

# 自動車 の 運 動 力 学

藤井 澄二・井口 雅一

運転者により操縦された自動車の運動特性は、自動車の運動力学的特性と、運転者の動作特性とから組み立てられる。そこでまずオーバ・ステアリング、アンダ・ステアリングで表現される自動車の静力学的特性から、さらに手放し走行などを含む動力学的特性を解説し、ついで運転者の操縦が加えられた自動車の運動特性へと論議を進め、最後に自動車の研究と平衡した運転者の研究の必要性を述べる。理解の助けとするためにアナログ計算機による計算曲線例を示す。

## 1. ま え が き

自動車は各速度において安定に走行し得、かつ想定されたコースにできるだけ忠実に追従し得るものであることがのぞましい。ところで実際には速度を増すにしたがって定められたコースに追従して安定に走行することがしだいに困難になってくるのが認められるし、またいちじるしい曲線路や悪路では良い追従性を保ち得る速度はかなり低いものとなってくる。自動車というものは運転者によって操縦されてはじめて目的にかなう運動をするものであるから、このような安定性および追従性は制御対象である自動車自体の特性とそれを制御する運転者の特性との両方によってきまってくる。通常の自動制御系であると、安定性や追従性の悪い場合、制御対象の方はそのままにして、制御装置に手を加えて高度の演算を行ない得るものにし、全体の系の特性を改善することができる。しかし操縦された自動車のような人と自動車とから構成される系では、制御の主体である人間に高級な制御動作を要求することは、運転に必要な熟練度および緊張が増すことを意味する。また場合によっては、安定性および追従性を維持するために制御者である人間に要求される制御動作が人間の達し得る限界を越えてしまうことも考えられる。したがって全体の系の特性の改善は、この場合には制御対象である自動車の特性の改善によってなされるべきであろう。操縦された自動車の運動に関する理論をあきらかにして、このような運転者の高度の熟練と過度の緊張とを要することなしに、所望のコースに良く追従して安定に操縦され得るような自動車を計画するための資料を提供することは、自動車の運動力学の目標であるといえよう。

操縦された自動車の挙動を知るためには、自動車自体の特性と運転者の特性との両方があきらかにされなければならない。この前者は従来の自動車の運動力学としてかなりよく研究されてきている。すなわち自動車の運動を決定する外力を与える最も重要な要素であるタイヤの性質の研究を基礎とし、ハンドル固定、ハンドル自由、その他の場合について自動車の運動に関する多くの研究が発表されている。後者の運転者に関する研究はこれに

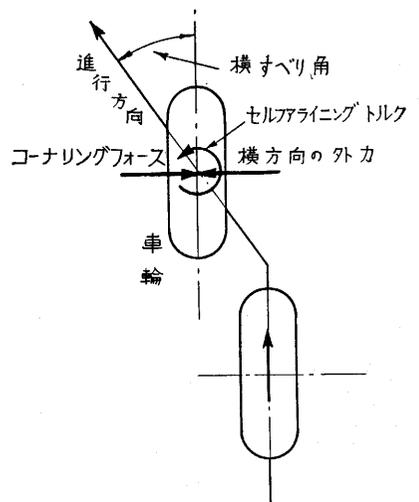
比較すると歴史は新しいが、まず仮定的なものから始まり、最近では実験的な研究もいくらか行なわれるようになって、すこしずつ成果をあげつつある。さらに操縦された自動車の挙動を調べることも試みられるようになってきた。これらの研究の結果として今日われわれの持っている知識はまだはなはだ不完全で、今後研究すべきことも多いが、ここに総合的に紹介してこの方面に関心を持たれる方々の参考になりたいと思う。

## 2. タイヤの力学的性質

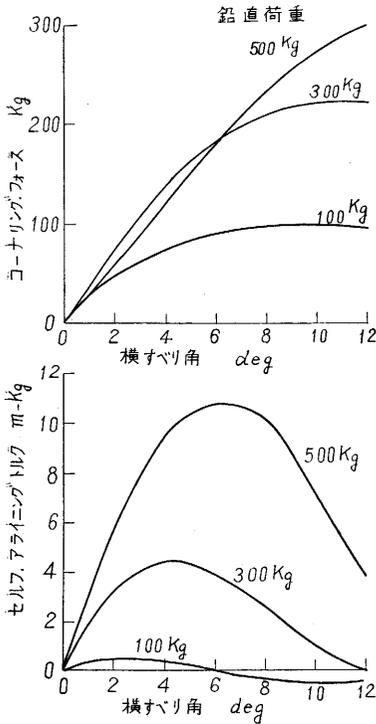
自動車の運動力学が体系的に研究され始めたのは、自動車と路面との接触部であるタイヤの力学的性質が Evans<sup>1)</sup>, Gough<sup>2)</sup>, Fiala<sup>3)</sup> らによってあきらかにされてきてからである。それまでは Ackermann Steering System<sup>4)</sup> にみられるような自動車の運動の幾何学的性質について研究がなされていたに過ぎなかった。その後もタイヤの力学的性質は多くの人々によって研究されてきたが、わが国でも斎藤<sup>5)</sup>, 入谷<sup>6)</sup>, 光成<sup>7)</sup> らによって取り上げられ、その研究結果は自動車の運動力学の基礎として有用な資料を提供すると同時に、自動車前車輪系の起こす不快な振動現象の解明に役立っている。

路面に直角に置かれたタイヤが鉛直荷重を受けながらタイヤの面と同じ方向にころがる場合には、

進行方向と逆向きのころがり抵抗力を発生するだけである。ところがタイヤに



第1図 コーナリング・フォースとセルフアライニング・トルク



第 2 図 コーナリング・フォース、セルフアラライニング・トルクと横すべり角との関係<sup>8)</sup>

ふつうは一致しないために、セルフアラライニング・トルクとよばれる反力モーメントが生ずる。これらの反力および反力モーメントとすべり角との関係は自動車の運動特性を左右する重要な因子である。第 2 図<sup>8)</sup>はコーナリング・フォース、およびセルフアラライニング・トルクとすべり角との関係を示す 1 例である。

タイヤの力学的研究の結果は自動車の運動力学を理論的に取り扱うことを可能にした。わが国では近藤<sup>9)</sup>によって操縦されない場合およびある仮定された操縦を加えた場合の自動車の運動がはじめて体系的に研究され、その後 菊地<sup>10)</sup>などによって自動制御で用いられる手法を取り入れた研究が進められた。国外でははじめゼネラル・モーターズの研究者により操縦されない自動車についての研究が行なわれ<sup>11)</sup>、その後 Segel<sup>12)</sup>, Whitcomb<sup>13)</sup>, Milliken<sup>13)</sup> そのほか多くの研究者がこれをさらに発展させた。

### 3. 自動車の定常走行における静力学的特性

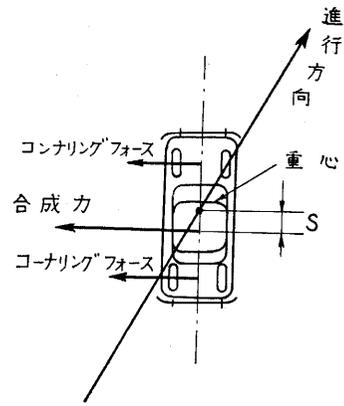
前にのべたように、タイヤには横方向の力が加えられると横すべりを起こす性質があるため、自動車の描く走行軌跡は自動車のかじ取機構から定まる幾何学的な軌跡とかなり異なってくる。たとえば自動車がある一定の速度で定常的な円旋回をしている際に描く円軌跡の半径は、自動車の運動特性に応じて、ハンドル回転角から幾

を加えると、タイヤはその力に押されてすべり、タイヤの面と進行方向との間にすべり角とよばれる角度をもつようになる(第 1 図参照)。この横すべりの結果、タイヤは加えられた横方向の力に抗する反力を路面から受けることになる。この反力はコーナリング・フォースとよばれる。反力の着重点が車輪の対称軸と

何学的に計算した値よりも大きくなったりあるいは小さくなったりする。このような定常走行における力学的特性を総合的に表現した言葉のひとつにアンダ・ステアリングとオーバ・ステアリングとがある。またスタティック・マージンという概念を使う研究者もある<sup>12)</sup>。

アンダ・ステアリングとは、ハンドルを固定した状態で自動車の重心に横方向の力が加えられると、自動車はその先端を力に押し流される方向に向けてしまう性質をいう。だからそれまでの進路を保持するためには、ハンドルを力の加えられる方向に中立位置からいくらかまわさなければならない。この性質は、定速度で定常的な円旋回をする際の旋回半径が、幾何学的に期待される径よりも大きくなる性質であるといってもよい。オーバ・ステアリングはこの逆の現象をいい表わす。

スタティック・マージンは同じことを別の観点から表現した言葉であって、この概念は古くから航空機の運動特性の表現に用いられている。これを説明するために、かりに自動車の前車輪と後車輪とを同じすべり



第 3 図 スタティック・マージン

たとしよう(第 3 図参照)。すると前車輪、後車輪にはそれぞれ各自のタイヤの性質その他によって定まるコーナリング・フォースが加わるようになるが、この前、後車輪コーナリング・フォースの合力の作用線は一般には自動車の重心点を通らない。重心点からこの作用線までの距離の軸距に対する比率をスタティック・マージンというのである。ただし慣習的に作用線が重心位置よりも後方にくる場合に正の符号をつけている。したがってスタティック・マージンが正であるということはアンダ・ステアリングの性質をもつことと同じ意味であるが、その程度を定量的に表現することができる。

アンダ・ステアリング、オーバ・ステアリングを決定する要因の第一は前後タイヤに関係する諸項目である。重心位置を前方に移すほど、前車輪タイヤの空気圧を低くするほどアンダ・ステアリングの性質が強められるといわれる<sup>14)</sup>。このほかにもかじ取装置の特性<sup>15)</sup>、前車輪のアライメント、前後車輪の支持機構、推進力、制動力など多くの因子が関係する。これらの因子については近藤の論文で検討が行なわれている<sup>14)</sup>。また自動車に加わる横方向力が大きくなるに従って、タイヤのコーナリング・フォース対すべり角特性の持つ非線形性も無視する

ことができなくなる。横方向の小さな外力に対してはアンダ・ステアリングの性質を示す自動車が、ある大きさ以上の外力に対してはオーバ・ステアリングの特性を示すようになることも多い。この現象をタイヤの特性から予想する方法は藤井、喜山の論文<sup>16)</sup>にのべられている。

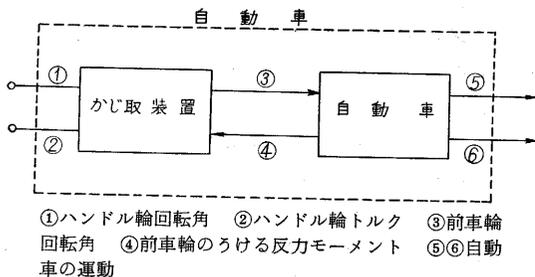
さて運転者にとってオーバ・ステアリングとアンダ・ステアリングとのどちらが望ましいのであろうか。あるいはどのくらいのスタティック・マージンを持たせたらよいのであろうか。この問いに対するはっきりとした解答はまだ与えられていない。オーバ・ステアリング、アンダ・ステアリングという性質は自動車の操縦性、安定性を決定する重要な一因子ではあるが、自動車の定常特性を表現したものにすぎず、解答はさらに多くの動的特性を受けつ因子との関連において定められるものであろう。しかしこれまでのところでは、普通の自動車では弱いアンダ・ステアリングの特性をもたせるのが経験的に望ましいといわれている<sup>14)</sup>。

4. 自動車の動力的特性

静力学的特性がアンダ・ステアリング、オーバ・ステアリングあるいはスタティック・マージンという用語で巧みに表現されているのに対し、動力的特性を要領よく総合的にあらわす要因はまだみつけれられていない。

動力的特性を調べるためにふつうまず自動車車体をひとつの剛体とみて、各自由度ごとの微分方程式がたてられる。厳密な解析を行なおうとすれば、自動車を剛体とみての6自由度の運動、それにかじ取装置の運動、ばね下系とよばれる部分の運動などすべてが考慮されなければならないが、すべてを含めるとかなり式が複雑となり見通しが困難となるので、自由度をへらし簡略化して取り扱われることが多い。

幾重にも干渉し合った変数を含む系の問題を取り扱う際に、これを微分方程式のまま取り扱うよりも変数間の関係を図で表示しながら解析を進めた方が考えやすいことがある。そこで自動車およびそのかじ取装置との関係を第4図で表わすこととする。ブロックを結ぶ横の実



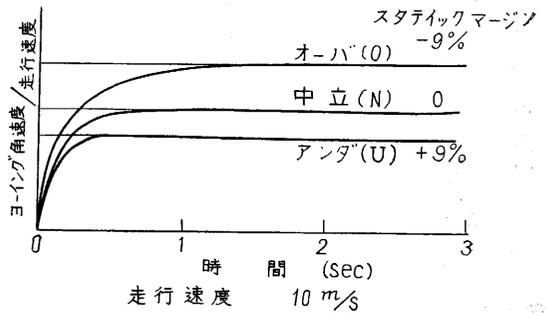
第4図 自動車とかじ取装置との関係

線は変数の流れを表わし、ブロックはそれら変数間の関係を代表している。必要があればその中に変数相互間の

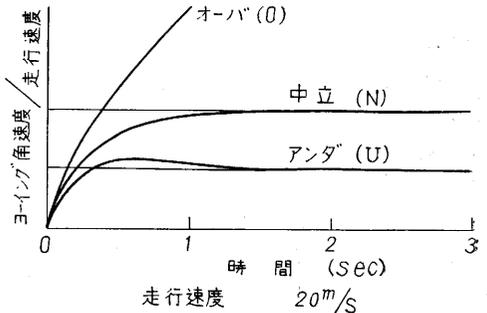
関係式を記入する。

自動車の動力的特性の研究を行なう際に、自動車のとりうる両極端の状態として、前輪固定の場合の特性と前輪自由の場合の特性とが良く検討される。第4図でいえば前車輪固定は④の変数の値いかにかわらず③の変数を強制的にある値に固定してしまうことに相当し、したがってかじ取装置は運動を起こさずその特性は自動車の運動に何も影響を与えない。これに対して、前車輪自由の場合は①、②のみを解放の状態に置き、ほかは結ばれているから、かじ取装置の特性は自動車の運動と無関係でなくなる。

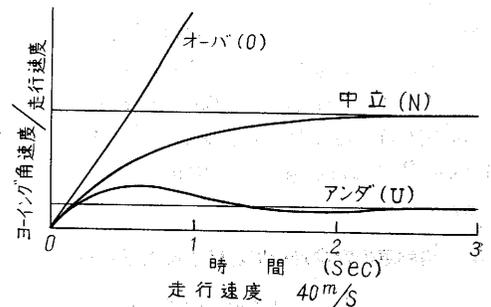
まず前車輪固定の場合から調べてみよう。第5図から第7図までは、あるオーバ・ステアリング、アンダ・ス



第5図 円旋回への進入 (1)



第6図 円旋回への進入 (2)



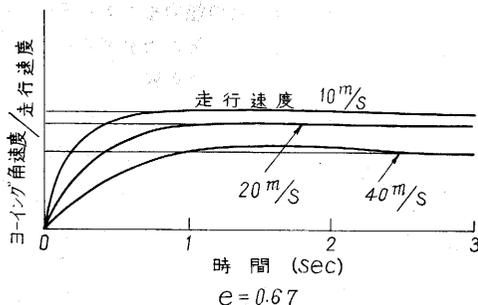
第7図 円旋回への進入 (3)

テアリング、それと中立の性質を持ったそれぞれの自動車が直線走行中、とつぜん前車輪をある同じ角度だけ回転させその角度に固定してしまった際の挙動をアナログ

・コンピュータを利用して調べたもので\*〔付録参照〕、定常的な円旋回に入るまでの過渡的な様子が示されている。縦軸には自動車のヨーイング角速度を取っている。この値がある一定値に落ち着いたということは定常的な円旋回に入ってしまったことを表わすものである。この計算では自動車の走行速度は常に与えられた一定値を維持しているものとしたから、ヨーイング角速度が大きくなるほど旋回半径が小さくなることになる。したがってオーバ・ステアリングの自動車が走行速度 20 m/s, 40 m/s でヨーイング角速度がいくらかでも大きくなってしまふということは、旋回半径が一定値に落ち着くことなく限りなく小さくなってしまふことを意味する。こうなるのはこの自動車が速度 19.5 m/s 以上で動力学的に不安定な特性を持っているためである。

第 5 図から第 7 図までを比較してみると、同じ自動車であっても、走行速度が増加するに従い大きな挙動の変化が生ずることがわかる。つまり高速度走行となるほど転舵してから定常的な円旋回に入るまでの時間遅れが大きくなる。この性質は空気タイヤをつけた自動車には必ず伴うものであって、高速度になるほど定められたコースに自動車を追従させるのが困難となる一つの原因となっている。しかし同じ走行速度状態で示す遅れの程度が自動車の特性によりかなり差があることは図を見ても認めることができ、それを決める要因はかなり設計者の手に残されていることが推察される。

これまでは自動車前車輪の回転角を固定してしまつて考えを進めてきた。そのためにかじ取装置のもつ特性は自動車の運動特性とまったく無関係になったわけである。このことはハンドル輪と前車輪との間にかじ取装置に弾性がなく完全に剛であるなら、ハンドル輪を固定したとしても同じ結果となる。しかしハンドル輪固定の場合にかじ取装置に弾性があると、この影響が自動車の運動に現われてくる<sup>15)</sup>。それはかじ取装置に弾性があると、前車輪が路面からキング・ピンまわりに受ける反力モーメントのためにすべり角を減少させる方向にまわされ、その結果コーナリング・フォースが減少してしまう。そのため見かけ上前車輪タイヤのコーナリング・バ



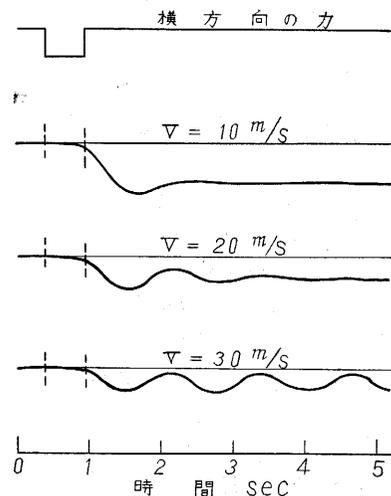
e は操だ系の弾性を示す定数  
第 8 図 かじ取装置の弾性の影響

ワを減じたのと同じことになり、スタティック・マージンが増加する傾向となる。いいかえればオーバ・ステアリングの性質をもつ自動車は中立あるいはアンダ・ステアリングの性質に近づき、アンダ・ステアリングの自動車ではその性質がさらに強まる。第 8 図は 5~7 図の前車輪を固定した際の計算でオーバ・ステアリングの性質を示した自動車のかじ取装置に弾性をもたせ、こんどはハンドル輪を固定した場合の運動を示した。前車輪固定の場合に 20 m/s, 40 m/s の走行速度でみせたような動的な不安定の特性は取り除かれて、弱いアンダ・ステアリングの特性があらわれている。

つぎにかじ取装置を自由にした、つまり手放し状態での自動車の運動を見てみよう。この場合には、前車輪タイヤのすべり角に応じて生ずる路面からの反力モーメントがかじ取装置に大きな回転運動を起こさせる。そしてこの回転角の変化が自動車に新たな運動を起こさせることになる。自動車の運動にかじ取装置の運動が加わると、前車輪を固定した場合よりもさらに複雑な運動特性をもつようになる。そこでここでもアナログ・コンピュータによる計算例をあげて理解の助けとしたい。

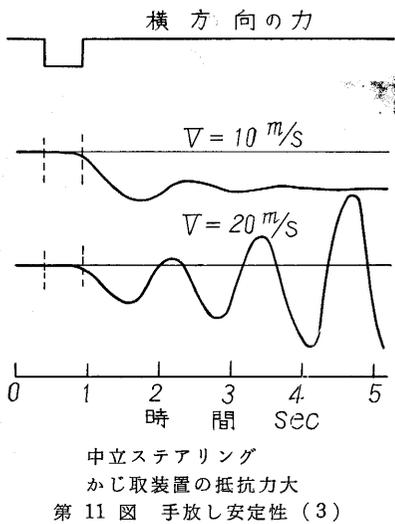
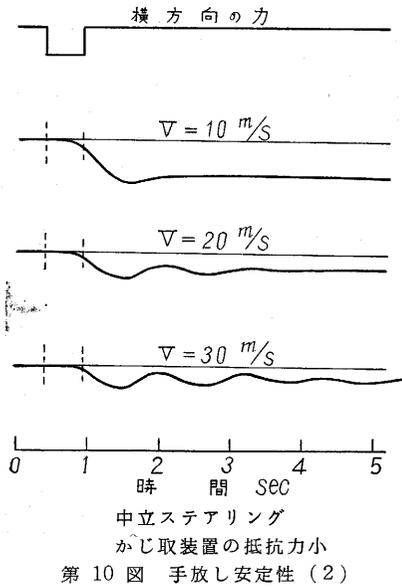
第 9 図から第 11 図までは、直線走行中の自動車がその重心にある短い時間だけ横方向の外力を受けた場合の運動を示したものである。運動はヨーイング角度であらわしている。だから横方向の外力を受けた後、ヨーイング角度がふたたび別の一定値に落ち着いたということは、力を受ける前とは別の方向の直線走行を行なうことを意味している。

第 9 図はオーバ・ステアリングの自動車の前車輪を自由とした場合の運動である。ただしかじ取装置の質量、抵抗などは無視してある。この自動車は前車輪固定の場



オーバ・ステアリング  
かじ取装置の抵抗力 = 0

第 9 図 手放し安定性 (1)



合に 19.5 m/s 以上の走行速度で動的不安定となる性質を示したのであるが、その際みられた種類の不安定現象はここでは見られなくなっている。前に、オーバ・ステアリングとは前車輪を固定した状態で重心に横向きの外力を加えると、自動車の先端を力に押し流される方向とは逆の向きにふり向けるような特性であるとのべたが、かじ自由の場合にはアンダ・ステアリングの自動車に似て、力に押し流される向きに新たな走行を続けるようになる。

第10図は中立ステアリングの自動車に対して、かじ取装置の慣性能率と粘性抵抗係数とを考慮して計算した結果である。第 11 図は慣性能率と粘性抵抗係数との値を10図の場合の2倍に選んである。これらの図をみると、高速度になるほど振動の減衰の度合は次第に悪くなり、かじ取装置の慣性能率、粘性抵抗が過度に大きいとある速

度以上で振動が成長することもありうる事がわかる。

運転者に操縦され、運転者の手によってハンドル輪が握られている状態は、ハンドルを固定した場合ともまた自由にした場合とも異なる。いずれにせよかじ取装置の特性が自動車の運動特性に及ぼす影響を見すごすことはできないように思われる。

### 5. 操縦された自動車の運動力学

前にものべたように、自動車の目的は運転者により操縦されて所定のコースに忠実に追従して走行するという事である。そこで自動車の研究者が明らかにしたいと望んでいることがらの一つは、所定のコースを忠実に追従しうるためには、操縦された自動車の運動特性がどのようであれば良いのかということである。またこのことは道路設計者の立場からいえば、自動車を希望する速度で安全に走行させるにはコースの性質をどのように定めるべきかといいかえられる。

操縦された自動車の運動特性は、自動車の運動特性と運転者の動作特性とから組み立てられる。運転者の動作特性はほかの機械と比べて非常に高級なもので、それを完全に知ることはとてもできないであろう。しかし自動車の操縦のような種類の動作に関してはいくらか研究の手がかりがつかめつつある<sup>17)</sup>。その一つは運転者の動作を微分方程式で近似して表現しようとするものであって、いくらか成功を収めている。

一般に人間の動作研究の困難な点の一つは、たとえ自動車の運転のような特別なものに限るにせよ、その動作の規則性が広く変化することにある。たとえば人は優れた適応性をもっているので、一人の運転者についてみてもその動作が自動車の種類により、その走行速度により、追従するコースの性質により、また経験量の程度により常に変化する。この変化は、もし運転者に努力がなされるならば、操縦された自動車の運動特性をその能力の限界内でできるだけ優れたものにしようとする方向になされる<sup>17)</sup>。それゆえ操縦性の悪い自動車でも、また安定性の欠ける自動車でも、一応安全に路上を走行することができる。もちろん、運転者の能力をこえる要求がなされる場合もないとはいえない。そこでまず運転者の能力を最大限に発揮させた場合にその限界がどこにあるのかが運転者の特性として問題となる。自動車を安全に走行させるためにはいかなる条件のもとでも運転者にこの限界を越えた要求をしないようにしなければならない。そのつぎの段階としては、運転者が長時間持続できないような過度の緊張をしないで済むような動作内容を明らかにしたい。自動車の操縦に際しもしこの範囲を越えるような要求が運転者になされている場合があったならば、越えたぶんは自動車の運動特性を改善することによって補い、すくなくとも長時間の持続が必要な動作に対

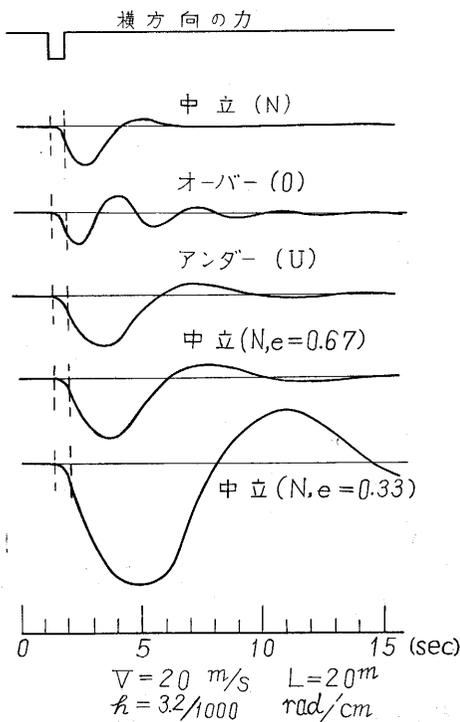
しては運転者に過度の緊張を強くないもののみとしておくことがのぞましい。ところで他方、人間の生理学的研究によると、人間への刺激が過度にすくない状態では人間の緊張が極度に低下してしまうといわれる<sup>18)</sup>。そこで運転者の動作の研究がさらに進めば、運転者を過度の緊張から解放するばかりでなく、自動車の安全な走行に必要な適度の緊張を楽に維持することができるような方法も研究しなければならないであろう。

自動車の操縦のような種類の動作に対する人間の動作能力の限界、および過度の緊張を必要としない動作の内容についていままでにほぼ明らかにされていることはつぎの通りである。(1) 人間の目に与えられる自動車の運動に関する資料の変化の加速度を算出して、それをハンドル操作の考慮に加えることはふつうは困難である。(2) 人間に過度の緊張を強いることなく行ないうる動作は、資料の大きさに比例したハンドル操作を行なうことで、しかも資料が目と与えられてから手を動かすまでにあるわずかな時間の遅れが許される動作である。なお資料の変化速度をいくぶん考慮に入れることも困難でない。

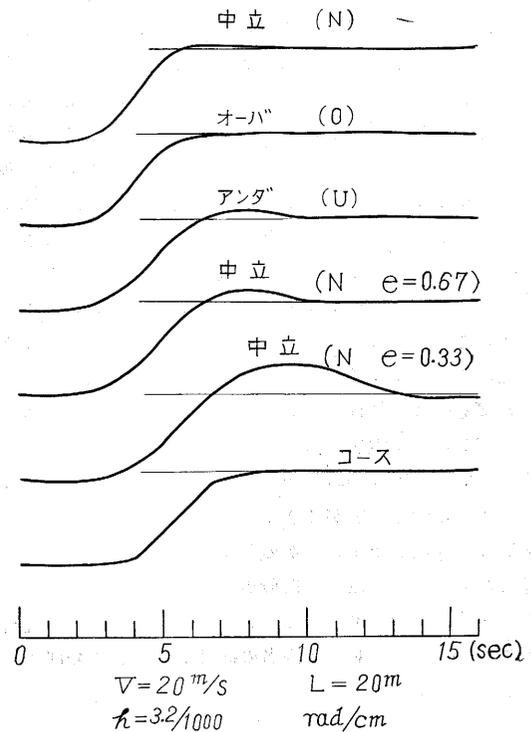
自動車を操縦する際、運転者は自動車の運動のどのような資料によってハンドル操作をするのかということは、操縦を経験した者でさえもはっきりとわからない。しかし自動車の前方を注視してその運動に関する資料を得

ていることが楽な自動車操縦を可能にしている一要因であることは、自動車の前窓の視野をさえぎって横を見て運転してみるとわかる<sup>19)</sup>。筆者らは運転者が自動車の中心線に沿った前方のある地点におけるコースからのずれを読みとるものとし、与えられた走行速度のもとで運転者があるわずかの時間遅れの許された比例動作で安定に自動車を操縦するには、ずれの読みとり地点をどの程度以上前方に移さなければならないかを調べたことがある<sup>20)</sup>。その結果は、走行速度が増すほどほぼその値に比例して前方注視点の位置をより前方に移動させなければならない、もしこれよりも手前の地点でずれを読むならばずれの変化速度を算出しなければ自動車の安定な走行はのぞめないことが示された。また高速度になるほど同じずれの大きさに対して小さなハンドル操作を行なわなければならない、その比例定数はほぼ走行速度の二乗に逆比例させなければならないこともわかった。

第 12 図と第 13 図とは、運転者の動作に近藤<sup>9)</sup>が採用した仮定（自動車の前方地点におけるコースからのずれに完全に比例してハンドルを回転させる）を与え、アナログ・コンピュータに計算させた操縦された自動車の運動軌跡の例である<sup>21)</sup>。自動車の走行速度を 20 m/s とし、運転者は自動車の重心点より前方 20m の地点でコースからのずれを読みとっているものと仮定している。



第 12 図 自動車の特性と安定性との関係



第 13 図 自動車の特性とコースへの追従性との関係

またずれの大きさに対するハンドル回転角の比率は0.32 rad/m としてある。第12図は第9～11図と同じように、直線走行中の自動車の重心に横方向の外力を与えて安定の度合をみたもので、第13図はいちばん下にあたえられているコースに自動車を追従させてみたものである。中立ステアリングの自動車は外力をうけた後にコースに落ち着く様子も、コースに対する追従性もかなり良い特性を示している。オーバ・ステアリングの場合は、コースには巧みに追従しているものの、外力を受けた後に減衰の悪い振動を残している。この振動をす早く減衰させて自動車の安定な走行を保つためには、運転者の高度の技術が必要となろう。アンダ・ステアリングと、その下の中立ステアリングの自動車に弾性を持たせたかじ取装置を組み合わせたものとはかなり似た運動を示している。この場合には外力をうけるといくぶん大きな横変位を起こすが、その後の減衰は悪くない。コースの追従ではわずかなゆきすぎを示している。かじ取装置をひどくたわみ易くすると、いちばん下に示すように外力に対する安定性、コースに対する追従性ともに悪化し、かじ取装置が過度にたわみやすいことは望ましくないことを示している。

## 6. あとがき

運転者の動作特性と自動車の運動特性とを組み合わせ、操縦された自動車の運動特性を研究しなければならないということはかなり以前から叫ばれていたようである<sup>11)</sup>。しかし運転者というつかみ難いものが含まれているためその発展ははかばかしくない。現在運転者の動作についていくらか明らかにされてきたといってもまだ多くの仮定を含んだものであり、まだまだ今後の研究にまつところが多い。自動車自体の運動特性については多くの研究者の努力によってかなりはっきりしてきたが、それでもなお運動特性を支配する因子がすべて理論的に把握されているとはいえず、長い間の経験だけから議論されていることもすくなくない状態である。自動車だけに限ればその運動特性を表わす数学モデルがかなり複雑なものであっても電気式計算機の助けを借りて解くことが可能であり、実物の試作車を製作する前にその運動特性を一応予想することができよう。しかしどのような自動車の運動特性が望ましいかの判定基準のほとんどが運転者に依存している以上、自動車の数学モデルができてもただそれだけでは不十分で、ここに運転者の動作特性を研究する必要がある。両者の研究が平衡して発展することがのぞまれる。(1961. 3. 16)

## 文 献

- 1) R. D. Evans, SAE J., **36**, 1 (1935-1), 41.
- 2) V. E. Gough, Autom. Engr., **44**, 4 (1954-4), 137.

- 3) E. Fiala, Z. VDI, **96**, 29 (1954-10), 973.
- 4) 自動車技術会編, 自動車工学ハンドブック
- 5) 齋藤 安, 機械学会誌 **63**, 500 (昭35-9), 1209
- 6) 入谷幸平, 機械の研究 **13**, 1 (昭36-1), 138
- 7) 光成卓志, 機械の研究 **13**, 1 (昭36-1), 145.
- 8) 光成卓志他, 自動車技術会, 自動車性能解析委員会資料
- 9) 近藤政市, 自動車技術, **7**, 1 (昭28-1) 他
- 10) 菊地英一, 自動制御, **3**, 3 (昭31-3), 11.
- 11) W. F. Milliken, D. W. Whitcomb, IME, Proc., **7** (1956-7), 287.
- 12) L. Segel IME, Proc., **7** (1956-7), 310
- 13) D. W. Whitcomb, W. F. Milliken, IME, Proc., **7** (1956-7), 367.
- 14) 近藤政市, 機械の研究 **13**, 1 (昭36-1), 129.
- 15) 藤井澄二, 機械学会論文集, **22**, 119 (昭31-7), 492.
- 16) 藤井澄二, 喜山宜志明, 豊田研究報告, 15.
- 17) 井口雅一, 機械の研究 **12**, 1 (昭35-1), 219.
- 18) 橋本邦衛, 「疲労」 コロナ社 (昭35-6)
- 19) 東大工学部機械科藤井研究室資料
- 20) 井口雅一, 機械学会誌, **62**, 491 (昭34-12), 1715.
- 21) 藤井澄二, 機械学会誌 **63**, 494 (昭35-3), 396.

## 付 録

アナログ計算機での計算にもちいた運動方程式はつぎのとおりである。

$$\begin{aligned} \frac{W}{g}x'' &= -2k_f e \left\{ \frac{x' + l_f \phi'}{V} - (n\theta + \phi) \right\} \\ &\quad - 2k_r \left\{ \frac{x' - l_r \phi'}{V} - \phi \right\} \\ J\phi'' &= -2k_f e l_f \left\{ \frac{x' + l_f \phi'}{V} - (n\theta + \phi) \right\} \\ &\quad + 2k_r l_r \left\{ \frac{x' - l_r \phi'}{V} - \phi \right\} \end{aligned}$$

ここに

$W$  = 自動車の重量

$J$  = 重心を通る鉛直軸まわりの慣性モーメント

$V$  = 車速

$k_f, k_r$  = 前車輪, 後車後のコーナリング・バウ

$l_f, l_r$  = 重心から前車軸, 後車軸までの距離

$x$  = 直線コースからの自動車重心の横変位

$\phi$  = 直線コースと自動車中心線とのなす角

$\theta$  = ハンドル角

$n$  = ハンドル角と前車輪転だ角との比

$e$  = ハンドル系の弾性を示す係数

$$e = k_s / (k_s + k_c)$$

$k_s$  = ハンドルを固定しておいて、キング・ピンに単位の角変位を起こさせるのに必要なモーメントとして定義されるかじ取装置のばね定数

$k_c$  = 横すべりによって生ずる反力モーメントを横すべり角で除して得られる係数。

したがってかじ取装置が完全に剛ならば  $e=1$ , 結合が切れれば  $e=0$  となる。

採用した数値は,

$W=1360$  kg,  $J=1.96 \times 10^7$  kg-cm<sup>2</sup>,  $l_f+l_r=260$ cm,  $n=1/16$ ,  $k_f=k_r=1800$  kg/rad., オーバ・ステアリングの場合は  $l_r/l_f=0.7$ , 中立ステアリングの場合  $l_r/l_f=1$ . アンダ・ステアリングの場合  $l_f/l_r=0.7$  とした。