にもっていくのにか

かる最小時間が決まっているということになる。そこで、われわれが普段の運転行動をとる時、予測軌跡を何秒先までとるかということがその運転行動が余裕のあるものかどうかのひとつの指標になる。この時間のことを余裕時間  $t_m$  と名づける。  $t_m$  の役割は極めて重要なのであるが、まずモデルの具体的構成を述べ、その中で明らかにしていくことにする。

最初に論じた人間の運転行動を規定する欲求の中で安全性だけを取り挙げる。まず、ある運転行動が安全であるかそれとも危険につながるかということ判定するのは、その運転行動による自動車の応答としての軌跡が他の障害物を通りかかると決まる。そして、運転者の持つ危険感とは自動車の進路軌跡がどれだけ障害物の近くを通るかに依存していると考えるのは自然なことである。そこで、これらの色々な障害物が個有な障害度  $q$  を持ち、道路上に危険感の場を作っていると仮定する。各障害物  $i$  が道路上の点  $P(X, Y)$  におよぼす危険感の影響は、障害物から点  $P$  に引いたベクトル  $\mathbf{r}_i = (X - X_i, Y - Y_i)$  の関数  $\eta(\mathbf{r}_i)$  と個有な障害度  $q_i$  の積で与えられ、これらの各障害物の影響を重ね合わせたものが点  $P$  の危険感を表す場の関数  $\phi(X, Y)$  になっているとする。

$$\phi(X, Y) = \sum_i q_i \cdot \eta(\mathbf{r}_i) \quad \dots\dots\dots(8)$$

そして、ドライバーがある操舵を行なう時の安全感の評価は次のようにされると考える。時刻  $t$  において、

- (i) ドライバーは実現可能な操舵パターン  $\mathbf{u}^* \in U$  を一つ選んでくる。但し、ここで  $U$  というのは実現可能な操舵パターンの集合で、筋肉系とステアリング系によって制限される。
- (ii) その  $\mathbf{u}^*$  に対する自動車の進路軌跡の応答を確率密度関数  $f(X(t+\tau), Y(t+\tau) | \mathbf{u}^*)$  で予測する。
- (iii) この時、その予測進路の  $\phi(X\tau, Y\tau)$  を積分した  $\int_0^{t_m} w(\tau) \phi(X\tau, Y\tau) V(t+\tau) d\tau$  がひとつの進路軌跡に対する危険感になり、これをさらに個々の進路の確率密度  $f\mathbf{u}^*$  で積分して危険感  $\Phi$  の期待値が得られる。  
 $E[\Phi | \mathbf{u}^*] = \int \int_0^{t_m} w(\tau) \phi(X\tau, Y\tau) V(t+\tau) d\tau d f\mathbf{u}^* \quad (9)$ 
 但し、  $V(t+\tau)$  は  $\tau$  秒後の車速、  $w(\tau)$  は時間  $\tau$  に対する重み係数である。
- (vi) この期待値  $E[\Phi | \mathbf{u}^*]$  がある行動  $\mathbf{u}^*$  に対する危険度になり、これが最小になるような  $\mathbf{u}^*$  が最適行動となる。

さて、(9)式の意味を明らかにするために、(9)式の値がほぼ一定になるような走行はどのようになるか



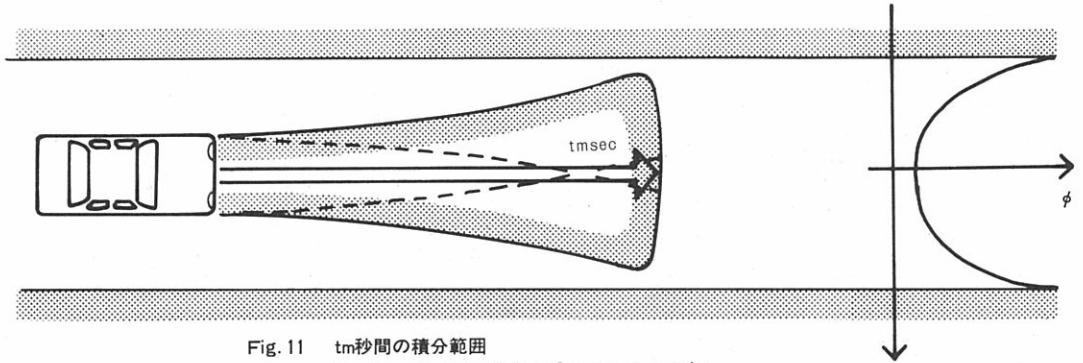


Fig. 11  $t_m$ 秒間の積分範囲  
Region of integration for  $t_m$  seconds

考えてみる。いま、Fig. 11に示すように直線路を走行する場合を考えてみる。 $t_m$ が一定だとすると、(9)式の積分は図のような車両前方の広がりを持った範囲について行なうことになる。両側の道路を規定している障害物上では $\phi = \infty$ であり、 $E[\Phi|\vec{u}]$ がほぼ一定値になるには左右の障害物からのこの積分範囲までの距離がある一定のものになればよい。すると、いまFig. 12(a)のように広い道路を走行してきた車両が急にFig. 12(b)のような狭い道路に入ったとすると、(a)と同じ車速では積分範囲は両端の障害物にかかって非常に危険と判断される。そこで車速を下げ、(a)と同じ程度積分範囲が障害物から離れるようにするわけである。

また、このような時に車速を下げずに積分範囲を狭くするもうひとつの方法がある。それは、余裕時間 $t_m$ を短くとればよいのである。しかし、この時は単位時間内の処理情報量が増すので、非常にいそがしい操舵になる。すなわち、 $t_m$ の取り方ひとつで心理的ないそがしさがある程度表現されることになり、車間距離の取り方等にも反映されている。では、実際にはドライバーは $t_m$ をどのくらいに取っているかという点、筆者等が実験や計算機シミュレーションを重ねた結果では0.6~2.5秒程度で、0.6秒というのは相当いそがしい操舵になる。実験結果の詳細は次の機会に報告したいと考えている。

5. あとがき

以上、人—自動車系におけるあいまい運転行動のモデル化の問題点を非常におおざっぱではあるが述べてきた。モデルというのはわれわれ人間の用いている数式、言葉で表現しうる範囲を越えられないため、自然界の物理法則では解明できない“意志”を持つ人間の正確なモデル化など不可能に近い。結局は状況に応じた行動の一面一面をわれわれの言葉で

置き換えただけのものになってしまうが、これからの人—自動車系の研究ではそういったモデル化に関連した基礎研究の積み重ねを学問分野を越えた頭脳で行なっていく必要があると思われる。筆者等は工学以外の分野ははなはだ浅学で、モデル化に関して色々勘違いの点も多いと思う。各界の専門家のご指摘がいただければ幸いと思う。

このモデル化にあたって東京大学生産技術研究所

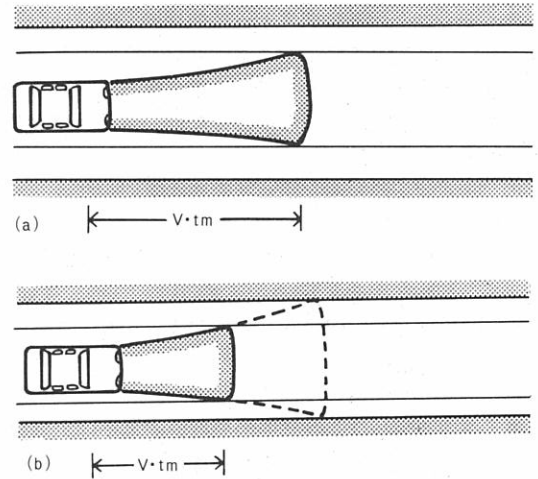


Fig. 12 車速の選択  
Determination of automobile speed

平尾取名誉教授ならびに平尾自動車研究会に出席の諸氏から数々の貴重なご助言をいただいた。紙上をかりてここに謝意を表したい。

●付録

1. (1)式の自動車の運動方程式は線形の範囲で色々研究されている。タイヤの横すべりがほとんどないようなデッド・スローの走行では、車速 $V$ が一定の時には実舵角 $\beta$ に対するヨー角 $\phi$ 、重心横変位 $Y$ は

$$\dot{\psi} \doteq (V/l) \cdot \beta, \dot{Y} \doteq V \cdot \psi \quad \dots\dots (i)$$

と表される。ただし、 $l$  はホイールベースの長さである。2式を同時にベクトル表示すると

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ V & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi \\ Y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V/l \\ 0 \end{bmatrix} \beta \quad \dots\dots (ii)$$

となり、2次系の線形制御系といえる。

高速になるとタイヤのすべりは無視できない。ヨー角  $\psi$  の値がそれ程大きくならない直線走行に近い時には、近似的に

$$\frac{W}{g} \ddot{Y} = -\frac{K_F + K_R}{V} \dot{Y} - \frac{K_F L_F - K_R L_R}{V} \dot{\psi} + (K_F + K_R) \psi + K_F \beta \quad \dots\dots (iii)$$

$$I \ddot{\psi} = -\frac{K_F L_F - K_R L_R}{V} \dot{Y} - \frac{K_F L_F^2 + K_R L_R^2}{V} \dot{\psi} + (K_F L_F - K_R L_R) \psi + K_F L_F \beta \quad \dots\dots (iv)$$

と、やはり線形に表現できる。ただし、 $W$ ：車体総重量、 $I$ ：車体のヨー慣性モーメント、 $K_F$ 、 $K_R$ ：前後輪コーナリングパワー（左右の和）、 $L_F$ 、 $L_R$ ：重心より前後輪軸までの距離。

しかし、舵角  $\beta$  が大きくなったり、ヨーレート  $\dot{\psi}$  が大きな値をとると、タイヤのスリップ角が増し、タイヤのコーナリングフォースの非線形の部分がでてきて、線形系では精度よくは近似し得なくなってくる。また、加減速まで考えると、横方向の運動とのインターアクション等も起こるため、非常に複雑な制御系となる。

II. (5)式はIの結果を用いて簡単に求められる。すなわち、(i)式より、 $V$ と $\beta$ が一定なら

$$\dot{Y} = V\dot{\psi} = \frac{V^2}{l}\beta \quad \therefore Y = \frac{V^2}{l}\beta \cdot \frac{t^2}{2} + \dot{Y}(0)t + Y(0) \quad \dots\dots (v)$$

$$Y(0) = 0, \dot{Y}(0) = 0, t = L/V \text{ を代入すれば、} \quad Y = \frac{L^2}{2l}\beta \quad \dots\dots (vi)$$

となって、(5)式が得られる。

III. このモデルは危険感  $\phi$  の期待値を最小にする操作  $\dot{u}^*$  を見つけるといって、最適制御の問題といえる。(9)式の  $w$ 、 $\phi$ 、 $f\dot{u}^*$  を特別に定めて極端な単純化を行なうと、このモデルは線形フィードバックモデルに帰することを示そう。

まず車速  $V(t+\tau) = V_0$  (一定) として、ハンドル操作だけを考える。操作パターン  $\dot{u}^*$  は、ある一定舵角  $\alpha_0^*$  だけ切って  $tm$  秒間固定することを考える。

$$w(\tau) = \delta(\tau - tm) \text{ (デルタ関数)} \quad \dots\dots (vii)$$

とすると、

$$E[\Phi|\dot{u}^*] = V_0 \int \phi(X_{tm}, Y_{tm}) df\alpha_0^* \quad \dots\dots (viii)$$

一方、ハンドル固定で  $tm$  秒進んだ時の重心位置の座標  $(X_{tm}, Y_{tm})$  は、ヨー角  $\psi$  が小さくなく、車速  $V_0$  が非常に低い時には、

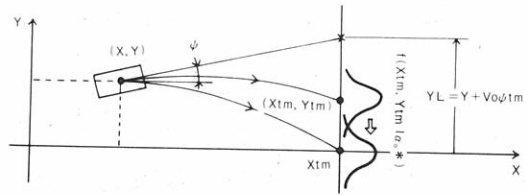


Fig. 13 線形モデルとの比較  
Comparison with a linearized model

$$X_{tm} \doteq X + V_0 t m, Y_{tm} \doteq Y + V_0 \psi t m + \frac{V_0^2}{2l} t m^2 \cdot \frac{1}{n} \cdot \alpha_0 \quad \dots\dots (ix)$$

$$\alpha_0 = \alpha_0^* + \Delta\alpha \quad \dots\dots (x)$$

の関係がある。 $\Delta\alpha$  は心理空間と物理空間の誤差で、平均0、分散  $0^2$  の正規分布  $N(0, 0^2)$  に従うとする。いま、目標コースが1本の直線であり、左右に制限する障害物のない従来の人間-自動車系の条件下で考えると、 $\phi(X_{tm}, Y_{tm})$  の形は  $X_{tm}$  にはよらず  $Y_{tm}$  が0になる所で  $\phi$  は極端に小さく、他の  $Y_{tm}$  では一定としてよい。例えば

$$\phi(X_{tm}, Y_{tm}) = -\delta(Y_{tm}) \quad \dots\dots (xi)$$

と書ける。すると、(viii)式は

$$E[\Phi|\alpha_0^*] = -V_0 f(X_{tm}, 0|\alpha_0^*) \quad \dots\dots (xii)$$

となる。すなわち、 $E[\Phi|\alpha_0^*]$  を最少にするには、 $f(X_{tm}, 0|\alpha_0^*)$  を最大にすればよい。ドライバーの自動車の応答に対する確率的予測を  $\Delta\alpha$  の分布に代表させ、他を無視すれば、

$$f(X_{tm}, 0|\alpha_0^*) = f_0(\Delta\alpha_0) \quad \dots\dots (xiii)$$

ただし、 $f_0$  は  $\Delta\alpha$  の確率密度関数  $\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\Delta\alpha^2}{2\sigma^2}}$  であり、 $\Delta\alpha_0$  は  $Y_{tm} = 0$  となる  $\Delta\alpha$  の値である。 $f_0(\Delta\alpha_0)$  は  $\Delta\alpha_0 = 0$  で最大となるから、 $\alpha_0 = \alpha_0^*$  で

$$Y_{tm} = Y + V_0 \psi t m + \frac{V_0^2}{2l} \cdot t m^2 \cdot \frac{1}{n} \alpha_0^* = 0 \quad \dots\dots (xiv)$$

よって、最適操舵  $\alpha_0^*$  は

$$\alpha_0^* = -(Y + V_0 \psi t m) / (V_0^2 / 2l \cdot t m^2 \cdot 1/n) \quad \dots\dots (xv)$$

$Y + V_0 \psi t m$  は  $tm$  秒後の自動車から車体中心線に沿って直進した時の目標コースからの偏差  $Y_L$  に等しい。すなわち、ドライバーは前方  $V_0 t m$  の地点の変位  $Y_L$  を入力し、ゲイン  $-1 / (V_0^2 / 2l \cdot t m^2 \cdot 1/n)$  のフィードバック制御をしていることになり、「近藤の前方注視点モデル」に一致する (Fig.13)。

参考文献

- 1) 川畑正夫; ヒューマン・エラーレーション原論, PPP 7501~ (75年1月号より連載)
- 2) 近藤政市; 自動車技術, Vol.7, No.5, 1953.
- 3) 古谷、古川; 人間-自動車系のモデルの研究, 自動車技術, Vol.29, No.12, 1975.