自動車性能の自由化とヒューマンパフォーマンス*

小口泰平**, 澤田東一**

1. まえがき

ガソリンエンジンを動力源にした今日の自動車の原型が誕生して、ちょうど 100 年になる。空気入りゴムタイヤが使われ、振動乗心地性能がケタ違いに改善されるようになって 90 年、人の肩幅に近い直径をもつ丸型ハンドルになってほぼ 85 年、車が盗まれないようにエンジンキーが普及して 75 年、女性にも楽々とエンジンがかけられるようにスタータが装着されて 70 年になる。イージードライブが普及しはじめてほぼ 40 年、欠陥車問題により、安全性に対する設計コンセプトが大きく転換されて 20 年になろうとしている。エレクトロニクス技術が低公害、予防安全性、そして快適性などの改善に導入されるようになって 10 年になる。

乗りものである自動車は人との関わりの部分を軸にして、その性能向上が図られてきた。そして、これからはマン-マシン インターフェースを主軸にして、自動車性能は改善されることが予測される。ただし、これからは電子技術の援助によって、これまでの技術の延長線上にあるものとは多少質の異なった技術が主流になるように思う。たとえば、従来からよくいわれてきた力学的にトレードオフの関係にある性能をそれぞれ独立させ、ヒューマンパフォーマンスを中心にすえて、自由にその性能を設定していく技術である。

本稿では、前段でこのような性能の自由化に関わる自動車の技術コンセプトについて述べ、後段では自動車のアクティブ制御への橋渡しになることを期待して研究を行ってきた 4 輪操舵システムの基本特性について述べる。

2. ヒューマンパフォーマンスと アクティブ制御

自動車は速度によってその運動力学特性が変わる。運転者は限界性能付近での非線形領域においても、その変化を読みとってハンドル操作のゲインや位相をたくみに調節したり、アクセル、ブレーキ操作の微分項を変えながら適度に制御を行っていることが多い。しかし、それは制御対象の特性がしばしば制御の負担を運転者に強い

ていることになる。高速走行による負担は、たとえばハンドルの切れ方や重さが低速のときに比べて大きく変わることがひとつの要因である。運転者はその運転制御を行っているとき、車輛の設計パラメータ（たとえばホイールベースやトレッド、ステアリングギア比、車重などのように数または数の比で表される設計上の仕様）を手がかりにしているのではなく、車輛の応答パラメータを読んでいるのである。そして車輛側の位相遅れが大きくなると、そのぶんを運転者側が進めるようにし、ゲインが大きくなれば同様に調節して人-自動車 システムとして適当な特性に収めるように努めている。強い横風が吹いているときなどは、この外乱によってハンドル操作のゲインや位相の制御は難しくなり、風の呼吸作用がさらに緊張感を増大させる。

アクセル操作では、定速走行が予想している以上に難しく、とりわけ AT 車では、勾配をもった高速道路を一定の速度で走りつづけることが速度制御の点で負担となる。それは制御対象が強い二階積分系を構成しているためである。

ブレーキ操作においては、急制動時の車輛の方向安定性を決定づけるタイヤ路面間のすべり率が重要な意味をもつわけであるが、それを運転者が読みとって制御することは困難で、まして緊急制動時には運転者の能力の外にあることである。こうした 2, 3 の例をみただけで

* 昭和 60 年 1 月 16 日受付

** 芝浦工業大学 機械工学第 2 学科

Dept. of Mechanical Eng. II, Shibaura Institute of Tech.

表 1 電子制御による自動車技術の将来像

も、運転者におけるヒューマンパフォーマンスを体系だてて、マン・マシン インターフェースにおける援助システムを普及させることがまだまだ必要であり、今後に待たれるものが多いように思う。

ところで、安全性については運転者のリスクテイキングが重要な意味をもっている。すなわち、危険なものについては人とそれを分離するシステム指標を定めて設計を行えば、かなりなところまで安全が確保される。リスクは、その危険源を人を含めたシステムの指標そのものが内包しているところに特徴がある。したがって、自動車の安全対策はリスクテイキングを対象にしなければならないため、ヒューマンパフォーマンスを活かしたアクティブ制御が、この観点からも必要になろう。これまでのように機械システムを人の特性に適合させるという従来型の技術に加えて、人の状態を感知して人工知能に投影し、その判断内容に応じて制御対象の特性を変化させることも考えられるかもしれない。居眠り運転や疲労運転あるいは情動運転などを防止するバックアップシステムも将来のひとつの姿であり、情報容量や処理能力の大きいコンピュータ技術はそれを可能にするであろう（表1）。

3. 自動車の性能の自由化

アクティブ制御技術 ACT (active control technology) は、航空機の FBW (fly-by-wire), CCV (control configured vehicle) にみられるように、多入出力系に新しい制御機構を加えて人工的に最適設計を行う技術である。このように航空機分野では様々な制御技術が生まれている。自動車は、航空機のシステムと比較にならないほど、その規模に違いがあり、運転は、パイロットのような、いわゆるプロフェッショナルが対象ではなく、付加価値にもひらきがある。したがって、航空機のアクティブ制御技術の概念をそのまま移行して考えるのは早計であるが、結果的に共通するコンセプトも少なくない。

今日の自動車の性能は車体寸法、エンジン排気量、ホイールベースやトレッド、車輻重量、タイヤのアスペクト比など、車輻のデザインパラメータによって運動性能の大筋が決まる。しかも、操縦性と安定性、振動乗心地性能の操安性、動力性能と燃費などにみられるように、種々の性能はトレードオフの関係にあるため、設計コンセプトによって性能の重みづけを変えて個々の機能の改善が行われてきた。しかし、これは設計する側の論理であって、混合交通を前提にしている自動車は、それぞれ

の車輻の大きさ、形態の違いによって性能の違いがあって当然ということにはならない。自動車を使う立場からすれば、同一平面を移動する場合に性能の差があまり大きくないことが望ましい。

スタイリング、車室内外のデザイン、快適性、そして居住性などのように、人の好みに関わるものについてはどうあっても問題にならないが、車輻応答や制御に直接関係する性能については、混合交通における安全や交通の円滑化のために、ある程度のレベルを確保していることが必要である。信号で止まって再発進する操作が面倒なために、タイミングを図りながら減速走行をしている大型トラックに象徴されるように、トラックの操作性の改善の余地は大きい。また、マイクロバスや小型トラックは、乗用車よりも車輻重量の変化が大きいだけに、性能の面からアクティブ制御技術による操安性の積極的な改良が期待されるところである。

電子制御技術は、自動車のこれまでのような機械的結合方式を断って、要求性能の指標にあわせた性能の組み立てを可能にすることであろう。たとえば、低速から高速までハンドルの重さを自由に設定でき、操舵入力に対する車輻の応答もヒューマンパフォーマンスに適応した範囲に設計することも可能となり、乗心地性能も操安性と分離して自由に設定することができるようになろう。文字どおり自動車技術のメガチェンジであり、性能の自由化である。

すでに、こうした性能の自由化への橋渡しの技術は今日の自動車に目立つようになってきた。マイコンやセンサの小型化、低コスト化の電子技術の進歩を受けて、これまで固定されていた性能が種々の走行条件にある程度適応されるようになった。その2、3の例を次にあげる。

(1) サスペンション系の電子制御

操安性と乗心地をできるだけ高次元で適合させるために、ダンパ減衰力を各種モードを設定して可変とし、エアスプリングを併用してバネ定数を制御する高度な電子制御サスペンションも実用化されている。車高調整に光学センサも使用されるようになってきている。制御演算はマイコンが一般的である。これにより、低速走行時には乗心地を重視し、悪路走行ではボトムングを防止し、高速走行時にはローリングを抑制している。また、直進性や横風安定性を改善したり、急加減速時のアンチスクォートとアンチダイブを向上している。サスペンションジオメトリを一定に保って乗車人員による操安性の変化を抑えたり、ヘッドランプの照射角を保つことも行われている。

表 2 電子制御パワーステアリングの例

名 称	セ ン サ	特 徴
3 ウェイ パワーステアリング (ブルーバード)	転舵角速度センサ 車速センサ	運転者の好みに応じて軽め(L)、普通(N)、重め(H)の3種の操舵力特性が選べる。車速と操舵角速度を検知して、急転舵時には操舵力が重くなる
プログレッシブ パワーステアリング (クラウン)	車速センサ	パワーシリンダ両室を結ぶバイパス回路に、リニア・ソレノイドバルブを設け、車速に応じて開度を変えて操舵力を制御
EPS (ギャランΣ)	車速センサ エンジン回転数	インプットシャフト先端に反力プランジャを設けて、油圧をプレッシャ・コントロールバルブで制御し、ソレノイドバルブで車速に応じて操舵力を制御
VSSS (車速感応型操舵力可変 パワーステアリング) (アスカ)	車速センサ	運転者の好みに応じて、ポジション I (重め)、II、III (軽め) の3種の操舵力特性が選べる

(2) パワステアリング系の電子制御

パワステアリングのアシスト量を自動的に制御するもので、従来はエンジン回転数を検出してパワステアリングのアシスト量を変化させていたが、最近では車速感応型が多い。このときのアシスト量の制御を電子制御によって自動的に行うもので、表2に示すように、操舵力のモードを選択可能にして運転者の好みにある程度応じられるようなシステムが実用化されている。また、車速と運転者の操舵角速度を検出して、急転舵のときは操舵力を重くするものもみられる。

(3) ブレーキ系の電子制御

自動車の運動は最終的にはタイヤと路面の摩擦によって決まる。急制動時に車輪のロックを防ぐことにより、車輛の方向安定性を確保するとともに操縦性をも保持し、制動距離についても短くしようとするものである。油圧式四輪制御方式が採用され、車速センサ、コンピュータ、そしてアクチュエータから構成されている。制御は車輪がロックする前に制動油圧を減圧させる方式をとっているため、車体速度と車輪速度の違いによるスリップ率を正確に検出することがポイントになる。現在は車体速度を車輪速度から推定しているが、将来は直接計測することも考えられる。また、路面のすべりやすさに応じた最適の制御パターンを指令するために、路面の摩擦係数を直接に計測することが今後への課題となっている。

このように2、3の例をみても、電子制御技術によって自動車の運動性能を人間の特性に適合したものに変わる

ることが着実に進行している。そして今後、さらに性能の自由化も加わり、より運転しやすく快適なものへと変わることであろう。

4. 操舵制御と四輪操舵システム

自動車の運転は交通機械のなかにあってはやさしいほかに位置づけられるであろうが、それでもかなり長い教習が要求される。運転のための手動制御は、自動車の二階積分系を対象にし、限界付近での非線形性は強いため、操舵制御はかなり面倒である。

McRuer らによって提案されたクロスオーバーモデル^{1,2)}によって、人-自動車システムの操舵制御を横運動走行試験台(図1)を用いて実車実験により調べてみると、図2のようになる。図中の λ は車輛の特性を表すもので、

$\lambda = 0$: 今日の前輪操舵方式の一般的な自動車で、いわゆる二階積分系(操舵角入力に対する車輛の位相遅れが今日の一般車と同じ)。

$\lambda = -0.46$: たとえば過積載した一般車輛に相当し、いわゆる強い二階積分系(位相遅れ $< G_{\alpha}^{\ddot{y}}$ が一般車より大きい)。

$\lambda = 1.2$: 前輪とともに後輪も切る四輪操舵車で、いわゆる一階積分系に近い(位相遅れ $< G_{\alpha}^{\ddot{y}}$ が小さい)。

$\lambda = 3.3$: さらに後輪を切る割合を増した車輛(位相遅れ $< G_{\alpha}^{\ddot{y}}$ が極めて小さい)。

一般に車輛の操舵系のゲイン特性 -40 dB/dec に対して、運転者は 20 dB/dec となり、人-自動車システムと

図 1 横運動走行試験台 (芝浦工業大学)

しては -20 dB/dec となっている。位相については、車輛の位相遅れ 180 deg に対しては運転者はそのぶんだけ遅れを補おうと位相を進めて操舵を行っている。そして、車輛の位相遅れが大きいくほど、それだけ大きく位相を進めるように努力していることがうかがえる。巨視的にみれば、クロスオーバーモデルが形成されていると判断される。

このように車輛の特性によって、運転は制御の中味が変わり、 $\lambda \leq 0$ の二階積分系の今日の車輛は、 $\lambda > 0$ の車輛に比べ、それだけ運転者に制御の負担を強いていると考えられる。理想的にはこの制御の負担を機械側が受けもつような特性をつくりだし、短時間の練習で運転技能が身につく、また、限界付近の制御がしやすく、負担が

少ないことが望ましいわけである。

(1) 四輪操舵システムの特性

ハンドルを切ったときの操舵角入力に対する車輛の横変位応答の位相遅れは、車輛の高速直進性や障害物を回避するときの性能に影響し、位相遅れを小さくすることが運転しやすいにつながるものと予測される。この位相遅れを小さくするには、四輪操舵システムが最も効果がある。

車輛運動の横運動を横加速度 $\ddot{y}$ で代表し、ヨー運動をヨー角速度 $\dot{\psi}$ で代表させる。後輪を前輪と比例的に操舵することができ、その前後輪舵角比 k (後輪実舵角/前輪実舵角) を変えることのできる車輛について、操舵角入力に対する各応答の伝達関数を求める。車輛の前後重量配

図 2 人-自動車システムのクロスオーバーモデル

分や前後輪タイヤのコーナリングパワーを等しいと置いて、ニュートラルステアの場合を考え、操舵角 α , 減衰比 ζ , 固有振動数 ω_n とすると、横加速度の伝達関数 $G_{\ddot{y}}(s)$ は

$$G_{\ddot{y}}(S) = \left[G_{\ddot{y}}(0) \right]_k \frac{1 + (1 + \lambda) T_{y1} S + (1 + \lambda) T_{y2} S^2}{1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} S + \frac{1}{\omega_n^2} S^2}$$

ただし $[G_{\ddot{y}}(0)]_k = (1 - k) G_{\ddot{y}}(0) = \eta \frac{V^2}{l}$

$$\lambda = \frac{2k}{1 - k}, \quad \eta = \frac{1}{n} (1 - k)$$

である。なお、車速 V , ホールベース l , 操舵ギヤ比 (前輪実舵角/操舵角) n , η は操舵系のゲインを増減する定数である。ヨー角速度の伝達関数 $G_{\dot{\psi}}(S)$ は、

$$G_{\dot{\psi}}(S) = [G_{\dot{\psi}}(0)]_k \frac{1 + T_{\dot{\psi}} S}{1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} S + \frac{1}{\omega_n^2} S^2}$$

ただし

$$[G_{\dot{\psi}}(0)]_k = (1 - k) G_{\dot{\psi}}(0) = \eta \frac{V}{l}$$

図 3 障害物回避実験における λ と $y-\dot{y}$ 位相平面軌跡 (sub. E)

である。前輪を操舵する今日の車輛の応答に比べると、横加速度の伝達関数の式の分子にある $T_{y1}S, T_{y2}S^2$ の項だけが、ともに λ の割合で変化する。よって n と k を適当に定めることによって λ, η を自由に変えることができる。 λ を適切に設定すれば、操舵角入力に対する車輛の横運動の位相を進めることができ、人-自動車システムの性能を著しく向上することが予測されるため、この λ を操舵応答修正係数 (steering response modificatory factor) と名づけている³⁾。

(2) 障害物回避性能の実験例

緊急に車線を変更して障害物を回避する性能を調べるために、横運動走行試験台を用いて、車輛の前方にステップ状の目標値を提示して実験を行った。その結果の一例として、 λ と $y-\dot{y}$ 位相平面軌跡を図 3 に示す。 y は車輛重心位置の横変位、 $\dot{y}$ は横移動速度を表す。車輛側の位相遅れが少なくなるほど車輛の横移動速度の立ち上りは速くなり、しかも目標に到達してからの重心位置横変位の収束は著しい。これは制御成績が大幅に改善されたことを示している。

図 4 はテストドライバ (Sub. A) から平均的運転者 (Sub. C), そして運転者 (Sub. G) にいたるまで技量の異なる運転者を対象にして実験を行い、主観的評点との関係を求めたものである。位相遅れを少なくするほど評点は高くなる。図 5 に λ と制御成績の関係を示す。制御能力のすぐれている運転者、特にテストドライバはその効果は少ないが (ただし主観的評点では著しく効果ありとしている), 初心者になるほど制御成績への効果は

図 4 障害物回避実験における λ と主観的評点 (平均値)

図5 障害物回避実験における λ と制御成績 (ITAE) の関係

図6 高速直進性実験における λ と y - $\dot{y}$ 位相平面軌跡 (sub. C, G)

著しい^{5,6)}。

(3) 高速直進性の実験例

実験は試験台を用いた場合とプルービンググラウンドでの走行実験の2種類を行ったが、いずれも同じ傾向を示している。図6は高速直進時に横力外乱0.15 Gを受けたときの進路回復の様子を位相平面軌跡で表したものである。図中のうず巻き状の軌跡が小さいほど制御成績はすぐれていることになり、 $\lambda=1.20$ 以上になるとその効果は大きい^{5,6)}。

図7は高速直進時に0.15 Gの横力外乱を不規則なタイムインターバルで作用したときの進路保持性について、主観的評価により評価したものである。

図8は生体反応によって位相遅れの影響をみるために心拍数を調べたものである。 $\lambda=1.20 \rightarrow \lambda=3.33 \rightarrow \lambda=0 \rightarrow \lambda=-0.46$ の順で、心拍数が大きくなっている。このことは制御の負担の傾向を表しているものと想像される。

図9は皮膚抵抗水準 (SRL) を捉えたものであるが、心拍数とほぼ同じ傾向を示しているものと判断される⁴⁾。

図7 高速直進性実験における λ と主観的評価点 (sub. A, C, F, G)

図8 高速直進性実験における λ と心拍数 (sub. C)

図 9 高速直進性実験における λ と SRL (sub. C).

Test A : ランダム周波数目標 C/O 0.3 Hz

Test B : ランダム周波数目標 C/O 0.1 Hz

以上のように、操舵角入力に対する車輛の横変位応答の位相遅れは、障害物回避性能や高速直進性に及ぼす影響が大きく、それは制御成績、主観的評点および生体反応においても認められ、とりわけ初心運転ほど著しいものである。操舵応答修正係数 λ を適当な値に設定した4輪操舵システムは制御のしやすさをもたらすことになる。

5. あとがき

今日の自動車は技術的にかなりのところまで熟成されたといわれるが、それはこれまでの技術コンセプトの延長線上で考えた場合であって、マン-マシン インターフ

ェースの観点からすれば、アクティブ制御などはこれからの問題である。運転者にとって重要な性能については、他のパラメータから独立して設定する技術が期待されるところであり、そのときこそ自動車の性能の自由化が達成されるであろう。

参考文献

- 1) McRuer, D. T. and Krendel, E. S. : Mathematical Models of Human Pilot Behavior, North Atlantic Treaty Organization, AGARD-AG-No. 188, Jan. 1974.
- 2) 井口雅一：人間-機械系，共立出版，1970.
- 3) 小口泰平：人-自動車系の横向加速度 応答特性に関する研究，芝浦工業大学 工学研究所報告，第19号，1982.
- 4) 澤田東一：生体反応により車両操舵特性の評価に関する研究，人間工学，19(5)，1983.
- 5) S. Sano, Y. Furukawa, Y. Oguchi, H. Nakaya : Influence of Vehicle Response Parameters on Driver Control Performance, 18th International Congress of FISITA, Hamburg, 1980.
- 6) H. Nakaya, S. Sano, Y. Furukawa, Y. Oguchi : Effects of Vehicle's Yaw and Lateral Acceleration Responses on Drivers Control Performance, 19th International Congress of FISITA, Melbourne, 1982.