

自動車の望ましい応答特性について

——四輪操舵車を用いた操安性の研究——

中谷弘能*

本稿は、人が自動車を運転する際、より制御し易い車両とするにはどんな応答特性をもつのが望ましいかについて検討している。自動車の種々の横運動応答特性のうち、特に人の操舵制御に与える影響が大きいと考えられるヨー応答特性と横向加速度応答特性をとりあげ、クローズドループの実験を行った。その結果、2つの応答特性の位相を、現在の一般市販車両よりもさらに進めると、制御性が格段に向上することが得られた。

On Desirable Response Characteristics of Vehicle

——Vehicle Control Studied with the 4 Wheel Steering Vehicle——

Hiroyoshi NAKAYA*

This paper describes desirable response characteristics to make the vehicle more controllable. Among the various lateral response characteristics, I have examined those of yaw rate and lateral acceleration which suppose to have a great influence on man's steering control, and have made an experiment on closed loop. As the result, it has been proved that controllability has remarkably improved when two phase of response characteristics were led to the higher level than those of vehicles on the market.

1. まえがき

「人車一体」という言葉がある。これは、運転者があたかも自己の体の一部のように自動車をあやつり、少しの無理や無駄もなく走行している様子を表した言葉と理解される。そこでは、単なる交通機械である車両に、乗り手が心を通わせていることがうかがわれる。

ここで思いおこされるのは、人が道具と機械とに對したときの心の持ちようの違いである。人と道具との関わりにおいては、古くから伝わる針供養などの民間行事や、最近のものでは赤坂氷川神社の包丁塚などにみられるような心の結びつきがあるように思える。これらは、道具を使いこなす人がその道具に精神的意味づけを行い、使い古した道具に感謝の気持を表す行為である。同様な意味あいのものに、平板な大石を道辻に建て、使役した馬を祀る馬頭観世音などがある。

ところが、郊外の空地などには、まだ十分使用に耐え得るであろうと思える自動車やオートバイがう

ず高く積み、無残な姿で放置されている光景をよく目にする。このように道具と機械では、人との関わりに雲泥の差があるように思える。この差は関わりの歴史の深さに起因しているものと想像され、つまりはいかに物を使いこなせるかによるものであろう。このように考えると、前述したようにすべてのドライバーが人車一体となるには、自動車の応答特性をより人の制御特性に近づけることが有効であることが理解される。

そこで本稿では、自動車の種々の横運動応答特性のうち、操縦性・安定性に最も関わりが深いと考えられるヨー応答特性と横向加速度応答特性をとりあげ、人の制御特性と照らし合わせたとき最も運転し易い車両応答特性のあり方について考察した。

2. 本研究の考え方

操舵による自動車の横運動制御を考えると、主として操縦性・安定性の面からは、ヨー応答特性(車両の重心を通る鉛直軸まわりの回頭運動特性)と、横向加速度応答特性(車両の横方向への並進運動特性)の2つが重要な意味をもつ。この2つの運動は単独では存在し得ず、必ず2つの特性が関連し合っており、自動車の横運動が成り立っている。一般市販乗

* 芝浦工業大学講師
Lecturer, Shibaura Institute of Technology
原稿受理 昭和58年10月24日

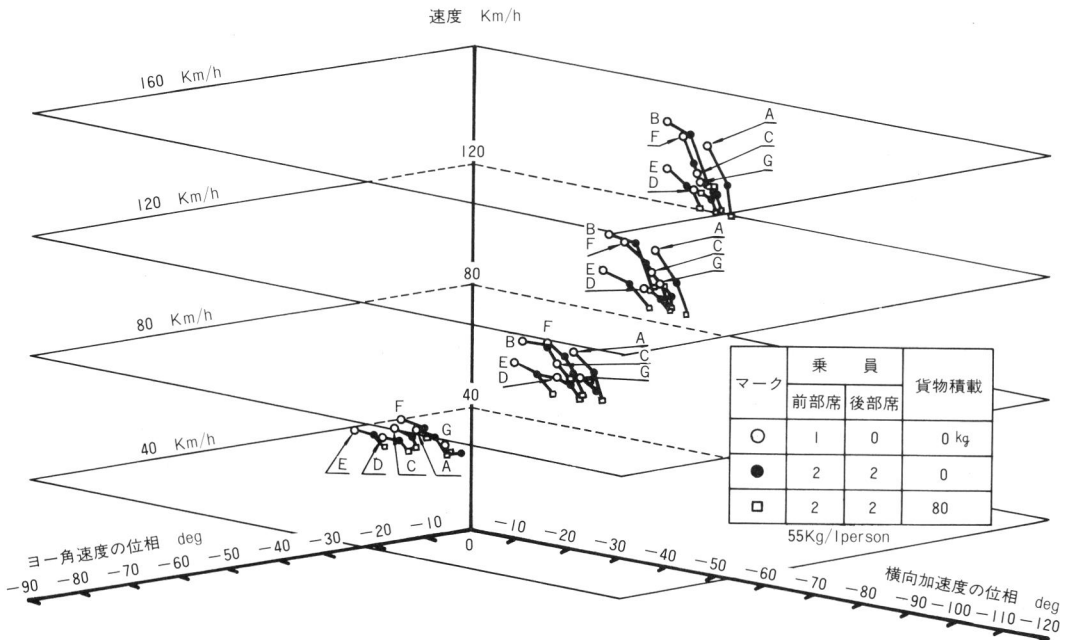


Fig. 1 ヨー角速度と横向加速度の位相の変化(A~Gは個々の車両)

**Phase transition of yaw rate and lateral acceleration
(the letter from A to G means the individual vehicle)**

用車について、その様子を示したものが Fig. 1 である。これは車速と積載荷重をパラメータとして、ヨー角速度と横向加速度の操舵角に対する位相の変化を、2 自由度数学モデルにより求めたものである。なお、操舵周波数は修正操舵時に最も頻度の多い 0.75Hz のときを示している。X、Y 軸にそれぞれヨー角速度と横向加速度の位相遅れをとり、Z 軸に車速をとっている。積載荷重は 1 名乗車、4 名乗車および 4 名乗車+後車軸上 80kg の貨物積載の 3 段階の場合を想定している。

Fig.1 より、速度の増加とともにヨー角速度および横向加速度の位相とも遅れが大となるが、特に横向加速度の位相遅れが顕著で、この傾向は積載荷重の増加とともに著しくなることがわかる。これは高速になるほど、また、積載荷重が増加するほど操舵による位置制御の遅れが大きくなることを示しており、例えば、高速道路などで横風による外乱に遭遇したときなど、修正操舵に対する車両の横運動に遅れが生じ、事故に結びつくケースなどから容易に納得できる。

ここで自動車の操舵制御は、フィードバック制御、フィードフォワード制御およびプログラム制御の 3 つを運転者が適宜選択して行っているものと考えら

れる。つまり操舵入力に対する車両の運動、すなわち出力を検出しつつ修正操舵を行い（フィードバック制御）、また、車両の運動を予想しながら操舵入力を与え（フィードフォワード制御）、一方、これまでの経験をふまえて、操舵入力の大きさを決定して（プログラム制御）運転している。このときの操舵制御の手がかりとしては、車両重心の横変位および重心まわりの回頭運動が主なものであり、この 2 つの運動の位相特性は制御性に大きく影響を及ぼすことが予想される。この点について、理論的に検討を試みたものはあるが¹⁾、クローズドループによる実証はみられない。

その後、この種の研究は少なくないが、それらはいずれも種々の応答パラメータが影響した状態で検討を加えたものが多い^{2),3),4)}。そこで本稿では、特別な実験車両を用い、次の 2 つの条件を満たすように横運動応答特性を設定した。

- 1) ヨー角速度の応答を一定とし、横向加速度の位相のみを変化させた場合。
- 2) 横向加速度の応答を一定とし、ヨー角速度の位相のみを変化させた場合。

このように設定した実験車両を用い、クローズドループの実験により、それぞれの応答特性が制御性

にどのように影響するのかを検討することにした。

実験に用いた車両は、歯車切替式の変速機を介して、前輪に比例した舵角を後輪にも与える形式の四輪操舵方式としている。実験車両の概要を Fig. 2 に示す。後輪の舵角は、後輪用変速機のギア比とイドラギアの組み合わせを選択することにより、前輪に対する舵角比および転舵方向を自由に設定することができる機構となっている。前述した1)、2)の条件を満足するよう前輪舵角に対する後輪舵角比を設定する方法は次のようになる。

条件1)を満足するには、前輪舵角に対する後輪舵角の比率を同方向に増せば増すほど横方向並進運動は操舵に対する遅れが少なくなり、転舵量を前輪と逆方向に増すほど遅れが大となる。つまり横方向加速度の位相を任意に設定することが可能となる。条件2)については、ヨー角速度の位相特性はタイヤのコーナリングパワーによって決定されるものであり、通常の前二輪操舵方式の場合、それは同時に横方向加速度の位相特性にも影響をもたらしてしまう。そこで、まずコーナリングパワーの異なるタイヤを適宜選択して、ヨー角速度の位相特性を設定した後、後輪舵角の与え方を調整して横方向加速度の位相特性を一定に保つようになっている。

次に、この点についての理論的考察について述べる。まず、操舵角 α に対する横方向加速度の伝達関数 $G_{\ddot{a}}^{\alpha}(s)$ と、ヨー角速度の伝達関数 $G_{\dot{\psi}}^{\alpha}(s)$ について検討する。通常の前二輪操舵方式の車両の場合、これらは次に示すような形となる。

$$G_{\ddot{a}}^{\alpha}(s) = G_{\ddot{a}}^{\alpha}(0) \frac{1 + T_1 S + T_2 S^2}{1 + \frac{2}{W_n} \xi S + \frac{1}{W_n^2} S^2} \dots\dots(1)$$

$$G_{\dot{\psi}}^{\alpha}(s) = G_{\dot{\psi}}^{\alpha}(0) \frac{1 + T_{\dot{\psi}} S}{1 + \frac{2}{W_n} \xi S + \frac{1}{W_n^2} S^2} \dots\dots(2)$$

この2つの応答特性は、車体横すべり角 β を介して関連し、次式で表される。

$$G_{\ddot{a}}^{\alpha}(s) = V \left\{ G_{\dot{\psi}}^{\alpha}(s) + S G_{\beta}^{\alpha}(s) \right\} \dots\dots(3)$$

このように前二輪操舵方式の車両の場合、(3)式のように横方向加速度特性はヨー角速度特性と関連し合い、個々の応答特性のみをとりだして検討することはできない。ここで、前輪に比例した舵角を後輪にも与える四輪操舵方式とすることにより、2つの応答特性を分離してとりあつかうことができる。本研究で用いた実験車両は、ニュートラルステアに設定してあるため、(2)式を保ったまま横方向加速度特性を

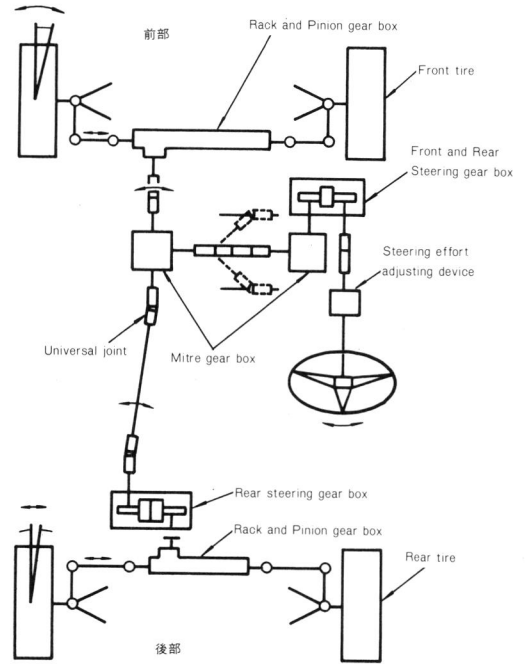


Fig. 2 四輪操舵車の基本構成
Formation of 4 wheel steering vehicle

次式のように変化させることができる。

$$G_{\ddot{a}}^{\alpha}(s) = G_{\ddot{a}}^{\alpha}(0) \frac{1 + (1 + \lambda) T_1 S + (1 + \lambda) T_2 S^2}{1 + \frac{2}{W_n} \xi S + \frac{1}{W_n^2} S^2} \dots\dots(4)$$

ただし $\lambda = \frac{2q}{1-q}$

$q =$ 後輪実舵角 / 前輪実舵角

すなわち、(4)式の分子の時定数 T_1 、 T_2 を λ の値で増減することができ、横方向加速度の位相を任意に設定することができる。また、タイヤのコーナリングパワーを変えることにより、(2)式、(4)式の $T_{\dot{\psi}}$ 、 T_1 、 T_2 、 ξ 、 W_n を可変とすることができ、これと前後輪舵角比 q を適宜選定することにより、(4)式の横方向加速度応答特性を一定に保ったまま、ヨー角速度応答特性を任意に設定することができる。

製作した実験車両には2つの車種がある。そのうちのひとつは、直径1,200mm、長さ5,000mmの2本のドラムを用いた横運動試験台⁵⁾に搭載し実験を行う目的の車両で、走路を構成するドラムは油圧モータにより駆動される形式のため、自走機能を省略した形式としている。これを1号車と呼称する。他のひとつは、プルービンググラウンド(テストコース)等での走行実験を可能とするため、自走機能を完備する形式である⁶⁾。これを2号車と呼称する。

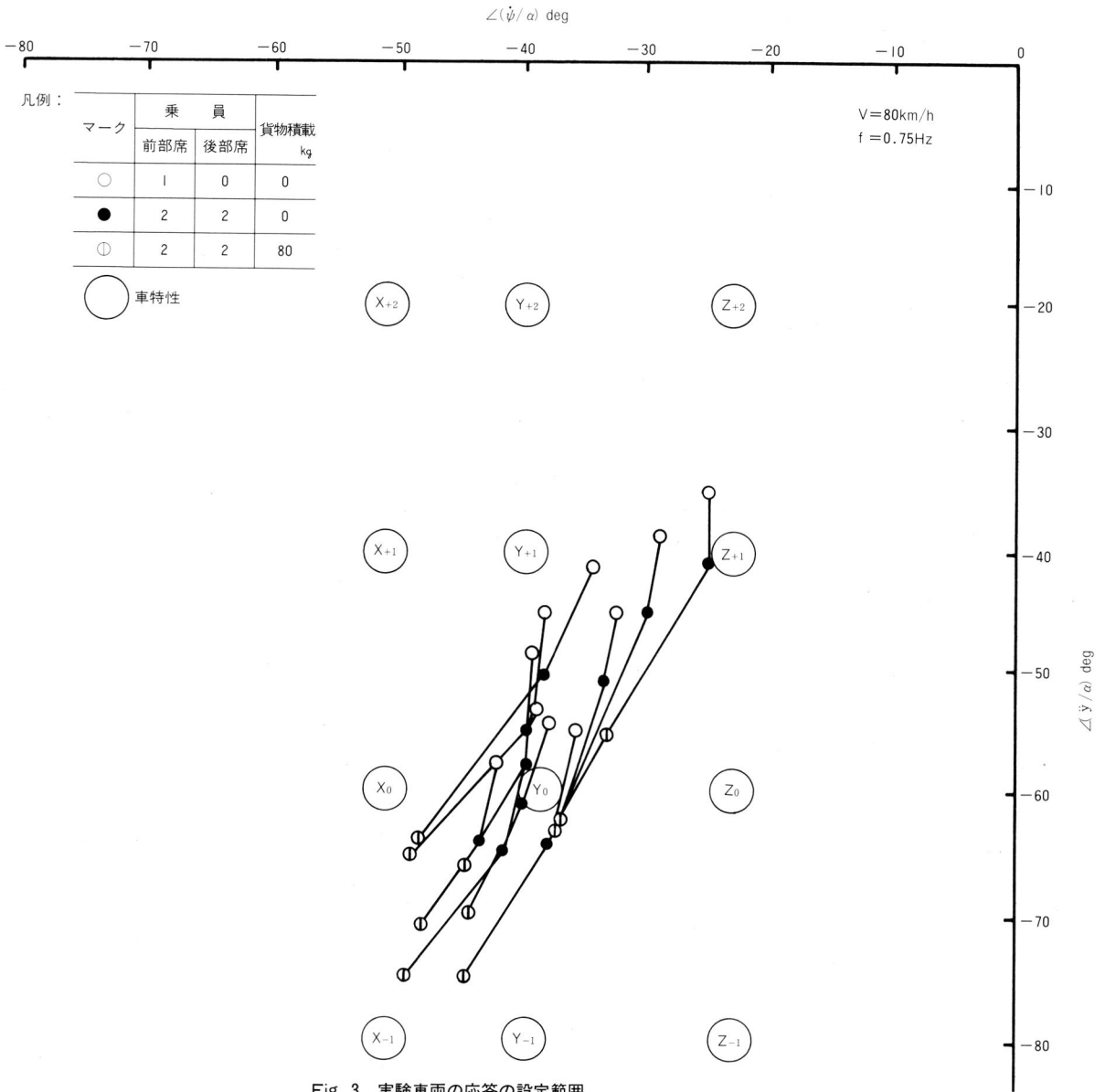


Fig. 3 実験車両の応答の設定範囲

Range of experimental vehicle's response

3. 実験および考察

3-1 実験車両の横応答特性設定値

2章で述べた条件を満足するよう、ヨー角速度と横向加速度の応答の範囲を、市販乗用車と設定した実験車両について比較したものがFig. 3である。縦軸と横軸にそれぞれ横向加速度とヨー角速度の位相遅れをとり、操舵周波数0.75Hzのときの値をプロットしたものである。設定した実験車両の特性は、

ヨー角速度の位相の遅れた仕様のものから順にX、Y、Zと呼称し、横向加速度の位相の遅れた仕様のものから順に-1、0、1、2の添字を附して表している。即ち、Y₀仕様は一般市販車の平均的な特性、Z₂はヨー角速度および横向加速度とも一般市販車よりも位相を進めた特性、X₋₁は2つの位相とも遅らせた特性を表している。

3-2 曲線路走行の性能 (コース追従試験)

この実験は、一般の曲線路を走行する際の制御性

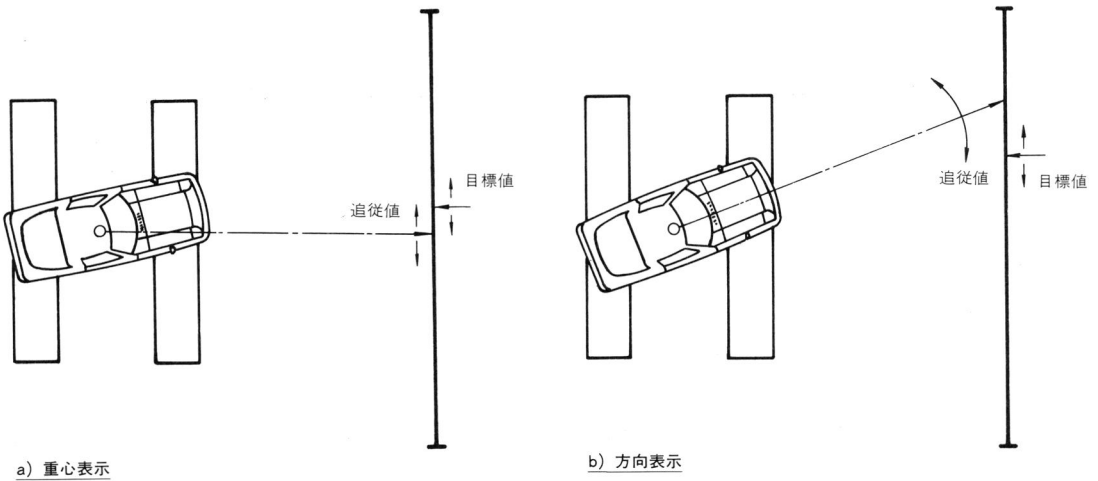


Fig.4 追従値の表示法

Indication modes of follow-up value

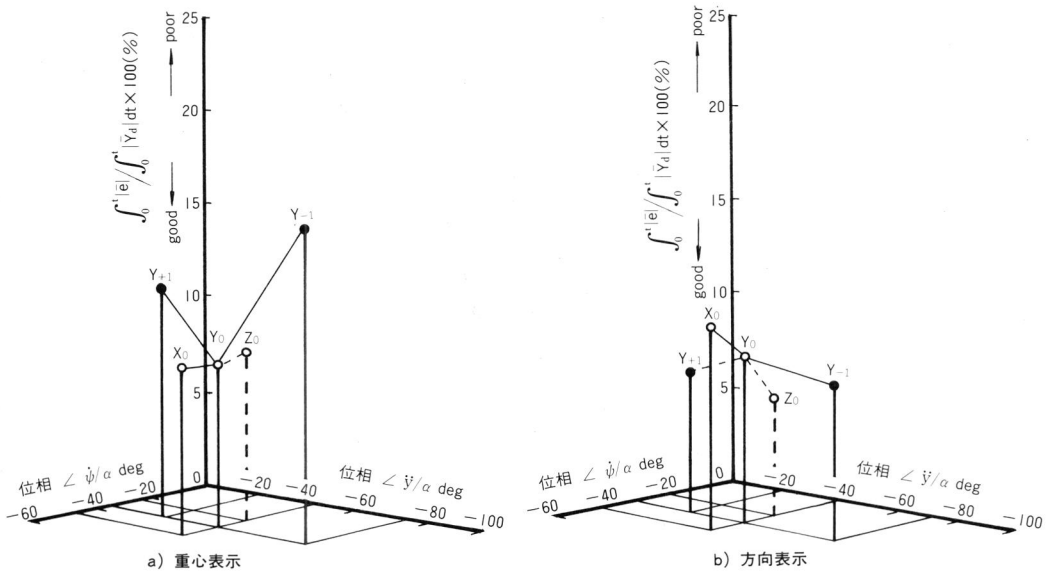


Fig.5 コース追従試験の制御成績 (被験者3名の平均)

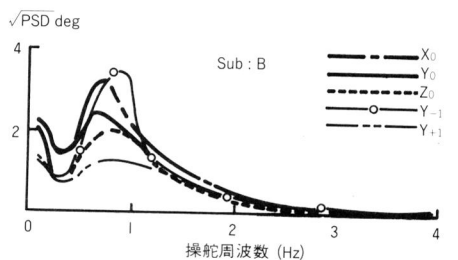
Subject's control performance in course tracking test (Average of three subjects)

について検討しようとするものである。前述の1号車を横運動試験台上に搭載し実験を行っている。

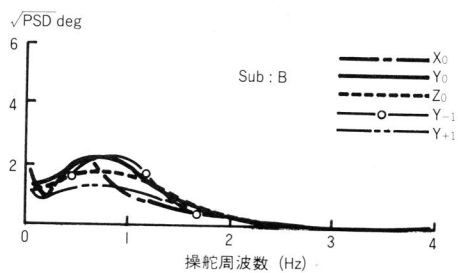
被験者は前方約8mに表示される目標値の動きに、できるだけ追従値を合わせるよう操舵制御することが義務づけられている。この実験では、目標値は0.3Hz以下のランダム周波数で横移動するため、平常運転時の曲線路走行を模擬したものと見える。追従値はFig.4に示すように、車両重心の横変位を表示する重心表示と、車体の姿勢角を表示する方向表示の2つを用いた。方向表示の場合は、車両の重

心位置とヨー方向の姿勢角の両方が合成された値が被験者への入力情報となる。被験者は初心者から熟練者を含む3名の男子で、車速は80km/hで実験を行った。

Fig.5は被験者3名の制御成績の平均値を示したものである。なお、各被験者間で制御成績には相違がみられるが、設定した各車両特性間では傾向が一致しているため、本稿では平均値のみを示した。制御成績は、制御誤差の絶対値の平均値を目標値の絶対値で除して正規化したもので表した。車両の方



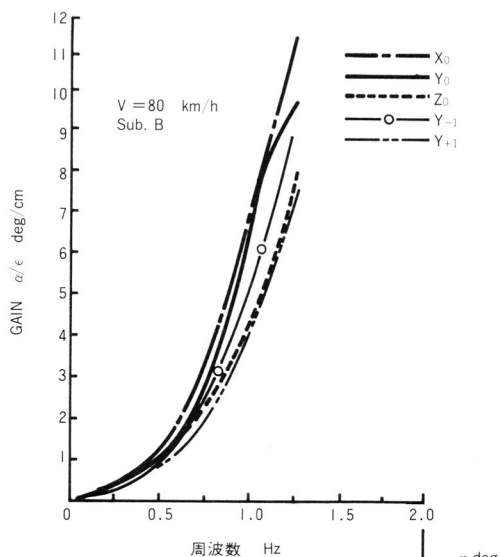
a) 重心表示



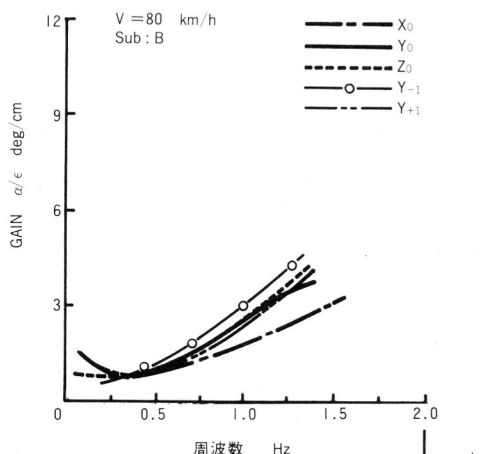
b) 方向表示

Fig. 6 操舵角のスペクトル密度

Spectral density of steering wheel angle



a) 重心表示



b) 方向表示

Fig. 7 被験者の制御応答

Subject's control response

向を表示した追従値制御の場合、ヨー角速度の位相を進めると ($X_0 \rightarrow Y_0 \rightarrow Z_0$) 制御成績はめざましく向上する。また、重心表示の場合、横向加速度の位相を進めすぎると (Y_{+1}) 制御成績は悪化する。コース追従実験についての全般的な成績は、重心表示よりも方向表示の方が良好である。

この通常の曲進走行時の運転を模擬したコース追従実験では、制御成績が良好であることと同時に、制御負担の軽いことが望ましい。Fig. 6 は制御負担について検討するため、操舵角のパワースペクトル密度 (何ヘルツの操舵頻度が多いかを表す) を、平均的被験者 B について示したものである。重心表示、方向表示とも、0.6~0.8Hz に目標値と追従値の間に生ずる誤差を補正する操舵時のピークがみられる。このピークは、横向加速度およびヨー角速度の位相を進めるほど低くなり、制御負担が低減することがわかる。また、重心表示よりも方向表示のほうがパワレベルが小さく、車両応答特性の影響も少ない。

Fig. 7 は被験者 B について、制御誤差に対する修正操舵の周波数応答特性を求めたものである。これ

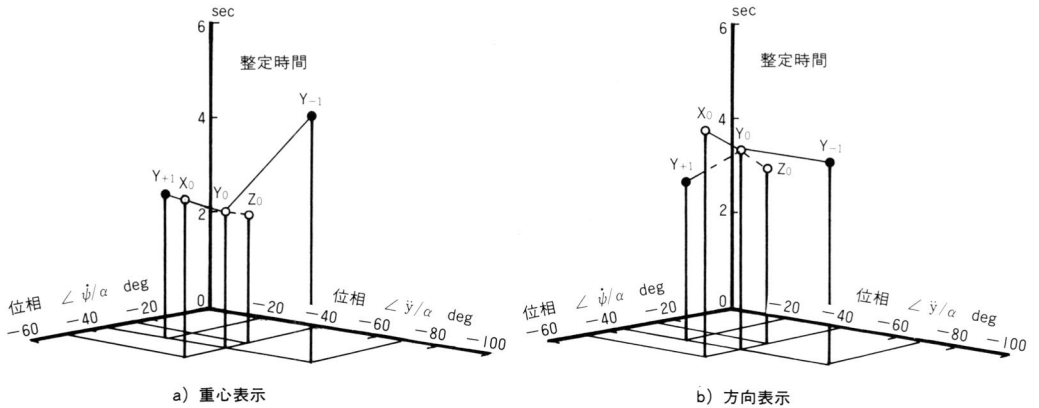


Fig. 8 緊急車線変更試験の制御成績 (被験者 3 名の平均)
 Subject's control performance in sudden lane change test (average of three subjects)

は入力情報に対する操舵の関係を知らうとするもので、被験者の伝達関数を求めることに相当する。重心表示の場合、被験者は車両の横向加速度の位相が遅れるに従い、それを補償すべく操舵の位相を進めているが、ヨー角速度の位相の違いには影響をあまりうけていない。方向表示の場合、車両特性の違いが被験者の操舵に及ぼす影響は少ない。これらは他の被験者についても同様な傾向である。以上のことから、通常の一般路走行時には制御負担を少なくするために、運転者はヨー方向の姿勢角により大きな重みづけを行っており、そのときヨー角速度の位相を進めると制御成績が向上することがわかる。

3-3 障害物回避の性能 (緊急車線変更試験)

この実験は、予期しない障害物などを緊急に回避する性能を検討しようとするもので、制御性のよいことが最優先される。前記コース追従実験と同様、横運動試験台を用い被験者 3 名について行った実験について述べる。

目標値は緊急車線変更を模擬し、最小振幅 0.5m から最大振幅 2.0m まで 0.5m とびにランダムなステップ状に動き、被験者は追従値をできるだけ速く目標値に合致させるよう操舵制御を行う。追従値は重心表示の場合と方向表示の場合の 2 つについて実験を行った。

Fig. 8 はそれぞれの表示について、追従値が目標値の振幅の ±0.1m の範囲に入るまでの整定時間 (応答が最終目標値のある範囲内に収まるまでの時間をいう。応答の速さが同じでも減衰が悪いと整定時間は長くなるから、安定度も加味した応答の速さを示す尺度となる。) を示したものである。重心表示、方向表示とも横向加速度の位相が独立に進んで

も、ヨー角速度の位相が独立に進んでも整定時間で代表させた制御成績は向上する。

この傾向は、重心表示の場合で横向加速度の位相を変化させたとき影響が最も現れ、方向表示の場合より全般に制御成績は良好である。これは前述のコース追従試験と逆の結果である。つまり、緊急車線変更時には運転者は車両の横変位に大きな重みづけを行っており、そのとき横向加速度の位相を進めると制御成績が向上することがわかる。

Fig. 9 はコース追従試験と緊急車線変更試験について、被験者が総合的に各車両応答特性に与えた主観的評価を示したものである。なお、評点は被験者 3 名の平均値である。これにより横向加速度特性とヨー角速度特性は独立して主観的評価に影響を及ぼし、ともに操舵角に対する位相が進むほど評価は向上することがわかる。

3-4 プルービング・グラウンドでの検証

横運動試験台による実験は、再現性に富みかつ運転制御の場を単純化して設定することができ、種々の外乱の影響も極力とり除くことができるなどの有為性がある。しかし、そこで得られた結果を、実走行で検証する確認実験もまた重要である。そこで、台上試験で得られた結果を、プルービング・グラウンドで検討するための実験を行った。

Fig. 10-a は、車速 80km/h で走行したとき、横向加速度が最小 0.2g から最大 0.4g 発生するランダムなクロソイド曲線を試験路に描き、それを追従したときの制御誤差面積率について、各被験者の平均値を示したものである。ヨー角速度の位相が進むと (X₊₁ → Y₊₁ → Z₊₁, X₀ → Y₀ → Z₀) 制御成績は向上するが、ヨー角速度の位相のみ進んで横向加速度の位

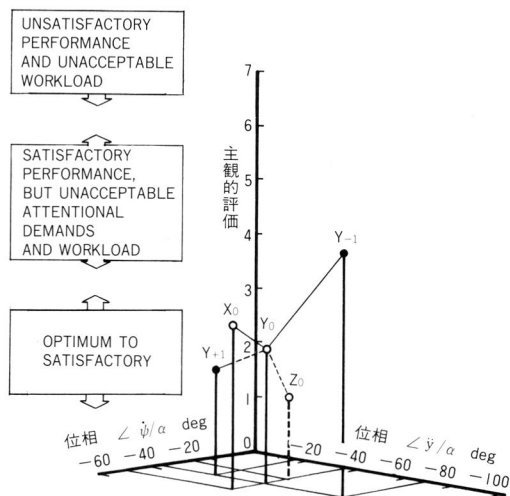


Fig. 9 総合的な主観的評価
Comprehensive subjective rating

相の遅れた車両(Z_{-1})は制御性が劣ることがわかる。

Fig.10-b)は、3.5mの緊急車線変更試験を行った結果で、車両重心位置の整定時間について各被験者の平均値を示したものである。横向加速度の位相が進むと($X_{-1} \rightarrow X_0 \rightarrow X_{+1}$, $Y_{-1} \rightarrow Y_0 \rightarrow Y_{+1}$, $Z_{-1} \rightarrow Z_0 \rightarrow Z_{+1}$)整定時間は格段に短くなり、ヨー角速度の位相を進めるにつれ、さらに制御性が向上する。両応答特性の位相を進めた Z_{+1} が最も制御成績が良く、両応答特性の位相が遅れた X_{-1} が最も制御成績が悪くなる。

3-5 考察

以上述べたクローズドループの実験結果をまとめ

ると次のようになる。

- 1) ヨー角速度の位相特性は、特に通常走行時の制御性に大きく影響する。
- 2) 横向加速度の位相特性は、特に緊急回避時の制御性に大きく影響する。
- 3) ヨー角速度と横向加速度の両者の位相を進めると、制御性が格段に向上する。
- 4) ヨー角速度と横向加速度の位相のうち、一方のみを進めた場合には制御性は悪化する。
- 5) ヨー角速度と横向加速度の位相を進めるほど制御性が向上するが、それは運転に不慣れな被験者ほど顕著である。

これらのことから、ヨー角速度と横向加速度の位相特性は独立にクローズドループの制御性に影響を与え、また、2つの位相を同時に進めた場合、著しい相剩効果を現すことがわかった。

ヨー角速度の位相特性は通常運転時の操舵制御の際、手がかりとして重要な意味をもち、その位相を進めることにより運転時の負担を軽くし、制御成績も向上する。横向加速度の位相特性は、特に緊急操舵時の制御性に深くかかわりをもっていることが知られ、位相を進めたときの制御成績の向上は運転に不慣れな者ほどその効果が大きい。一方、横向加速度の位相を進めすぎると、一般市販車両の応答特性に習熟しすぎた者には、制御成績に若干の低下をもたらすことも知られた。しかし、これはいわゆる「慣れすぎ」のなせるものであり、未熟練者への寄与度を考えあわせれば、有為性ははかり知れないものと思われる^{7),8),9)}。

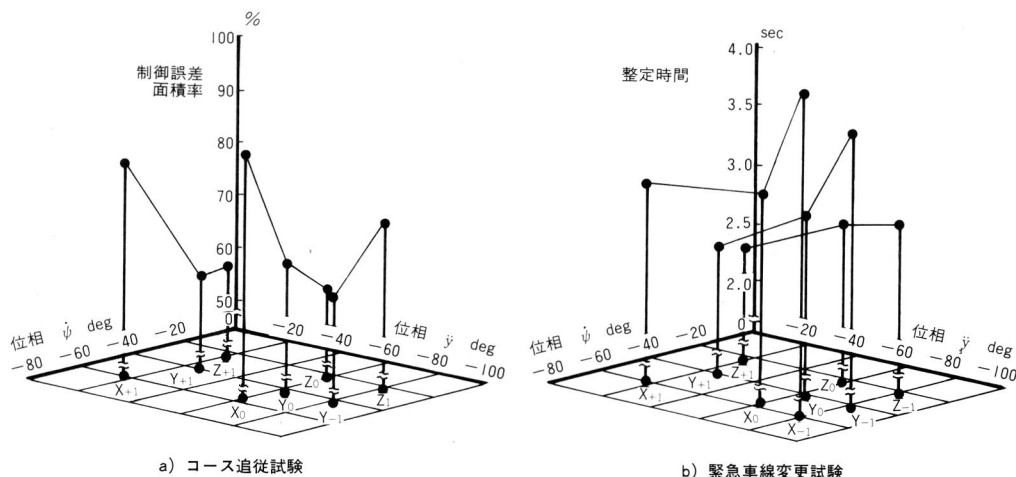


Fig. 10 プルービンググラウンドでの実験結果
Result of Proving Ground Test

4. あとがき

現在の自動車の操縦性・安定性は、ほぼ満足のいく性能にまで到達しているといえるが、さらに向上させるべくタイヤ、サスペンション、操縦系統の開発がなされている。例えば、グリップが良くしかも耐摩耗性の高いコンパウンド、全天候用トレッドパターン、乗心地や接地性が良くアライメント変化の少ないステアリングシステム等々である。しかし、それらは新たな発想に基づく開発というよりも、膨大なコンポーネントの組み合わせの中から、いかに組み合わせの妙を得て性能向上を図っていくかが主になっているように思える。

さて、本稿で述べたいいくつかの実験により得られた結論を具現する、より人の制御特性に合致した応答性をもつ車両、即ち「人車一体」となれる自動車とはいかなるものであろうか。ひとつには、ヨー角速度の位相を現在の車両よりもさらに進めることである。それには、車両重量の徹底した軽量化と、高いコーナリングパワーをもつタイヤの開発が望まれる。

もうひとつには、横向加速度の位相をさらに進めることがあげられる。通常の前二輪操舵車の場合、前輪が転舵された後ヨー角が生じてはじめて後輪に横すべり角が生じ、コーナリングパワーが発生するため、横向加速度の位相を進めることは容易ではない。これを解決するひとつの方策として四輪操舵方式の車両がある。これまで、特殊な使用目的の車両を除いて、操向を司どるのは前輪のみにまかされてきた。それは多分に馬車の時代からのなごりであり、馬の代わりにエンジンが動力源となり飛躍的に走行性能が向上した現在、積極的に後輪も操向に関与するシステムも一顧の余地あるものとする。

おわりに、本稿における基礎研究は、芝浦工業大学小口泰平教授ならびに本田技術研究所佐野彰一主任研究員、古川修研究員との共同研究であることを記し、あわせてご援助をいただいた諸氏に深く感謝いたします。

[記号凡例]

α 操舵角 ψ ヨー角

$\dot{\psi}$ ヨー角速度 y 横変位

\dot{y} 横向速度 \ddot{y} 横向加速度

β 車体横すべり角 V 車速

$G_{\alpha}^y(S)$ 操舵角に対する横向加速度の伝達関数

$G_{\dot{\psi}}^y(S)$ 操舵角に対するヨー角速度の伝達関数

$G_{\alpha}^{\dot{\psi}}(S)$ 操舵角に対する車体横すべり角の伝達関数

$G_{\alpha}^y(O)$ 操舵角に対する横向加速度応答の定常ゲイン

$G_{\dot{\psi}}^y(O)$ 操舵角に対するヨー角速度応答の定常ゲイン

T_1, T_2 横向加速度応答の時定数

$T_{\dot{\psi}}$ ヨー角速度応答の時定数

ξ 減衰係数

W_n 固有振動数

参考文献

- 1) 岡田, 高木: 自動車の操縦性安定性について, 自動車技術, Vol. 18, No. 3, 1964
- 2) Weir, D. H. & McRuer, D. T.: Measurement and Interpretation of Driver Steering Behavior and Performance, SAE paper 730098 (1973)
- 3) Linke, W., Richter, B., Schmidt, R.: Simulation and Measurement of Driver-Vehicle Handling Performance, SAE paper 730489 (1973)
- 4) Repa, B. S. & Wierwille, W. W.: Driver Performance in Controlling a Driving Simulator with Varying Vehicle Response Characteristics, SAE paper 760779 (1976)
- 5) Oguchi, Y., Nakaya, H., Sawada, T.: Experimentally Constructed Lateral Motion Simulator and Its Characteristics in Man-Vehicle System, 16th International Congress of FISITA, Tokyo, 1976
- 6) 中谷: 四輪操舵車の操縦性・安全性に関する研究, 芝浦工業大学研究報告理工系編, 第26巻, 第1号, 1982
- 7) Oguchi, Y., Nakaya, H., Sano, S., Furukawa, Y.: Influence of Vehicle Response Parameters on Driver Control Performance, 18th International Congress of FISITA, Hamburg, 1980
- 8) 小口: 人一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
- 9) Nakaya, H., Sano, S., Furukawa, Y., Oguchi, Y.: Effects of Vehicles' Yaw and Lateral Acceleration Responses on Drivers control Performance, 19th International Congress of FISITA, Melbourne, 1982