



Title	周波数応答解析による自動車の操縦性・安定性の研究
Author(s)	古庄, 宏輔
Citation	大阪大学, 1967, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/472
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

周波数応答解析による自動車の 操縦性・安定性の研究

昭和 4 1 年 1 1 月

古 庄 宏 輔

周波数応答解析による自動車の操縦性・安定性の研究

目 次

第 1 章 緒 論	1
1. 1 本研究の目的	1
1. 2 従来の研究	3
1. 2. 1 周期的操舵による周波数応答解析	3
1. 2. 2 空気外力に関する研究	4
1. 2. 3 人間－自動車系の研究	6
1. 2. 4 不規則波形のスペクトル解析	7
参 考 文 献	9
第 2 章 周波数応答特性の解析方法	13
2. 1 緒 言	13
2. 2 周波数応答試験	14
2. 2. 1 実験方法	14
2. 2. 2 測定例	15
2. 3 過渡応答試験	16
2. 3. 1 過渡応答から周波数応答特性を求める方法	16
2. 3. 2 精度の検討	18
2. 3. 3 解析例	21
2. 4 相関々数による解析	23
2. 4. 1 不規則波形と周波数応答関数	23
2. 4. 2 パワースペクトルの推定	25
2. 4. 3 クロススペクトル，応答関数の計算法	28
2. 4. 4 解析例	31
2. 5 結 論	33
参 考 文 献	34

第3章 操縦性・安定性に影響する因子と進路の予測	3 7
3.1 緒 言	3 7
3.2 under, over-steer 特性との関連	3 8
3.2.1 under, over-steer 特性	3 8
3.2.2 操舵による応答関数	4 2
3.3 車速, High Cornering Power タイヤの影響	4 4
3.3.1 車速の影響	4 4
3.3.2 High Cornering Power タイヤ	4 5
3.4 県 架 パ ネ	4 8
3.4.1 試 験 条 件	4 8
3.4.2 under, over-steer 特性	5 0
3.4.3 操舵による応答関数	5 1
3.5 インパルス応答関数と任意に操舵した場合の進路予想	5 2
3.5.1 インパルス応答関数の算出方法	5 2
3.5.2 任意に操舵した場合の進路予想	5 4
3.6 結 論	5 5
参 考 文 献	5 6
第4章 人間－自動車系の操縦特性	5 8
4.1 緒 言	5 8
4.2 人間－自動車系の解析方法	5 9
4.2.1 過渡応答試験による解析	5 9
4.2.2 相関々数による解析	6 2
4.3 自動車の操縦特性と人間－自動車系の応答特性	6 5
4.3.1 自動車の操縦特性	6 5
4.3.2 人間－自動車系の応答	6 5
4.4 結 論	6 9
参 考 文 献	7 1

第5章 突風による自動車の応答について

その一、突風の測定方法	7 2
5. 1 緒 言	7 2
5. 2 風速・風向の測定器について	7 3
5. 2. 1 プロペラ型風速計	7 3
5. 2. 2 従来の短周期測定用風速計	7 7
5. 2. 3 自動車に適した風速・風向計	7 8
5. 3 開発した球型風速・風向計	7 9
5. 3. 1 構 造	7 9
5. 3. 2 算出方法	7 9
5. 3. 3 特 性	8 1
5. 4 測 定 例	8 2
5. 5 結 論	8 3
参 考 文 献	8 4

第6章 突風による自動車の応答について

その二、突風の性質	8 5
6. 1 緒 言	8 5
6. 2 定地点での風の性質について	8 6
6. 2. 1 風速・風向のパワースペクトル	8 6
6. 2. 2 風速・風向の変動値、突風率	8 7
6. 2. 3 風速と風向の関連性	8 9
6. 3 走行中の自動車に加わる風の性質について	9 1
6. 4 結 論	9 4
参 考 文 献	9 5

第7章 突風による自動車の応答について

その三、自動車の応答関数	9 6
7. 1 緒 言	9 6
7. 2 解析方法	9 6

7. 3	突風時の自動車の応答系	9 7
7. 4	多入力系伝達関数の推定	1 0 0
7. 5	解 析 例	1 0 3
7. 6	結 論	1 0 4
	参 考 文 献	1 0 6
第 8 章	自動車の高速安定性と人間の応答	1 0 7
8. 1	緒 言	1 0 7
8. 2	突風時の高速安定性	1 0 8
8. 2. 1	自動車の姿勢角、横変位の測定	1 0 8
8. 2. 2	under, over-steer 特性と高速安定性	1 0 8
8. 3	突風時の人間の緊張度について	1 1 0
8. 3. 1	自動車を運転している場合の腕の運動	1 1 0
8. 3. 2	自動車の安定性と人間の緊張度	1 1 2
8. 3. 3	外乱の大きさ、環境条件の影響	1 1 3
8. 4	突風時のトラッキング特性	1 1 6
8. 5	結 論	1 2 0
	参 考 文 献	1 2 2
第 9 章	総 括	1 2 4
	謝 辞	1 3 0

第 1 章 緒 論

1. 1 本研究の目的

自動車の高速化に伴い、自動車の操縦性・安定性の研究は重要な課題になっている。自動車自体の運動特性の研究はかなり以前から行なわれているが、最近急速な進歩をとげ、運動理論として体系化されつつある。しかし、自動車自体だけでも、その力学系はかなり複雑で、今後解析されねばならない事項も多い。

自動車の操縦性・安定性の研究をむづかしいものに行っている原因の一つは、自動車は人間によつて操縦されるということである。人間は複雑、微妙な特性のものであるから、従来の研究は人間との結びつきは考えない自動車自体の特性についての研究が主体であつた。

しかし、人間の特性を考慮しない自動車自体の研究のみでは、人間に適応した自動車の設計は不可能であろう。このようなことから、最近、運転された自動車の特性を知り、操縦性・安定性の評価基準を確立しようと云う動きがでてきている。

人間に適した自動車はどんなものであるかということをはっきりさせるためには、自動車を操縦するとき、人間がどのような特性であるかを調べる必要がある。

たゞ、人間は非常に複雑な性質をもっており、その解明は非常にむづかしいが、ことに自動車を操縦するときの特性については明らかでないことが多い。

近来、人間工学や制御理論が発展し、人間がある応答特性をもつた要素として取扱う人間－機械系の動特性の研究が進められつつある。人間を一つの制御系として取扱うようになれば、自動車自体の動特性を周波数応答特性のような伝達関数で評価する必要がある。人間と自動車をこのように取扱うと、人間と自動車を結びつけた、いわゆる人間－自動車系の解析が容易になる。

このためには、自動車の特性を伝達関数で表現する必要があり、まず第一に実際の自動車を完全に把握できるような応答関数の解析方法を確立しなければならない。そこで自動車の応答を解析する三つの方法を調べ、操縦性・

安定性に影響する主要因子を変更した場合の操舵による応答関数を比較した。

次に人間を含めた人間－自動車系の応答解析の手法を新たに開発し、自動車の操縦特性と人間動作との関連性を間接的に調べた。

自動車が走行中に受ける攪乱外力や、一般路面を走行中の操舵は不規則波形になる。したがって、突風などのような攪乱外力に対する応答や、人間の操縦特性を解析するためには、不規則波形のスペクトル解析の手法を操縦性・安定性の研究分野に適用する必要性が生ずる。このようなことから、相関関数を用いた統計的手法による操縦性・安定性の解析を始めて試みた。

次に高速安定性を検討する場合、まず第一に自動車に加わる攪乱外力を調べる必要がある。高速走行時の攪乱外力としては大部分、突風のような空気攪乱外力と考えられるが、高速安定性解析に必要な資料は現在のところ、皆無の状態であり、まず突風の性質を知ることが先決である。

自動車に対する風の影響は、定常風のようなものも人間の補償操舵が必要であるから検討しなければならないが、特に重要なのは風の乱れに対する応答であろう。

自動車の応答解析には周期の短かい、いわゆる短周期の風の乱れを測定する必要があり、気象観測用に使用されている風速計を利用するのは無理である。

また、走行中に自動車が受ける空気攪乱外力を測定する必要があるから、自動車に搭載できる風速計が要求される。このようなことから、自動車の応答解析に適した新しい風速計を開発した。

この風速計を用いて、定地点での風の性質と走行中に自動車が受ける風の性質を調べ空気攪乱外力の検討を行なった。

突風中を自動車が走行する場合の挙動については、全く解明されていない。高速安定性を検討するためには、攪乱外力、特に突風による応答特性を知る必要がある。

そこで、多入力系スペクトル解析から突風時の自動車の応答関数を実際の作動状態で算出する方法を試みた。

次に、突風を受けた自動車を操縦しているときの運転者の緊張度を測定し、自動車の特性と運転者との関連性を解明した。また各種の自動車の運転量の測定結果から外乱に対する追従性を検討し、どのような特性の自動車が安定

であるかを調べた。

本論文は運転された自動車の特性を知り、操縦性・安定性の評価基準を確立することを目的としているが、この方面の研究の草分けであり、しかも人間の複雑な動作を含有しているので、その目的を十分達することができるか否か疑問である。

しかし、このような研究は重要であるから、発展されて行くものと思われるが、本論文が今後の研究に何らかでも貢献しうれば、筆者の喜びとする次第である。

1.2 従来の研究

1.2.1 周期的操舵による周波数応答解析

自動車の操縦性・安定性の研究も、今後、人間と自動車を結びつけて解析する必要がある。人間は複雑な性質をもっているが、最近、人間工学の研究が進み、人間をある応答特性をもった要素、すなわち制御系としての取扱いが行なわれるようになって来た。

したがって、人間を含めた人間－自動車系の操縦性・安定性の解析を行う場合、自動車の動特性を周波数応答特性で解析すると、人間との結びつきを検討するのに都合がよい。

自動車の動特性を周波数応答特性で取扱いうることをL. Segel¹⁾が示してから、操縦性・安定性の解析に脚光を浴びてきた。我国では自動車技術会操縦性・安定性委員会で操舵規定装置を試作し、実験を²⁾行なった例がある。

³⁾近森は周期的操舵を加えた時の自動車のヨー角速度を測定し、この応答関数をニコルス線図で閉ループ系に換算すると、制御系の二次おくれ特性に近くなることから固有振動数、減衰率を算出し、安定性を評価しようとして試みている。しかし自動車の応答特性の中で二次おくれ特性に近い形状を示すのはヨー角速度の応答関数のみで、横方向の運動特性については当てはまらない。また、閉ループ系が必ずしも二次おくれ特性になるとは限らない。これは自動車の簡単な力学系の伝達関数を考えても明らかである。

このようなことから、その後、この考え方は発展していないようである。

一昨年⁴⁾の FISITA 国際会議には M. Mitschke が理論的研究を発表した。彼は横方向、ヨーイング、ローリング、操縦系に関する運動方程式をたて、Cornering force と横すべり角の関係が直線とみなせるような範囲の小さい横すべり角を取扱い、サインカーブした時の車の特性を理論解析している。

また近藤⁵⁾らは操舵規定装置を用い、周波数特性を実測し、5 自由度による伝達関数からの理論値と対比している。この結果では理論計算値と実測値とはまだ相違があり、理論計算で自動車の動特性を完全に算出する段階に到達していないように考えられる。

このように自動車の動特性を周波数応答関数で表現しようという試みはかなり以前から行なわれているが、どのような応答関数が操縦しやすいのか、あるいは安定であるか、評価基準が明らかでない。

1. 2. 2 空気外力に関する研究

操縦性・安定性の研究論文の中には“横風を受ける自動車の挙動” “横風の影響” “進路保持に対する空気力の影響”などのように空気外力の影響に対する首題を冠したものは多い。

しかし、理論解析で検討しているのは大部分、ステップ入力に対する過渡応答を調べたもので、横風の影響といつても、単に横力、ヨーイング・モーメントの外力で検討しているに過ぎない。

例えば E. Sawatzki⁶⁾ の論文は風洞試験装置とその測定例を示し、風が斜めに入射したときの合成風を検討している。F. Gauß⁷⁾ は簡単な運動方程式から真横に風速 5 m/s、15 m/s (定常風) の風を受けた時のコースのずれを計算している。また、H. J. Beermann⁸⁾、F. Böhm⁹⁾ などはステップ状の外力を横風とみなし、その影響を調べた。

運転者は横風を受けて、急にコースがずれることをよく経験するが、自動車に影響を受けやすい場所や地形を述べたものに F. Bitzel¹⁰⁾ の報告があるが、具体的な実測例については示していない。

自然風での唯一の測定例に数年前のものであるが W. E. Lay, P. W. Lett¹¹⁾

の論文がある。

この研究は車体とシャーシを分離して、この間を四本の棒で結合し、伝達される力を長手方向と横方向とに分けて抵抗線歪計で横方向の空気力、風圧中心、ヨーイング モーメントなどを定常横風の状態で測定したものである。また走行中、突風を受けたときの空気力、風速、合成風向を測定例として示しているが、風速計に風杯、風向には矢羽根を使用しているので、これらの測定器の応答については疑問があるようにも考えられる。

最近に至り、空気外力に対する応答について、二つの興味深い研究がある。その一つはGeneral Motors Co.の研究所で行なわれた R.T. Bundorf, D.E.Poollock¹²⁾の研究で、車体側方に取付けたロケットにより外力を与え応答を測定するものである。

ロケットの取付位置を上下、前後に位置を変えて空気外力の着力点による影響を調べ、ロール、ヨー、横方向の三自由度運動方程式にステップ状の外部攪乱入力を加えたときの計算値と比較している。この実験では攪乱外力に対する自動車の応答は、かなり正確に把握できるであろうが空気外力に対する応答に直接結びつくかどうか今後の研究にまたなければならない。

もう一つのものは1965年7月号のA T Z¹³⁾に掲載されている。

試験道路の側方に大きなプロペラ式送風機を設置し、道路の直線部分17mに横風を与える Daimler-Benz 社の設備である。この部分を自動車が通過する時の応答を測定しようとするものである。

この報告は装置の説明が大部分を占め、各速度で自動車が走行したときの軌跡例を示したのみで詳細な解析結果はない。

この実験設備では横風の吹く部分の距離が17mであるが、この部分に突入したときとか脱出したときに自動車には、前あるいは後などに局部的に風が当ることになる。

現在風洞試験で測定された空気力学特性は、自動車の全面に一樣に風が入射するとの仮定の上に立脚している。したがって、このような実験設備で解析した結果と風洞試験結果とは結び付かないのではなかろうか。

しかし現実には、トンネルを出た時に突風に襲われることもあり、むしろ現用の風洞試験方法に改善向上の余地があるかもしれない。

風が局部的に自動車に入射する場合の空気力学特性解析は非常に困難なことであろうが、今後解析が必要であらう。

空気外力に対する自動車の応答について、従来の研究を検討したが、自然風に対する解析例は見当たらないようである。

W.Kamm はロンドンで開催された第 9 回 FISITA 会議での“技術的に可能な自動車の安全性の達成への道”¹⁴⁾なる報告の中に“空気力による外乱に対する安定性とか、空気力と地面からの力との合成力などについては応用が進んでいない、研究を要する問題である”と述べている。

1. 2. 3 人間－自動車系の研究

人間を含めた、いわゆる人間－自動車系の研究もようやく始められた段階である。

運転者が行なうもつとも基本的な動作として、近藤¹⁵⁾の仮説がある。これは自動車が現在、向いている方向に直線で一定距離だけ伸ばした点のコースからのずれを基準にして運転者はハンドルを操作すると云う考えである。この仮説から実際の現象をかなり良く説明できるようであるが、すべての運転状態について、成立つかどうか疑問であり、また仮説が正しいかどうか実証されていない。

その後、菊地¹⁶⁾、井口¹⁷⁾、藤井¹⁸⁾は制御理論の伝達関数の概念を用い、人間の応答関数を或る形で仮定し、人間と自動車を組合せたときの特性を理論的に解析している。たゞ仮定する人間の応答関数に関しては変更或は訂正が行なわれているようで、人間の操縦動作に関しては明確でない。

藤井、井口¹⁹⁾は自動車の運動をアナログ・コンピュータで模擬し、ブラウン管の画面上の像の動きを使つて、台上で人間の運動特性を測定した。

この結果、自動車の運転の際に、ある距離以上に前方を見て運転すると比例操作だけですむが、それ以下だと微分操作をしなければならない。また、この限界の距離はほぼ速度に比例することなどを明らかにしている。

最近、このような人間特性を調べるため自動車操縦シミュレータが開
発されている。^{21) 22)}

自動車^{注)}をシャーシ、ダイナモメータのような走行模擬装置上に置き、
路面走行時の視界に相当する視覚表示装置を見て操縦を行う。この時の操
縦特性から人間の動特性を調べようとするものである。

視覚表示装置には、スクリーン上に映写する映画方式、ブラウン管の
画面に映す、点光源投写法などがあるが、人間に対して主たる入力にな
る視覚表示法をどのようにするか、また、実験時の環境条件によつて影
響を受けるかどうかなどが問題点である。

この装置は最近開発されたものが多く、これより人間の動特性を測定
した結果は未だ発表されていないようである。

人間が自動車を運転する場合の操作については明らかではない点が多
い。例えば道路上を運転するとき、進路とのづれ角で制御しているの
か、横方向のづれ量か、或はヨー、横方向の加速度、操舵力、車体の傾
き（ロール角）などにも反応するのか、など基本的な事項についても明ら
かでない。

これを明らかにするためには運転された自動車の特性を実車試験によ
つて測定し、この結果から人間の動特性を求めるのが最善の方法と考えら
れる。

現在一般運転状態から人間の特性を測定したものは皆無であり、今後
この方面の研究が期待されている。

1. 2. 4 不規則波形のスペクトル解析

1953年に高橋²³⁾が道路凹凸を定常確率過程とし、自動車が線形振動
であると仮定すれば、道路面のパワースペクトル、自動車の振動周波
数特性、自動車の振動のパワースペクトルの三者には簡単な関係がある
から、路面の性質との結びつきを、この方面によつてしらべうることを

注) シャーシ、ダイナモメーターとはタイヤを回転させて動力を吸収
する装置

提案した。

1958年、M.Mitschke²⁴⁾は同一趣旨の論文で、路面パワースペクトルと二自由度系で近似した自動車の振動特性を仮定して、振動パワースペクトルを計算し、乗心地、タイヤ荷重等の計算を行なった。

最近では兼重²⁵⁾が自動車のバネ下加速度の測定結果をパワースペクトル解析し、この結果から路面の凹凸を検定した。

また川合は自動車のバネ上加速度のスペクトル解析によつて走行中の自動車の振動を、路面の凹凸によるものと自動車自体に内蔵しているものの割合を調べ、²⁶⁾また名神高速道路の路面凹凸を評価した。²⁷⁾

これらはすべて自動車の振動、路面の凹凸を対象としたもので、自動車の操縦性、安定性の解析に適用した例はない。

次にクロススペクトルによる周波数特性の推定は鉄道車輛のローリング²⁸⁾に関しての中村の、船舶の波浪とローリング²⁹⁾に関しては山内、川島、³⁰⁾自動車のエンジンマウンテイング³¹⁾に関しては兼重、などの研究がある。

上記のものはすべて入力系が一つの Single-Input System の解析で多入力系 (Multi-Input System) についての解析例は見当らない。

以上、不規則波形のスペクトル解析について、従来の研究を調べて見たが、実際の現象への適用は近年始められたばかりであり、今後、適用分野も拡がり急速に発展するものと思う。

参 考 文 献

- 1) L.Segel ; "Theoretical Prediction and Experimental Substantiation of
the Response of the Automobile to Steering Control."
SAE Transactions Vol. 56 , 1957
- 2) "操舵規定装置による操縦性・安定性の研究"
自動車技術会操縦性安定性委員会
自動車高速性能研究報告書 昭和34年
- 3) 森谷・近森 ; "自動車の周期的操舵に関する一考察"
自動車技術 Vol-17, No. 9 , 1963
- 4) M.Mitschke ; "Kurshaltung und Lenkkorrekturen am Kraftfahrzeug."
Proceedings of the FISITA 10th International Congress, 1964 Tokyo
- 5) 近藤 ; "自動車の操舵周波数特性と方向安定性について"
自動車技術会講演会前刷 昭和40年夏
- 6) E.Sawatzki ; "Einfluß der Luftkräfte auf die Fahrtrichtung des
Kraftfahrzeugs."
ATZ Jahrg 42, Heft 10 , Okt. 1939
- 7) F.Gauß ; "Das Verhalten von Kraftfahrzeug bei Seitenwind."
ATZ Jahrg 54, März, 1952
- 8) H.J.Beermann ; "Kursstabilität luftbereifter Fahrzeug und deren
verhalten bei Seitenwind Störung."
ATZ Jahrg 66, Heft 5 , 1964

- 9) F.N. Beauvais ; "An improved Analog for Vehicle Stability Analysis."
SAE Paper S405 1964
- 10) F.Bitzl ; "Die Einwirkung von Seitenwindkraft auf den Straßenverkehr."
Verkehrssicherheit 7(1961) III
- 11) W.E.Lay, P.W.Lett ; "Wind Effects on Car Stability."
SAE Transactions Vol 61, 1953
- 12) R.T.Bundorf, D.E.Poollock ; "Vehicle Handling Response to Aerodynamic Inputs."
SAE Paper 716 1963
- 13) N.Liebold ; "Erfahrung mit Seitenwindgebläsen für Fahrversuche mit Kraftwagen."
ATZ Jahrg 67, Heft 7, 1965
- 14) W.Kamm ; "Wege zur Erzielung der technisch möglichen Sicherheit des Fahrzeuges."
Proceedings of the FISITA 9th International Congress, 1962 London
- 15) 近藤 ; "自動車の操舵と運動間に存在する基本的関係"
自動車技術会論文集 Ⅻ 5 昭和33年
- 16) 菊地 ; "変位インピダンスによる自動車の操縦性の評価"
自動車技術 Vol 17, No. 3, 1963
- 17) 菊地 ; "適応制御系としてみた自動車の操縦性"
自動車技術 Vol 18, No. 11, 1964

18) 菊地 ; “ 人間 - 自動車系のかじ取り伝達関数 ”

自動車技術会 前刷 昭和 40 年秋

19) 藤井・井口 ; “ 模擬自動車による運転者の制御動作の基礎的研究 ”

自動車技術会論文集 No. 7, 昭和 35 年

20) 井口 ; “ 運転者の運動特性からみた自動車の走行安定性 ”

機械学会誌 Vol 62, No. 491, 1959

21) 大久保 ; “ 自動車操縦シミュレータ ”

自動車技術 Vol 17, No. 7, 1963

22) 須長 ; “ 操縦性・安定性シミュレータについて ”

自動車技術 Vol 19, No. 4 1965

23) 高橋 ; “ 路面の性質と自動車の振動をむすぶ理論 ”

自動車技術 Vol 7, No. 11~12 1953

24) M.Mitschke ; “ Schwingungsverhalten und Sicherheit eines Kraftfahrzeuges . ”

ATZ Jahrg 60, Heft 6, 1958

25) 兼重 ; “ 自動車走行振動のスペクトル解析 ”

自動車技術 Vol 18, No. 4, 1964

26) 川合 ; “ 自動車走行時の振動についての一考察 ”

新三菱技報 Vol 6, No. 1, 1964

27) 川合 ; “ 自動車走行路面の性質と振動乗心地への一知見 ”

自動車技術 Vol 20, No. 3, 1966

28) 中村 ; “ 水準狂いとローリングの関係 ”

鉄道技術研究報告 No. 216 1961

29) 山内 ; “ 船の波浪中動揺応答の解析法について ”

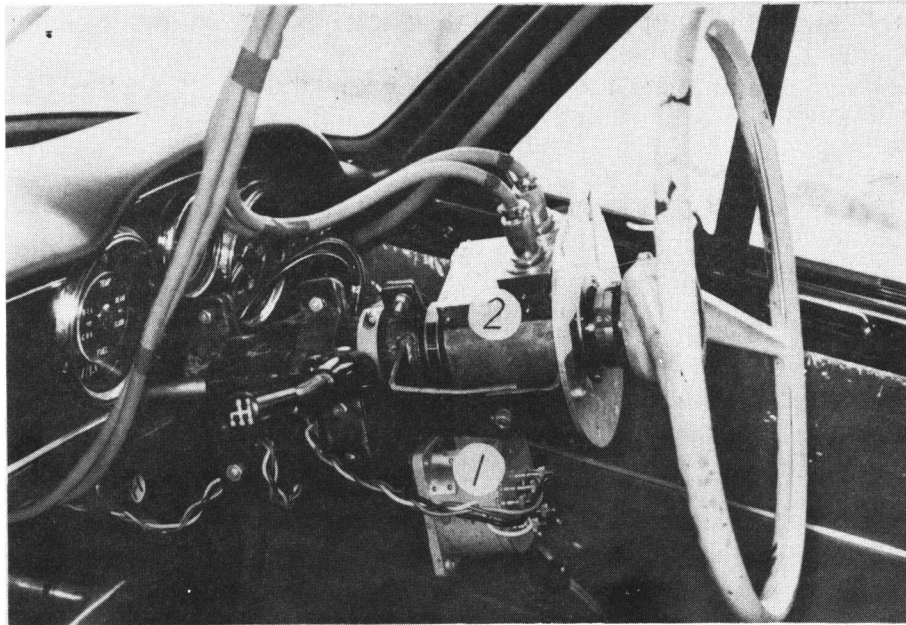
造船協会論文集 No. 109, 110, 1961~1962

30) 川島 ; “ 海洋波中の漁船の横揺の応答関数の統計的推定について、第二報
実船の洋上実験による応答特性の推定 ”

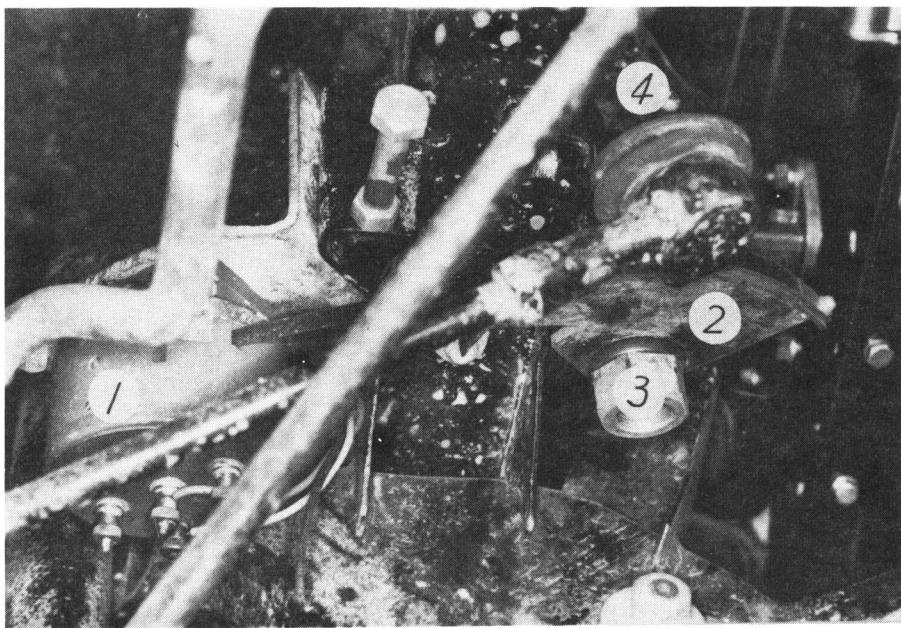
日本航海学会 第31回講演会前刷

31) I. Kaneshige ; “ Power and Cross Spectral Analysis of an Automobile.”

Proceedings of the SAE International Congress, 1965



第 2 - 1 図 操舵角、操舵力の測定装置
(変位計① 操舵力計②)



第 2 - 2 図 実舵角の測定方法
(変位計① 扇形金具② , セクタシャフト③ , ビットマンアーム④)

第2章 周波数応答特性の解析方法

2.1 緒 言

自動車の操縦性・安定性の理論解析は盛んに行なわれているが、なかなか複雑であり理論計算のみで自動車の運動を完全に表現しうる段階に到達していないのが現状のようである。このため特に、実車の運動特性を完全に把握することが重要となってくる。

自動車の動特性を周波数応答関数で表現しようという試みはかなり以前から行なわれているが、自動車の周波数応答特性の解析方法は電気工学、制御工学の分野において、とり扱われているような理論的にすつきりした方法が確立されていないように思われる。

そこで周波数応答試験、過渡応答試験および、相関関数による統計的手法の三つの方法で自動車の操舵による周波数応答関数を解析し、解析方法の検討を行なった。

これらの方法は電気、制御工学の分野では、すでに採用されている方法であるが、自動車にとり入れる場合には種々の制約を受け、問題点も多い。

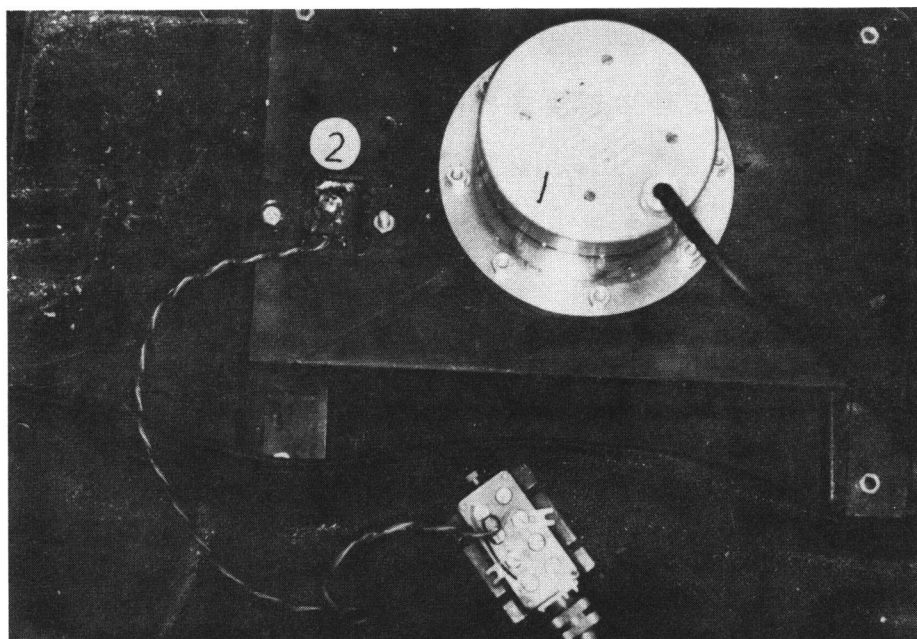
周波数応答試験よりえられた結果の数値的評価は簡単であるが、正弦波入力をどのようにして加えるかが問題である。本章では運転者により周期的に操舵する方法を採用している。

過渡応答試験は測定点数、データ処理などの労力が少なくすむが、入力波形、解析方法などにより計算精度が左右されるように思われるので、種々の波形を想定し精度の検討を行なった。

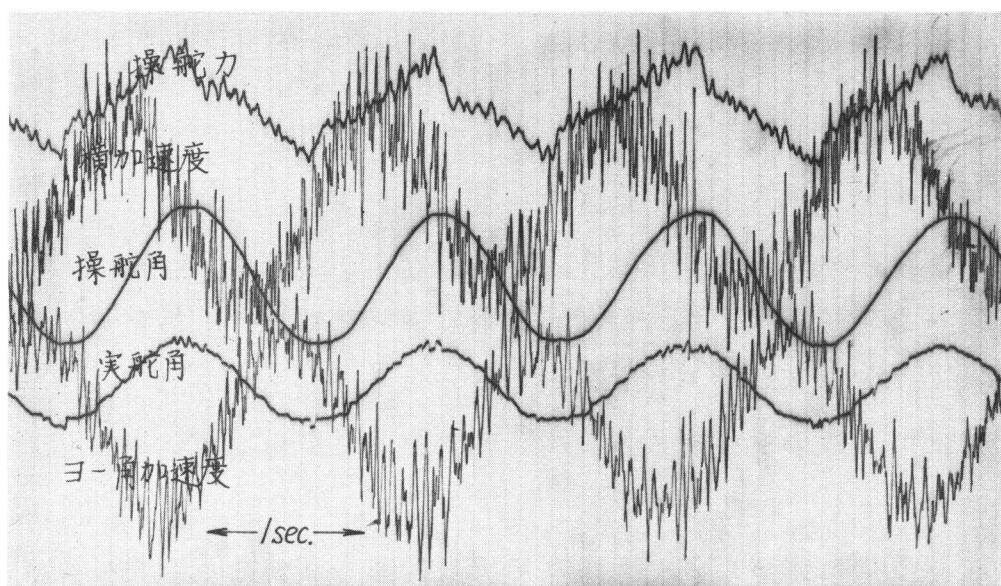
次に突風や不整地などの自動車に加わる外部攪乱力是不規則波形になるから、これらの外力による応答解析には統計的手法を用いなければならない。

また統計的手法で解析すると、その系が実際に動作している状態での応答特性を求めることが可能になる。

そこで、不規則波形のスペクトル解析の概念を自動車の運動性能解析に適用し、統計的手法による自動車の操縦性・安定性の解析を試みた。



第 2 - 3 図 角加速度計と加速度計ピックアップ
(角加速度計①，加速度計ピックアップ②)



第 2 - 4 図 周波数応答試験の測定波形例

2.2 周波数応答試験

2.2.1 実験方法

自動車の周波数応答試験とは電気工学、制御工学で実施されているように制御対象系に、入力として一定振幅の正弦波を与え応答を調べる試験である。系が線形の場合には出力も同じ正弦波が現われ、振幅と位相は入力の周波数に応じて変化する。この出力と入力との比（ゲイン）、両者の位相差（位相）を測定し、自動車の操縦性・安定性を評価しようというものである。

自動車の周波数応答試験では、規定した車速で走行中に操舵ハンドルから入力波形として正弦波を加える必要があるが、完全な正弦波を加えないと測定精度は悪くなる。

一定振幅、周期の完全な正弦波を附加するために、適当なサーボ源を自動車に搭載し、このサーボ源から機械的に操舵ハンドルを周期的に動かす装置も考え¹⁾られているが、何分、路上を高速の走行状態で試験を実施するから、このような装置をハンドルに附加すると緊急の場合、運転者が応急処置を取りにくい。また自動車のように限られたスペースで、これらの装置を取付けることは困難な場合が多い。

このようなことから、入力として与える周期的外力の精度は劣下するが、運転者が、ハンドルを左右に周期的に操舵する方法を採用した。²⁾運転者が、一定振幅で操舵することは比較的容易であるが、人間は周期を見出すことは苦手のようである。

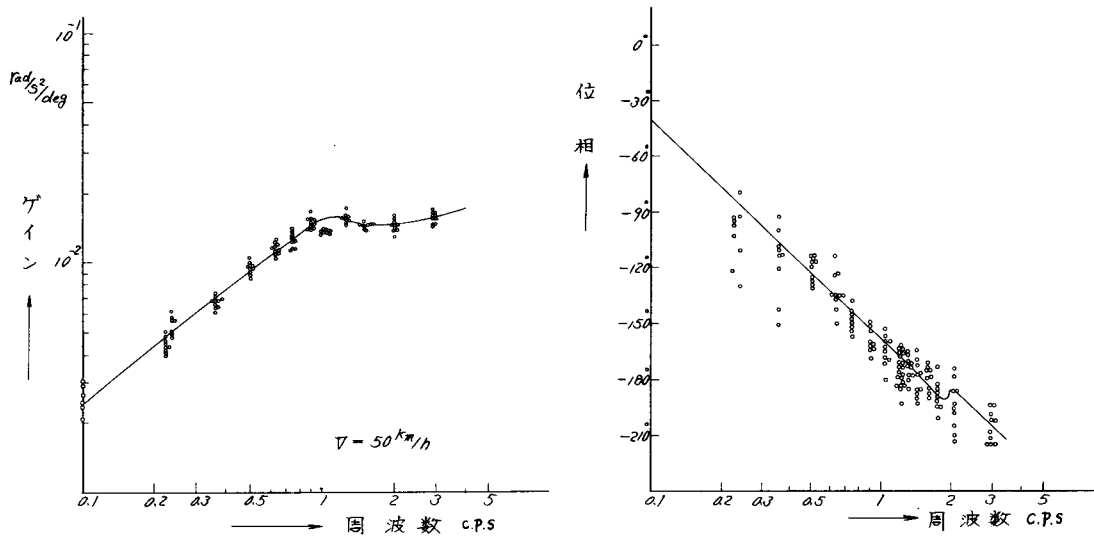
そこで自動車のワイパーの動きに追従する方法を用いた。その変数となる周波数はワイパー・モーターの入力電圧を変えて0.1～40.P.S.の範囲に選んだ。

操舵ハンドルに周期的外力を加えると自動車は蛇行運動をするが、自動車の横加速度とヨー角加速度で、運動を解析した。

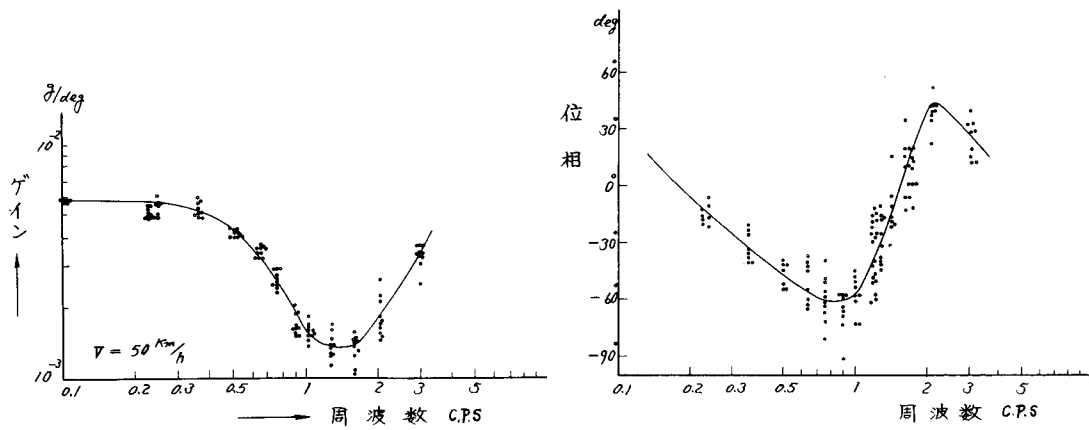
測定は、操舵角、操舵力、実舵角、横加速度およびヨー角加速度の5要素を電磁オシログラフで同時測定した。

第2-1図はステアリング・ポストに取付けた操舵角、操舵力計を示したもので、操舵角は、ハンドル回転角を撓動抵抗で、操舵力はシャフトに貼付けた歪みゲージから検出している。

実舵角は、第2-2図のようにセクター・シャフトとピットマン・アームの



第2-5図 操舵による自動車の応答関数
(操舵角-ヨー角加速度)



第2-6図 操舵による自動車の応答関数
(操舵角-横加速度)

連絡部に扇形金具を取付けた変位計でタイヤの舵角を間接的な方法で測定した。

第2-3図に示したのは、床上部に取付けた、角加速度計と横加速度計で、いずれも歪ゲージを利用したピック・アップで、自動車の横加速度とヨー角加速度を測定している。

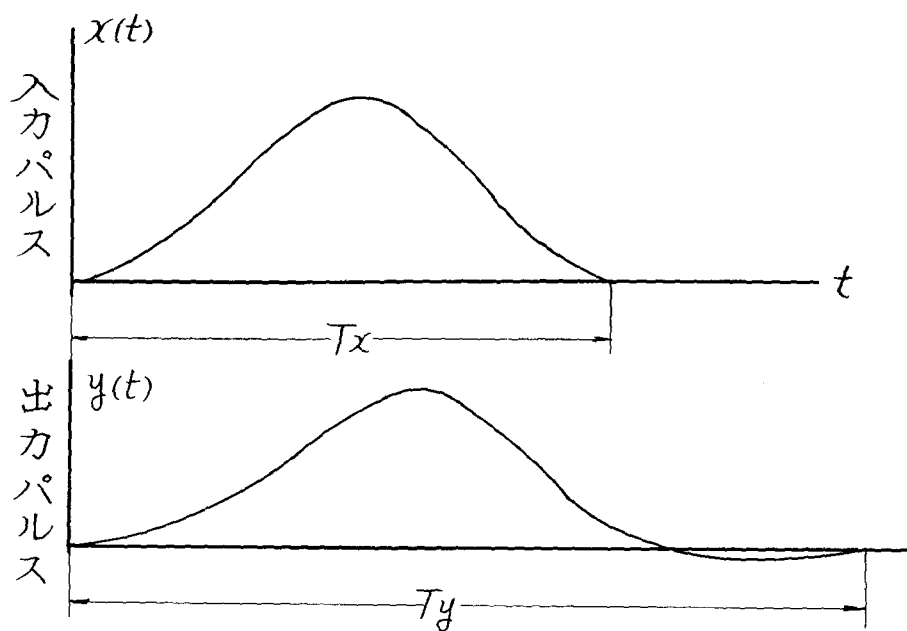
2.2.2 測定例

測定波形の一例を第2-4図に示す、自動車を制御系と考えた場合、入力としては操舵角、操舵力、実舵角、出力としてはヨー角加速度、横加速度が考えられ、種々の組合せの伝達関数がえられる。

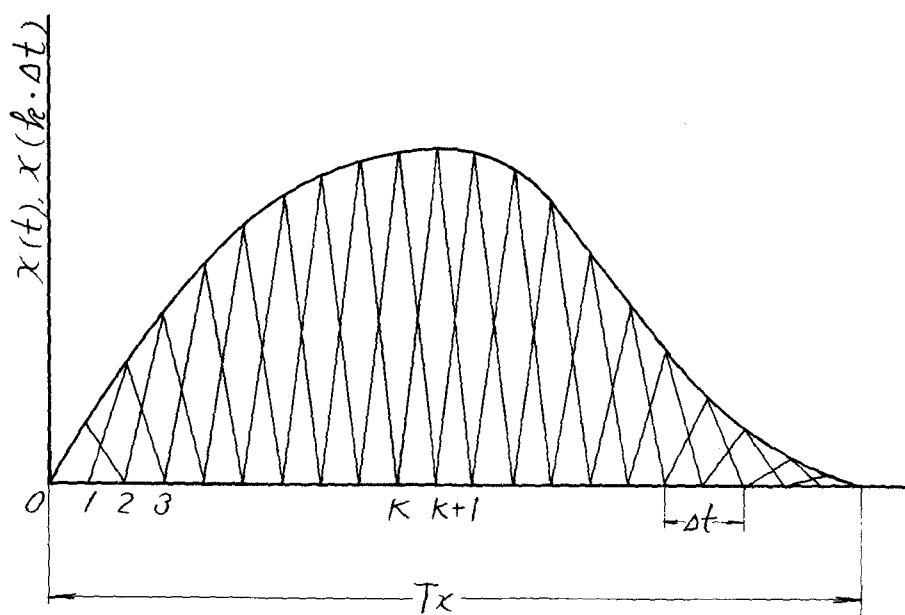
第2-5図は入力に操舵角、出力をヨー角加速度にとつたときの応答関数を示す。周波数が高くなるにつれて、ゲインは増加し位相おくれも大きくなる。各周波数ごとに数個の測定データをプロットしてあるが、位相ではかなり、測定データのバラツキが認められる。

特に低域側でバラツキが大きい。この原因は運転者がハンドルを左右に周期的に操舵する方法を採用したため、振巾、周期が一定な、完全な正弦波がえられなかつたためと考えられる。

次に入力に操舵角、出力、横加速度の応答を第2-6図に表わした。この曲線は、ヨー角加速度の場合と異なり、かなり複雑な様相を示す。



第2-7図 入・出力波形



第2-8図 三角波形による近似

2.3 過渡応答試験

2.3.1 過渡応答から周波数応答特性を求める方法

自動車の動特性を求めるために、入力波形として完全な正弦入力あるいはステップ入力などを加わえることは困難なことである。

ところが、直進中に（ハンドル中立）ハンドルを急激に操舵し、再びもとの位置に戻すような操舵なら比較的簡単に行なえる。

このときの波形は第2-7図のようにある規準値から始まり非常に短い時間 T_x の後、再びもとの位置に戻るようなもので数式では表現できない。

いま入力波形 $x(t)$ を伝達関数 $G(s)$ なる系に加えたとき $y(t)$ なる出力波形がえられたとすると

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\int_0^{\infty} y(t) e^{-st} dt}{\int_0^{\infty} x(t) e^{-st} dt} \quad (2-1)$$

の関係が成り立つ。入力 $x(t)$ が $t=0$ から $t=T_x$ 、出力 $y(t)$ が $t=0$ から $t=T_y$ まで変化すると周波数応答は次のように求まる。

$$G(i\omega) = \frac{\int_0^{T_y} y(t) e^{-i\omega t} dt}{\int_0^{T_x} x(t) e^{-i\omega t} dt} \quad (2-2)$$

(2-2) 式の右辺を積分すればよいが、第2-8図のような三角波形で近似すると

$$\int_0^{T_x} x(t) e^{-i\omega t} dt \doteq \left[\frac{\sin \frac{\omega \Delta t}{2}}{\frac{\omega \Delta t}{2}} \right]^2 \sum_{k=1}^{n-1} x(k\Delta t) e^{-i\omega k\Delta t} \Delta t \quad (2-3)$$

$$\int_0^{T_y} y(t) e^{-i\omega t} dt \doteq \left[\frac{\sin \frac{\omega \Delta t}{2}}{\frac{\omega \Delta t}{2}} \right]^2 \sum_{k=1}^{n-1} y(k\Delta t) e^{-i\omega k\Delta t} \Delta t \quad (2-4)$$

3).4)

がえられる。したがって伝達関数 $G(i\omega)$ は次のようになる。

$$G(i\omega) = \frac{\sum_{k=1}^{n-1} y(k\Delta t) e^{-i\omega k\Delta t}}{\sum_{k=1}^{n-1} x(k\Delta t) e^{-i\omega k\Delta t}} \quad (2-5)$$

実際の計算は次のように実数と虚数とに分けて計算した。

$$\left. \begin{aligned} C_x(\omega) &= \left[\frac{\sin \frac{\omega \Delta t}{2}}{\frac{\omega \Delta t}{2}} \right]^2 \Delta t \sum_{k=1}^{n-1} x(k\Delta t) \cos \omega k \Delta t \\ S_x(\omega) &= \left[\frac{\sin \frac{\omega \Delta t}{2}}{\frac{\omega \Delta t}{2}} \right]^2 \Delta t \sum_{k=1}^{n-1} x(k\Delta t) \sin \omega k \Delta t \\ C_y(\omega) &= \left[\frac{\sin \frac{\omega \Delta t}{2}}{\frac{\omega \Delta t}{2}} \right]^2 \Delta t \sum_{k=1}^{n-1} y(k\Delta t) \cos \omega k \Delta t \\ S_y(\omega) &= \left[\frac{\sin \frac{\omega \Delta t}{2}}{\frac{\omega \Delta t}{2}} \right]^2 \Delta t \sum_{k=1}^{n-1} y(k\Delta t) \sin \omega k \Delta t \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

とおくと

$$\int_0^{Tx} X(t) e^{-i\omega t} dt = C_x(\omega) - i S_x(\omega) \quad (2-7)$$

$$\int_0^{Ty} Y(t) e^{-i\omega t} dt = C_y(\omega) - i S_y(\omega) \quad (2-8)$$

となるから、入力波形の周波数スペクトル $A_x(\omega)$ は

$$A_x(\omega) = \sqrt{C_x^2(\omega) + S_x^2(\omega)} \quad (2-9)$$

として求められる。入力のスペクトルの値が小さい周波数領域では、求める伝達関数の精度の低下が予想される。このようなことから、入・出力波形の周

波数スペクトル A_x, A_y を計算し、この値から信頼性のある周波数範囲を検討した。

次に伝達関数のゲイン $|G(\omega)|$ 、位相 $\phi(\omega)$ は

$$|G(\omega)| = \frac{\sqrt{\{C_x(\omega)C_y(\omega) + S_x(\omega)S_y(\omega)\}^2 + \{C_y(\omega)S_x(\omega) - C_x(\omega)S_y(\omega)\}^2}}{C_x^2(\omega) + S_x^2(\omega)} \quad (2-10)$$

$$\phi(\omega) = \tan^{-1} \frac{C_y(\omega)S_x(\omega) - C_x(\omega)S_y(\omega)}{C_x(\omega)C_y(\omega) + S_x(\omega)S_y(\omega)} \quad (2-11)$$

からえられる。これらの計算は全て、電子計算機で行なった。

2.3.2 精度の検討

以上のような計算方法で、過渡応答試験からその系の周波数応答関数が求まるわけであるが、分割巾 Δt 、入力を持続時間 T_x 、入力波形などが応答関数の精度にかなり影響するものと考えられる。そこで、これらの点について検討した。

(1) 分割巾 Δt

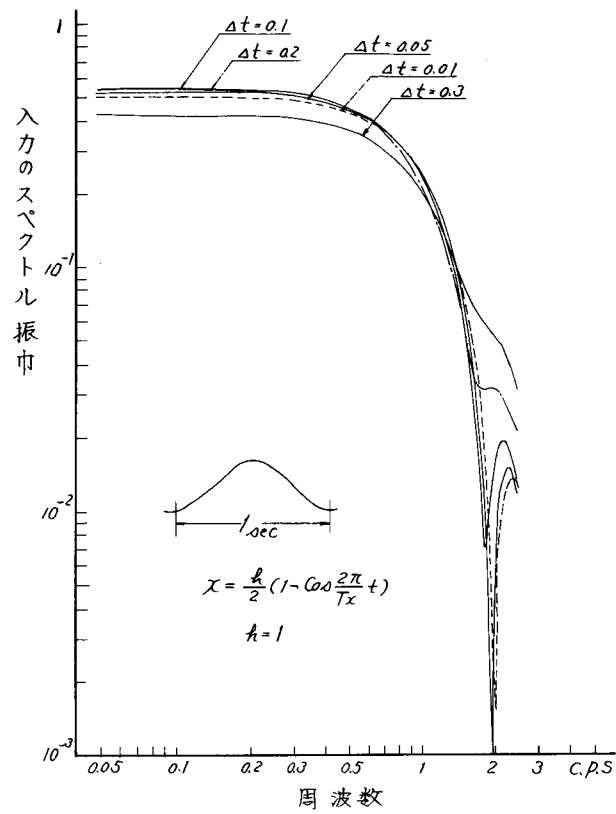
5)

まず分割巾 Δt についてであるが、大体 10 分割すればよいとの報告もある。入力の加わっている持続時間 T_x を分割するよりも電磁オシログラフのタイムマークを基準にして時間軸で等分割する方が便利である。

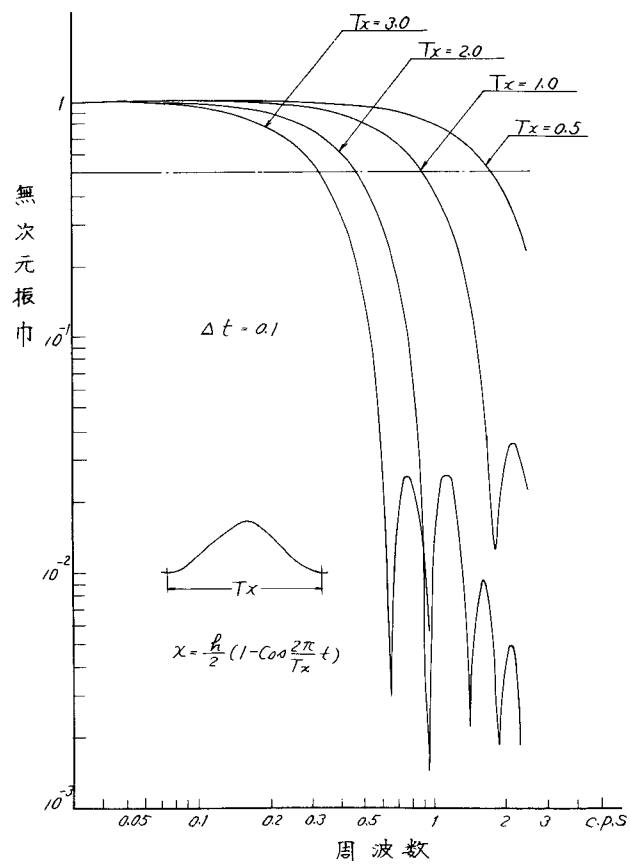
自動車の動特性を算出するのに、どの程度の時間間隔でデータをサンプリングすればよいかを調べるため、まず理論解析の容易な

$$X = \frac{h}{2} (1 - \cos \frac{2\pi}{T_x} t) \quad (2-12A)$$

なる波形を仮定し、周期 $T_x = 1.0 \text{ sec}$, $h = 1$ として、入カスペクトルが Δt の値によつてどのように変るかを検討した。



第2-9図 Δt の影響



第2-10図 T_x の影響

第2-9図は分割巾 $\Delta t = 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3$ の5種類に変化させたときの入力スペクトルを示す。周波数スペクトルは10PS附近から急激に減少する。したがって、この波形の解析可能周波数範囲は10PS迄と推定される。

入力波形を $h = 1$ に取っているから、スペクトル振巾は0.10PSで0.497になるべきである。 $\Delta t = 0.01$ にしたときはこの値に最も近い。 $\Delta t = 0.3$ ではかなり小さな値で、 $\Delta t = 0.1, 0.2$ のときは上廻る。

このように Δt の値により、周波数スペクトルは違ってくるが周波数の高い所では大体同様な値になる。

したがって、 Δt の選定により解析対象系のゲイン精度が左右されるが、解析可能な周波数範囲は余り変化しない。

今回の解析例で $\Delta t = 0.3$ に取ると $T_x = 1 \text{ sec}$ で波形からサンプリングされるデータ数は3ケになるから第2-9図のようにスペクトル振巾はかなり小さな値になり応答関数のゲイン誤差が大きくなることは理解できる。

Δt の値を小さく取れば精度は向上するが、計算時間は増大し、コスト高になる。またデータをサンプリングする手間も大きくなるので実用上は制約を受ける。

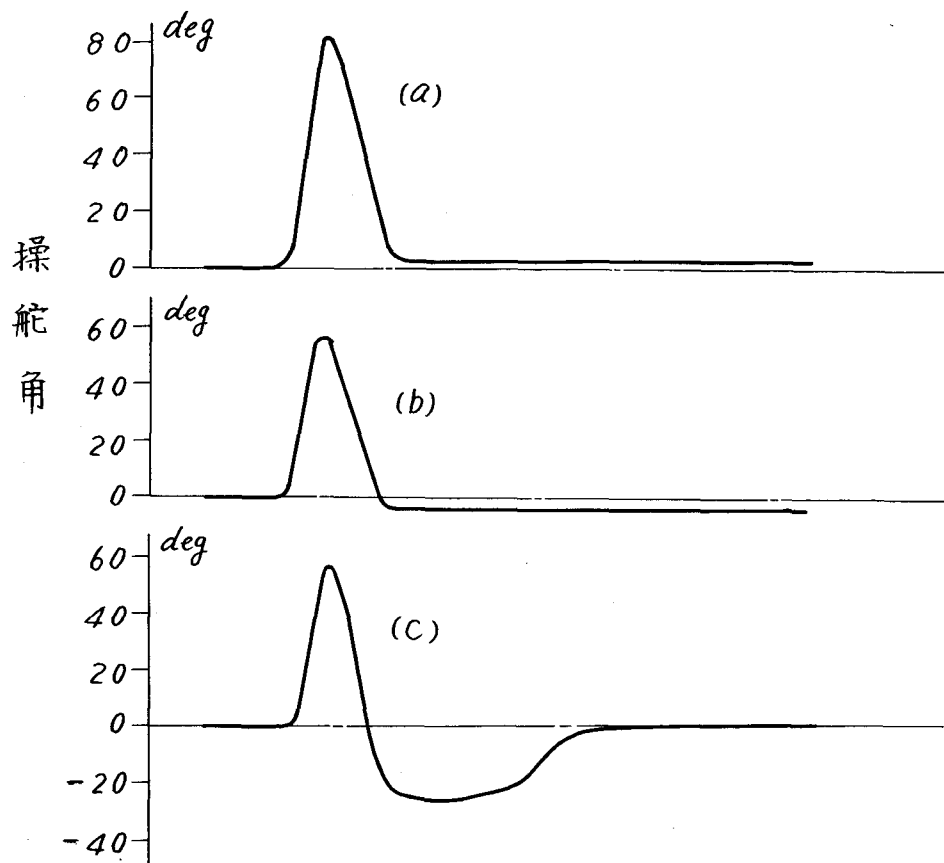
これらのことを考慮すれば分割巾は $\Delta t = 0.05$ または0.1に取るのが妥当と考えられる。

(2) 入力の持続時間 T_x

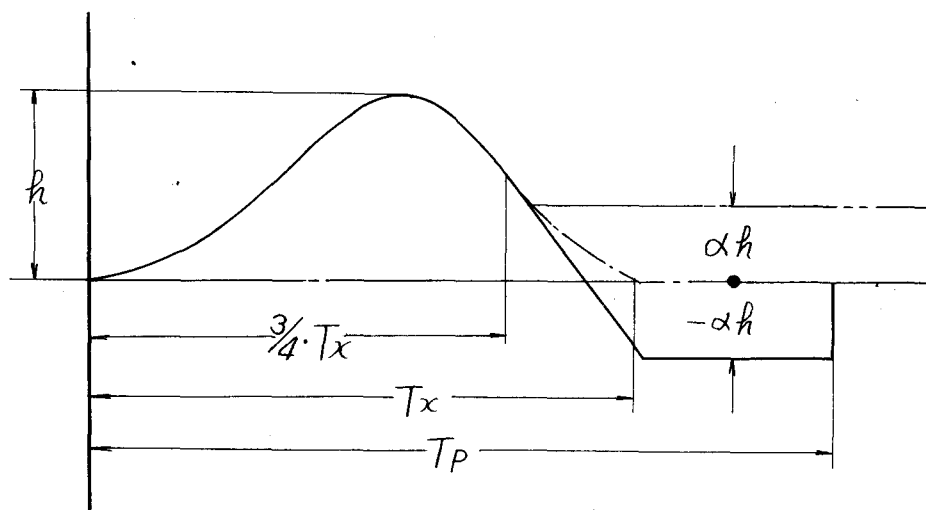
次に入力波形の持続時間 T_x の影響を検討するため、(2-12A)式の波形で $\Delta t = 0.1$ として、 $T_x = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 \text{ sec}$ について計算し、第2-10図に示した。 T_x が小さくなるほど曲線は高周波域迄伸び、解析可能な周波数が高くなることを示している。

理想的な波形としては $T_x = 0$ のインパルス関数が考えられるが、実現不可能で、運転者がハンドルから入力として与える限界は $T_x = 0.5 \sim 1 \text{ sec}$ であろう。

振巾が50%低下までの範囲を信頼巾とすれば、解析可能な周波数は $T_x = 3.0 \text{ sec}$ で0.320PS, $T_x = 2.0$; 0.470PS, $T_x = 1.0$; 0.90PS, $T_x = 0.5$; 1.750PSになる。



才 2-11 図 操舵波形例



第 2-12 図 入力波形の検討

実用的にはこのような過渡応答試験で解析しうるのは1～2 C P S程度迄と考えられる。

(3) 入力波形の形状

実際に運転者がハンドルから入力を加えた場合、操舵角波形がどのような形状を示すかを調べた。第2-11図は代表的な操舵波形例で、(a)はハンドル中立の位置から始まり、大体もとの位置に戻り、解析波形としては望ましいものである。(b)はもとの状態に戻らず、戻したりない場合の波形である。(c)はover-shootを起し、しばらくたつてからもとの位置に復帰した状態である。

測定データでは(a)のような波形はまれで、一般に(b)又は(c)の波形になりやすい。このような波形の形状が、計算精度にどのような影響があるかを検討した。

解析波形は先に検討したものと同様に(2-12A)式の偏位正弦波を用い、第2-12図のようにもとの位置に戻らず αh だけ偏位した状態を想定した。 $\alpha < 0$ の場合すなわち戻り過ぎた状態の検討は正弦波の $\frac{3}{4} \cdot T_x$ 点の接線を延長した波形を使用した。

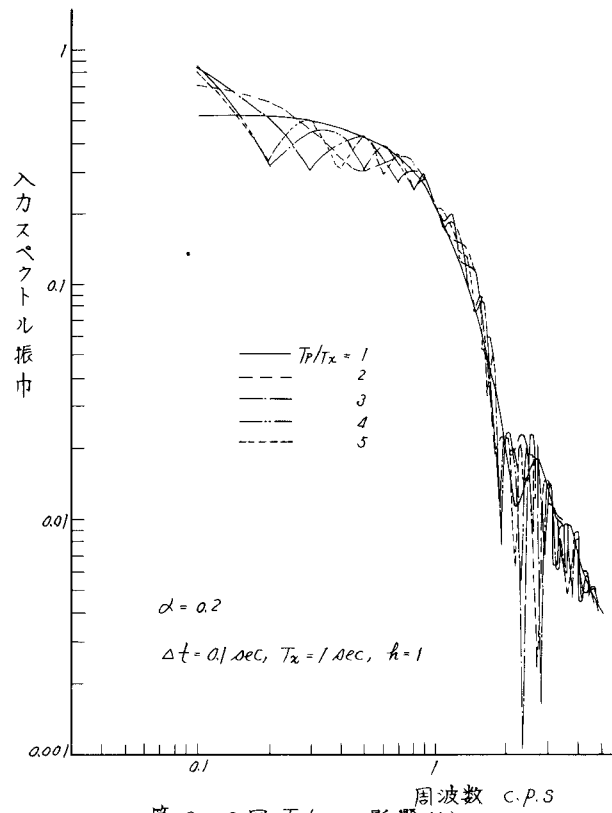
第2-11図(b)はハンドルが中立位置に完全に復帰せず、偏位した状態が持続しているが、実際の解析では出力波形の持続範囲を計算の対象にするから、第2-11図のように T_p/T_x の値を変えて検討した。

精度の検討計算は実際に操舵したときと同じ程度の $T_x=1\text{sec}$, $\Delta t=0.1\text{sec}$, $h=1$, $T_p/T_x=1\sim 5$, $\alpha=0.2$, $Q4$ の諸元を採用した。

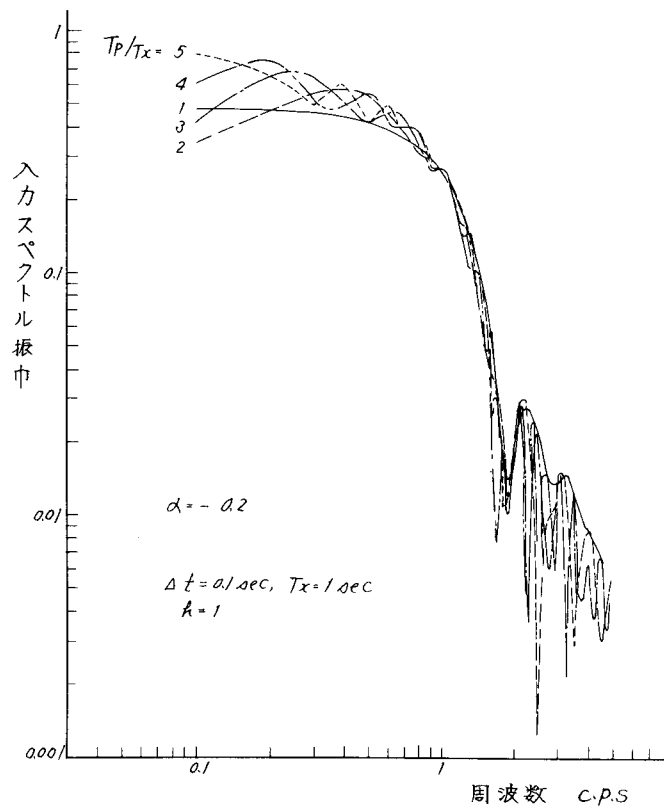
第2-13図は偏位量 $\alpha=0.2$ のときの T_p/T_x の影響を表わしたもので、 $T_p/T_x=1$ のとき、周波数スペクトルは比較的なめらかな曲線になるが、この値が大きくなると凹凸がかなり表われる。しかも T_p/T_x の値が変つても凹凸の周波数位置が変化するのみで凹凸の変動値には大差ない。

以上は $\alpha > 0$ の場合であつたが、 $\alpha=-0.2$ 、すなわち戻り過ぎた状態は第2-14図のように、凹凸の平均値を考えると第2-13図のときとは逆に周波数スペクトルは見掛け上大きくなる。

第2-15図は偏位量 $\alpha=0.4$ のときの計算結果で、凹凸の振巾は $\alpha=0.2$ のときに較べ大きくなつてゐる。



第 2-13 図 T_p/T_x の影響 (1)



第 2-14 図 T_p/T_x の影響 (2)

これらの検討結果から判断すれば、偏位量は $\alpha = \pm 0.1$ 以内に、すなわち入力最大振巾の10%以内に、また T_p / T_x の値は1～1.5程度、入力持続時間の1.5倍以内に収めればかなり精度の良い値がえられる。いずれにしても偏位量を少なくすることが最善の方法である。

以上、精度の検討を行なったが、解析に適した運転方法としてはできるだけ短時間にハンドルに刺戟を与え、完全に中立の位置にもどすことである。しかし、このような運転はかなり困難なことであるから、数多くのデータから解析に適した測定波形を選択すべきであろう。

2.3.3 解 析 例

車速 $V = 50 \text{ Km/h}$ で直進中、運転者がハンドルに急激に刺戟を与えた時の測定波形例を第2-16図に示す。この時の測定項目は操舵角、操舵力、横加速度、ヨー角加速度の4つで電磁オシログラフに記録したものである。入力の持続時間 $T_x = 0.5 \text{ sec}$ で運転者はかなり早く操舵している。

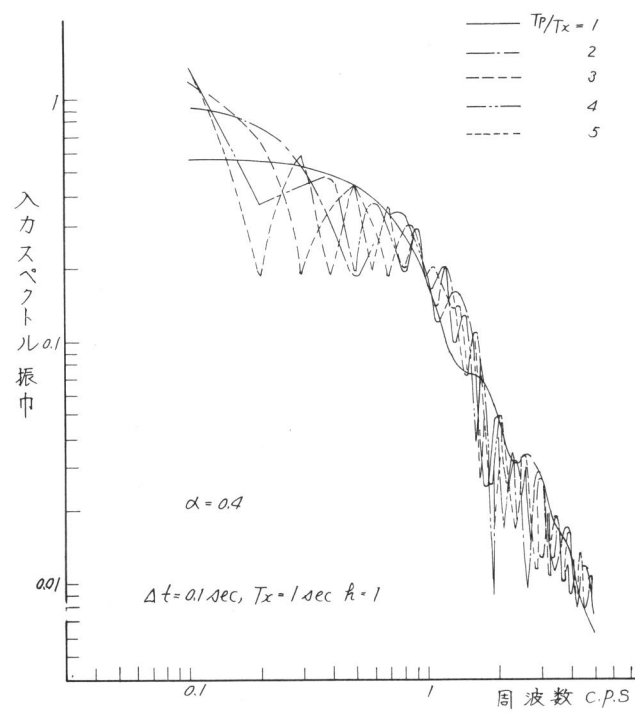
この測定波形より $\Delta t = 0.1 \text{ sec}$ 間隔でデータをサンプリングし、操舵角、横加速度のスペクトル振巾を計算したものが第2-17図である。横加速度のスペクトルは 0.50 P S 以上の高い周波数で凹凸の山がかなり見られる。入力である操舵角スペクトル A_x から信頼域を50%とすれば 1.90 P S まで解析可能である。

入・出力のスペクトルから操舵角－横加速度の応答関数を計算し第2-18図に示した。これを周波数応答試験結果と比較すると、解析値のバラツキはかなり認められるが、平均値的なものを考えると大体よく合う。たゞ周波数が 2.00 P S 以上では両者の結果に開きが生じている。

先の精度の検討で $\Delta t = 0.1$ 、 $T_x = 0.5$ の場合、解析可能な周波数範囲が 1.90 P S 迄であつたが、この結果とよく一致している。

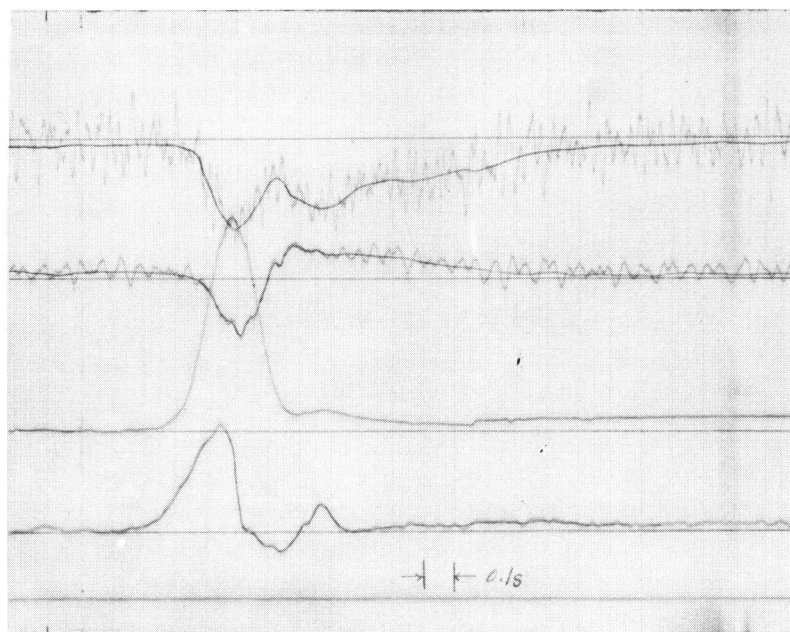
このように実際の解析結果でも精度の検討結果と同じ傾向が認められることから、実際の計算には精度の検討結果を基礎にして解析結果を判断すれば、大きな誤りをおかさないですむものと考えられる。

以上過渡応答試験により自動車の周波数応答関数を解析したが、この試験は周波数応答試験に較べ、測定時間が短かくてすむ利点がある。自動車の試験は



第2-15図 T_P/T_x の影響 (3)

横加速度
ヨ
角加速度
操舵角
操舵力

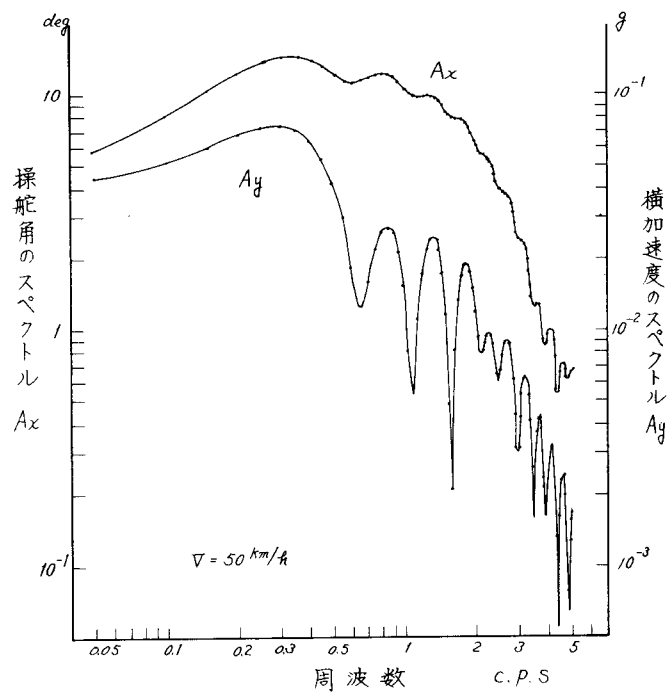


第2-16図 過渡応答試験の測定波形例

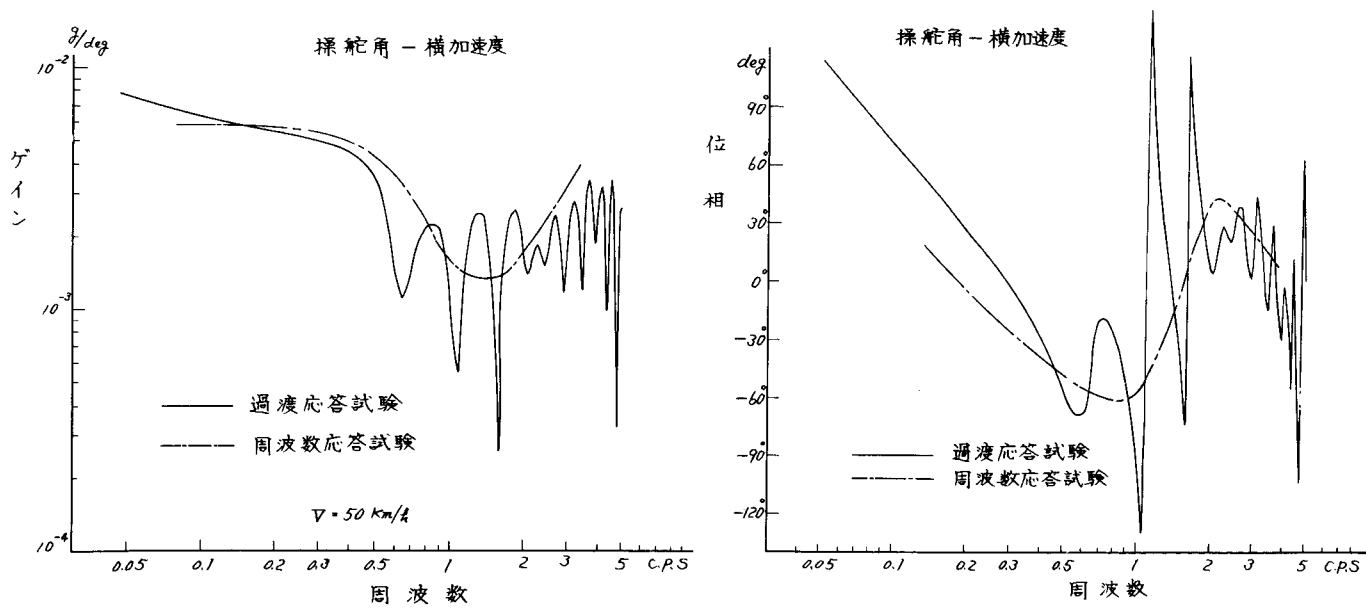
路面上を走行中に実施するから試験道路の長さ、道巾などで制約を受けることが多い。このような点ではこの試験法は便利である。

また測定データを読取り、電子計算機で計算するが、データ読取り個数は数十個以内で、データ処理もたいした問題でない。

過渡応答試験はこのような長所があるが、解析する場合は精度について十分検討する必要がある。



第2-17図 入出力のスペクトル



第2-18図 過渡応答試験による解析例

2.4 相関関数による解析

2.4.1 不規則波形と周波数応答関数

先の周波数応答試験、過渡応答試験などは自動車の動特性を測定するために、正弦波や、瞬間的な過渡波形をハンドルなどから故意に自動車に附加した試験であつた。

しかし突風、不整地などによる外部攪乱力や、一般路面を走行中の操舵などはすべて不規則波形になる。

また、自動車の力学系はかなり複雑、微妙なもので、非線形特性と考えられる要素も多い。したがつて入力の大きさによつても応答特性が変化することもある。

このようなことから、自動車の実際の作動状態での応答特性を解析することは特に重要で、不規則波形のスペクトル解析の概念を自動車の運動性能解析に適用し、不規則な応答波形から周波数応答関数を算出することが必要になる。⁶⁾⁷⁾ 自動車の振動や路面の凹凸についてのスペクトル解析は高橋、M. Mitschke,⁸⁾⁹⁾ 兼重、川合などにより以前から行なわれており、解析方法も確立されつつある。

一方、自動車の運動性能の解析に適用された例はない。

自動車の運動性能は振動特性と、対象とする周波数も異なり、また取扱う力学系もかなり相違する。

したがつて、運動性能をスペクトル解析する方法を検討するため、運転者に任意に操舵させ、この時の車の運動から周波数応答関数を算出する方法を試みた。

いま、周波数応答関数 $G(\omega)$ なる系にランダムな入力 $x(t)$ を入れ $y(t)$ なる出力をえたとし、 $x(t)$ 、 $y(t)$ が平均値 0 の定常確率過程であると仮定すると、入力および出力の自己相関関数 $R_{xx}(\tau)$ 、 $R_{yy}(\tau)$ は

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t+\tau) \cdot x(t) dt \quad (2-12)$$

$$R_{yy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T y(t+\tau) \cdot y(t) dt \quad (2-13)$$

入・出力間の相互相関関数 $R_{yx}(\tau)$ は

$$R_{yx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T y(t+\tau) \cdot x(t) dt \quad (2-14)$$

また、入力および出力のパワースペクトル $P_{xx}(f) \cdot P_{yy}(f)$ は

$$P_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) \cdot e^{-2\pi f \tau i} d\tau \quad (2-15)$$

$$P_{yy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{yy}(\tau) \cdot e^{-2\pi f \tau i} d\tau \quad (2-16)$$

入力 $x(t)$ ・ 出力 $y(t)$ のクロススペクトル $P_{yx}(f)$ は

$$P_{yx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{yx}(\tau) \cdot e^{-2\pi f \tau i} d\tau \quad (2-17)$$

で表わされる。パワースペクトルと周波数応答関数 $G(f)$ の間には次の関係が成立つ。

$$P_{yy}(f) = |G(f)|^2 \cdot P_{xx}(f) + P_{nn}(f) \quad (2-18)$$

ただし、 $P_{nn}(f)$ は出力 $y(t)$ の中の $x(t)$ に無関係な要素いわゆる $n(t)$ なるノイズのパワースペクトルで、 $P_{nn}(f)$ が無視しうる程度の場合には、入・出力のパワースペクトルから系の応答が求められる。

また、クロススペクトルでは

$$P_{yx}(f) = G(f) \cdot P_{xx}(f) \quad (2-19)$$

となり、振幅ゲイン $G(f)$ は

$$G(f) = \sqrt{\left| \frac{R\{P_{yx}(f)\}}{P_{xx}(f)} \right|^2 + \left| \frac{\text{Im}\{P_{yx}(f)\}}{P_{xx}(f)} \right|^2} \quad (2-20)$$

位相 $\phi(f)$ は

$$\phi(f) = -\tan^{-1} \left[\text{Im}\{P_{yx}(f)\} / R\{P_{yx}(f)\} \right] \quad (2-21)$$

で、 $\text{Re}\{P_{yx}(f)\}$, $\text{Im}\{P_{yx}(f)\}$ は $P_{yx}(f)$ の実数部と虚数部を示す。

コヘレンシー $r^2(f)$ は

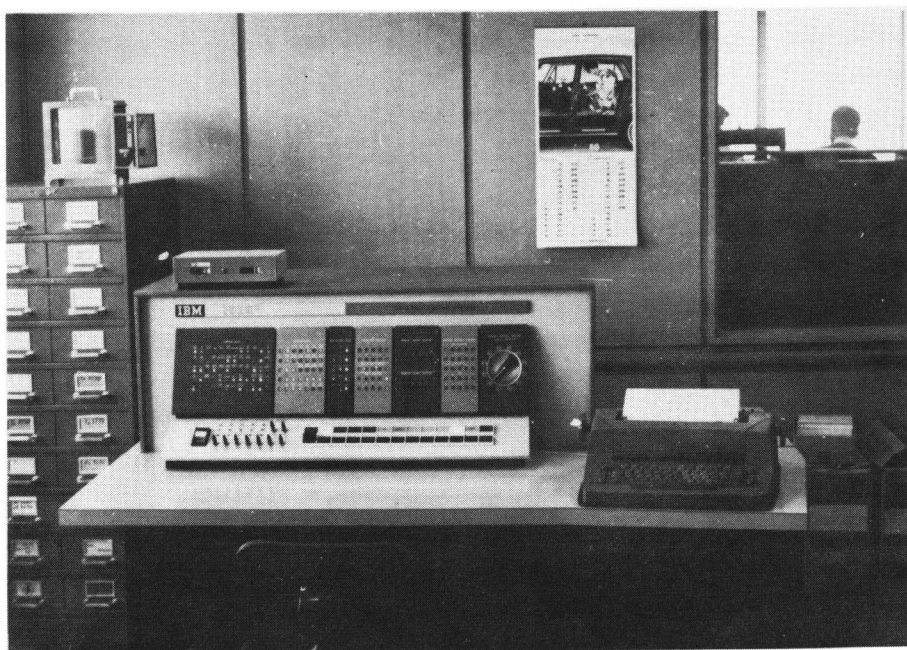
$$r^2(f) = 1 - \frac{P_{nn}(f)}{P_{yy}(f)} = \frac{P_{xx}(f)}{P_{yy}(f)} |G(f)|^2 \quad (2-22)$$

このように、入・出力間のパワースペクトルからも周波数応答関数が求められるが、さきにも述べたように、出力 $y(t)$ にノイズが含まれていると $G(f)$ 推定値の精度は低下するし、また、位相が求められない欠点がある。この点、クロススペクトルによる計算は、多少複雑になるが位相も求められるし有利である。以上のようにして周波数応答関数のゲイン・位相差がわかるが、実際の自動車の運動の場合に、入力としては操舵角・操舵力・実舵角があり、出力としては横方向・ヨーイング・ローリングのそれぞれの加速度・速度・変位が考えられ、これらの伝達関数から車の操縦性が評価できる。

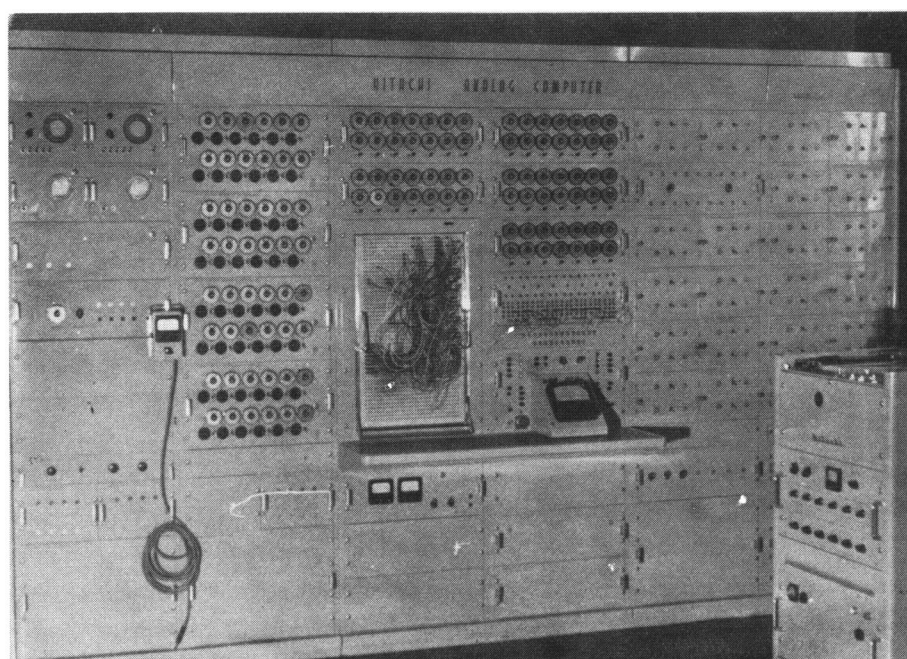
2.4.2 パワー・スペクトルの推定

パワー・スペクトル、クロススペクトルを解析する方法には大別して、アナログ方式とデジタル方式がある。アナログ方式の一つにアナログ・コリレータ¹⁰⁾ーを使用してパワースペクトルを計算する方法がある。筆者は、アナログ・コリレーターを使用した経験はないが、器機のドリフト、精度などに難点があるようである。コリレーターは相関関数が求められるのみで、周波数応答関数の算出には、コリレーション曲線をデジタル化して以後の計算をデジタル・コンピュータで処理する必要がある。

アナログ方式のもう一つの方法は、測定波形を計測用テープ・レコーダーに収め再生波形を帯域のせまいバンド・パス・フィルターを通して、アナログコンピュータで各周波数ごとのパワー・スペクトルを算出する方法である。¹¹⁾ 筆者は $\frac{1}{8}$ オクターブ・バンドのバンドパスフィルターを使用し、計算を試みたが、フィルターの帯域幅などに問題があり、精度が悪かった。またこの方式では入・出力のパワースペクトルの比から応答関数を計算するから、位相が求められない難点がある。



第2-19図 デジタルコンピュータ
(IBM 1620 II)



第2-20図 アナログコンピュータ
(HITACH ALS)

一方、デジタル方式は、測定波形をある時間間隔でデジタル化し、パワー・スペクトル、クロス・スペクトルの計算から、応答関数、誤差計算まで一貫してデジタルコンピュータで処理する方法である。この方法は、後ほど述べるような数値諸元の変更やデーター処理過程にかなり複雑な論理回路を挿入できるので、たとえば数値フィルターののような測定波形の修正も可能である。もちろん、計算精度においてはアナログ方式と比較にならない。たゞ、欠点は計算のコストが高くなることである。

このようなことから、デジタル・コンピュータを使用する計算方式を採用した。第2-19、20図は本論文に使用したデジタル・コンピュータとアナログ・コンピュータを示す。

今、入力の測定波形を $x(t)$ または $\{x(n \cdot \Delta t)\}$ ($n = 1, 2, 3, \dots, M$)、出力を同様に $y(t)$ 、 $\{y(n \Delta t)\}$ ($n = 1, 2, 3, \dots, M$)とし、これらはそれぞれエルゴード的な定常確率過程のサンプル関数であると仮定する。^{12) 13)}

(第2-21図)

自己相関関数 $R_{xx}(\ell \Delta t)$ ¹⁴⁾は

$$R_{xx}(\ell \Delta t) = \frac{1}{M-\ell} \sum_{n=1}^{M-\ell} x[(\ell+n)\Delta t] \cdot x(n\Delta t) \quad (2-23)$$

$$\ell = 0, 1, 2, \dots, h$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, M$$

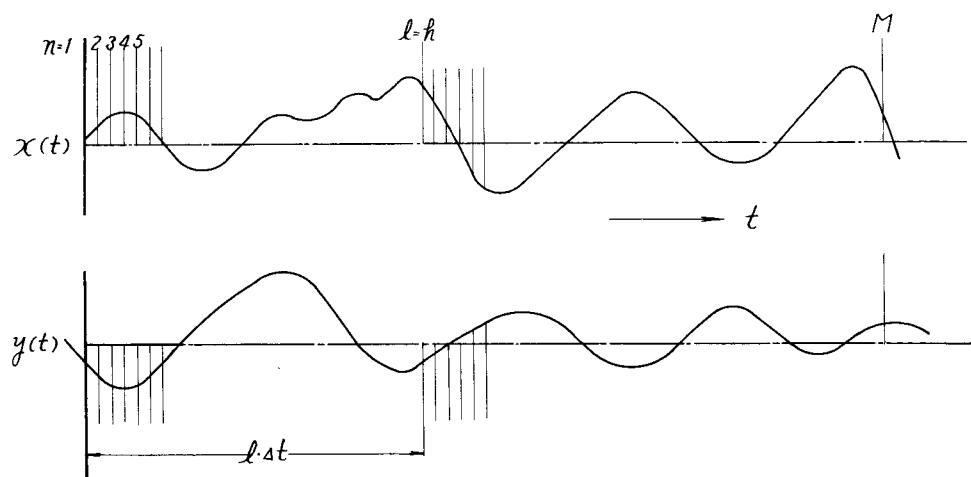
パワースペクトルの計算には直流成分があると困る。そこで平均値 $\bar{x}$ を計算

$$\bar{x} = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M x(n\Delta t) \quad (2-24)$$

して、 $x(n\Delta t)$ の代りに直流分を除いた $[x(n\Delta t) - \bar{x}]$ を使用する。次に自己相関をフーリエ変換した値を $\bar{P}_{xx}$ とすると

$$\begin{aligned} \bar{P}_{xx}\left(\frac{r}{h} \frac{1}{2\Delta t}\right) = \Delta t \{ & R_{xx}(0) + 2 \sum_{\ell=1}^{h-1} R_{xx}(\ell \Delta t) \cos\left(2\pi \frac{r}{2h} \ell\right) \\ & + (-1)^r R_{xx}(h\Delta t) \} \end{aligned} \quad (2-25)$$

$$r = 0, 1, 2, 3, \dots, h$$



第2-21 図 相関々数説明図

実際に、この確率過程のパワー・スペクトルを求めるにはえられた観測記録が有限であるから、計算した $\bar{P}_{xx}$ をスムージングする必要がある。

これに Spectra Window W_1, W_2, W_3 ¹⁵⁾ を用いた。

Power Spectrum の推定値を $\hat{P}_{xx}$ とすれば、

$$\hat{P}_{xx} \left(\frac{r}{h} \frac{1}{2\Delta t} \right) = \sum_{\nu=-k}^k a_{\nu} \bar{P}_{xx} \left(\frac{r-\nu}{h} \frac{1}{2\Delta t} \right) \quad (2-26)$$

$$\text{ただし、} \bar{P}_{xx} \left(\frac{-r}{h} \frac{1}{2\Delta t} \right) = \bar{P}_{xx} \left(\frac{r}{h} \frac{1}{2\Delta t} \right)$$

$$\bar{P}_{xx} \left(\frac{h+r}{h} \frac{1}{2\Delta t} \right) = \bar{P}_{xx} \left(\frac{h-r}{h} \frac{1}{2\Delta t} \right)$$

ただし、 a_{ν} としては次のような値を使用する。

	a_0	$a_1 = a_{-1}$	$a_2 = a_{-2}$	$a_3 = a_{-3}$
W_1	0.5132	0.2434	0	0
W_2	0.6398	0.2401	-0.0600	0
W_3	0.7029	0.2228	-0.0891	0.0149

$$\text{但し } r-1 = |r-1|$$

$$r-2 = |r-2|$$

⋮

W_1, W_2, W_3 の数値を代入して書換えると

$$\left. \begin{aligned} \hat{P}_{xx} \left(\frac{r}{h} \frac{1}{2\Delta t} \right)_{W_1} &= 0.486 \bar{P}_{xx} \left(\frac{r+1}{h} \frac{1}{2\Delta t} \right) + 0.5132 \bar{P}_{xx} \left(\frac{r}{h} \frac{1}{2\Delta t} \right) \\ \hat{P}_{xx} \left(\frac{r}{h} \frac{1}{2\Delta t} \right)_{W_2} &= -0.1200 \bar{P}_{xx} \left(\frac{r+2}{h} \frac{1}{2\Delta t} \right) + 0.6398 \bar{P}_{xx} \left(\frac{r}{h} \frac{1}{2\Delta t} \right) \\ \hat{P}_{xx} \left(\frac{r}{h} \frac{1}{2\Delta t} \right)_{W_3} &= 0.0298 \bar{P}_{xx} \left(\frac{r+3}{h} \frac{1}{2\Delta t} \right) - 0.1782 \bar{P}_{xx} \left(\frac{r+2}{h} \frac{1}{2\Delta t} \right) \\ &\quad + 0.4456 \bar{P}_{xx} \left(\frac{r+1}{h} \frac{1}{2\Delta t} \right) + 0.7029 \bar{P}_{xx} \left(\frac{r}{h} \frac{1}{2\Delta t} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2-27)$$

上記、 W_1, W_2, W_3 の各場合について計算し、各周波数におけるちらばりを、¹⁶⁾
検討し、結果に著しい差が認められる場合には h を大きくとつた。

総データ数 M 、サンプル間隔 Δt 、遅延数 h などの設定は非常にむづかし
い問題であるが、¹⁷⁾ 解析の対象物に応じて経験的に決定した。

(2-27) 式で求められた平均化されたパワー・スペクトル密度の推定誤差¹⁸⁾
の範囲は

$$\text{Error} = \frac{\text{推定値 } \hat{P}_x \text{ の標準偏差}}{\text{真のパワー・スペクトル密度 } P_x} \div \sqrt{\frac{h}{M}} \quad (2-28)$$

で周波数 $f = \frac{r}{h} \cdot \frac{1}{2\Delta t}$ で $r = 0$, h の両端では、上記誤差の 40 % 増しにな
る。

出力 $y(t)$ の自己相関々数 R_{yy} , パワースペクトル P_{yy} も同様に計算でき
る。

2.4.3 クロス・スペクトル，応答関数の計算法

入力 $X(t)$ と出力 $y(t)$ との相互相関関数 R_{yx} ¹⁹⁾ は

$$\left. \begin{aligned} R_{yx}(\ell\Delta t) &= \frac{1}{M-\ell} \sum_{n=1}^{M-\ell} y[(\ell+n)\Delta t] x(n\Delta t) \\ R_{yx}(-\ell\Delta t) &= \frac{1}{M+1} \sum_{n=-\ell}^M y[(-\ell+n)\Delta t] x(n\Delta t) \end{aligned} \right\} \quad (2-29)$$

$$\ell = 0, 1, 2, \dots, h$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, M$$

で計算できる。

$$\left. \begin{aligned} R^+_{yx}(\ell\Delta t) &= \frac{1}{2} \{ R_{yx}(\ell\Delta t) + R_{yx}(-\ell\Delta t) \} \\ R^-_{yx}(\ell\Delta t) &= \frac{1}{2} \{ R_{yx}(\ell\Delta t) - R_{yx}(-\ell\Delta t) \} \end{aligned} \right\} \quad (2-30)$$

とおけば、クロススペクトル P_{yx} は

$$P_{yx}(f) = C_{yx}(f) - i S_{yx}(f) \quad (2-31)$$

$$i^2 = -1$$

で表わされる。

ただし、 $C_{yx}(f), S_{yx}(f)$ は、相関々数のフーリエ変換したものの余弦項 (Real),
正弦項 (Imaginate) 部分で次式で示される。²⁰⁾

$$\begin{aligned} \bar{C}_{yx}\left(\frac{r}{h}, \frac{1}{2\Delta t}\right) = \Delta t \left\{ R_{yx}^+(0) + 2 \sum_{\ell=1}^{h-1} R_{yx}^+(\ell\Delta t) \cos\left(2\pi \frac{r}{2h} \ell\right) \right. \\ \left. + (-1)^{r+} R_{yx}^+(h\Delta t) \right\} \end{aligned} \quad (2-32)$$

$$\bar{S}_{yx}\left(\frac{r}{h}, \frac{1}{2\Delta t}\right) = \Delta t \left\{ 2 \sum_{\ell=1}^{h-1} R_{yx}^-(\ell\Delta t) \sin\left(2\pi \frac{r}{2h} \ell\right) \right\}$$

$$r = 0, 1, 2, \dots, h$$

クロス・スペクトルの推定値 $\hat{P}_{yx}$ は先のパワースペクトルの場合と同様

$$\hat{P}_{yx}(f) = \hat{C}_{yx}(f) - i \hat{S}_{yx}(f) \quad (2-33)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{C}_{yx}\left(\frac{r}{h}, \frac{1}{2\Delta t}\right) &= \sum_{\nu=-k}^k a_{\nu} \bar{C}_{yx}\left(\frac{r-\nu}{h}, \frac{1}{2\Delta t}\right) \\ \hat{S}_{yx}\left(\frac{r}{h}, \frac{1}{2\Delta t}\right) &= \sum_{\nu=-k}^k a_{\nu} \bar{S}_{yx}\left(\frac{r-\nu}{h}, \frac{1}{2\Delta t}\right) \end{aligned} \right\} \quad (2-34)$$

$$r = 0, 1, 2, \dots, h$$

a_{ν} は Smoothed Spectral Window W_1, W_2, W_3 を使用する。

ここでえられたクロススペクトルの成分から、ゲイン・位相が次のように推定できる。

$$G(f) = \frac{P_{yx}(f)}{P_{xx}(f)} \quad (2-35)$$

であるから、周波数応答関数のゲイン位相の推定値 $|G(f)|, \phi(f)$ は

$$|\hat{G}(\frac{r}{h}, \frac{1}{2\Delta t})|^2 = \left\{ \frac{\hat{C}_{yx}(\frac{r}{h}, \frac{1}{2\Delta t})}{\hat{P}_{xx}(\frac{r}{h}, \frac{1}{2\Delta t})} \right\}^2 + \left\{ \frac{\hat{S}_{yx}(\frac{r}{h}, \frac{1}{2\Delta t})}{\hat{P}_{xx}(\frac{r}{h}, \frac{1}{2\Delta t})} \right\}^2 \quad (2-36)$$

$$\phi(\frac{r}{h}, \frac{1}{2\Delta t}) = -\tan^{-1} \frac{\hat{S}_{yx}(\frac{r}{h}, \frac{1}{2\Delta t})}{\hat{C}_{yx}(\frac{r}{h}, \frac{1}{2\Delta t})} \quad (2-37)$$

$$r = 0, 1, 2, \dots, h$$

となる。次に出力 $y(t)$ が、入力 $x(t)$ とどの程度の直線的関係にあるかを調べるコヘレンシー $r^2(f)$ の推定値は

$$r^2(\frac{r}{h}, \frac{1}{2\Delta t}) = \frac{|\hat{G}(\frac{r}{h}, \frac{1}{2\Delta t})|^2 \hat{P}_{xx}(\frac{r}{h}, \frac{1}{2\Delta t})}{\hat{P}_{yy}(\frac{r}{h}, \frac{1}{2\Delta t})} \quad (2-38)$$

から求められ、系の線形性や、精度などの概略の検討が、これよりできる。
 応答関数、推定値の相対誤差 $R(f)$ は、⁽²⁾

$$R(\frac{r}{h}, \frac{1}{2\Delta t}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\frac{1}{\hat{r}^2(\frac{r}{h}, \frac{1}{2\Delta t})} - 1 \right) F(2, 2(n-1), \delta)} \quad (2-39)$$

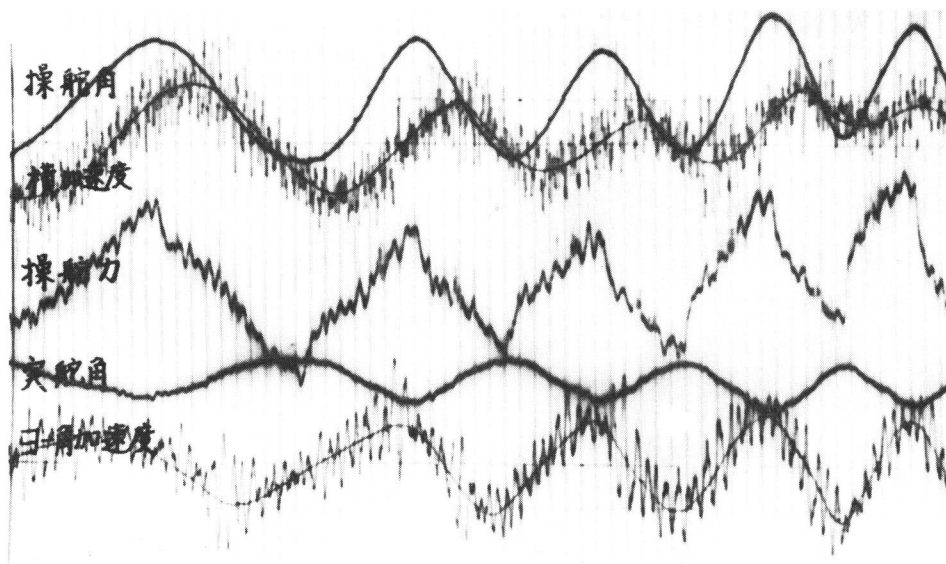
ただし、

$$n = \frac{M}{h} - \frac{1}{2 \sum_{\nu=-k}^k a_{\nu}^2} \quad (2-40)$$

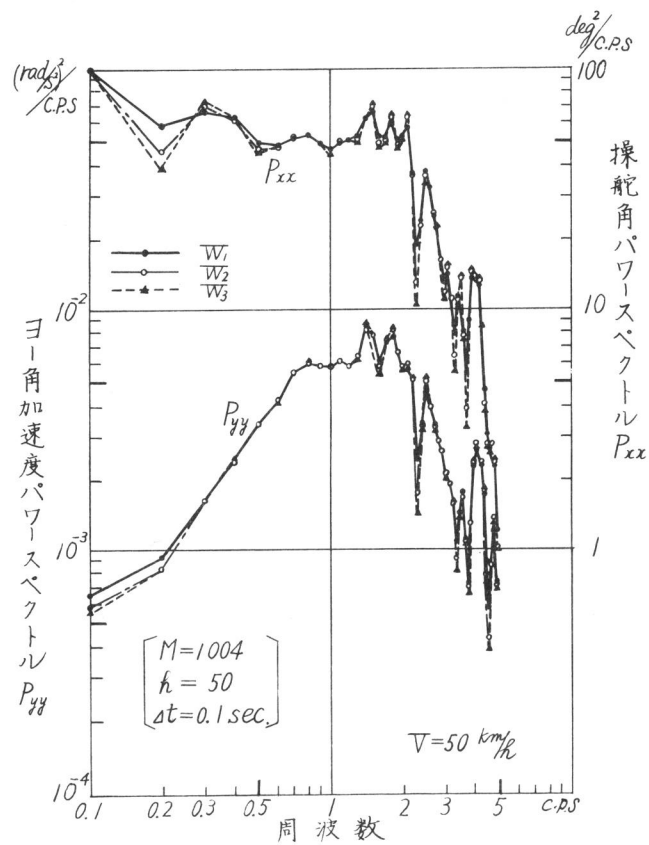
に最も近い整数。 $F(2, 2(n-1), \delta)$ は自由度、 $2, 2(n-1)$ の F 分布に従う。

$F_{2(n-1)}^2$ により

$$P_{\text{rob}} \{ F_{2(n-1)}^2 \leq F(2, 2(n-1), \delta) \} = \delta \quad (2-41)$$



第2-22図 ランダム操舵の波形例



第2-23図 ヨー角と操舵角のパワースペクトル

で定められる。 δ は 95% として計算し、 $F(2, 2(n-1), 0.95)$ の近似式として、

$$F(2, 2(n-1), 0.95) \doteq 3.00 + \frac{10.00}{2(n-1) - 1.40} \quad (2-41A)$$

を使用した。計算された $R(f)$ が 1.00 となると大体 $G(f)$ の値は信用できない。

確率(信頼度)が δ 以上の $|G(f)|$, $\phi(f)$ の入る範囲は $|G(f)| \{1 \pm R(f)\}$,

$\phi(f) \pm \sin^{-1}(R(f))$ である。

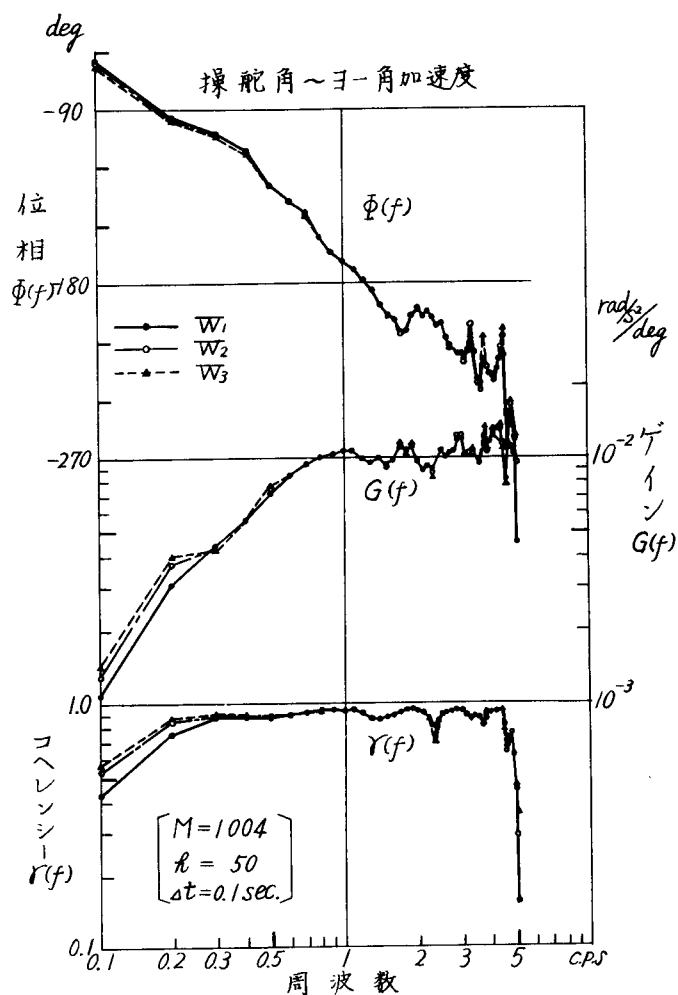
2.4.4 解析例

以上のような計算方法を適用すると、任意に操舵しても自動車の応答が求められるわけであるが、テストコースの道幅には制限があるから、ランダムといつても左右操舵の繰返しにならざるをえない。周波数応答関数をパワースペクトルから求める場合、最も重要なことは、対象とする周波数範囲の全域にわたり十分なパワーを有することである。このようなことから、車速一定で走行し運転者がハンドルを左右に操舵し、0.10 P S から 5.0 P S 位まで周期を繰返し上げたり下げたりする方法をとつた。

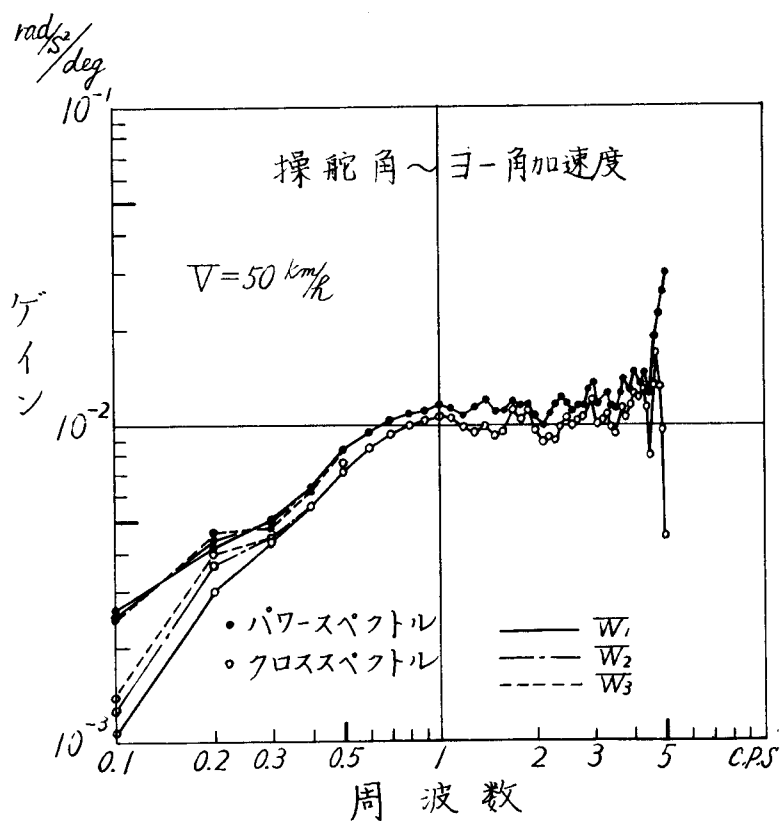
上記のような運転方法を採用することにより、周波数範囲の全域にわたり大体一樣なパワーがえられた。もちろん、このような運転方法をとらなくても応答は求められるが、周期的に運転をした方が精度が向上する。第 2-22 図は測定波形の一例である。

第 2-23 図はある小型車の車速 50 Km/h の場合の測定結果で、操舵角・ヨー角加速度のパワースペクトルを示す。計算はサンプル時間間隔 $\Delta t = 0.1$ sec ; データ総数 $M = 1004$; 最大ラグ数 $h = 50$; ウィンドウ $W_1 \cdot W_2 \cdot W_3$ で行なつた。低域側で多少のバラツキはあるが、ウィンドウによる差はわずかである。

第 2-24 図は相互相関から計算した操舵角・ヨー角加速度のゲイン・位相・コヘレンシーの結果である。測定周波数全域にわたりコヘレンシーも高く非常に良好な結果がえられている。



第2-24図 相関による解析の一例



第2-25図 パワーおよびクロススペクトルからのゲイン比較

$$(2-12) \text{式を } \tau=0 \text{ とおくと } R_{xx}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)^2 dt \quad (2-42)$$

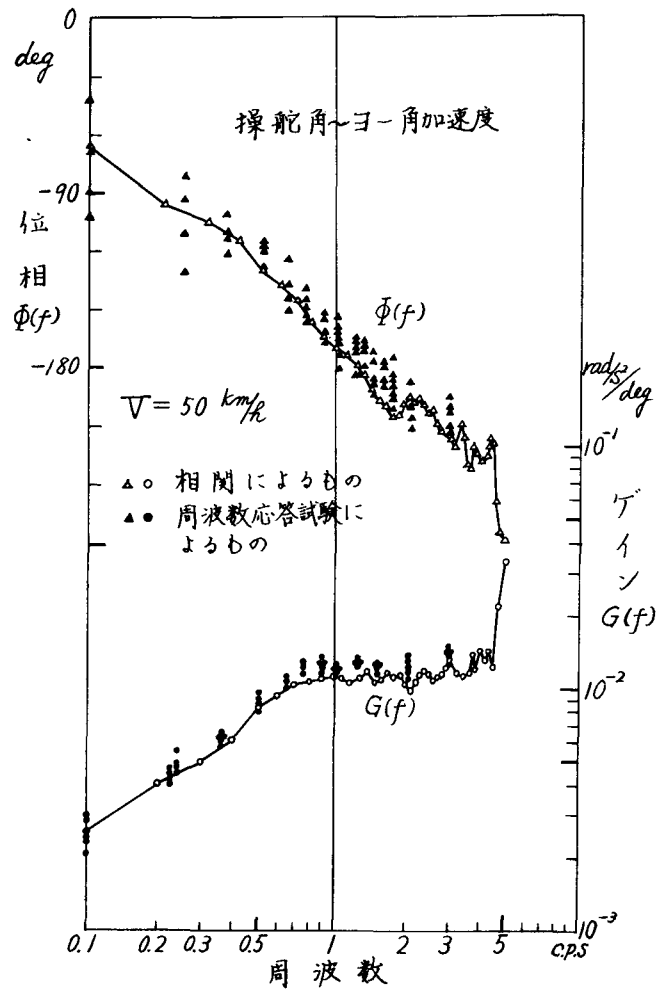
すなわち、 $R_{xx}(0)$ の値は入力の実乗平均値にほかならない。この関係から第2-24図の試験時の操舵角実効値 (r.m.s.) を求めると、18.1 deg で入力振幅の目安となる。

入・出力間パワースペクトルから算出したゲインとクロススペクトルからの値を比較すると、第2-25図のように、パワースペクトルから求めたものの方が多少ゲインが大きい程度で大体近い値になる。このことは、路面などの外部攪乱力が非常に少ないことを物語っている。テストに使用した専用道路はアスファルト舗装で路面凹凸は実効値 (r.m.s.) で6.3 mmであるから、この路面より凹凸が約半分程度の名神高速道路などでは、操縦性に及ぼす路面凹凸の影響は完全に無視しうるものと考ええる。

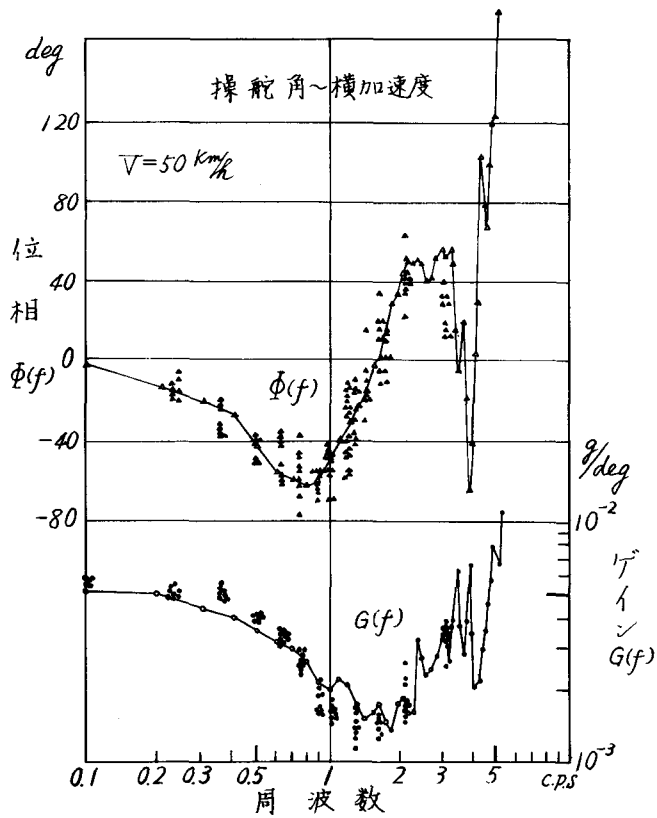
第2-26図は操舵角-ヨー角加速度のゲイン・位相を相関関数を利用して計算したものと周波数応答試験より求めた値とを比較したものである。

同様に、操舵角-横加速度の関係を第2-27図に示した。相関から求めたものと周波数応答試験から求めた値とは大体近い値になつている。

次に(2-39)式から、車速 $V = 50 \text{ Km/h}$ の操舵角-ヨー角加速度応答関数の相対誤差を計算し、第2-28図に示した。信頼度95%で相対誤差は10~20%程度で計算精度は高い。たゞ周波数の低い部分ではかなり大きくなる。



第2-26図 相関と周波数応答法との比較(1)



第2-27図 相関と周波数応答法との比較(2)

2.5 結 論

自動車の操舵による周波数応答特性を周波数応答試験、過渡応答試験、相関関数による解析の三つの解析方法について検討した結果は次の通りである。

周波数応答試験よりえられた結果の数値的評価は簡単であるが、自動車に完全な正弦波入力を加えることがかなりむづかしい。運転者により周期的に操舵する方法を採用したが、人間によつて正弦波を発生させるため入力波形が歪み、測定値、特に位相特性のばらつきがかなり認められる。

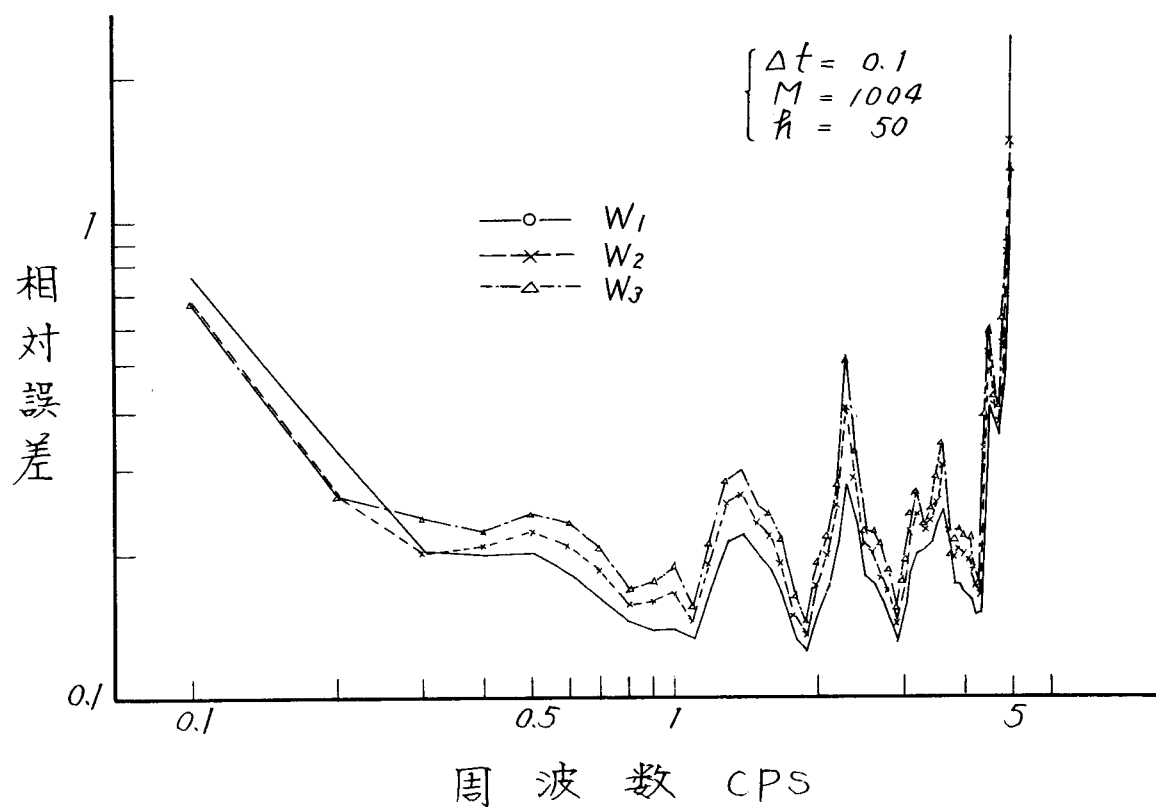
また、この試験には道巾、長さなどかなり大きな規模のテスト・コースが必要で、高速での不安定な状態での試験ではテスト・コースに制約を受けると危険である。この試験中に事故を起したにがい経験もある。

過渡応答試験は測定時間が短かく、テスト・コースも小規模なもので間に合うし、測定後のデータ処理、計算が比較的簡単であるが、運転者が加える入力波形、計算方法などにより解析値がかなり大巾に変化する。したがつて、この解析法を使用する場合は精度を十分検討する必要がある。

自動車の操縦性・安定性の解析にスペクトル解析の手法を適用することを初めて試みたが、筆者の経験によれば振動スペクトル解析よりも取扱いやすく良好な結果がえられている。

もちろん、この解析ではデーター処理、計算が複雑でかなりの労力を要するが、路面の不整地外力、突風のような空気攪乱外力などの不規則波形に対する解析など、実際に作動している状態での応答解析が可能であることなど多くの利点がある。

いずれにしても、これらの解析方法はそれぞれ長所、短所があるから解析する対象、試験条件により適宜使いわけて使用すべきであろう。



第2-28図 相対誤差の計算例
 (操舵角-ヨー角加速度)

参 考 文 献

- 1) “操舵規定装置による操縦性・安定性の研究”
自動車技術会操縦性・安定性委員会
自動車高速性能研究報告書 昭和34年
- 2) 森谷, 近森; “自動車の周期的操舵に関する一考察”
自動車技術 Vol.17, №9, 1963
- 3) 松岡, 清水; “内燃機関用インジェクタの動特性に関する研究”
機械学会論文集 Vol.28, №195 (昭和37-11)
- 4) J.O.Hougen & R.A.Walsh; “Pulse Testing Method.”
Chemical Engineering Progress, Vol.57, №3 1961
- 5) 4) の文献
- 6) 高橋; “路面の性質と自動車の振動をむすぶ理論”
自動車技術 Vol 7, №11~12, 1953
- 7) M.Mitschke; “Schwingungsverhalten und Sicherheit eines
Kraftfahrzeuges.”
ATZ Janrg 60, Heft 6, 1958
- 8) 兼重; “自動車走行振動のスペクトル解析”
自動車技術 Vol.18, №4, 1965
- 9) 川合; “自動車走行時の振動についての一考察”
新三菱技報 Vol. 6, №1, 1964

- 10) 兼重; “アナログコリレータによる走行時振動のパワースペクトル解析例”
自動車技術 Vol. 17, № 8, 1963
- 11) H. Bosch; “Analyse von komplexen Schwingungsercheinungen an Fahrzeugen.”
ATZ Jahrg 64, April, 1962
- 12) 藤井; “確率過程入門”
統計数理研究所 1964
- 13) W.T. Thomson; “Anwendung Statistischer Methoden auf mechanische Schwingungen.”
VDI-Berichte Nr. 66, 1962
- 14) 赤池; “不規則振動の統計的处理”
機械学会第198回講習会
“振動工学における最近の進歩”
- 15) Akaike; “On the Design of Lag Window for the Estimation of Spectra.”
Annals of the Institute of Statistical Mathematics.
Vol. XIV, № 1
- 16) H. Akaike; “On the Statistical Estimation of the Frequency Response Function.”
Annals of the Inst. of Statistical Mathematics.
Vol. 14, 1962
- 17) 兼重; “自動車の走行時振動データのとり扱い”
機械学会第181回講習会教材
“データ処理に関する講習会”

18) 14) の文献参照

19) 赤池；“不規則振動のスペクトル解析”

統計数理研究所 1964

20) 赤池；“スペクトル推定の統計理論”

統計数理研究所 1965

21) 赤池；“スペクトル推定の実際”

統計数理研究所 1965

第3章 操縦性・安定性に影響する因子と進路の予測

3.1 緒 言

自動車の動特性を制御系として取扱いうることを L. Segel が示してから、周波数応答解析が脚光を浴びてきているが、どのような形の応答関数が操縦しやすいのか、あるいは安定であるのか、応答関数の評価基準が確立されていない。

勿論、自動車は人間によつて操縦されるから、人間の特性を考慮して評価すべきであるが、まず自動車自体の応答関数を完全に把握すべきであろう。

自動車の操縦性・安定性に影響する因子は多いが、人間感覚で判定しうる程度の要素の水準を取れば測定された応答関数と人間の感じとを対照し、応答関数がどのような形をとるべきか、ある程度推察しうるものとする。

そこで、under, over-steer 特性の基礎的な主要因である前後輪 cornering 特性変化の影響を定常旋回、傾斜台試験で調べたのち、自動車の動特性を比較した。

また cornering 特性値の大きい High Cornering Power タイヤを使用した場合や、悬架装置の影響、特にロール剛性の大きさや、前後輪の分担比を変更したときの特性などを検討した。

次に周波数応答関数からインパルス応答関数を算出する方法を検討し、任意に操舵した場合の自動車の進路予想が可能かどうかを調べた。

3. 2 under,over-steer 特性との関連

3. 2. 1 unier,over-steer 特性

under,over-steer 特性は自動車の操縦性の基本的な特性である。
ハンドルを一定の角度で保舵し、走行速度を低速度から増して行くと、
旋回の曲率半径が増加する、すなわち軌跡が低速度のときよりもはみだ
して行く性質を under-steer、逆に曲率半径が減ずる、したがって軌跡は
内に入りこんで行くものを over-steer と称している。¹⁾

この under,over-steer 特性は力学的に基礎的な因子として、重心位置
と前後輪タイヤのコーナリング特性²⁾により変化するが、その他、多くの
因子により微妙に影響される。

たとえば Wishbone, Rigid Axle, Swing Axle など³⁾ 車架方式、操縦系統の弾⁴⁾
性⁵⁾、車架バネの伸縮に伴う操縦系統の干渉⁶⁾、板バネ式車架方式でよく問
題になるバネの上下変位につれて車軸が前後に変位する Axle Steer⁷⁾ な
どの影響を受ける。

今回は under,over-steer 特性に影響する基本的要素として、前後輪の
タイヤ圧（前後輪 Cornering Power の変化）の因子を取り上げ、その影
響がかなり認められる条件で比較測定を行なった。そして、under,
over-steer 特性により自動車の応答関数がどのように変化するかを調
べた。

試験は 5.20-12-2PR タイヤのタイヤ圧を 1.0 , 1.4 , 2.1 kg/cm² に
変え under,over-steer 特性を変更した。第 3-1 表は各タイヤ圧の^{注1)}
とき cornering 特性をタイヤ cornering 試験機で測定した値である。
タイヤ荷重 245 kg, Side Slip Angle 2° のときの Cornering Force を^{注2)}
単位 Slip Angle 当りの Cornering Power で表示している。

□

注 1) ブリジストンタイヤ株式会社での測定結果である。

注 2) Side Slip Angle の小さい範囲では Cornering Force は Side Slip
Angle に比例する。

第 3 - 1 表 試験時のタイヤ特性

タイヤサイズ	タイヤ圧 Kg/cm^2	コーナリング パワー Kg/deg
5.20 - 12 - 2PR	1.0	12.5
	1.4	20
	2.1	25.1

タイヤ圧が低くなると Cornering Power は減少している。この車の標準タイヤ圧は前後輪共、 1.4 Kg/cm^2 であるが、タイヤ圧を前輪 1.0 Kg/cm^2 、後輪 2.1 Kg/cm^2 の場合と前輪 2.1 Kg/cm^2 、後輪 1.0 Kg/cm^2 の3種について実験を行なった。

8)
under, over-steer の度合を示す量として Static Margin は次のように定義される。

$$S.M. := \frac{K_r \ell_r - K_f \ell_f}{(K_f + K_r) \ell} \quad (3-1)$$

K_f : 前輪のコーナリング・パワー

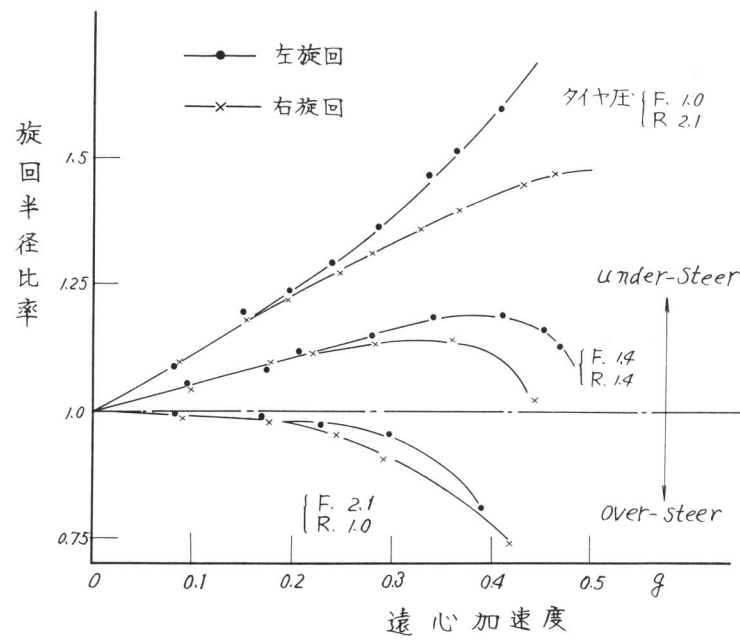
K_r : 後輪のコーナリング・パワー

ℓ : ホイールベース

ℓ_f : 前車軸から重心までの距離

ℓ_r : 後車軸から重心までの距離

この S.M. の値が正のとき under-steer 負の場合 over-steer 特性を示す。各試験時の値を求めると第 3 - 2 表のように、タイヤ圧 $1.0, 2.1 \text{ Kg/cm}^2$ の場合を除き $1.4, 1.4 \text{ Kg/cm}^2$ のときも程度は小さいが over-steer になる。この判定は自動車の重心位置とタイヤ cornering 特性のみを考慮したもので、先に説明したような各種の要因は加味されていない。



第3-1 図 under-Steer, over-Steer
特性の実測値



第3-2 図 傾斜台試験

第 3 - 2 表 試験時の Static Margin

(5.20-12-2PRタイヤ)

タイヤ圧 kg/cm^2		前後輪コーナリング	Static Margin	Steer の判定
前 輪	後 輪	パワー $K_f + K_r$ kg/deg	S . M .	
1.0	2.1	37.6	+0.253	U . S .
1.4	1.4	40.0	-0.015	O . S .
2.1	1.0	37.6	-0.183	O . S .

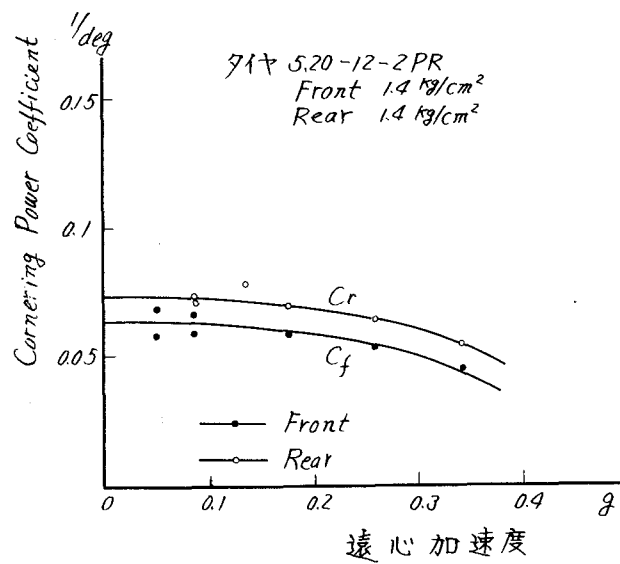
そこで、実車の under, over-steer 特性を実測した。第 3 - 1 図は規定された操舵角でハンドルを固定し、各車速における旋回半径を重心点軌跡から測定し、超低速時の旋回半径との比を取つて、旋回半径比率とした。この比率が 1 よりも大きい場合が under-steer で逆に小さい場合が over-steer 特性を示す。

この結果ではタイヤ圧 2.1, 1.0 kg/cm^2 のときは over-steer であるが、1.4, 1.4 kg/cm^2 では軽い under-steer 特性になつている。このように Static Margin の値と実測の under, over-steer 特性はかなり食い違いが見られる。

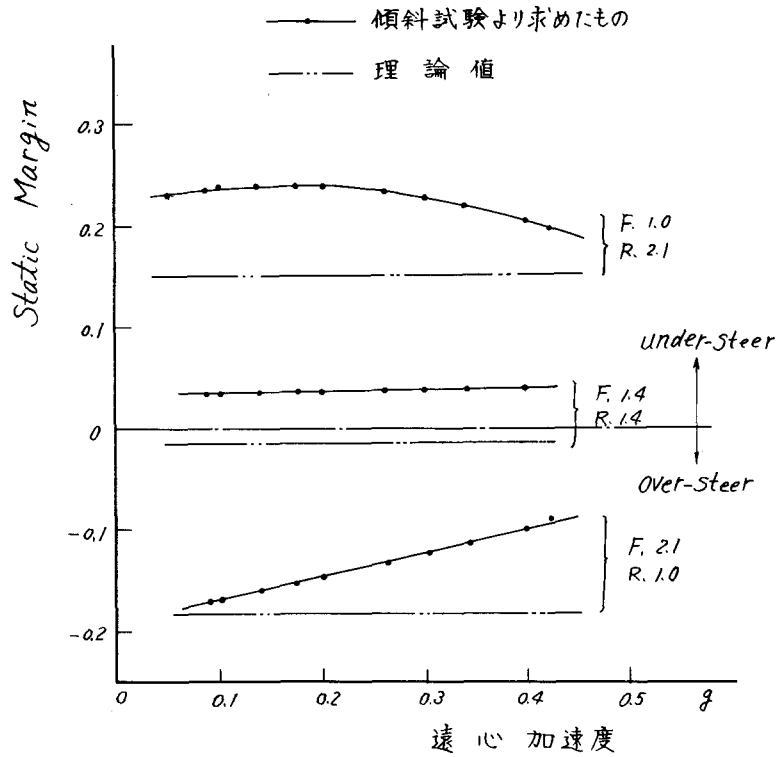
これらの原因を調べるため、自動車^{9) 10) 11)}の傾斜台試験を実施した。傾斜台試験は自動車を台上に載せて横方向に傾け、自動車に働く重力の傾斜台面に平行な成分を、旋回時に自動車に働く遠心力に代用させるものである。したがつて傾斜角が遠心加速度に対応する。第 3 - 2 図は傾斜台試験の状況を示す。

規定された遠心加速度に対応する傾斜角で車を傾け、この状態で車両を前進させるとハンドルは直進状態に保持されているにもかかわらず、車は傾いた方向に横滑りしながら前進する。この滑り角 (Side Slip Angle) の測定結果と傾斜角から算出した車に働く横方向力からタイヤの Cornering 特性を求めた。こゝ^{注)}で求められた値は左右輪の和の値としてえられる。第 3 - 3 図は傾斜台試験で求められた前輪タイヤ圧 1.4 kg/cm^2 、後輪 1.4 kg/cm^2 のときのタイヤの特性で、Cornering Power をタイヤ垂直荷重で割つた Cornering Power 係数で表示している。この値の中には操縦装置の弾性、Axle Steer など、この車に固有の under, over-steer に影響する各種要因が含まれているものと考えられる。

注) 傾斜に伴う荷重移動のため左右輪の値はそれぞれ異なる。



第3-3図 Cornering Power 係数



第3-4図 Static Marginの理論、実測値

第3-3図の結果では遠心力の増加に伴い、Cornering Power 係数は減少している。車の傾斜に伴い左右輪垂直荷重の移動を起すが、傾いた方のタイヤ荷重は増大し、Cornering Power は僅少であるが増す傾向がある。一方、反対側車輪の荷重は減じ、Cornering Power は急激に低下する。したがって、左右輪 Cornering Power の和は遠心力が0の場合よりも減少するわけである。

遠心加速度に伴う Cornering Power の減少は、このような左右輪の荷重移動によるタイヤ非線形特性とロールによる Camber Angle 変化の影響が主原因と考えられる。¹²⁾¹³⁾

先の(3-1)式を Cornering Power 係数 C_f 、 C_r 、前後輪から重心までの距離 l_f 、 l_r を用いて書きなおすと

$$S.M. = \frac{l_f l_r (C_r - C_f)}{(C_f l_r + C_r l_f) l} \quad (3-2)$$

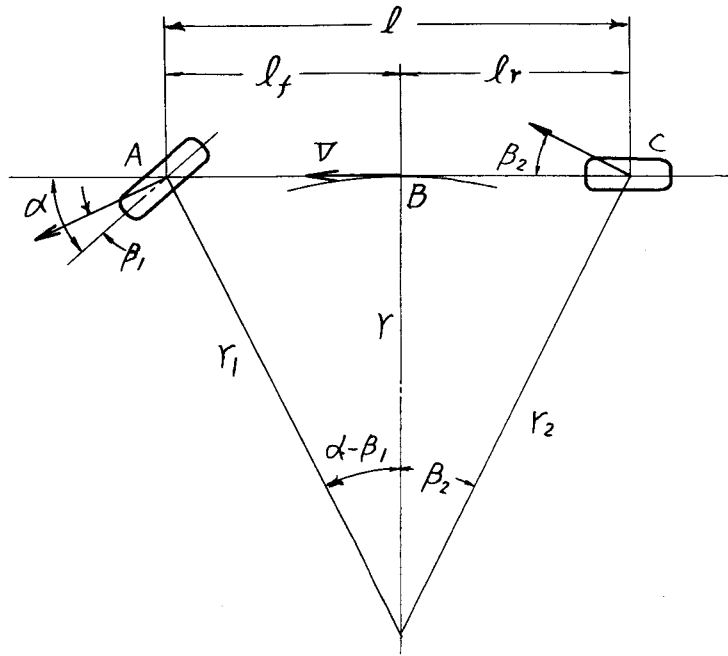
がえられる。(3-2)式で $C_r > C_f$ の場合は under-steer、逆に $C_r < C_f$ のときは over-steer である。第3-3図では $C_r > C_f$ であるから、タイヤ圧、前輪 1.4 kg/cm²、後輪 1.4 kg/cm² の実車では under-steer であることを示している。

次に傾斜台試験より算出した Cornering Power 係数 C_f 、 C_r より(3-2)式から Static Margin を計算した。この Static Margin はステアリングの弾性、悬架装置などのその車、固有の各要素を含んだものである。第3-4図は傾斜台試験から算出したものと、タイヤ自体の特性から求めた理論と比較している。実車試験では理論値よりも、各試験条件とも under-steer の傾向が強い。

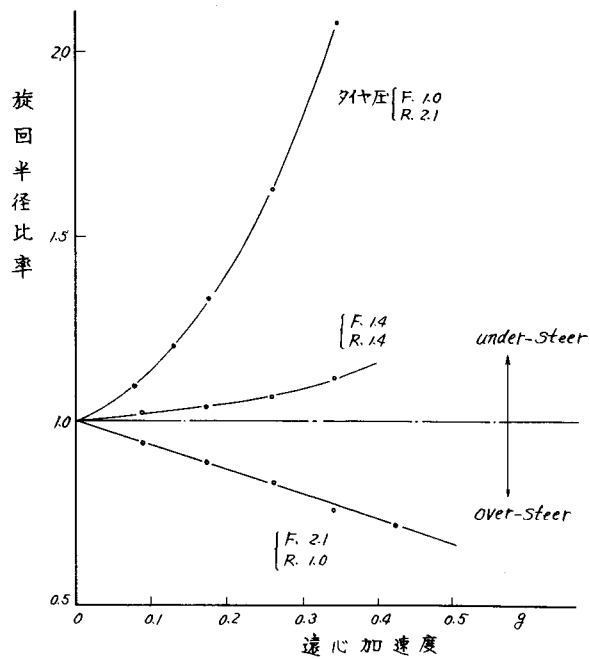
傾斜台試験から測定した Cornering Power 係数から、定常旋回時の旋回半径比率の計算を試みる。傾斜台試験での測定値は左右輪の和で表示されているから、前後輪の二輪車に単純化して考えてもよい。第3-5図で、A点を前輪、O点を後輪の中心、B点を重心点とし、前輪および後輪の Side Slip Angle をそれぞれ β_1 、 β_2 とする。また l をホイールベース(軸距)、 r を重心点の旋回曲率半径とすれば、旋回半径は自動車の寸法にくらべ大きいから

$$\frac{l}{r} \doteq \alpha - \beta_1 + \beta_2 \quad (3-3)$$

が成立つ。こゝで α は前輪操舵角で、超低速時には



第3-5図 定常旋回の図



第3-6図 傾斜台試験より算出した under, over-Steer特性

$$\alpha = \frac{l}{r_0} \quad (3-4)$$

となる。旋回半径比率は r/r_0 で求められるから (3-4) 式を (3-3) 式に代入すれば

$$\frac{l}{r} = \frac{l}{r_0} - \beta_1 + \beta_2 \quad (3-5)$$

Side Slip Angle β_1, β_2 は遠心加速度により車に働く横方向力と Cornering Force から決定される。(3-5) 式から各試験条件の旋回半径比率を算出したのが、第 3-6 図である。タイヤ圧前輪 1.4 kg/cm^2 、後輪 1.4 kg/cm^2 の条件では定常旋回測定結果と同様に軽い under-steer の状態で第 3-1 図と大体同じ傾向を示すが、定量的にはまだかなり相違する。

以上 under, over-steer について 2, 3 の実験解析を行なったが、この特性におよぼす因子は多く、しかも複雑である。これらの各要素がまだ完全に解明されていないのが現状のようである。

3.2.2 操舵による応答関数

前節で under, over-steer の性質について検討したが、操舵による応答関数がこの特性によつてどのような影響を受けるかを調べた。

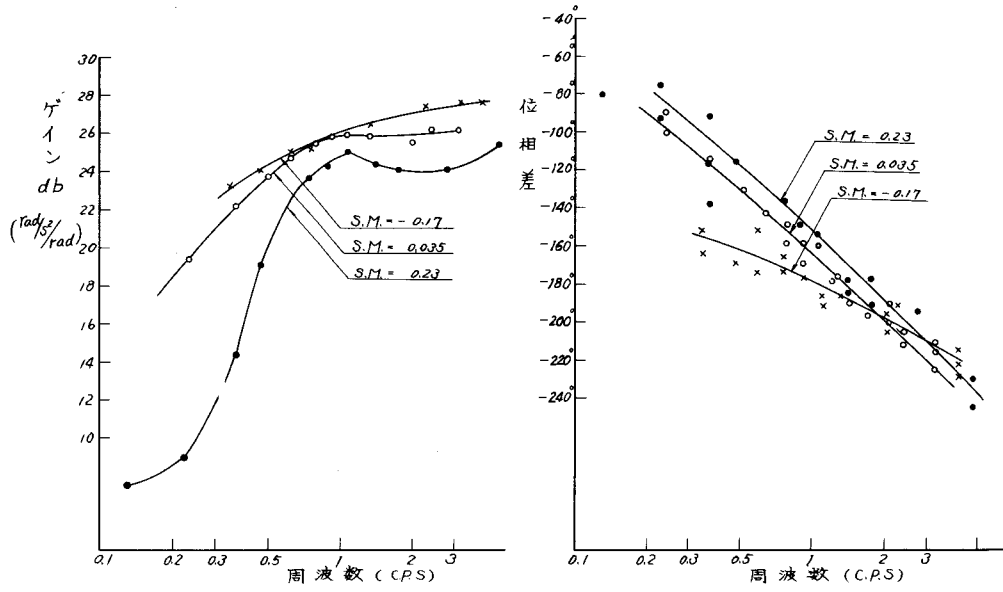
要素の変更は前後輪のタイヤ圧を第 3-2 表のように変え、特性の度合は Static Margin で表示した。理論値と実車での under, over-steer 特性はかなり食違いが見られるが、実測値から Static Margin を算出すると $S.M. = 0.23, 0.035, -0.17$ の三種の状態で、比較的度合の強い under-steer と弱い場合、over-steer の状態とである。

各試験時状態では、S.M. の影響のみならず車全体の Cornering Power ($K_f + K_r$) の影響も受ける。たゞ、今回の場合は第 3-2 表のように約 10% 程度の差異であるから大部分は、under, over-steer の特性と考えてさしつかえないであろう。

実舵角—ヨ—角加速度

5.20-12 2PR

$V = 70 \text{ km/h}$

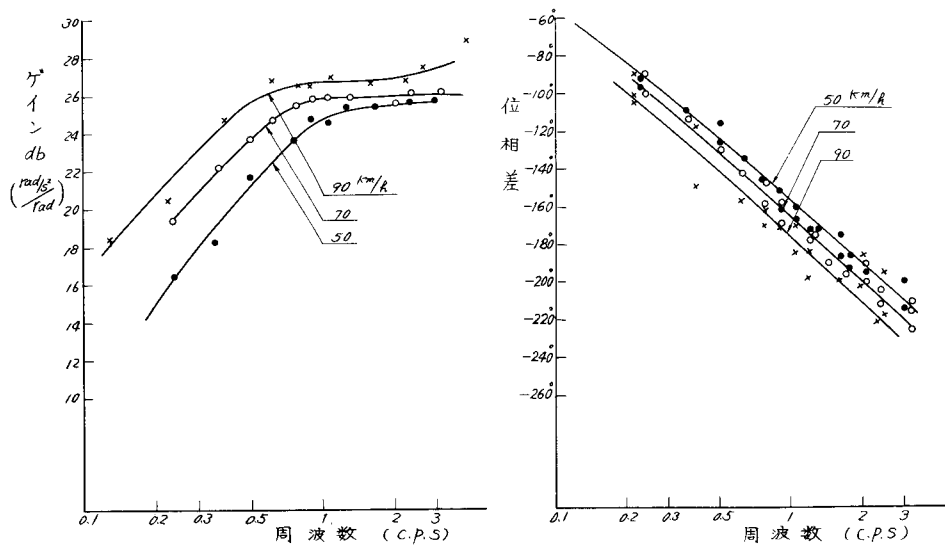


第3-7図 Static Margin による影響

実舵角—ヨ—角加速度

5.20-12 2PR

$P = 1.4, 1.4 \text{ kg/cm}^2$



第3-8図 車速の影響 (I)

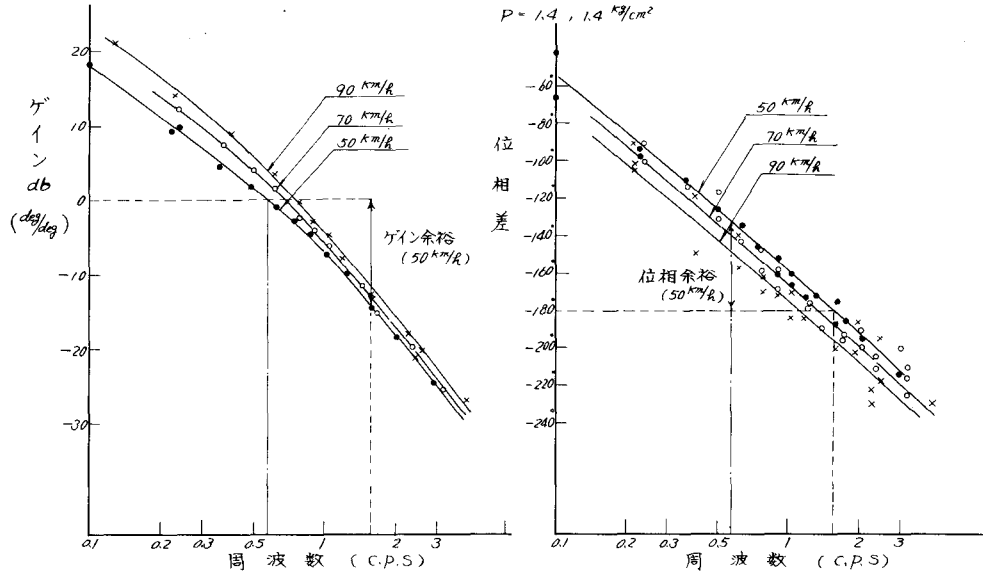
第 3 - 7 図は under, over-steer 特性との関連性を実舵角 - ヨー角
加速度応答関数で調べたものである。ゲインは実舵角 1 rad. 当りの
ヨー角加速度 rad/s^2 , すなわち、 $\text{rad/s}^2/\text{rad}$ を db 単位で表わした。
周波数が高くなるにしたがいゲインは増加し、位相遅れも大きくなる。
Static Margin による影響を調べると、S.M. の値が小さくなるとゲイ
ンが増加すると共に位相遅れが大きくなる。特に S.M. が負の場合、
すなわち over-steer 特性のとき位相おくれが大きい。

under-steer と over-steer のいずれが操縦しやすいかという問題
であるが、over-steer の車では低周波域のゲインが高いから、いわゆ
るハンドルの切れがシャープである。一方、位相特性は under-steer
車の遅れが小さく、応答が速いわけで、ゲインおよび位相特性のいずれ
が重要であるかによつて、under か over のどちらが望ましいか判定し
うるものと思われる。この判定は自動車運転する場合の人間の特性
から判断すべき問題であろう。

実舵角—ヨー角

5.20-12 2PR

$P = 1.4, 1.4 \text{ kg/cm}^2$

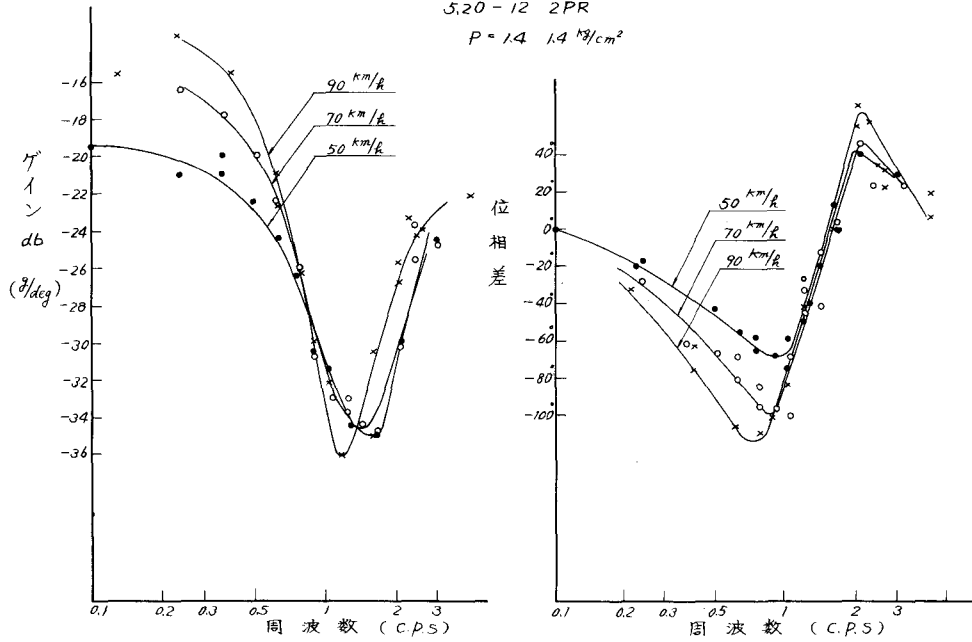


第3-9図 ゲイン, 位相差余裕(実舵角—ヨー角)

実舵角—横加速度

5.20-12 2PR

$P = 1.4, 1.4 \text{ kg/cm}^2$



第3-10図 車速の影響(2)

3.3 車速，High Cornering Power タイヤの影響

3.3.1 車速の影響

第3-8図は前輪、後輪に5.20-12-2PRタイヤを使用し、タイヤ圧 1.4 Kg/cm^2 の標準タイヤ圧状態での実舵角-ヨー角加速度の応答関数を示す。車速 $V=50, 70, 90\text{ Km/h}$ の場合を比較すると、高速になるほどゲインは高く、位相遅れも大きくなる。このヨー角加速度の測定結果から、ヨー角に対する応答に変換すると第3-9図がえられ、周波数の増加に伴い、ゲインは低下し高い周波数で応答しにくいことを示している。

制御系の安定度を検討する方法として位相余裕、ゲイン余裕を調べる方法がある。第3-3表は各車速でのゲイン、位相余裕を比較したものである。高速になるにしたがい、ゲイン余裕、位相余裕は小さくなり不安定になる。

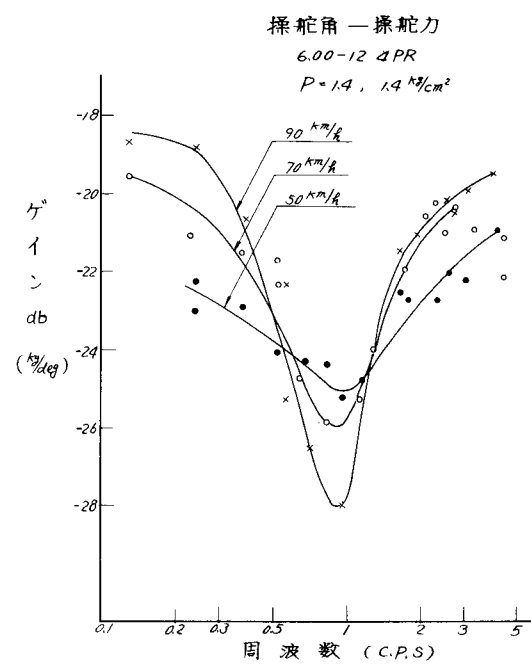
第3-3表 各車速でのゲイン，位相余裕

車 速 Km/h	位 相 余 裕 deg	ゲ イ ン 余 裕 db
50	47°	14.5
70	33°	10.0
90	18°	6.0

第3-10図は各車速での実舵角-横加速度の応答曲線で、先のヨー角加速度の場合とかなりの差異がある。前者の場合のゲイン曲線が周波数に対して、単調増加の傾向にあつたのに対して、後者は一旦減少して途中から再び増加する傾向が見られる。

位相曲線はさらにもう一回反転するといった複雑な様相を示す。このことは自動車を制御系と考えた場合、その安定性を判別するとき複雑な問題を含んでいることを意味する。

一般走行時の周波数領域は10PS以下と考えられるから、この範囲で考えれば、高速になるほどゲインは増加し、位相遅れも大きくなり、先のヨー角加速度のときと同様になる。



第 3-11 図 操舵角—操舵力特性

次に操舵角－操舵力の応答特性を第3－11図に示した。ゲイン特性は10FPS附近でゲインが急激に低下し、ハンドルが軽くなる部分がある。高速になるとこの部分の谷が深く、ハンドルの軽くなる度合いが強くなる。周波数によつてハンドルが急激に軽くなることは運転者にとつて好ましくないことである。

周波数の低域部分を考えると高速になるほど、ハンドルは重くなつてゐる。よく“高速になるとハンドルが軽く運転しにくい”などの運転者の意見を耳にする。このような現象は先の操舵角－操舵力特性で検討しうるものと考えるが、人間工学の面から人間特性を完全に把握し、自動車と人間特性との適合を検討して判断すべきであろう。

3.3.2 High Cornering Power タイヤ

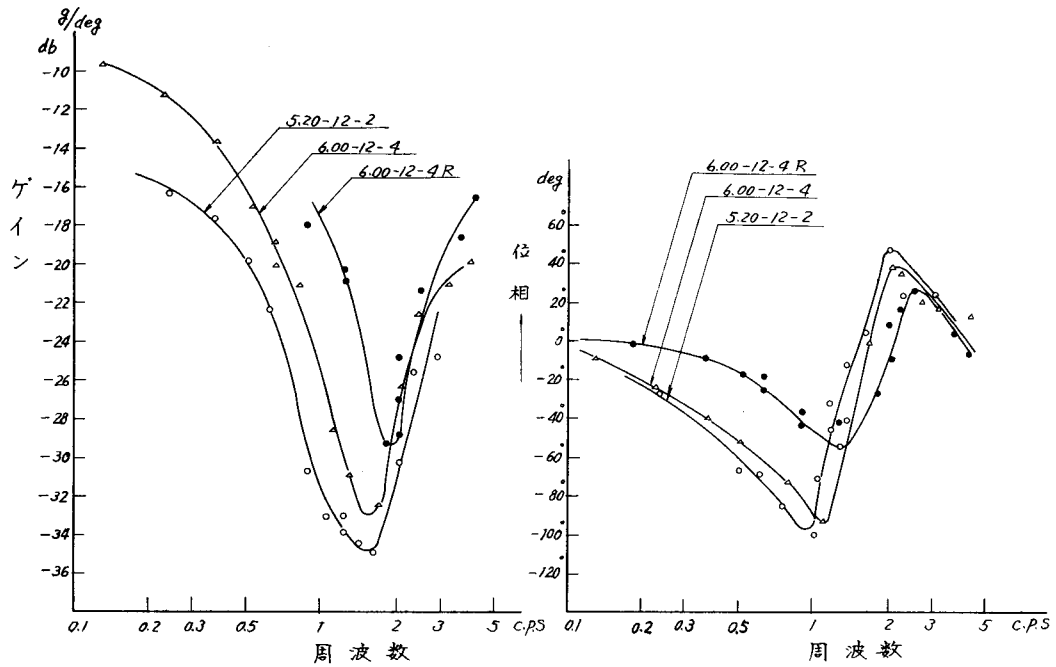
最近のタイヤ開発の動向として、Cornering Power の大きくなる傾向が見られる。自動車に外力が加わつたとき Cornering Power が大きくなると自動車の横滑り角が減少するから、進路からのずれが小さくなり安定であろうという概論的な判断はつくが詳細な定量的なデータは余り見当らない。

本節では Cornering Power の異なる三種のタイヤを使用し、High Cornering Power のタイヤが操縦性・安定性にどのように影響するか応答関数で比較した。

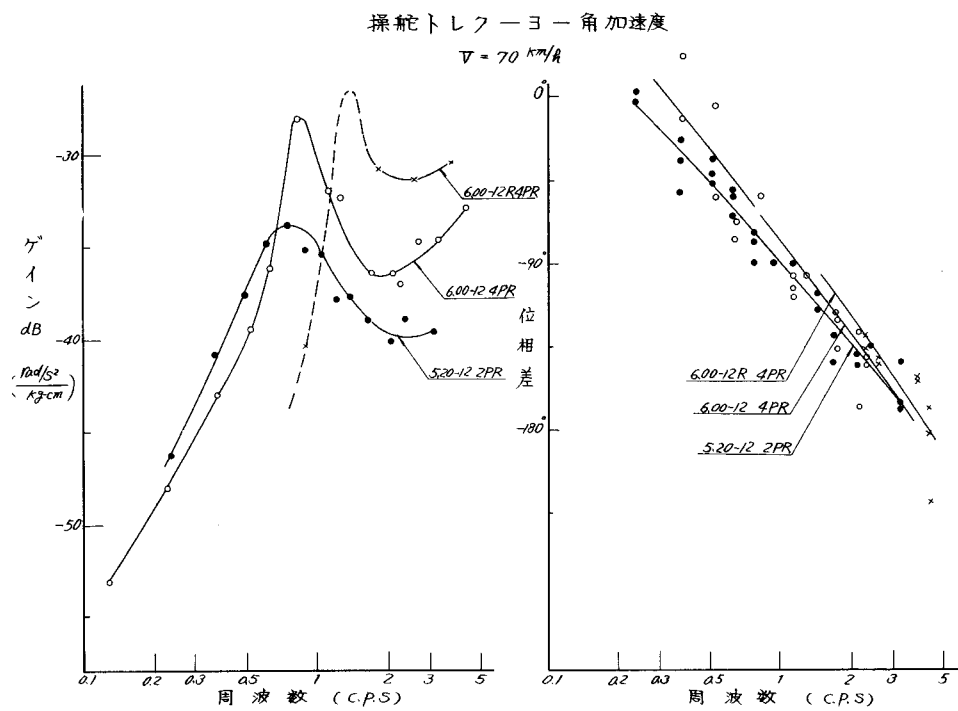
なお、前後輪のタイヤは同じにしたので Static Margin の値は試験条件によつて変化しない。したがつてここでえられた結果は Cornering Power の影響と見なせる。

供試タイヤの Cornering Power の値は第3－4表の通りである。

なお 5.20－12－2PR タイヤはセダンの乗用車に、また 6.00－12－4PR はスポーツタイプの車に採用されているもので、6.00－12R－4PR (R－2) タイヤはレース用のタイヤである。



第 3-12 図 High Cornering Power タイヤを使用したときの応答特性(1)
(実舵角 - 横加速度)



第 3-13 図 High Cornering Power タイヤを使用したときの応答特性(2)

第 3 - 4 表 供試タイヤの Cornering Power

タイヤの種類	タイヤ圧 Kg/cm^2	Cornering Power Kg/deg
5.20-12-2PR	1.4	2.0
6.00-12-4PR	1.4	2.9
6.00-12R-4PR (R-2)	1.4	4.4

これら三種のタイヤを使用したときの実舵角—横加速度応答特性を第 3 - 12 図に示した。ゲイン特性は Cornering Power が大きくなるにしたがい最小値を示す周波数が高域側に移行し、そのゲインの値が大きくなり、一方位相遅れは減少する傾向が認められる。このことは High Cornering Power のタイヤを使用するとハンドルの切れがシャープで応答が早くなることを示している。

次にヨー角加速度の応答から実舵角—ヨー角応答曲線を算出して、ゲイン余裕、位相余裕を求めると第 3 - 5 表のように、Cornering Power の大きいタイヤほど余裕が大きくなり安定になることを示している。

第 3 - 5 表 High Cornering Power タイヤを使用した場合のゲイン、位相余裕

車 速 Km/h	タイヤの種類					
	5.20-12-2PR		6.00-12-4PR		6.00-12R-4PR	
	位相余裕	ゲイン余裕	位相余裕	ゲイン余裕	位相余裕	ゲイン余裕
50	47°	145db	57°	155db	85.5°	145db
70	33°	10.0	36°	12.0	68°	13.5
90	18°	6.0	30.5°	9.5		

この結果ではゲイン余裕の変化は僅少であるが位相余裕は Cornering Power によりかなり大巾に変る。人間が自動車を制御する場合、位相遅れが大きいと人間に微分動作を強く要求されることになるから、位相

遅れが小さいことは運転しやすいものと推察する。このようなことから High Cornering Power タイヤを使用することは高速走行に望ましいことである。

以上、実舵角入力の場合を検討したが、同じ舵角を与えても前輪の Cornering Power の大きさにより加えられる外力が異なる。すなわち High Cornering Power のタイヤでは自動車に加わる外力が大きくなる。

そこで操舵トルクを入力として整理した。第 3 - 13 図は操舵トルク - ヨー角加速度応答特性を表わしたもので Cornering Power が高くなるほど極値を示す周波数が高い方に移行する。実際の走行で問題になるのは 10 P S 以下であるから、この範囲で検討すれば Cornering Power の大きいときはゲインが小さくなる。このことは同じ攪乱外力に対してその影響が小さいことで、外乱に対する安定性が向上するものと考えられる。

3. 4 県架パネ

自動車の操縦性・安定性の主要因子と考えられるタイヤコーナリング特性の影響を検討したが、県架装置の因子も重要である。この因子としては県架方式、県架パネの伸縮に伴う操向系統の干渉、Axle Steerなど幾何学的形状寸法による影響も含まれるが今回は県架パネ常数による因子を取上げた。もちろん幾何学的な影響を完全に除去することは困難なことであり、多少は影響を受けるが、供試車が持つているこれら固有の特性をなるべく一定に保ち、県架パネ常数を変更することによる影響を検討した。

3. 4. 1 試験条件

供試車の県架装置は前輪系がTorsion Bar式独立県架、後輪系は板パネを使用したRigid Axle方式で、前後輪系に車体のロールを抑制するRoll Bar (Stabilizer)を装備している。第3-6表は試験に使用した県架パネ、Roll Barのパネ常数、ロール剛性を示したものであるが、パネ常数はいずれもタイヤ部のパネ常数で表示した。試験はA、B県架パネを前後輪系に交互に組合せ、4つの条件で実施した。

第3-6表 供試県架装置のパネ常数

県架装置の種類		前 輪 系		後 輪 系	
		パネ常数 K_g/mm	ロール剛性 K_{g-m}/Rad	パネ常数 K_g/mm	ロール剛性 K_{g-m}/Rad
A	県架パネ	2.30	1634	2.75	1017
	ロールバー	0.95	675	1.05	706
B	県架パネ	1.15	817	2.40	888
	ロールバー	0.50	355	0.19	128

第3-7表は各試験条件でのロール剛性を表わしているが、試験条件Ⅰは前後輪系にそれぞれAの県架装置を使用した、すなわち前後輪ともパネが固い場合であり、条件Ⅱは前が固く、後が柔かい場合、またⅢは逆に前が柔らかく、後が固いときである。Ⅳは前後輪系共、柔かい条件である。第3-7表には車全体のロール剛性、全体の剛性に対する前

輪系の割合も示した。試験条件Ⅰ、Ⅳは前後輪系の配分は同程度で、Ⅰの場合はⅣのときに較べ全体のロール剛性が1.8倍である、一方、条件Ⅱは前輪系の比率が0.69で、前輪のロール剛性が大きい状態であり、条件Ⅲは比率0.425と逆に後輪系が固い場合であるが、全体の剛性値も変化している。

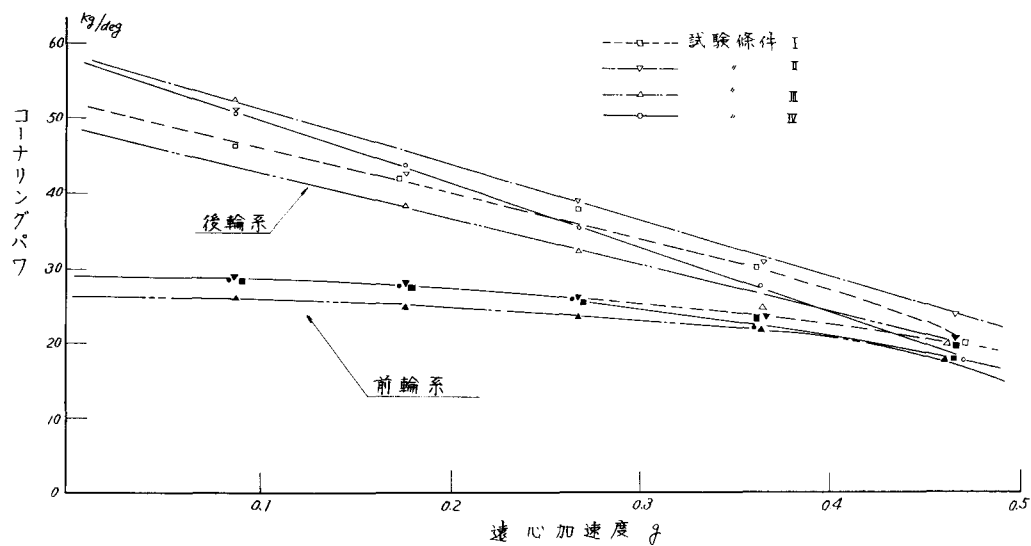
第3-7表 各試験条件でのロール剛性

試験条件	ロール剛性 $K_g - m / \text{Rad}$		ロール剛性の比率	
	前輪系 K_1	後輪系 K_2	$K_1 + K_2$	$K_1 / K_1 + K_2$
Ⅰ	2309	1723	4032	0.573
Ⅱ	2309	1016	3325	0.695
Ⅲ	1272	1723	2995	0.425
Ⅳ	1272	1016	2283	0.556

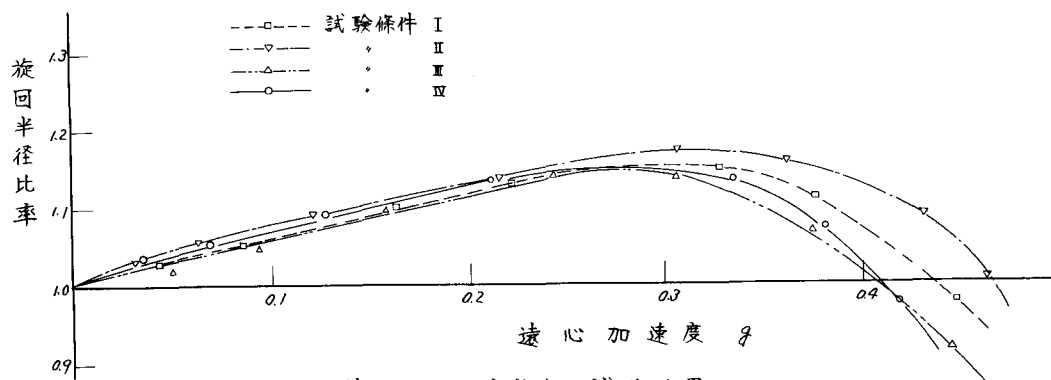
次に試験時の供試車諸元を第3-8表に示した。各試験条件での車体姿勢を同一にするよう種々の調整を行い車架装置の幾何学的配置の変更を極力なくすように努めた。第3-8表の重心高さは傾斜試験台での測定結果であるが、重心高さは実用上問題にならない程度の変動に収めえた。

第3-8表 試験時の車の諸元

試験条件	重心高さ mm	前輪分担荷重 K_g		後輪分担荷重 K_g		重心距離 mm		トレッド mm	
		右	左	右	左	l_f	l_r	前輪	後輪
Ⅰ	515	256	230	247	246	1190	1030	1193	1160
Ⅱ	517								
Ⅲ	530								
Ⅳ	517								



第3-14図 傾斜台試験から測定したコーナリング特性



第3-15図 定常旋回試験結果

3. 4. 2 under, over-steer 特性

先のような4つの試験条件で傾斜台試験を行ないタイヤ Cornering Power を測定し第3-14図に示した。なお試験時の前後輪タイヤ圧は 1.4 kg/cm^2 である。測定結果では、いずれの試験条件の場合でも後輪の Cornering Power が前輪よりも大きく under-steer の傾向を示している。試験条件により後輪系の値は顕著に変化するが、前輪系の影響は比較的僅少である。

後輪系では試験条件Ⅱ、($K_1/K_1+K_2=0.695$) すなわち前輪系が固く、後輪系が柔かい場合に見かけ上の Cornering Power は大きく、試験条件Ⅲ ($K_1/K_1+K_2=0.425$) の逆のとき低い値になる。

試験条件Ⅱ、Ⅲはロール剛性の比率 K_1/K_1+K_2 の影響のみならず、車全体の剛性 (K_1+K_2) の因子も含まれているものと考えられる。

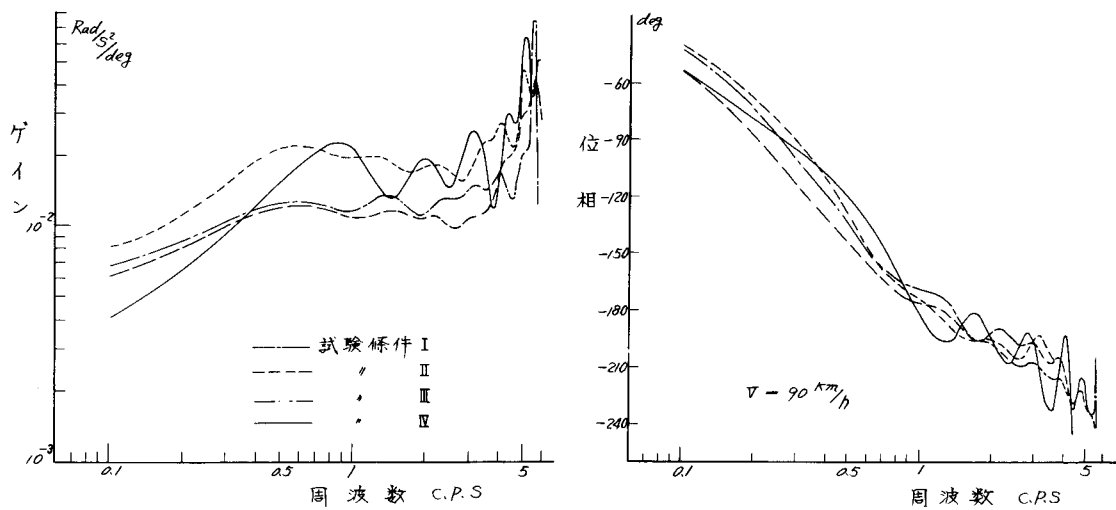
次に定常旋回試験から、under, over-steer 特性を測定し、第3-15図に示した。

under-steer 特性の度合は試験条件Ⅱの状態で強く、条件Ⅲのとき一番弱い。

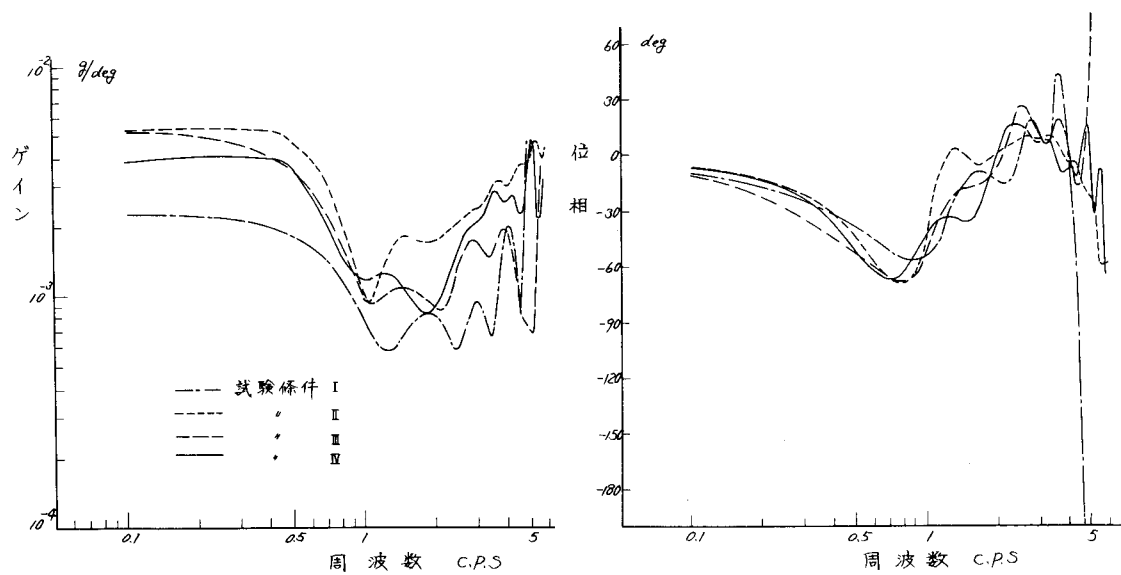
第3-14図の後輪と前輪とのコーナリングの差が under, over-steer 特性を表わしているが、定常旋回結果とも定性的にはよく一致している。遠心加速度の大きい部分での特性を調べると、試験条件Ⅲの場合、 $0.3g$ 附近から under-steer の度合が急激に低下し Reverse Steer の様相を呈している。一方、条件Ⅱではこの急激な低下が遠心力の高い所に移行している。

この Reverse Steer の現象は旋回時のロールモーメントにより生ずる左右輪の荷重移動が誘因になる、タイヤ荷重による非線形特性により惹起されるもので、自動車後部の滑りが過大になり、いわゆるスピン運動になる。

もちろん、この現象が遠心力の大きい方に移行することは、高速度で旋回しうることを意味し、条件Ⅱの方が旋回性能は向上している。旋回の極限ではタイヤが浮上りの現象を示すが、条件Ⅲは後輪内側タイヤから浮上りを生じ、条件Ⅱでは前輪から起り、浮上り発生車速も高くなる。



第3-16図 昇架特性と応答関数 (1)
(操舵角-ヨー角加速度)



第3-17図 昇架特性と応答関数 (2)
(操舵角-横加速度)

以上の試験結果から判断すると、県架バネ常数を大きくして、ロール剛性を増加させると同時に前後輪の配分は $K_1 / (K_1 + K_2)$ の値を大きくする、すなわち前輪を固くすることが旋回性能の向上に役立つ。たゞ県架バネ常数を増加することは振動乗心地を悪化することになり振動乗心地と操縦性とは相反する関係にあるから、ロールバーでロール剛性を高くするのが適当と考えられる。

このように県架装置により旋回性能が変化するのはロールによる左右輪の荷重移動に伴うタイヤ Cornering 特性の変化が主原因と考えられるが、その他 Axle Steer などの微妙な因子も多く含まれており、これらの因子を一つずつ理論的に解明することは非常に困難なことである。

3. 4. 3 操舵による応答関数

先の試験条件 4 つについて、過渡応答試験により操舵による応答関数を測定した。第 3 - 16 図は車速 $V = 90 \text{ km/h}$ の操舵角 γ - 角加速度応答関数を示したもので、条件 II の場合のゲインが大きい。一方位相遅れは条件 II のとき小さく、条件 III では遅れが大きくなる。

次に操舵角 γ - 横加速度特性について調べると、第 3 - 17 図のように条件 II でゲインは大きく、条件 I で小さい。位相については条件 III の遅れが目立つ。これら県架バネ要素の影響は判断しにくいだが、位相遅れを重視すれば旋回特性での判定と同様に、全体のロール剛性を増加させると同時に前輪の配分を大きくすることが望ましい。

3.5 インパルス応答関数と任意に操舵した場合の進路予想

インパルス応答関数を $h(t)$ とすると、入力 $x(t)$ と出力 $y(t)$ の間には

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) x(t - \tau) d\tau + n(t) \quad (3-6)$$

の関係があるから、もし、ノイズ $n(t)$ が小さければ入力 $x(t)$ から出力 $y(t)$ が求められる。すなわち、任意に操舵した場合の自動車の運動が予測できるわけである。

3.5.1 インパルス応答関数の算出方法

インパルス応答関数を推定する方法であるが、自己相関と相互相関とから求める方法と、周波数応答関数 $G(f)$ から推定するものの二つが考えられる。

自己相関 R_{xx} と相互相関 R_{yx} は

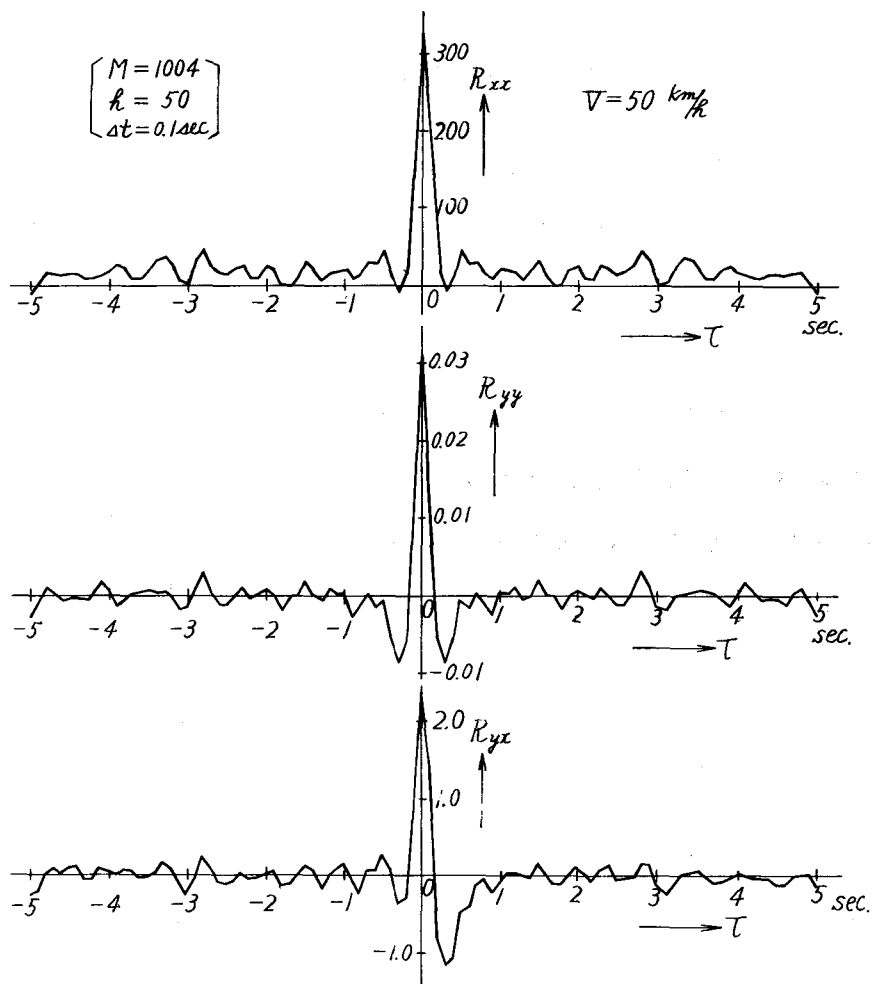
$$R_{yx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\mu) \cdot R_{xx}(\tau - \mu) d\mu \quad (3-7)$$

であるから、 Δt 間隔に取ったデータから計算をデジタルに行なう場合には

$$R_{yx}(\tau) = \sum h(\mu) \cdot R_{xx}(\tau - \mu) \Delta t \quad (3-8)$$

となる。 $\Delta t = 1$ とおくと、インパルス応答関数は相互相関、自己相関関数から

$$\begin{bmatrix} R_{yx}(-m) \\ R_{yx}(-m+1) \\ \vdots \\ R_{yx}(0) \\ \vdots \\ R_{yx}(m-1) \\ R_{yx}(m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{xx}(0) & R_{xx}(1) & \cdots & R_{xx}(m) & \cdots & R_{xx}(2m-1) & R_{xx}(2m) \\ R_{xx}(1) & R_{xx}(0) & \cdots & R_{xx}(m-1) & \cdots & R_{xx}(2m-2) & R_{xx}(2m-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ R_{xx}(m) & R_{xx}(m-1) & R_{xx}(0) & R_{xx}(m-1) & R_{xx}(m) & & \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ R_{xx}(2m-1) & R_{xx}(2m-2) & \cdots & R_{xx}(m-1) & \cdots & R_{xx}(2) & R_{xx}(1) \\ R_{xx}(2m) & R_{xx}(2m-1) & \cdots & R_{xx}(m) & \cdots & R_{xx}(1) & R_{xx}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(-m) \\ h(-m+1) \\ \vdots \\ h(0) \\ \vdots \\ h(m-1) \\ h(m) \end{bmatrix} \quad (3-9)$$



第3-18図 操舵角, ヨー角加速度の自己および相互相関

の連立方程式を解いて求められる。実際の計算には51連の方程式から計算した。

次に、周波数応答関数 $G(f)$ からインパルス応答関数は

$$h(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) \cdot e^{-2\pi f \tau i} df \quad (3-10)$$

として求められる。

実際の計算は周波数応答関数を次の様に表わすと

$$G\left(\frac{r}{h} \frac{1}{2\Delta t}\right) = C\left(\frac{r}{h} \frac{1}{2\Delta t}\right) - i S\left(\frac{r}{h} \frac{1}{2\Delta t}\right) \quad (3-11)$$

複素型フーリエ係数と実型フーリエ係数の関係から¹⁴⁾

$$G\left(\frac{r}{h} \frac{1}{2\Delta t}\right) + G\left(\frac{-r}{h} \frac{1}{2\Delta t}\right) = 2C\left(\frac{r}{h} \frac{1}{2\Delta t}\right) = L_r \quad (3-12)$$

$$r = 1, 2, \dots, h-1$$

$$L_0 = C\left(\frac{0}{h} \frac{1}{2\Delta t}\right) \quad (3-13)$$

$$L_h = C\left(\frac{1}{2\Delta t}\right)$$

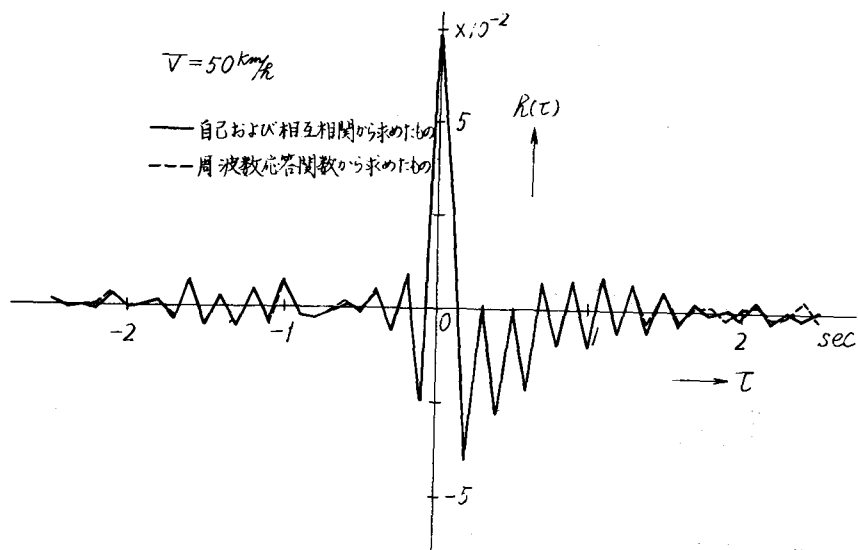
$$G\left(\frac{r}{h} \frac{1}{2\Delta t}\right) - G\left(\frac{-r}{h} \frac{1}{2\Delta t}\right) = i \cdot 2S\left(\frac{r}{h} \frac{1}{2\Delta t}\right) = i M_r \quad (3-14)$$

$$\left. \begin{array}{l} M_0 = 0 \\ M_h = 0 \end{array} \right\} \quad (3-15)$$

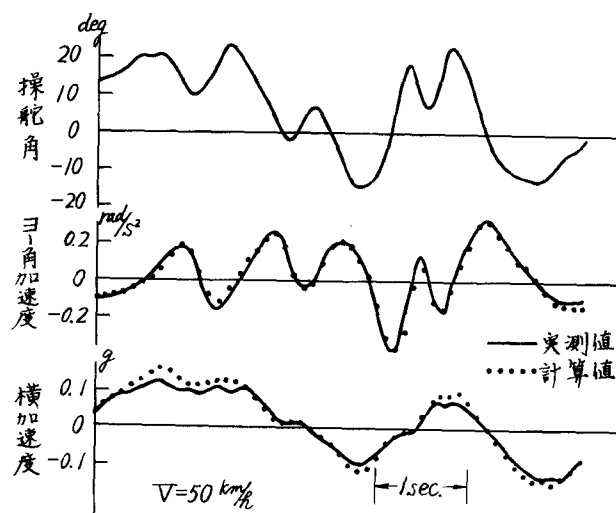
がえられる。したがってインパルス応答関数 $h(e)$ は

$$h(e) = \sum_{r=0}^h L_r \cos \frac{\pi}{h} r e + \sum_{r=1}^{h-1} M_r \sin \frac{\pi}{h} r e \quad (3-16)$$

$$e = 0, 1, 2, \dots, h$$



第3-19図 ヨー角加速度のインパルス応答関数



第3-20図 任意に操舵した場合の進路の予測

$$h(-e) = \sum_{r=0}^h L_r \cos \frac{\pi}{h} r e - \sum_{r=1}^{h-1} M_r \sin \frac{\pi}{h} r e \quad (3-17)$$

$$-e = 0, 1, 2, \dots, h$$

から求まる。このように周波数応答関数からもインパルス応答関数が計算できる。

3. 5. 2 任意に操舵した場合の進路予想

第3-18図は操舵角・ヨー角加速度の自己相関 R_{xx} ・ R_{yy} および相互相関 R_{yx} を示したものである。この値を用いて、さきの連立方程式の解としてえられたものと、周波数応答関数より計算したインパルス応答関数とを第3-19図に比較した。 τ が大きいところで両者の違いが認められるが、 τ の小さいところでは非常によく一致している。

インパルス応答関数 $h(\tau)$ を計算するのに、いずれの方法をとるべきかについて考えると、相関関数 R_{xx} ・ R_{yx} から求める場合は大きな連立方程式を解かなければならず計算が容易でない。また、周波数応答関数のようには誤差の評価ができないことなどから、現段階では、周波数応答関数から算出する方が有利と考えられる。

次に、インパルス応答関数から、任意の操舵角入力に対する横加速度・ヨー角加速度などの出力波形の推定を試みる。

第3-20図は周波数応答関数より算出したインパルス関数から横加速度・ヨー角加速度の予測を行なったものである。上の図は入力になる操舵角である。実測値と比較するため横加速度・ヨー角加速度の計算値をプロットしてある。

この結果では、計算値と実測値とがよく一致しており進路予想の可能なことを示している。

3.6 結 論

本章の各種試験から、えられた結果を要約すれば次の通りである。

- 1) 実車の under, over-steer 特性は簡単な理論値とはかなり食い違い、理論値より under-steer の傾向が強い。この原因については悬架装置、操縦系統、タイヤの非線形特性などの多くの因子の影響を受けているものと考えられる。
- 2) 傾斜台試験で見かけ上の Cornering 特性を測定し、この結果から定常旋回特性を算出した。定常旋回実測値とかなりよく似た傾向がえられたが、定量的にはまだ不十分な結果で、傾斜台試験結果から under, over-steer 特性を完全に表現しうる段階に到達していない。
- 3) over-steer の車はゲインが高くなり、位相遅れが増大する傾向が認められる。
under-steer, over-steer のいずれが運転者にとって望ましいかは、人間の特性から判断すべき問題であろう。
- 4) 車速が高くなるとゲインは高く、位相遅れは大きくなる。実舵角—ヨー角応答関数からゲイン余裕、位相余裕を調べた結果、両方共、高速になるほど余裕は小さくなり不安定になることを示している。
- 5) High Cornering Power のタイヤを使用すると、ゲインは高く、位相遅れは減少するからハンドルの切れはシャープで応答は早く運転しやすくなる。一方外乱による影響度も改善されるので、高速走行には望ましいタイヤである。
- 6) 悬架バネの影響、特にロール剛性については、under, over-steer 特性ほど大きな要因でないが、車全体のロール剛性を増し、前輪の分担比を大きくすることが性能の向上に役立つ。たゞ振動乗心地と相反する関係にあるから妥協点を見出すべきであろう。
- 7) 周波数応答関数からインパルス応答関数を算出する方法を検討し、任意に操舵した場合の自動車の進路予測を試みた。良好な結果がえられているので今後、進路の予測が可能と考えられる。

参 考 文 献

- 1) W.Bergman ; "The Basic Nature of Vehicle Understeer-Oversteer."
SAE Paper 957B, 1965
- 2) K.A.Stonex ; "Car Control Factors and their Measurment."
SAE Journal Vol. 48, No.3, March 1941
- 3) F.Jindra ; "Der Einfluß der Radaufhangung auf die Richtungshaltung
und Stabilität bei Kurrenfahrt."
ATZ Jahrg 63, Mai, 1961
- 4) 藤井 ; "自動車の運動性能に対するかじ取装置の弾性の影響"
機械学会論文集 第22巻, 119号
- 5) E.Fiala ; "Zur Fahrdynamik des Straßenfahrzeuges unter Berücksichtigung
der Lenkungselastizität"
ATZ Jahrg 62, März, 1960
- 6) 家弓, 高橋 ; "フロントサスペンションの横剛性が旋回特性におよぼす影響
の一例"
自動車技術 Vol. 15 No.3 1961
- 7) D.L.Noreen ; "To Improve Car Handling, Look at the Chassis."
SAE Journal, December, 1964
- 8) D.Whitcomb ; "Design Implication of a General Theory of Automobile
Stability and Control."
海外機械工学文献集 Vol. 9, No.3 1960
- 9) 岡田 ; "傾斜台法および過渡応答法による自動車の操縦性安定性試験"
自動車技術 Vol.20, No.8, 1966

- 10) 近藤 ; “自動車 の 安定性 ・ 操縦性 (主として試験方法) ”
自動車技術 Vol.14, No.1 1960
- 11) 高橋 ; “安定性 ・ 操縦性の立場からの車架特性室内試験法”
自動車技術 Vol.16, No.7 1962
- 12) F.N.Beauvais ; “An improved Analog for Vehicle Stability Analysis.”
SAE Paper 295-0 1961
- 13) D.L.Nordeen ; “Vehicle Handling, it's dependence upon Vehicle Parameter.”
SAE Paper S405 1964
- 14) 高橋 ; “フーリエ解析”
統計数理研究所 1964

第4章 人間－自動車系の操縦特性

4.1 緒 言

前章で自動車の主要因子を変えたとき、操縦性・安定性が、どのような影響を受けるかを周波数応答特性で検討したが、どのような応答関数が操縦しやすいのか明らかでない。

自動車は人間が操縦するものであるから、いうまでもなく人間に適した操縦特性を採用すべきであるが自動車を操縦するとき、人間が、どのような特性であるか、まず調べる必要がある。

しかし人間は非常に複雑な性質をもっており、人間の応答関数を、直接測定することは非常に困難なことであろう。

目標コースを設定し、人間がコースを見ながら操縦したときの自動車の軌跡を測定し、コースを入力とし軌跡を出力とする応答関数を算出すれば、いわゆる人間－自動車系の応答関数が求まる。この応答関数は人間の特性と自動車の特性の両方を含んだ総合特性と考えられる。

したがって、自動車の特性を変えて、この総合特性を測定すれば人間が操縦しやすい自動車はどのようなものか推定できるのではなかろうか。もちろん人間の特性は複雑、微妙なものであるから、定量的に判定することは困難なものと推察されるが定性的にはある程度、把握しうるものと思われる。

そこで過渡応答、相関々数による二つの解析方法を用い、人間－自動車系の応答関数を測定し、人間により運転された自動車の特性から操縦性・安定性の評価基準を確立しようと試みた。

4.2 人間－自動車系の解析方法

操舵周波数応答特性の解析には周波数応答試験、過渡応答試験、相関関数による方法の三つについて検討したが、人間を含めた操縦特性の解析は先の操舵周波数応答特性の解析の場合と手法を変える必要がある。

これは主に、解析する系の入・出力が変わることによるものである。

人間が自動車を操縦する場合を考えると、運転者は外部の環境の影響を受けながら、目標コースと自動車の横方向の位置や車の向きを見くらべてハンドルを動かす。これが操縦装置に伝わって、自動車は横方向変位とヨー角（自動車の姿勢角）の運動を起す。これらの量が運転者にフィード・バックされて、目標コースとの差を検出し、操作するフィード・バック制御系と考えられる。したがって目標コースを入力とし、自動車の通った軌跡を出力とする制御系が人間を含めたいわゆる人間－自動車系の応答特性と判断される。

このようなことから目標コースを路面上に設定し、人間がこのコースを見ながら操縦したときの自動車の軌跡を測定すれば、人間－自動車系の応答関数が求まるわけである。応答特性の解析には先の三つが考えられるが、その内の周波数応答試験では、各周波数（波長）の正弦波を路面に画かねばならずまた一つの周波数正弦波についても、路面にかなりの距離、画かないとその周波数の定常状態になりにくいものと思われる。また完全な正弦波では、運転者は何回かの練習で習熟し、目標コースからの刺戟を受けずに操縦する恐れがある。したがって、人間－自動車系の応答を過渡応答試験と相関関数による解析の二つの方法によつて解析した。

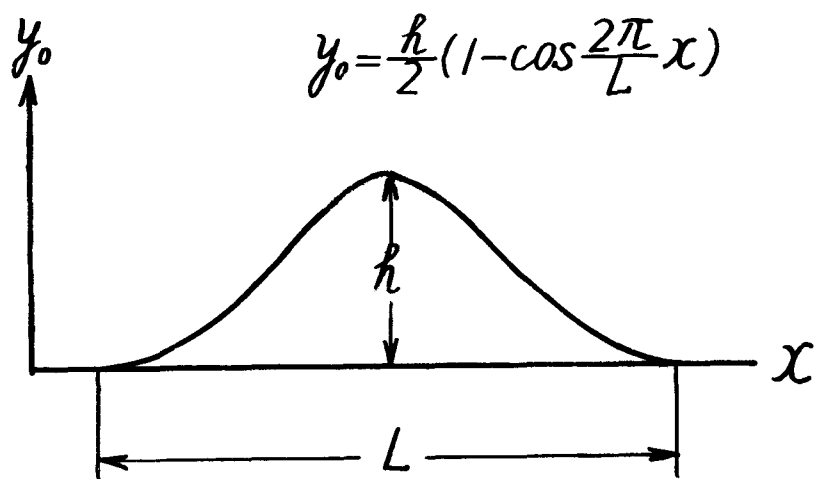
4.2.1 過渡応答試験による解析

(1) 測定方法

今、目標コースを $x(t)$ 、自動車の軌跡を $y(t)$ とすれば、人間－自動車系の応答関数 $G(s)$ は

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\int_0^{\infty} y(t) e^{-st} dt}{\int_0^{\infty} x(t) e^{-st} dt} \quad (4-1)$$

で表わされる。実際の計算は有限な数値を取扱うから、



第4-1図 過渡応答試験の目標コース

第 4 - 1 表 各試験条件での $T_0 = L/V$, $\omega_0 = 2\pi V/L$

波 長 L 車 速 km/h	m	15	25	30	35	50	70
30	$T_0 =$	1.8		3.6		6.0	
	$\omega_0 =$	11.3		22.6		37.7	
50	$T_0 =$	1.1	1.8	2.2	2.5	3.6	5.0
	$\omega_0 =$	6.8	11.3	13.6	15.8	22.6	31.6
70					$T_0 =$	1.8	3.6
					$\omega_0 =$	11.3	22.6

$$\int_0^{Tx} x(t) e^{-i\omega t} dt \doteq \left[\frac{\sin \frac{\omega \Delta t}{2}}{\frac{\omega \Delta t}{2}} \right]^{2n-1} \sum_{k=1}^{n-1} x(k\Delta t) e^{-i\omega k\Delta t} \quad (4-2)$$

$$\int_0^{Ty} y(t) e^{-i\omega t} dt \doteq \left[\frac{\sin \frac{\omega \Delta t}{2}}{\frac{\omega \Delta t}{2}} \right]^{2n-1} \sum_{k=1}^{n-1} y(k\Delta t) e^{-i\omega k\Delta t} \quad (4-3)$$

これらの値を近似計算して、伝達関数 $G(i\omega)$ は次式から算出した。¹⁾

$$G(i\omega) \doteq \frac{\sum_{k=1}^{n-1} y(k\Delta t) e^{-i\omega k\Delta t}}{\sum_{k=1}^{n-1} x(k\Delta t) e^{-i\omega k\Delta t}} \quad (4-4)$$

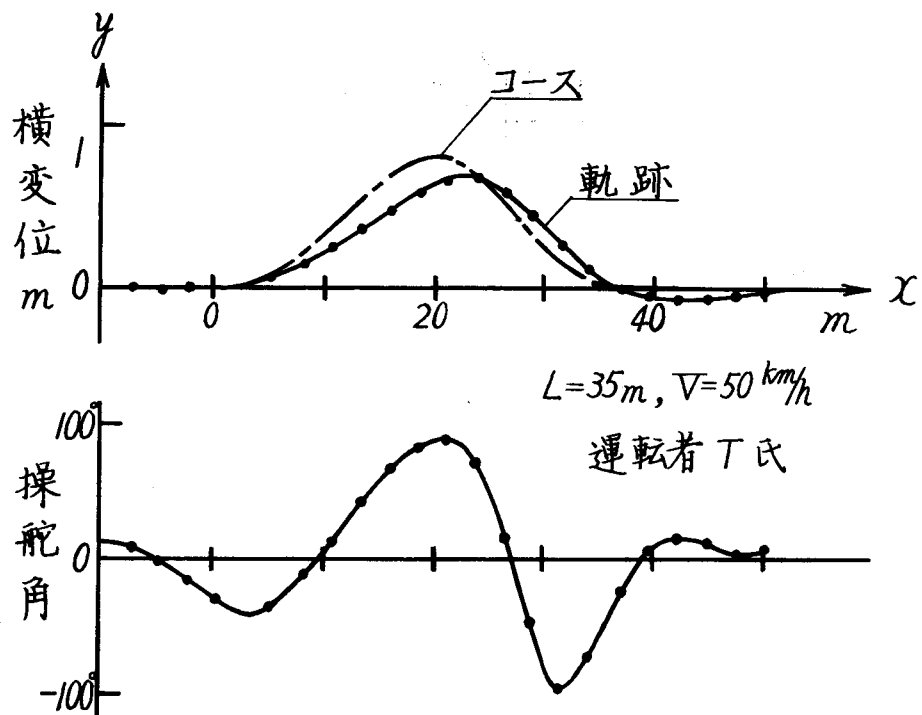
目標コース波形に第4-1図のような偏位正弦波を用いたので、車速 Vm/s で、このコースを走行するときの時間関数は

$$y_0(t) = \frac{h}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi V}{L} t \right) \quad (4-5)$$

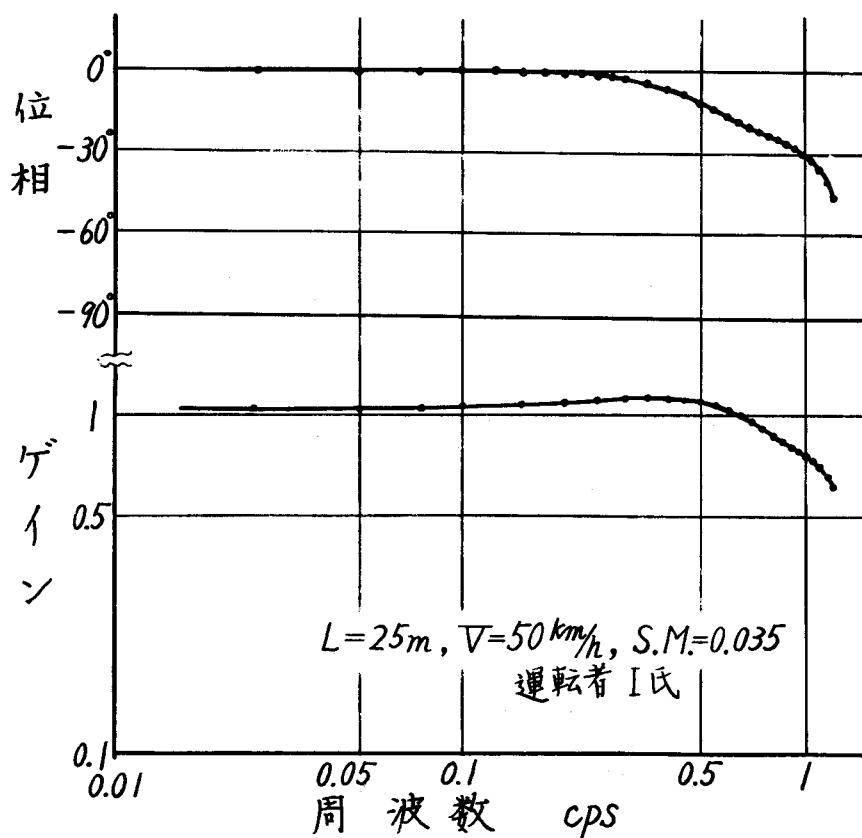
となる。目標コース周期、車速などを変えて、種々の検討を行なった。第4-1表は測定条件を一覧表にしたもので、コースを通過するに要する時間 $T_0 = L/V$ 、 $\omega_0 = 2\pi V/L$ などを記入してある。各条件の測定結果から、目標コースの周波数成分は変更せずに車速の影響のみを、また車速を一定にして周波数成分を変えた場合などの影響をそれぞれ検討できるようにした。

自動車の軌跡は、着色水を加圧し、前・後部バンパーの中央に取付けたノズルより自動車の前後部軌跡を測定した。

解析するデーターは定間隔でサンプリングすればよいので、バンパーに取付けたノズル部に電磁弁を取付け、電接時計の0.2秒毎の信号で、電磁弁を制御し、路面に残された断続線の残跡開始点を基準座標からの平面座標(第4-1図の $x-y$ 座標)として、計測している。このように各時刻における



第4-2図 過渡応答試験の測定例



第4-3図 過渡応答試験による解析例

自動車の前後部の座標が求まっているから、車の重心点の軌跡、姿勢（ヨー角）が計算でえられる。

以上は地上における軌跡の測定であるが車上では操舵角、操舵力などを電磁オシログラフで測定し、電接時計の信号を基準にして、データーをサンプリングし地面上の残跡との同期をうるようにした。

(2) 測定例

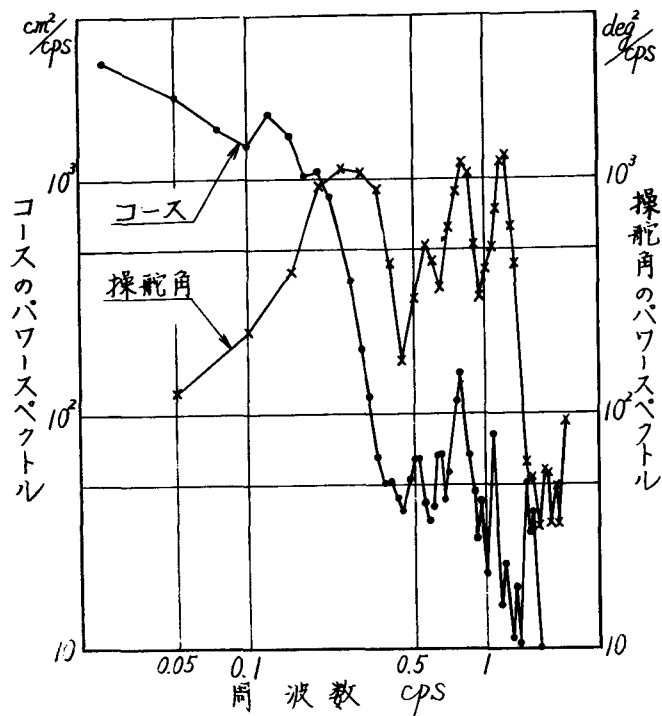
第4-2図は波長周期 $L = 35 \text{ m}$ 、横変位 $h = 1 \text{ m}$ の目標コースを車速 50 Km/h で、操縦したときの測定波形例で運転者はI君である。運転は20～30才のかなり運転の上手な人、4名を選び試験を行なった。第4-2図の上段の波形は目標コースと車の重心点の軌跡を示したものであるが、軌跡は目標コースよりかなり遅れている。

操舵角波形は当然のことであるがコース波形とかなり違った形状を呈している。操舵角を入力とし自動車の軌跡を出力とすれば、自動車の応答関数が求まるはずである。上記、入・出力間の測定結果で自動車応答関数の算出を試みたが信頼性のないでたらめな結果しかえられなかつた。この原因は、コースを偏位正弦波として操縦されるから、入力として取扱う操舵角波形が偏位正弦波と全く異なつた波形を呈するためである。

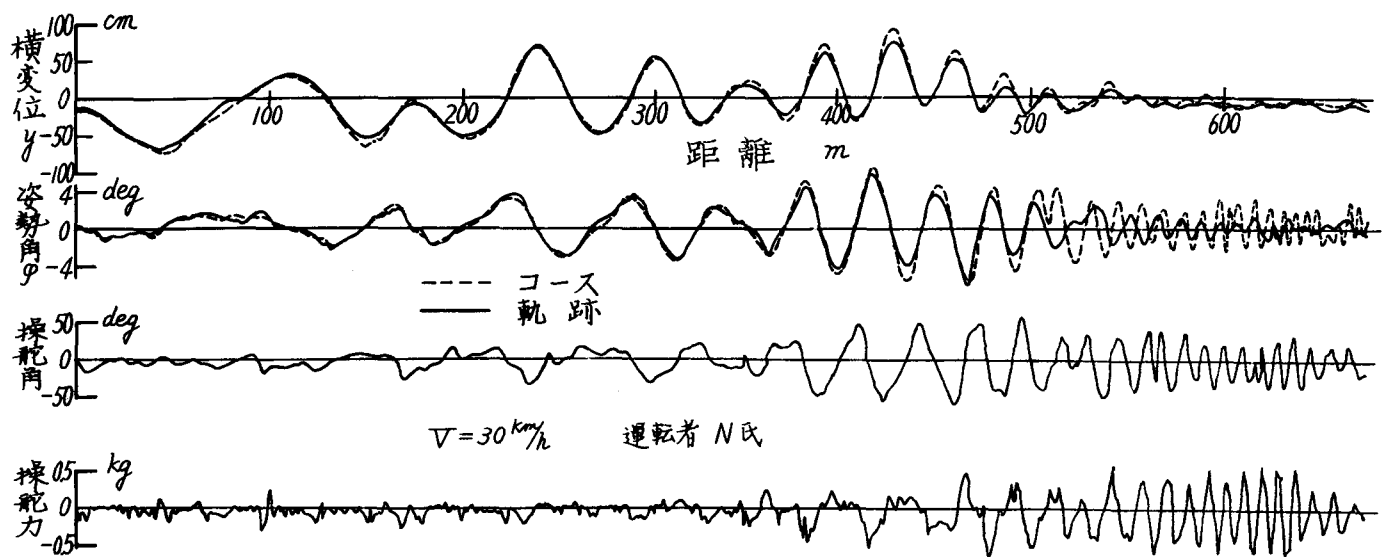
このように目標コースに偏位正弦波形を与えた場合には自動車の応答関数は求められない。したがつて、自動車の応答関数を算出するには前章のように操舵角に偏位正弦波を加える必要がある。過渡応答試験では入・出力波形の形状により、解析不能になる場合があるから、この試験法を用いるときは入力になるものをあらかじめ設定し、それに適した外力を加えるべきである。

次に測定波形の目標コースを入力とし、軌跡を出力として応答関数を計算し、第4-3図に示した。試験条件は目標コースの波長 $L = 25$ 、車速 50 Km/h で運転者はI君の場合である。ゲインは1.0に近い値を示し、周波数 0.40 P/S 迄平坦な曲線であるが、 0.60 P/S 附近から急激にゲインは低下する傾向を示している。

一方、位相は 0.20 P/S 迄、位相遅れは認められないがこれ以上の周波数で、位相遅れは増大する。このように人間-自動車系の特性は 0.50 P/S 程度迄、平坦な比較的単純な特性を有することが明らかになつた。



第4-4図 コース設定時の操舵角
横変位パワースペクトル



第4-5図 ランダムコースの波形例

4.2.2 相関関数による解析

過渡応答試験では目標コースが単純であるから、コース上の運転に習熟すれば目標コースから刺戟を受けずに操縦する恐れもある。このようなことから、目標コースをランダムに設定し、人間-自動車系の特性を解析する方法を検討した。

(1) 算 出 法

いま目標コースを x_0 、操舵角を x_1 、自動車の重心点の軌跡（横方向変位）を y 、姿勢角（ヨー角）の軌跡を φ とすれば x_0 、 y の自己および相互相関関数 $R_{x_0 x_0}$ 、 $R_{y y}$ は、²⁾

$$R_{x_0 x_0}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x_0(t+\tau) \cdot x_0(t) dt. \quad (4-6)$$

$$R_{y y}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T y(t+\tau) \cdot y(t) dt \quad (4-7)$$

入・出力間の相互相関関数 $R_{y x_0}$ は

$$R_{y x_0}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T y(t+\tau) \cdot x_0(t) dt \quad (4-8)$$

また、入力および出力のパワー・スペクトル $P_{x_0 x_0}(f)$ 、 $P_{y y}(f)$ は

$$P_{x_0 x_0}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{x_0 x_0}(\tau) \cdot e^{-2\pi f \tau i} d\tau \quad (4-9)$$

$$P_{y x_0}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{y x_0}(\tau) \cdot e^{-2\pi f \tau i} d\tau \quad (4-10)$$

で表わされる。パワーおよびクロス・スペクトルと周波数応答関数の関係から

$$P_{y x_0}(f) = G(f) \cdot P_{x_0 x_0}(f) \quad (4-11)$$

したがって振幅ゲイン $G(f)$ は

$$G(f) = \sqrt{\left| \frac{R\{P_{y x_0}(f)\}}{P_{x_0 x_0}(f)} \right|^2 + \left| \frac{\text{Im}\{P_{y x_0}(f)\}}{P_{x_0 x_0}(f)} \right|^2} \quad (4-12)$$

位相 $\phi(f)$ は

$$\phi(f) = -\tan^{-1} \left\{ \text{Im} \{ P y x_0(f) \} / \text{Re} \{ P y x_0(f) \} \right\} \quad (4-13)$$

から求められる。実際の計算は前節と同様な方法で行なった。

このようにして、人間-自動車系の応答関数が求まるわけであるが、入力に操舵角 x_1 、出力に横方向変位 y を取れば、自動車の横方向の応答特性を、また出力を姿勢角 ψ とすれば、自動車のヨー角特性が得られる。

(2) コース設定上の問題点

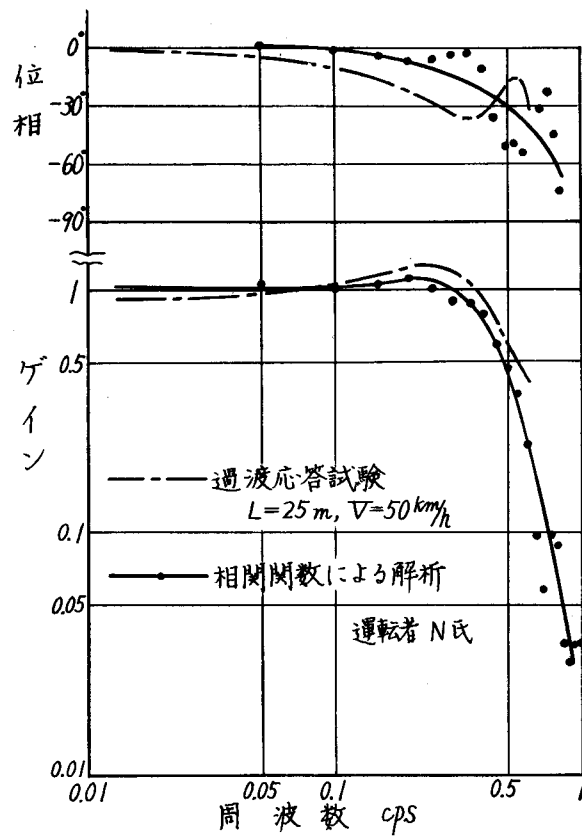
目標コースの設定であるが人間がランダムな波形を路面に画き、そのコース上を運転させる方法も考えられる。しかし人間や自動車の特性と余り異なつた周波数、変位を持つたコースでは、極端に追従できない恐れがある。このような条件で測定することは問題点が多い。したがって人間-自動車系の応答範囲より多少上廻る程度のコースが適当であろう。

このようなことから、人間がランダムに操舵した時の重心点の軌跡を自動車の前後部の残跡より求め、この重心点の軌跡を目標コースとした。目標コース周波数の高い部分は主に人間の筋肉運動を最大限に発揮した範囲で、運転者がコースを見て走行する場合には、これよりも特性は低下するはずである。

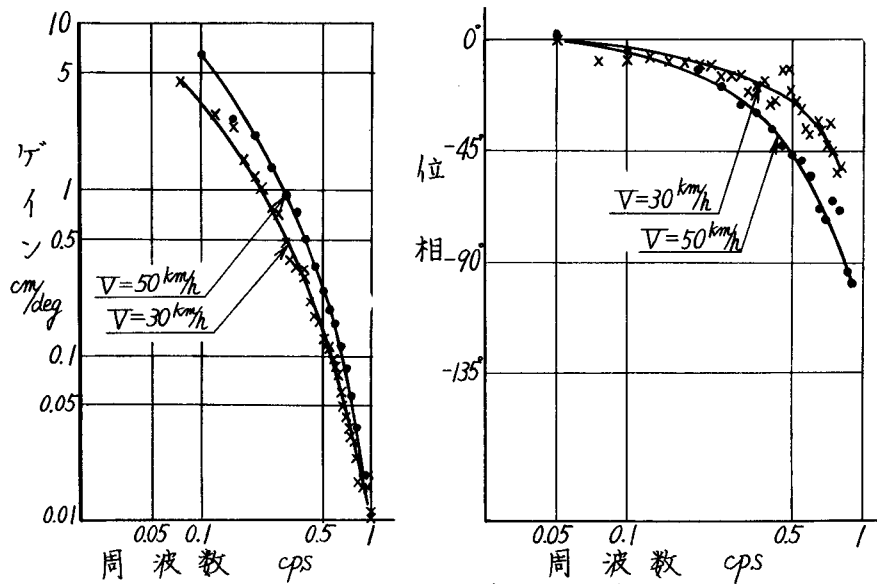
人間がランダムに操舵する方法であるが入力、すなわちコースのパワースペクトルを周波数全域にわたり大体一様にしないと精度が低下する。このようにことから前節と同様、運転者がハンドルを左右に操舵し、周期を上げたり下げたりする方法を採用した。

コースを設定するための運転者と被測定運転者とは区別し、個人的な特性が混入しないようにつとめた。コースを設定した運転者に設定コースを追従運転させて見たが、他の運転者と同様な運転を行ない、このような問題点は考える必要がないようである。

コースの設定は車速 $V = 30 \text{ Km/h}$ で行ない、試験は $V = 30 \text{ Km/h}$ 、 $V = 50 \text{ Km/h}$ の二つの速度について実施した。



第4-6図 人間-自動車系の解析例
(過渡応答, 相関関数による解析)



第4-7図 自動車の応答関数 (車速の影響)

(3) 解 析 例

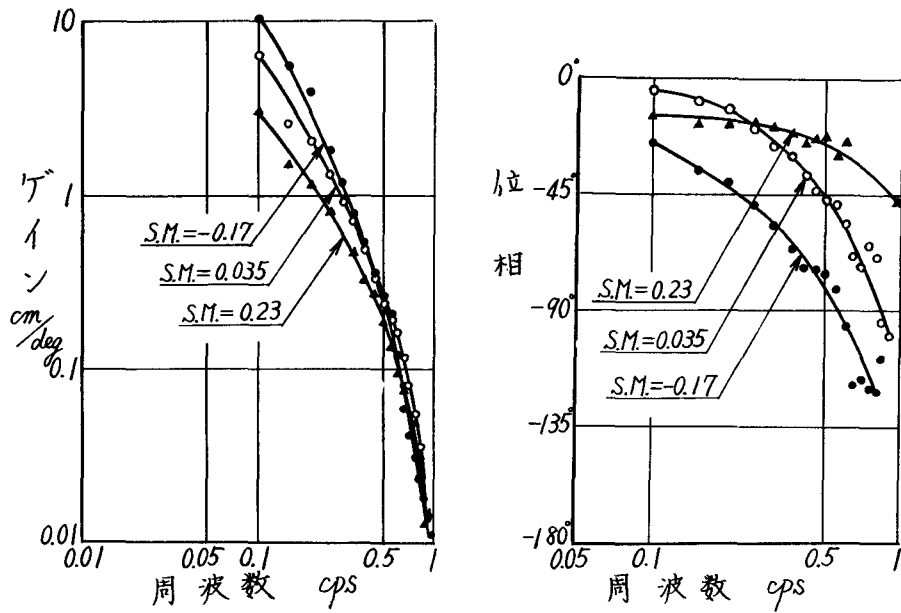
第 4 - 4 図は自動車を操縦して、コースを画いたときの操舵角のパワースペクトルを示す。このとき運転者はコースのスペクトルを一定にすべく、人間の出しうる限界に近い高い周波数の左右操舵を行なっている。この結果 20 P S が人間が出しうる周波数の限界と考えられる。

次にこのような操舵を行なったとき、自動車の重心点軌跡のスペクトルを第 4 - 4 図に示した。操舵角スペクトルはかなり高周波域の成分を含むが、軌跡のスペクトルは 0.2 c p s 附近から、急激に低下する。このことは自動車の応答特性が高周波域で急激に低下することを意味する。

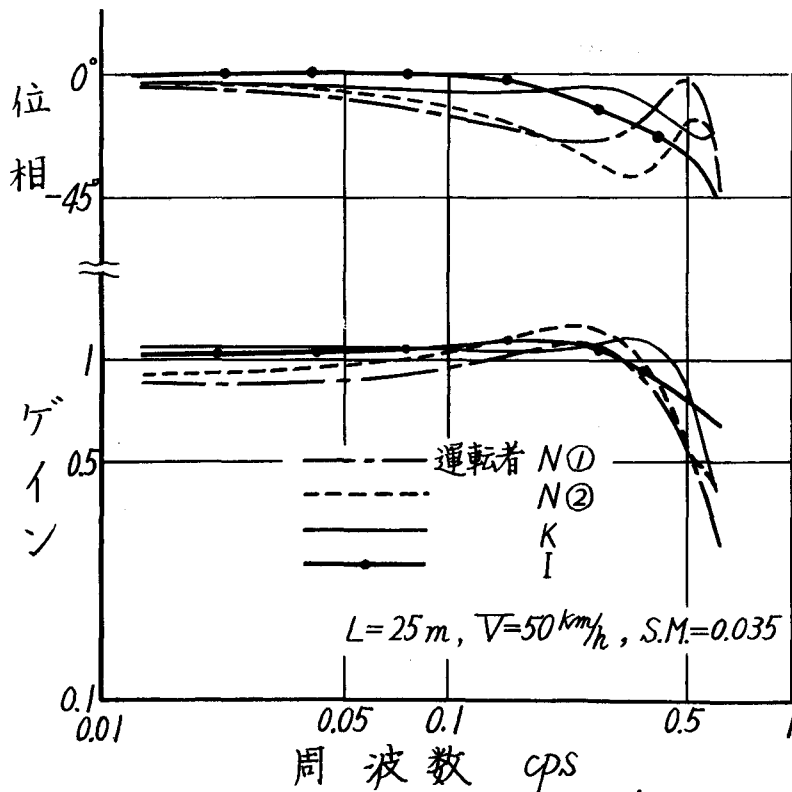
第 4 - 5 図は車速 $V = 30 \text{ Km/h}$ で、設定コースを目標として運転者 I 君が自動車を操縦したときの自動車の重心軌跡、姿勢角、操舵角、操舵力の測定波形例である。

図中、点線で示したものは設定コースで横変位は大体 1 m 程度のものである。また姿勢角波形の点線はコース設定時の自動車の姿勢角測定結果で、実線はコースを追従運転したときの結果である。

第 4 - 6 図は運転者 N 君が車速 50 Km/h で運転したときの人間 - 自動車系の応答関数である。図中実線で示したのは過渡応答試験 ($L = 25 \text{ m}$ 、 $V = 50 \text{ Km/h}$) で測定したもので、解析方法による相違を検討したものである。この結果、ゲイン特性は大体同じ結果がえられているが、位相遅れは過渡試験からの測定結果の方が大きい。しかし両者には根本的な相違は認められず、人を含めた総合特性にはコースによる相違は表われていない。



第4-8図 自動車の応答関数 $V=50 \text{ km/h}$
(Static Marginの影響)



第4-9図 運転者による相違

4.3 自動車の操縦性と人間－自動車系の応答特性

4.3.1 自動車の操縦特性

コース上を運転したときの測定波形から、入力として操舵角、出力に自動車重心点の軌跡を取れば自動車の横方向の運動特性、また入力と同じで出力に姿勢角をとるとヨー角の応答特性がえられる。

第4-7図は車速 $V = 30, 50 \text{ km/h}$ における自動車の横方向応答特性を求めたものである。車速が増加するとゲインは大きくなるが、位相遅れは増大する。同一操舵角に対して横方向運動の感度は大きく、いわゆるハンドルの切れはシャープになるが、一方位相遅れは増加するので操縦性が向上しているかどうか疑問であろう。たゞ人間の特性から判断すれば、人間のゲイン調整は比較的簡単に行なえるが、位相遅れの補償は困難なことで、人間に与える負担は大きいものと推定される。このような立場から考えると高速になるほど、操縦しにくいと判断される。

次にunder, over-steer 特性を変えたときの応答特性を第4-8図に比較してみた。この特性の変更は前後輪タイヤ圧を変え実車の Static Margin⁵⁾の値でその度合を表示した。Static Margin が負のとき、すなわち、over-steer になるとゲインは大きくなると同時に位相遅れも増加する。

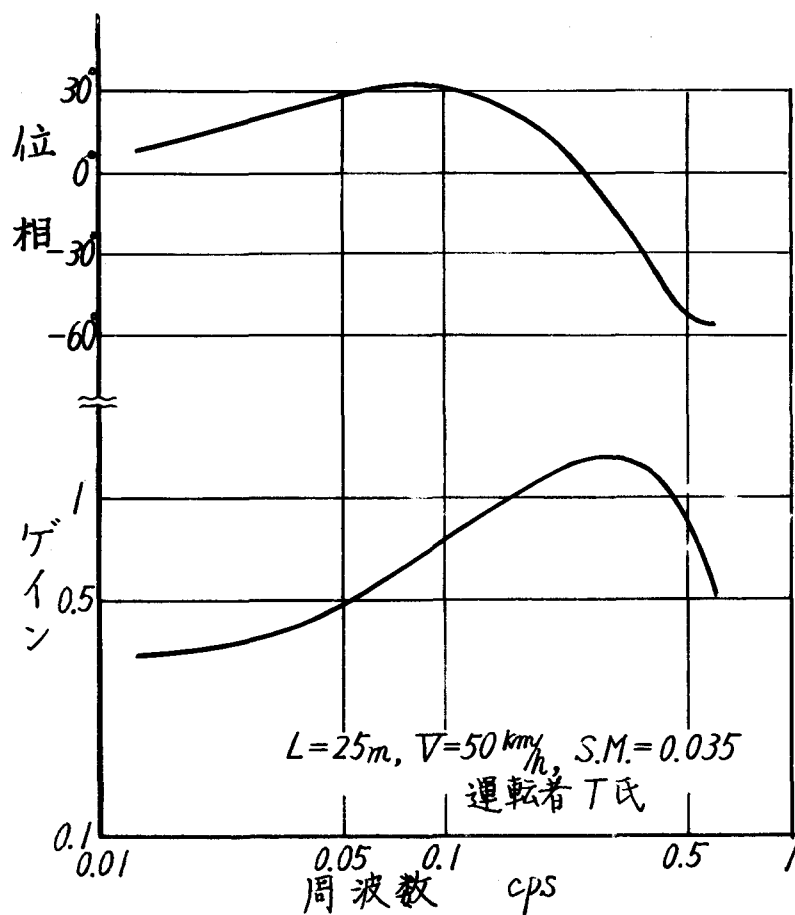
以上は自動車重心点の横方向の運動であるが、ヨー角の運動も全く同様な傾向が見られる。

4.3.2 人間－自動車系の応答

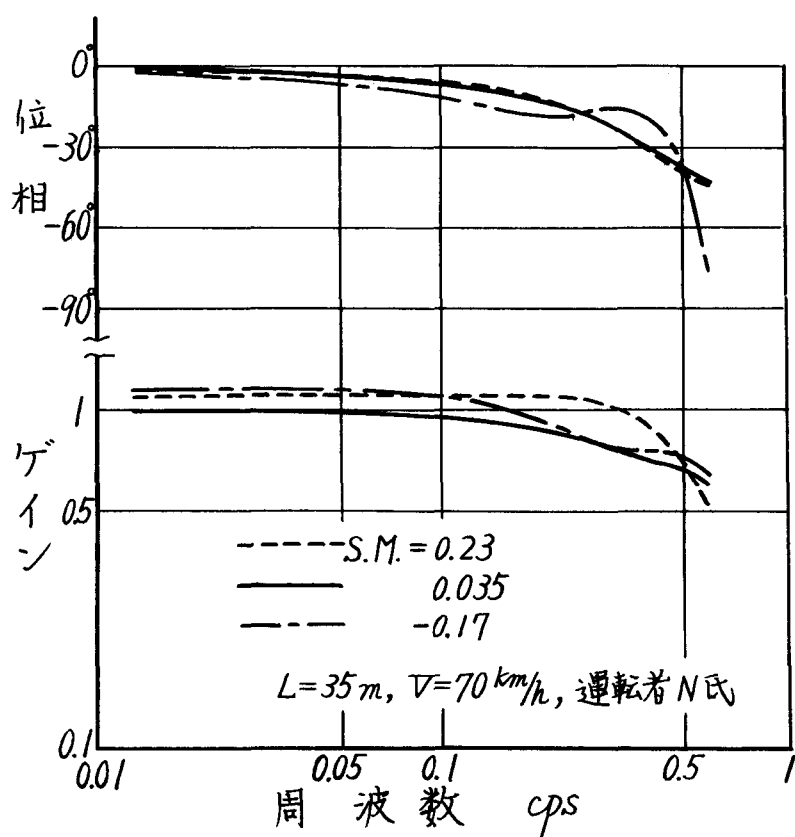
(1) 運転者による相違

人間は複雑、微妙な性質を有しているから運転者の個人差、測定時のバラツキが問題になる。したがって、測定に際してはなるべく安定した動作を行う運転者が望ましい。被測定運転者は20～30才の運転経験4～5年、運転の上手な人、4名を選定した。

第4-9図は同一条件で人間を含めた人間－自動車系の応答特性を測定し、運転者による相違を調べたものである。全周波数域にわたり大体一樣なゲイン特性を発揮する運転者と低周波範囲ではゲインを低下させて高域でゲインを増大させる運転者など個人差が認められる。位相特性で、高周波域に位相遅れが減少する、凸形を示している部分は解析時の誤差と推定される。



第4-10図 極端な運転例



第4-11図 under, over-steer 特性との関係
(過渡応答による解析)

第4-9図の測定結果は安定した状態の測定結果を示したものであるが、たとえば第4-10図のような極端な運転の場合もある。

運転状態の変化する人と、比較的安定な人など運転者による個人差は認められるようである。運転操作の個人差、バラツキなどもかなり認められるので各試験条件による相異を検出することはかなり困難なことであるが、数多くのデータから判断すれば定性的にはある程度推論できるのではなかろうかと思われる。

(2) under, over-steer 特性との関係

前後輪タイヤ圧を変更し、under, over-steer 特性による影響を調べた。

Static Margin は実車での旋回試験の結果から算出したもので、 $S.M = +0.23$, $+0.035$, -0.17 の値になつている。

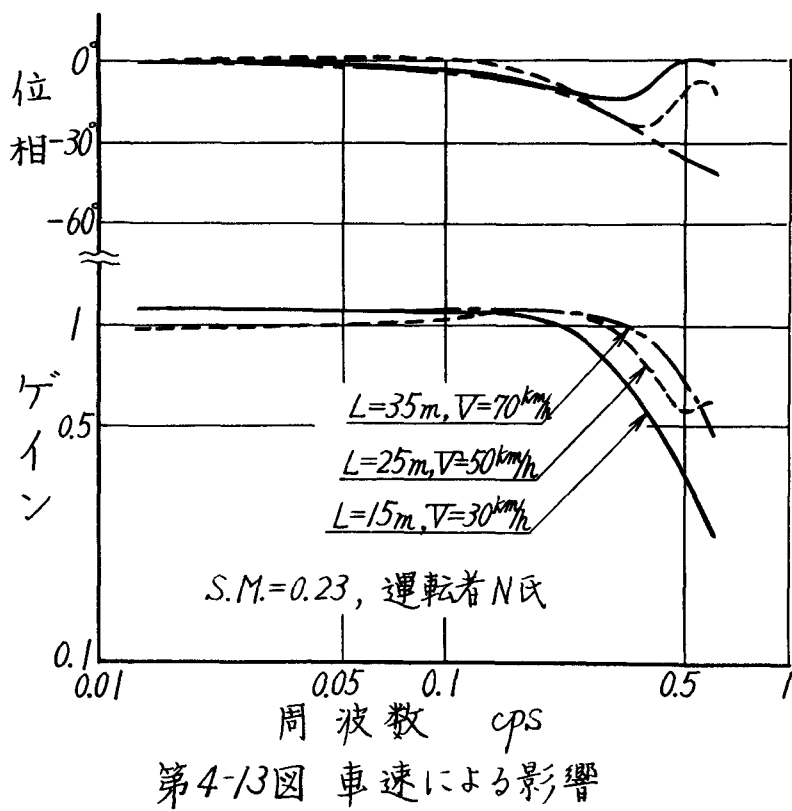
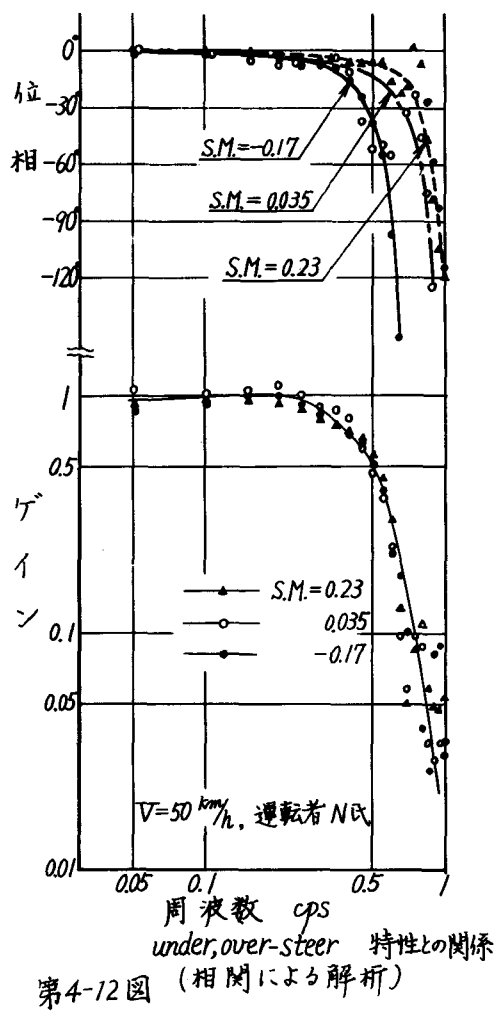
第4-11図はコース波長 $L = 35\text{ m}$ 、車速 $V = 70\text{ km/h}$ の条件で、Static Margin を変えたときの応答特性を比較したものである。ゲインの値は因子の変更により生じたと思われるものはないが、位相特性は、 $S.M = -0.17$, over-steer のとき、遅れが大きい。

第4-12図は相関関数による解析結果を示したもので、ゲイン特性の有意性は認められないが位相差では先の結果と同様、over-steer 特性の場合位相遅れが大きくなる。

自動車の応答関数は、第4-8図示したように横方向、ヨー角の両者共、over-steer 特性になるとゲインは増加し、位相遅れは大きくなる。

人間は制御対象物により、動特性を大巾に変更しうる特性を有する、いわゆる適応制御系と考えられるが、比例常数(ゲイン)の変更は比較的容易に行なえるが、位相遅れの補償はかなりむづかしいのでなかろうか。⁶⁾ しかも位相遅れの補償には運転者にかなりの負担になるものと考えられる。⁷⁾ 先の第4-11、12図の結果はこのような人間特性の一面を表わしているものと推察する。

以上のような考えを進めると、人間に適した自動車の特性はゲインの大きさよりも位相遅れの小さいものの方が良いように思われる。



(3) 車速による影響

目標コースを設定し、そのコース上を速度を変えて運転する場合、自動車自体の特性が速度によつて変化すると同時に人間に与えられるコースの周波数成分も変るから、自動車と人間の両方に影響を受ける。したがつて、人間—自動車系の応答関数にはこの両者の影響を含んだ結果が表われる。

そこでコース波長 L と車速 V を $L = 15 \text{ m}$; $V = 30 \text{ Km/h}$, $L = 25 \text{ m}$; $V = 50 \text{ Km/h}$, $L = 35 \text{ m}$; $V = 70 \text{ Km/h}$, のように組合せた。この三種の条件では $\omega = 11.3$, コースを通過するに要する時間 $T_p = 1.8$ 秒と、同一条件になり人間に加えられる周波数成分は同じになる。したがつて、車速 $V = 30, 50, 70 \text{ Km/h}$ の自動車特性の影響のみを調べることができる。

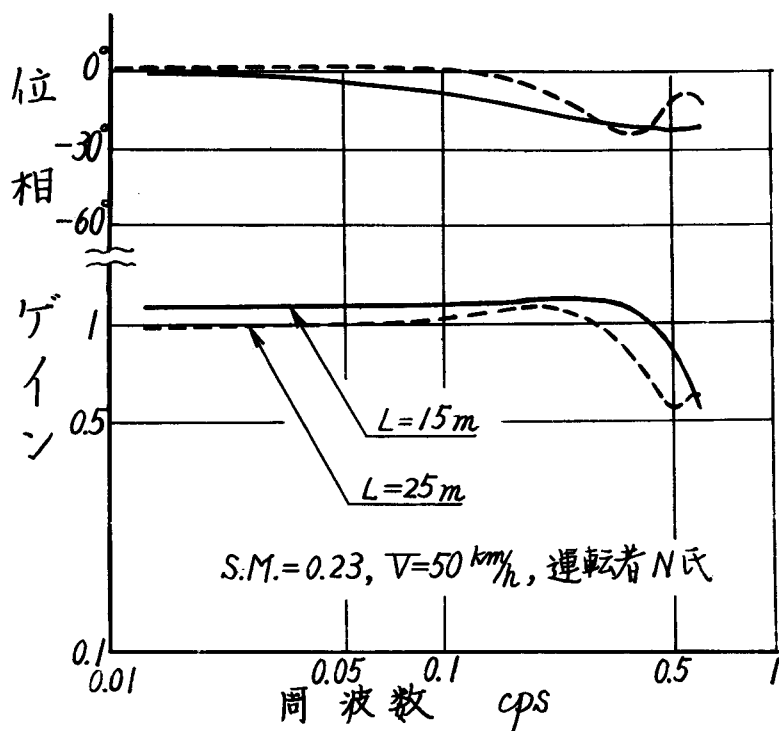
第4-13図は上記三条件の解析結果である、ゲイン特性は車速が高くなるほど特性が伸びているが、位相の差異は判然としない。人間の特性を含めた応答関数から自動車特性の相違による影響を調べることはむづかしいことであるが、第4-8図のように横方向、ヨー角特性の両者共、速度が高くなるにつれて、ゲインは増大し、位相遅れが大きくなる自動車の車速による影響を受けるのではなからうか。たゞ車速の増加に伴う位相遅れの変化は *over-steer* 特性の場合よりは僅少であるから、位相特性に変化が認められないのではないかとも思われるが、この原因については明らかでない。

(4) コースの周波数成分の影響

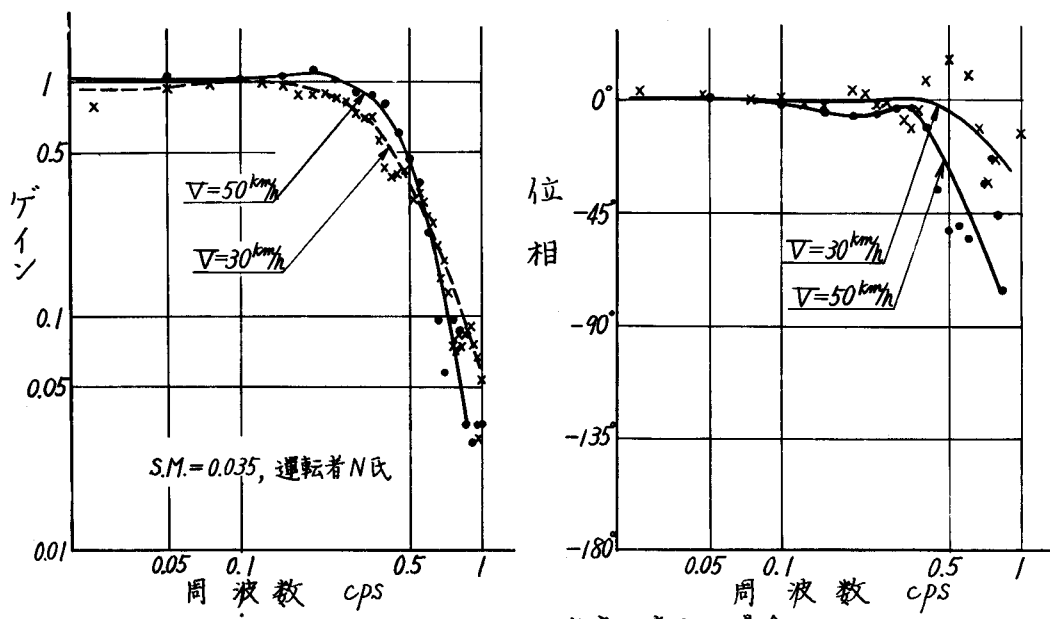
走行速度が同じで波長 L を変えたときは自動車に与えられるコースの周波数成分が変化する。波長が短い場合は高い周波数成分が増大するものと考えられる。車速 $V = 50 \text{ Km/h}$ で $L = 15 \text{ m}$, 25 m の両コースを運転したときの応答特性を第4-14図に比較した。ゲイン特性は $L = 15 \text{ m}$ のとき高い周波数迄伸びており、応答特性がよいように思われるが、路面波長で整理すれば逆に $L = 25$ の場合の方が応答が悪く、位相遅れも大きくなる。したがつてコースの周波数成分が高くなると、コースに対する追従が悪く、操縦しにくくなるものと考えられる。

(5) 同一コースを速度を変えて運転した場合

一般の道路を走行する場合、コースが定まつていて、その場所を色々な速



第4-14図 コース周波数成分の影響



同一コースで速度を変えた場合
第4-15図 (相関による解析)

度で運転することが多い。

このような場合には人間に与えられるコースの周波数成分が変化すると同時に、自動車自体の速度による特性変化の影響を受ける。

第4-15図は先に設定したランダムコースを速度30, 50 km/hで同一運転者に操縦させたときの人間-自動車系の応答特性である。

ゲイン特性は車速50 km/hの場合、高い周波数域まで伸び周波数応答が良くなっているが、一方位相遅れは増大する。

もし人間の特性が、車速に無関係に、一定であると仮定すれば自動車自体の特性の影響を受け、第4-8図のように車速の増大に伴いゲインは高く、一方、位相遅れは増すので、第4-15図の結果は理解できる。

以上は周波数、すなわち時間軸について検討したが、路面コースの追従性、誤差を調べるときはコース波長を基準にすべきであろう。第4-16図はコース波長の逆数をパラメーターにして、応答特性を比較したものである。車速30 km/hのときは短かい波長にもよく追従し、位相遅れも小さく、低速で操縦した方がコースに対する追従性がよく、誤差が小さくなることを示している。

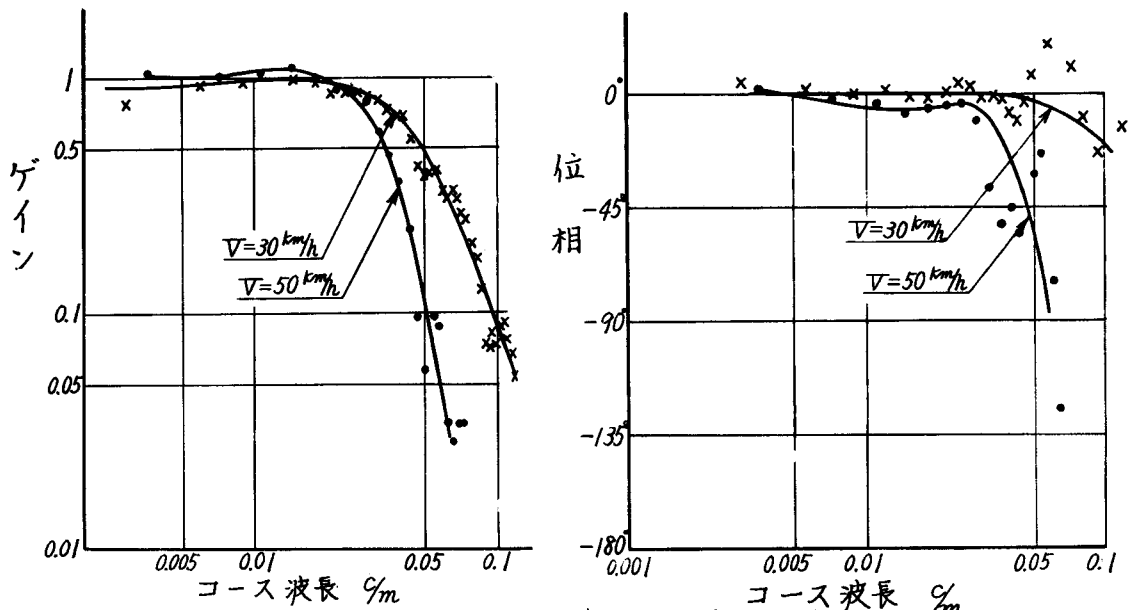
いま路面波長（逆数）を $P(\lambda)$ (c/m)、車速 V (m/s)とすれば、人間に加えられるコース波形の周波数 $P(f)$ (c.p.s)は

$$P(\lambda) = P(f) / V \quad (4-14)$$

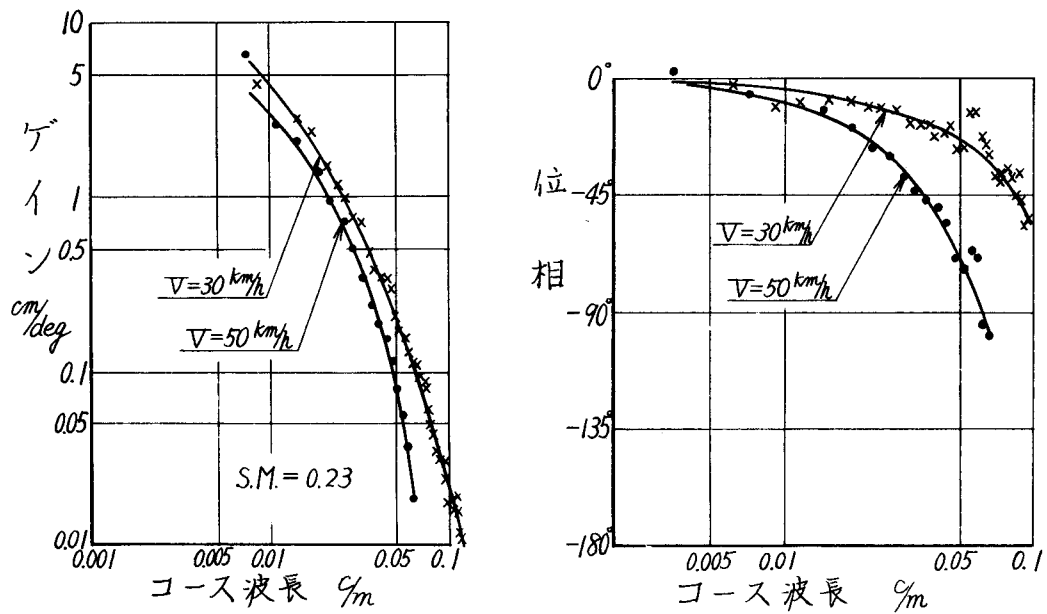
で与えられる。第4-8図の自動車の応答関数を波長で整理したものが第4-17図である。この結果では、ゲインは車速30 km/hの方がむしろ大きくなっているが車速による影響は僅少である。一方、位相遅れは高速になるほど急激に増大する。

コースの波長は同じでも、車速が早くなると人間に与える周波数は高くなり、いそがしい操縦を余儀なくされる。したがって、高周波に対する人間特性の低下も含まれ人間-自動車系の応答は高速になるほど悪化し、コースに対する追従誤差は大きくなる。

このように路面波長に対して、自動車の応答特性を整理すると操縦性を評価するのに便利である。このような考えから、車速による自動車の特性を評価すれば、高速になるほどゲインは低下すると同時に位相遅れは増大し、操縦しにくいことになる。



第4-16図 人間-自動車系の応答とコース波長で整理したもの



第4-17図 自動車の応答関数 (コース波長で整理)

4. 4 結 論

どのような操縦特性が人間に適しているかを調べるため、偏位正弦波形とランダムなコースを設定して、過渡応答および相関関数による二つの解析で、人間－自動車系の応答特性を調べた。その結果を要約すれば次の通りである。

- 1) 過渡応答による解析は測定が比較的簡単であるが、今回の測定データから自動車の応答関数が求まらなかつたように、入力波形により制約を受ける。このように、この解析方法ではコースの形状を自由に選択できない欠点がある。

一方、相関関数での解析は任意に設定したランダム波形コースでの測定が可能であるが、測定に手数がかかる。

- 2) 運転者による相違を調べたところ、個人差は認められるが、同一運転者は大体、同じ運転方法を取るようである。測定毎に操縦方法が変る不安定な人があり、測定には比較的、安定な動作をする運転者に操縦させる必要がある。

各試験条件による差異を検出することはむづかしいことであるが、数多くのデータから定性的には推定できるものと考ええる。

- 3) 自動車を over-steer 特性にすると、人間－自動車系のゲイン特性には変化が認められないが、位相遅れが増大し、コースに対する追従性が悪化する。したがって、under-steer 特性の方が運転しやすいのではなかろうか。

- 4) 一方自動車の応答特性は over-steer 特性になるとゲインが増加すると同時に位相遅れも大きくなる。

- 5) 人間は制御対象物により動特性を変更しうる、いわゆる適応制御系で、比例常数(ゲイン)の変更は比較的容易に行なえるが、位相遅れの補償はかなりむづかしい。このような人間特性から、over-steer の場合先のような人間－自動車系の応答特性が表われたものと考えられる。これらの結果から、判断すれば、自動車の応答特性はゲインの大きさよりも位相遅れが重要で、人間にとって、位相遅れの小さい車が運転しやすいものと推察する。

- 6) 人間の操縦特性を検討する場合、コースに対する追従誤差が問題になるから周波数の代りにコース波長で整理すると判断しやすい。たゞこの場合人間特性は時間関数であるから注意する必要がある。
- 7) 同一コースを速度を変えて運転した結果、高速になるとコースの短い波長に対する追従が悪く、位相遅れも大きく追従性が悪化することが明らかになった。このことは速度が早くなると操縦しにくいという、運転の常識を裏付けるものと考ええる。
- 8) 自動車の応答特性を波長で整理すると、高速になるほどゲインは低下し、位相遅れは大きくなる。高速で自動車を運転する場合、このような自動車の速度による特性変化と車速が早くなると人間の操舵速度が上昇するために起る高周波に対する人間特性の低下の二つの原因で人間－自動系の応答特性が劣化し、コースに対する追従が悪くなるものと考えられる。

今回の解析から、人間の応答特性を完全に把握することはできなかつたが、自動車の操縦特性の評価基準をきめる足がかりはできたものと思う。

参 考 文 献

- 1) J.O.Hougen & R.A.Walsh; "Pulse Testing Method."
Chemical Engineering Progress Vol.57, №3, 1961
- 2) Herman; "Correlation Functions and Noise Patterns
in Control Analysis."
Transactions of the ASME February 1958
- 3) 森谷, 近森; "自動車の周期的操舵に関する一考察"
自動車技術 Vol. 17, №9, 1963
- 4) 井口; "運転者の運動特性から見た自動車の走行安定性"
機械学会誌 Vol. 62, № 491
- 5) D.Whitcomb; "Design Implication of a General Theory
of Automobile Stability and Control."
海外機械工学文献集 Vol.9, №3, 1960
- 6) 藤井, 井口; "人間と制御 I"
科学 Vol. 31, № 6, 1961
- 7) 井口; "機械運転者の動作特性"
自動車技術会講習会教材 昭和39年

第5章 突風による自動車の応答について

その一 突風の測定方法

5.1 緒 言

高速走行中に自動車に加わる外部攪乱外力として考えられるものには、路面の不整地外力、突風などの空気力学的攪乱力の二つがあるが、一般に高速走行する場合には良好な路面であるから、外部攪乱力の大部分は突風などと考えられる。

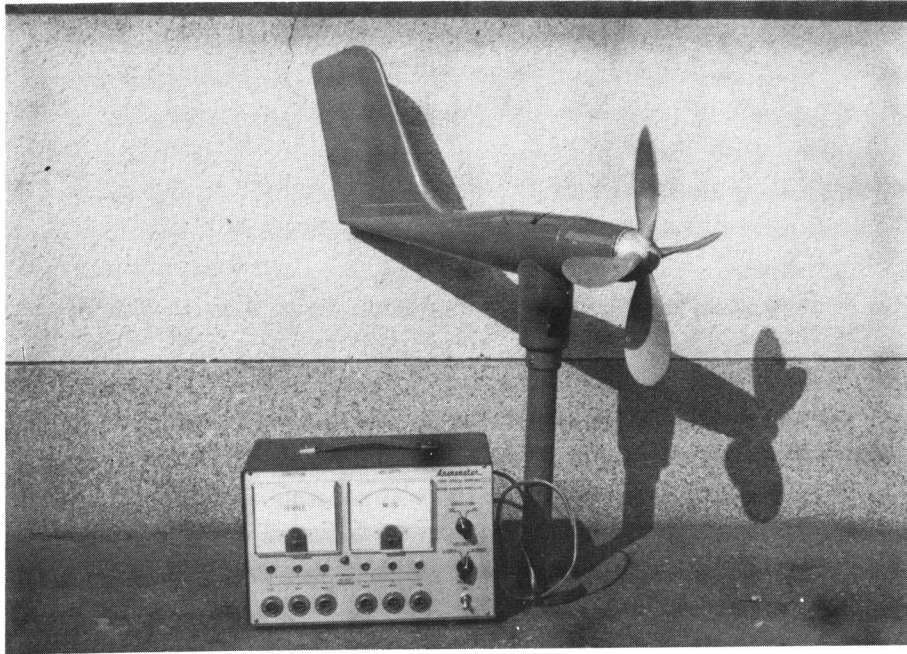
ところが、高速安定性の解析に必要な自動車に加わる突風の資料は、現在のところ皆無の状態、まず突風の性質を知ることが先決と考えられる。

自動車に対する風の影響は、定常風のようなものも人間の補償操舵が必要であるから検討しなければならないが、特に重要なのは風の乱れに対する応答であろう。

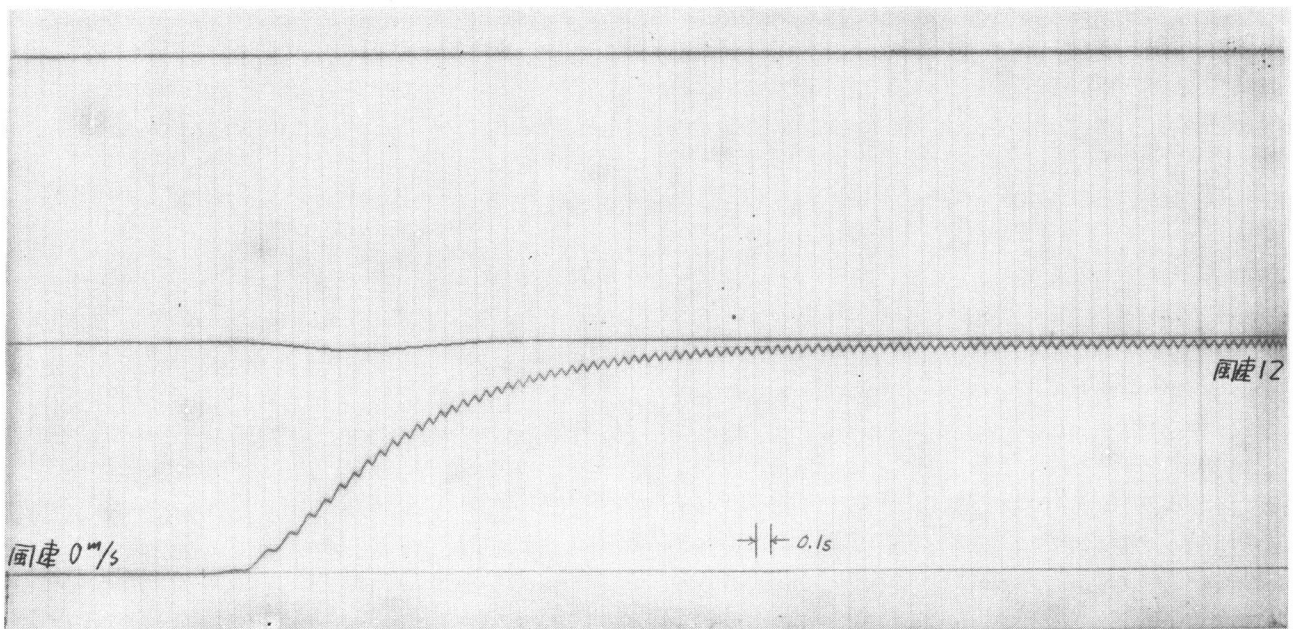
気象庁などで測定している最大風速は10分間の平均風速であるが、自動車の応答にはもつと周期の短かい、いわゆる短周期の変動が必要である。

本章ではまず、従来から気象観測用に使用されている風速計の動特性を調べ、自動車用風速計に具備すべき条件について検討した。

短周期風速変動の測定は、最近注目されてきた段階で、特に、測定器については問題点が多い。そこで筆者は自動車の応答解析に適した新しい風速計を開発した。



第 5 - 1 図 プロペラ型風速計



第 5 - 2 図 プロペラ式風速計のインディシャル応答
(風速 $V = 12 \text{ m/s}$, 入射角 $\alpha = 0^\circ$)

5.2 風速・風向の測定器について

5.2.1 プロペラ型風速計

一般観測用として今日広く用いられている風速計には風杯型（ロビンソン風速計）とプロペラ型風速計があり、日本ではいずれも気象庁型にほとんど統一されている。風杯型には3杯のFC-1型と4杯のFC-2型がある。3杯のFC-1型は風杯の直径が10cmで風杯の中心から回転軸までは10cmである。

プロペラ型風速計は直径35cm、4枚羽根のプロペラを持ち発電機により電氣的に指示するようになっている。一方、風向指示は矢羽根を用いたものが大部分で回転角を抵抗変化で検出している。

第5-1表 各種風速計の動特性

平均風速 風速計		完全追従限界周期 (sec)		
		10 m/s	20 m/s	40 m/s
風杯風速計 (3杯)	FC-1	19	9.5	4.8
風杯風速計 (4杯)	FC-2	23	12	5.8
プロペラ型風速計	FF-1	7.9	4.0	2.0

第5-1表に各種風速計の測定可能な風速変動周期を示した。この表からも明らかなように、現在、わが国で使用されている風速計ではプロペラ型が最も動特性が良好である。

このプロペラ型風速計（第5-1図）が自動車の応答解析に利用できるか、どうかを検討した。

風速計の動特性を解析する方法としてはステップ状の入力を加え、その時の応答特性から算出するのが簡便である。しかし風のステップ入力を与えることは實際上、不可能であるから、風速計を風洞装置内に取付け、一定風速の中で、プロペラの羽根を固定した状態から瞬間的に固定を解除した後の応答特性から解析する方法を採用した。

第5-2図はこのような方法で測定したプロペラ型風速計のインデシャル応答特性を示したもので、入射角が0，すなわち風の方角と矢羽根の方角とが完全に一致したときの状態のものである。

いま入力を $x(t)$ 、出力を $y(t)$ とし、 $x(t)$ 、 $y(t)$ のラプラス変換したものをそれぞれ $x(s)$ 、 $y(s)$ とすればその系の伝達関数 $G(s)$ は

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (5-1)$$

で表わされる。 入力が単位ステップの場合は

$$X(s) = \frac{1}{s} \quad (5-2)$$

$$\therefore G(s) = s Y(s) \quad (5-3)$$

$$G(s) = s \int_0^{\infty} y(t) e^{-st} dt = \int_0^{\infty} y'(t) e^{-st} dt \quad (5-4)$$

$i\omega$ で表わすと

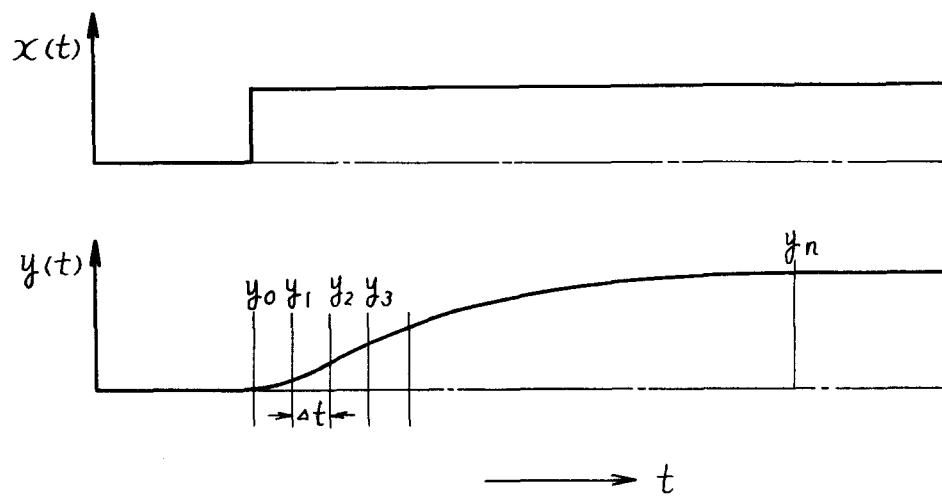
$$G(i\omega) = \int_0^{\infty} \cos \omega t d[y(t)] - i \int_0^{\infty} \sin \omega t d[y(t)] \quad (5-5)$$

上式、右辺の第1項および第2項は次の式から計算できる。

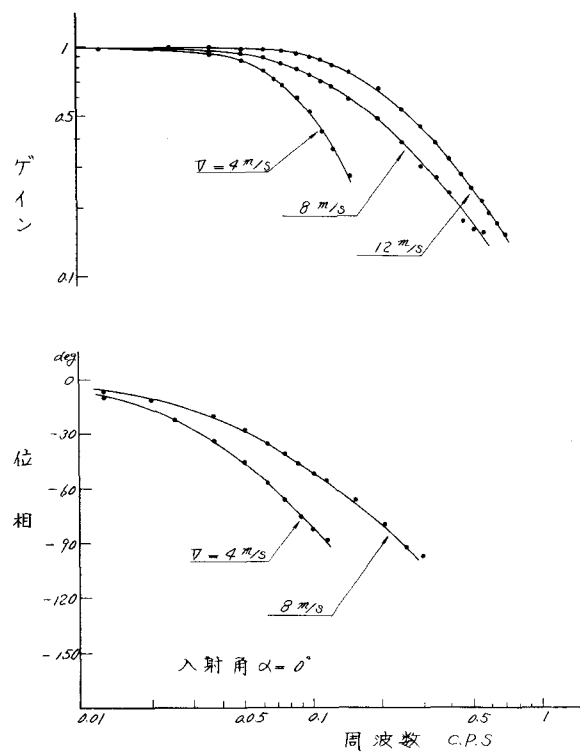
$$\cos \left(\frac{r}{h \cdot 2\Delta t} \right) = \sum_{k=1}^n \Delta y(k\Delta t) \cos \frac{r\pi}{h} k \quad (5-6)$$

$$\sin \left(\frac{r}{h \cdot 2\Delta t} \right) = \sum_{k=1}^n \Delta y(k\Delta t) \sin \frac{r\pi}{h} k \quad (5-7)$$

第5-3図のように時間間隔 Δt ごとにデーターをサンプリングして、



第5-3 図 ステップ応答の計算



第5-4 図 プロベラ型風速計の動特性

$$\left. \begin{array}{l} y_1 - y_0 = \Delta y_1 \\ y_2 - y_1 = \Delta y_2 \\ \vdots \\ y_n - y_{n-1} = \Delta y_n \end{array} \right\} \quad (5-8)$$

の階差を作り (5-6)、(5-7) 式から、実数および虚数部を計算し、応答関数のゲイン、位相を求めた。

上記のような計算式から、風速計の動特性を算出し、第5-4図に示した。

0.10 CPS 附近からゲイン特性は低下し、位相遅れは増大する、位相遅れ角 45° が測定可能な周波数範囲とすれば、風速 $V = 8 \text{ m/s}$ では 0.085 CPS (周期 12 sec) がその限界と考えられる。

これらの動特性は次のような二次おくれの伝達関数で

$$G(S) = \frac{1}{T^2 S^2 + 2\zeta TS + 1} \quad (5-9)$$

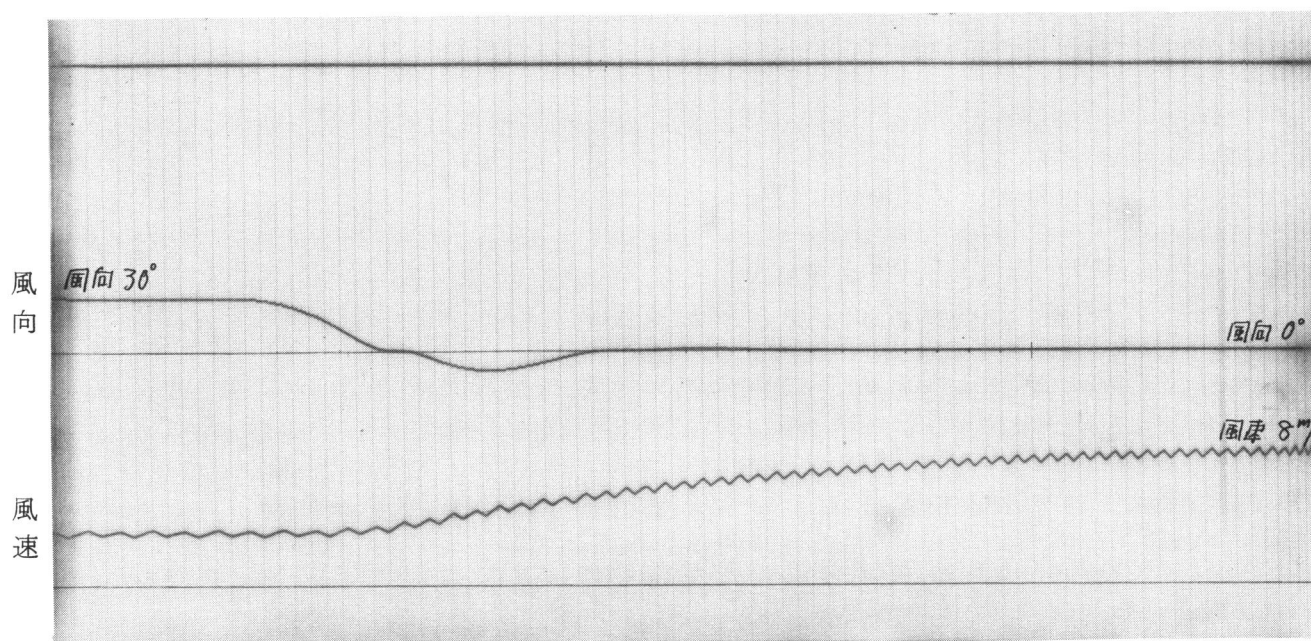
近似でき、各風速での減衰係数、時定数 T を算出すると第5-2表のようになる。

第5-2表 プロペラ型風速計の特性

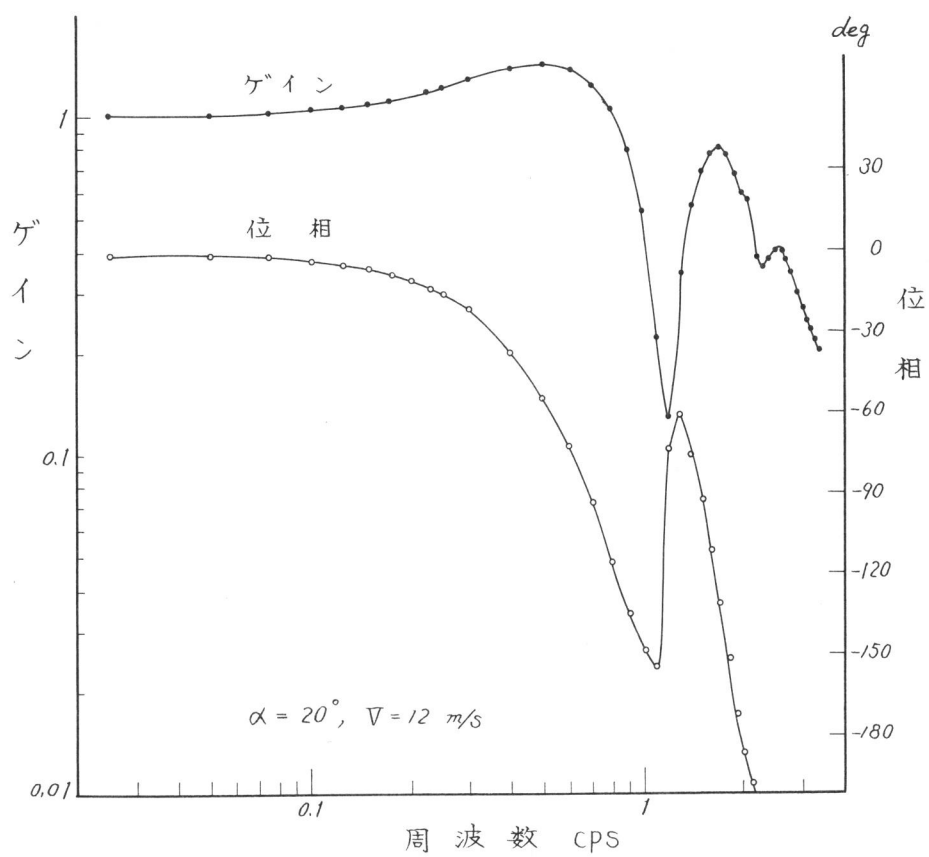
風 速 m/s	減 衰 係 数 ζ	時 定 数 T_{sec}
4	1.0	1.59
8	1.0	0.80
12	1.0	0.55

減衰係数は 1.0 と非常に大きな値で、風速に無関係である。一方、時定数は風速が大きくなるにしたがい減少し、応答が早くなる。

以上、プロペラ型風速計の動特性を検討したが、回転体より風速を検出する方法では、回転体の慣性モーメントが風速計の動特性を左右する



第5-5図 斜めから入射したときの風速・風向のインディシヤル応答
(風速 $V = 8 \text{ m/s}$, 入射角 $\alpha = 30^\circ$)



第5-6図 プロペラ式風速計の風向特性

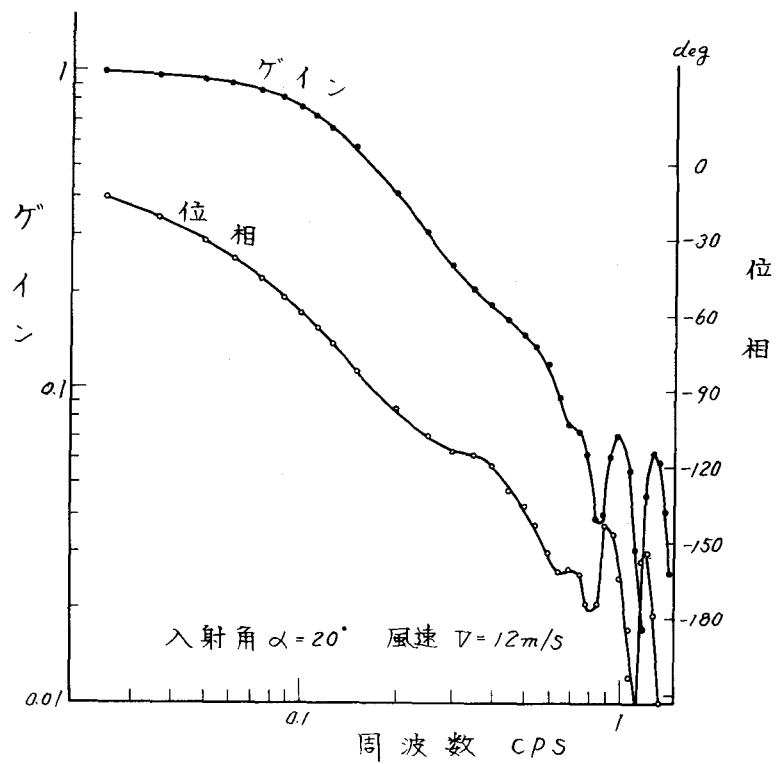
ことになる。たとえば慣性モーメントの大きい場合には風速の上昇過程で見かけ上小さく指示され、逆に下降過程では大きくなる。

次に風向計の動特性について調べる。測定は風洞装置内で風速計の矢羽根を風に対し規定した入射角の状態に固定し、瞬間的に固定を解除した状態の応答特性から検討した。風速 $V = 8 \text{ m/s}$ で、入射角 $\alpha = 30^\circ$ の場合の風向計、風速計の応答特性を第 5-5 図に示す。風向計の応答は比較的早いですが、反対方向に Over-Shoot の現象が認められる。風速は入射角 $\alpha = 30^\circ$ になると見かけ上かなり低い値で、その後の応答もかなり遅い。

第 5-6 図は風速 $V = 12 \text{ m/s}$ 、入射角 $\alpha = 20^\circ$ の場合の風向計の動特性を解析したものである。風速の特性と同様に (5-9) 式の二次おくれ伝達関数で近似しうるが、減衰係数 $\xi = 0.4$ 、時定数 $T = 0.23 \text{ sec}$ と応答は早いですが減衰が小さいため Over-Shoot の現象が表われる。筆者はプロペラ式風速計を車載し、自動車が走行中に受ける風の測定を試みたが、車の振動から攪乱を受けて矢羽根が変動し、測定できなかった。

次に風向が変動したときの風速の応答特性を第 5-7 図に示した。入射角 $\alpha = 20^\circ$ 、風速 $V = 12 \text{ m/s}$ の場合では減衰係数 $\xi = 1.0$ 、時定数は $T = 1.01 \text{ sec}$ で、第 5-2 表の入射角 $\alpha = 0$ のときの $T = 0.55 \text{ sec}$ より大きく、応答特性が悪化する。このように風向が変動するときは矢羽根が動くまでの時間遅れがあり、風速計の動特性がかなり低下する。

プロペラ型風速計の測定可能な変動周期は数秒以上であり、しかも風向測定の精度も悪いので、自動車の応答解析にプロペラ型風速計を利用することはできない。



オ5-7図 斜めから入射した場合の
風速の動特性

5. 2. 2 従来の短周期測定用風速計

自動車の応答解析には数サイクル程度の変動風速の測定が必要と考えられるから、従来の気象用測定器を利用することは無理である。

周波数応答のよい風速計としては次のようなものが開発されている。

- (1) 風圧板型風圧計
- (2) ピトー管型風圧計
- (3) 熱線風速計
- (4) 超音波風速計

風圧板型風圧計は¹⁾平板または円板の受圧板のたわみをストレインゲージ、インダクタンス変換器などで検出するものである。受圧板が矢羽根によつていつも風の方向に向けられるようになつていて風向を検出することも可能であるが、受圧部の慣性モーメントは大きくなるから短周期の風向変化に追従しえない欠陥がある。

²⁾ピトー管型風圧計はピトー管の全・静圧をステンレス製ベローズの変位として検出し、それを差動変圧器によつて電気出力に変換するものである。風向は矢羽根によつて常に風向方向に向くようになつている。

熱線風速計は、現在、よく利用されているが、一般のものでは応答性が悪い。最近、応答の速いものも見受けられるが強度的に弱いようである。

³⁾超音波風速計は音波の空気伝播速度が空気の動きによつて影響を受けることを利用しており、最近開発されたものであるが、これらの中では最も有望と考えられる。しかし、現段階では車載しえないこと、比較的高価であることなどが問題になる。

5. 2. 3 自動車用に適した風速・風向計

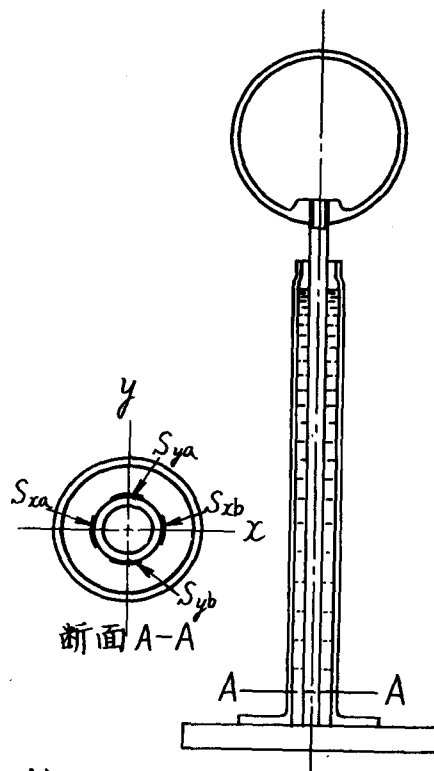
以上、各種風速計について調べて見たが、自動車用風速計に具備すべき条件には次のようなものがある。

- (1) 風速・風向の応答が速いもの
- (2) 風向が正確に検出できるもの
- (3) 車載できること

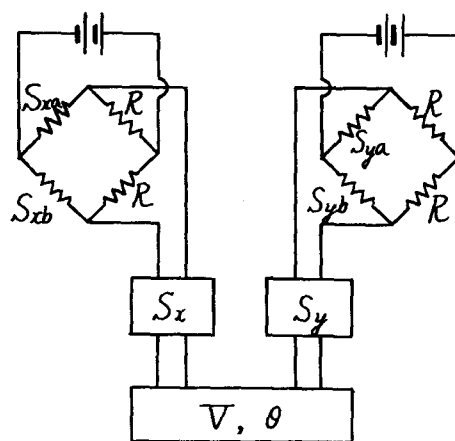
一般の測定器では最大風速方向の風速のみを検出するものが多く、風速計の指向性を少なくすれば風向の応答が悪くてもそれほど問題にならない。しかし、自動車の場合は、特に入射角すなわち風向の測定も重要である。車載することを考慮すれば矢羽根で検出することは無理と考えられる。車載する場合には、計器の寸法・重量にも制約があり、特に直流電源で動作させることが前提となる。

以上のような理由から、自動車用の風速・風向計としてはできるだけ現用の車載計器を流用できることが望ましい。

このような種々の観点から、筆者は次に説明する球型風速計を開発した次第である。



第5-8圖 球型風速·風向計



第5-9圖 風速計回路圖

5.3 開発した球型風速風向計

5.3.1 構造

球の空気抵抗については古くから多くの人々により解析されており、風速と抗力の関係は比較的簡単に求められる。しかも、球の場合、どの方向から風が吹いても幾何学的に対称であるから抗力は等しい。このような球の空気力学的特徴を利用して、球に加わる空気抵抗を片持はりにはりつけた電気抵抗線ひずみゲージより検出し、風速、風向を求めようとするものである。

第5-8図のように片持はりの端に球を取付ける。固有振動数をできるだけ高くするために、球は中空のプラスチック製、支柱はパイプを使用している。支柱自体のダンピングはあまり期待できないので、支柱と外筒の間に粘性の大きい油を挿入し、固有振動数附近の振動を吸収させた。ひずみゲージは支柱固定端部附近に図のように4枚はりつけた。

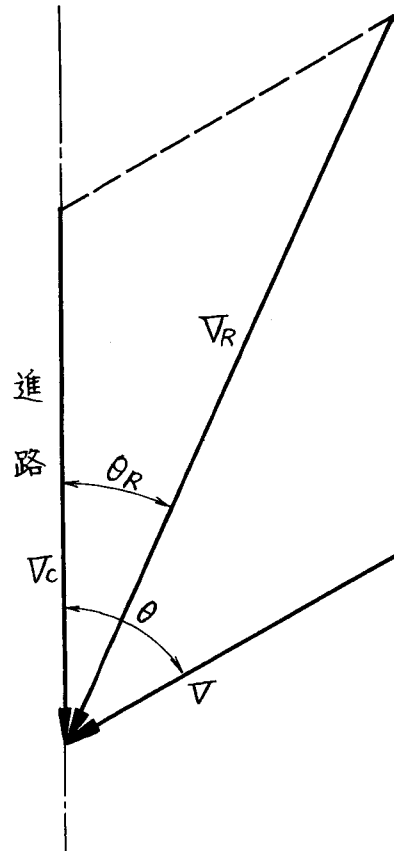
測定風速により球径を変えているが、固有振動数の実測値は第5-3表の通りである。球径 $D = 200\text{ mm}$ のものは定点の風速測定用で、また $D = 110\text{ mm}$ のものは車載するものである。特に車載するものは自動車の振動の影響を除去するため、固有振動数、減衰については留意した。

第5-3表 球型風速・風向計の固有振動数

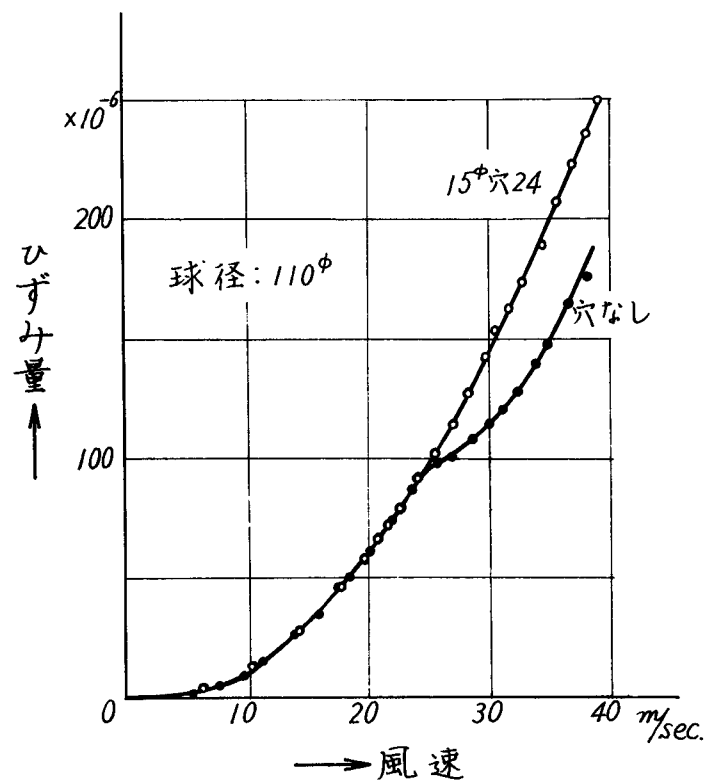
球 径 mm	$D = 200$	160	130	110
固有振動数 CPS	5.3	6.6	9.2	10.2

5.3.2 算出方法

ひずみゲージは直交成分ごとに第5-9図のごとくブリッジ回路を形成させてあるから、曲げ応力のみを検出し支柱に加わる垂直力（引張・圧縮）は相殺される。したがって、棒に垂直な平面（ $x-y$ 平面）の



※ 5-10 図 対車風速と対地風速



第5-11図 風洞試験結果

みの力を測定することになり、垂直成分を含まない2次元の風速・風向の測定が可能である。

いま、 x および y の各成分のひずみ量を S_x, S_y とすれば、

$$S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \quad (5-10)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{S_y}{S_x} \quad (5-11)$$

S は合成値であり、あらかじめ風洞試験で求めておいた風速-ひずみ量の較正值より風速が算出される。また、 θ から風の入射角が求められる。

次に、走行中の自動車で測定した対車風速・風向からの対地風速・風向の算出方法を考えてみよう。

いま、 $V_C(t)$ なる車速で走行中に、入射角 $\theta_R(t)$ で $V_R(t)$ なる風速を検出したとすれば、対地風速 $V(t)$ ・風向 $\theta(t)$ は次のように表わされる。

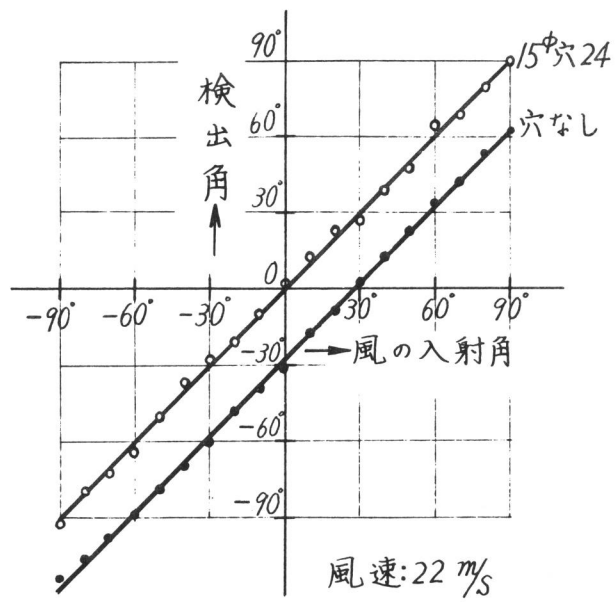
(第5-10図)

$$V(t) = \sqrt{V_R^2(t) + V_C^2(t) - 2 V_R(t) V_C(t) \cos \theta_R(t)} \quad (5-12)$$

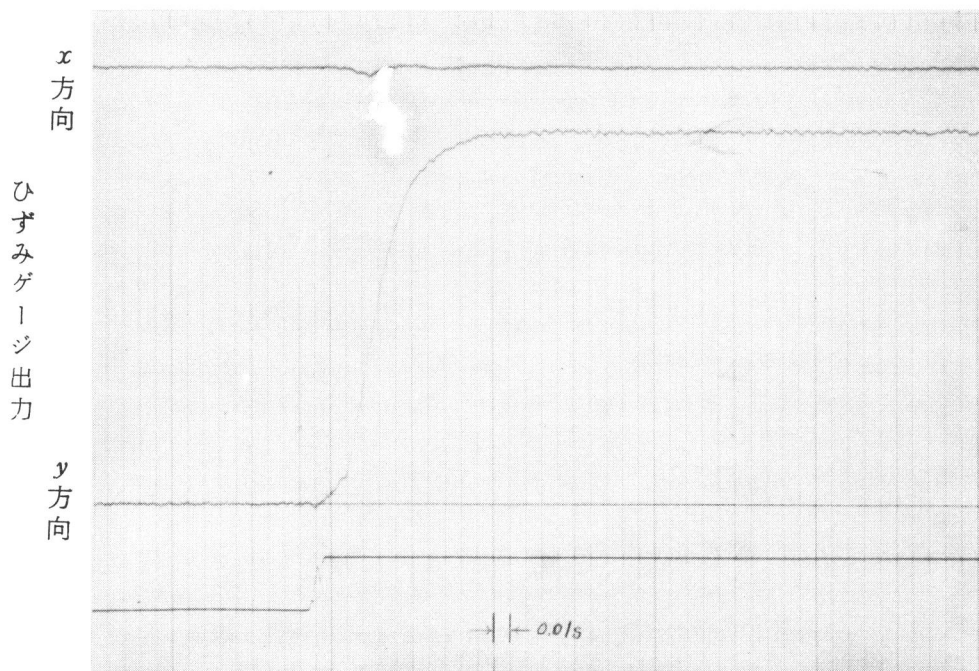
$$\theta(t) = \sin^{-1} \frac{V_R(t) \sin \theta_R(t)}{\sqrt{V_R^2(t) + V_C^2(t) - 2 V_R(t) V_C(t) \cos \theta_R(t)}} \quad (5-13)$$

測定地点は時々刻々移動するし、風向は自動車の進路を基準にしているので、このようにして求めた風速・風向の性質と定地点で測定した結果とを比較した。

データは、アナログコンピュータで波形をチェックする以外はすべてA-D変換し、IBM 1620デジタルコンピュータで処理した。



第5-12図 風向検定曲線



第5-13図 球型風速・風向計のインディシヤル応答
(風速 $V = 30 \text{ m/s}$)

5. 3. 3 特 性

実際の測定には直径 10 ～ 20 cm の球を測定風速に応じて使用した。

第 5 - 1 1 図は直径 11 cm 球の風洞試験結果で、球に 15 φ の穴を 24 個あけたものと穴のないものとを比較した結果である。穴のない場合は風速 25 m/s (レイノルズ数 $Re = 1.87 \times 10^5$) 附近で臨界点があるが、穴をあけることによつて高い風速まで風圧に比例した値がえられている。

風の入射角を検定したものが第 5 - 1 2 図で、穴のない場合には幾何学的には対称にもかかわらず角度のずれを起している。この現象はナックルボール効果⁴⁾と呼ばれるもので、でたらめの周期でちょうど逆方向にずれることがある。穴をあけた場合は正しい入射角を示しこのような不安定な現象も除去できた。

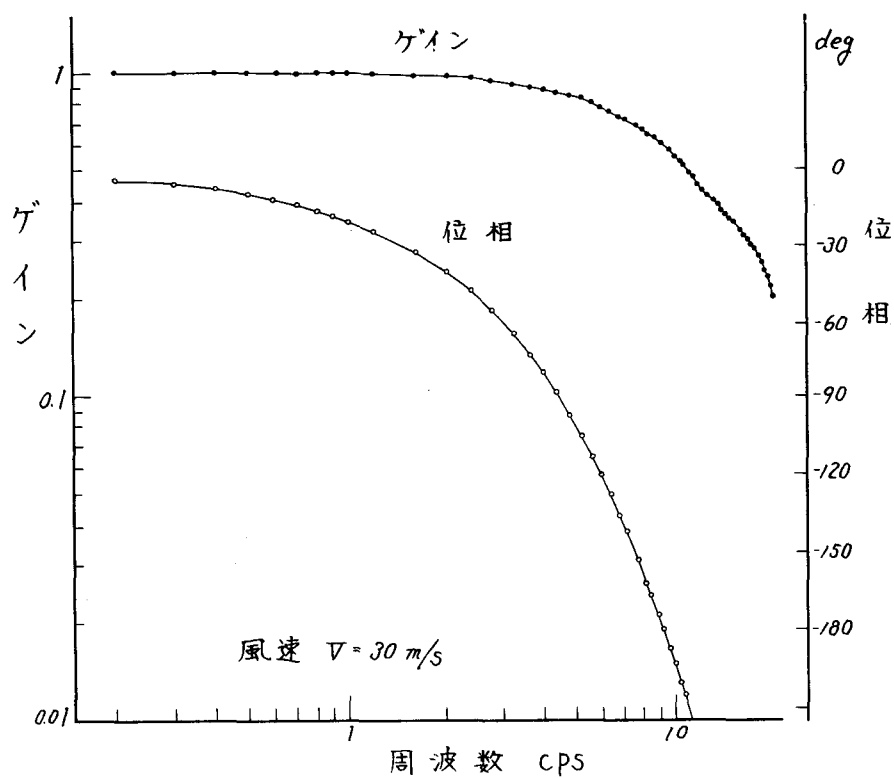
次に球型風速・風向計の動特性について、先のプロペラ型風速計の場合と同様にステップ応答特性から解析した。第 5 - 1 3 図は風速 $V=30$ m/s のときのインデンシャル応答特性を示したものである。この測定結果から (5 - 5) 式を用いて動特性を計算し第 5 - 1 4 図に表わした。応答特性はプロペラ型風速計より約 10 倍応答が早く、ゲイン特性は数サイクルの変動にも追従するが位相遅れはかなり大きい。いま、この特性を伝達関数で近似させると

$$G(s) = \frac{e^{-LS}}{T^2 s^2 + 2\xi TS + 1} \quad (5 - 14)$$

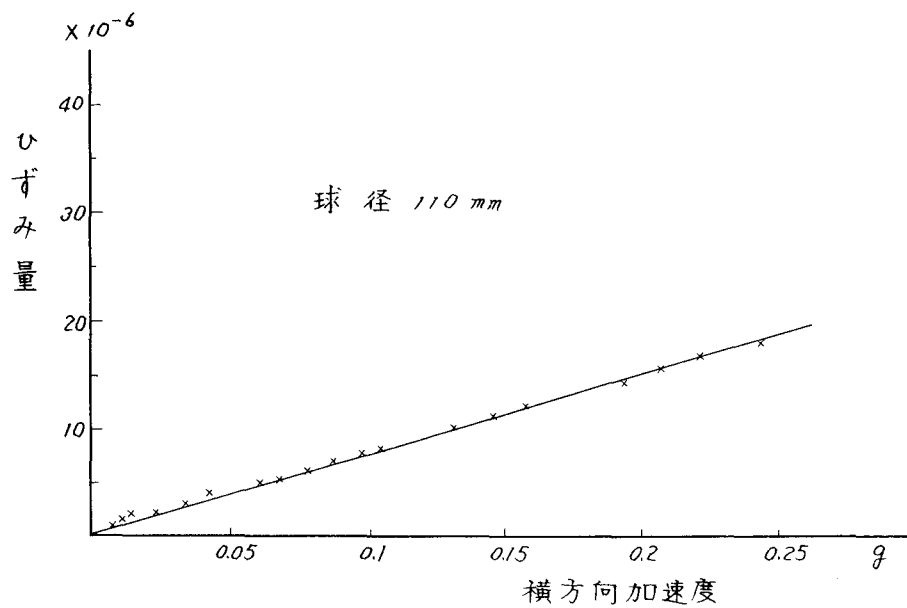
$T = 0.0157$ sec, $\xi = 0.9$, $L = 0.027$ sec の 2 次おくれ特性で表わされる。伝達関数から明らかのように位相遅れが、大きくなる原因は時間遅れ要素が存在するからである。

風速、風向の解析は、測定データを 0.2 秒ごとにサンプリングを行ないスペクトル計算をしているので、解析周波数は 2.5 C P S である。この周波数での球型風速計の位相遅れは 45° であるから、実際の測定には、位相遅れは問題にならない。

風速計を車載した場合、車体振動が風速・風向計の測定に影響をおよぼすことが県念される。このような影響を除去するため、支柱、球の重量軽減に苦心した。完全に除去することは困難であるから、車の横加速度測定結果からこの影響を修正することを開発初期の段階では計画していた。第 5 - 1 5 図は球型風速計の横加速度による影響を傾斜試験台で測定した結果である。突風時の自動車に加わる横加速度は $0.02 \sim 0.03g$ ($r \cdot m \cdot s$) であるからその影響は僅少として修正しなかつた。



第5-14図 球型風速計の動特性



第5-15図 球型風速計の加速度による影響

5.4 測 定 例

このような風速・風向計を使用した測定例を第5-16図に示す。(昭和40年4月1日、名神高速道路・京都南インターチェンジ附近)上段の2つの記録は南-北・東-西の各成分で、この値より風速と風向を算出し下段にプロットした。

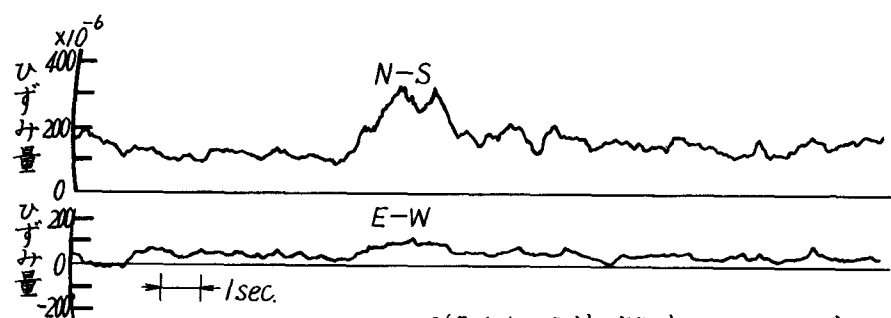
第5-17図はこの測定結果を0.2秒ごとにサンプリングして、約100秒間の値を風速・風向分布図に表示したものである。この時の平均風速は $V_0 = 10.13 \text{ m/s}$ 、平均風向 $\theta_0 = -14.4^\circ$ (NNW)、風速変動値(r.m.s) $\sigma_v = 1.87 \text{ m/s}$ 、風向変動値 $\sigma_\theta = 12.9^\circ$ である。

最後に、どの程度の風速がどれ位吹くかを名神高速道路附近の気象庁の資料から調べてみる。

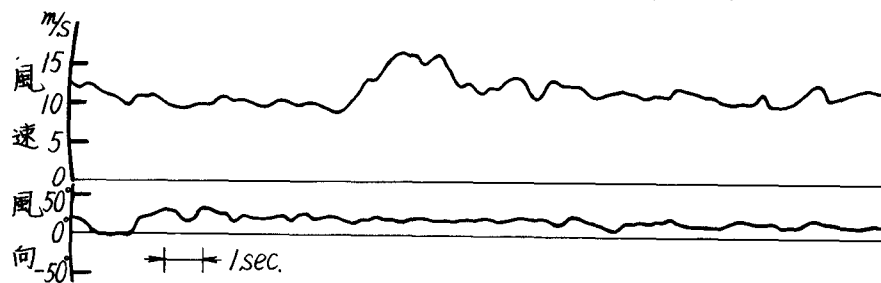
第5-4表はある階級以上の最大風速が1 season 当り何日吹くかを調べたもので、寒候季とは10~3月を、暖候季とは4~9月の間のことである。25~30 m/s以上の風速が暖候季に見られるのは台風によるもので逆に10~15 m/sの風速が寒候季に多い。寒候季には風速は大きくないがこの程度の風が吹く頻度が大きいことを示している。

第5-4表 最大風速の階級別頻度 (days/season)

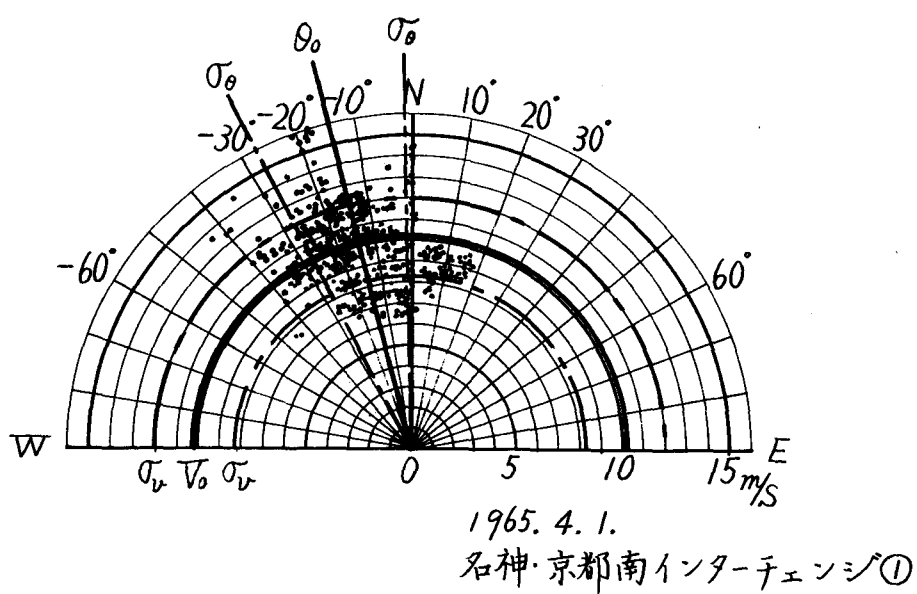
地 点		神 戸	大 阪	京 都	彦 根	岐 阜	名 古 屋
風 速	寒 候 季	65.4	25.1	7.3	65.1	32.0	49.8
	暖 候 季	50.6	14.6	6.1	24.6	19.9	34.4
15 m/s 以上	寒 候 季	8.5	1.9	0.4	8.6	0.8	4.1
	暖 候 季	5.5	0.6	0.4	1.8	1.9	3.0
20 m/s 以上	寒 候 季	0.5	0.0	0.0	0.0	0.3	0.1
	暖 候 季	1.0	0.3	0.1	0.4	0.3	0.4
25 m/s 以上	寒 候 季	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0
	暖 候 季	0.3	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1
30 m/s 以上	寒 候 季	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	暖 候 季	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



1965. 4. 1. 名神・京都南インターチェンジ①



第5-16図 測定波形の一例



1965. 4. 1.
名神・京都南インターチェンジ①

第5-17図 風速・風向分布図

5. 5 結 論

自動車の応答解析には周期の短かい、いわゆる短周期の風の乱れを測定する必要がある。

現在、気象観測用に使用されている風速計の中で、動特性が最もよいとされているプロペラ型でも応答周期が数秒以上で、これら観測用に使用されている風速計を利用することは無理である。

自動車に対する突風の解析には、風速だけでなく自動車への入射角すなわち風向も重要な量であるが、従来の矢羽根式では応答も悪く、特に、走行中の風速測定は困難である。

このようなことから、いろいろの風速計を検討したが、結局先に述べたような球型風速・風向計を開発した次第である。

この風速・風向計も開発初期にはいろいろ問題があつたが、球に穴をあけることによつて抗力係数も風速に対し一定となり、不安定な現象を取除くことができた。

参 考 文 献

- 1) Ishizaki ; "Variation of Wind Pressure against Structures in the even of Typhoons."
Kyoto Univ. Disaster Prevent Res. Inst. Bull. No 30,
1959
- 2) 棚橋 , 石崎 , 光田 ; "潮岬風力実験所における風力観測用測器について"
京大防災研究所年報 第7号 昭和39年3月
- 3) 光田 , 水間 ; "超音波風速計とその試作"
天気 , 1964
- 4) Reed ; "A Simple Fast Response Anemometer."
Journal of Applied Meteorology June 1963
- 5) 中原 ; "本邦各地の風の調査報告"
気象庁報 第4号 1957

第6章 突風による自動車の応答について

その二 突風の性質

6.1 緒 言

自動車の応答解析には比較的周期の短い、いわゆる短周期の変動測定が必要である。現在の一般観測用風速計は応答が悪く、動特性が最もよいとされているプロペラ型風速計でも応答周期が数秒以上である。

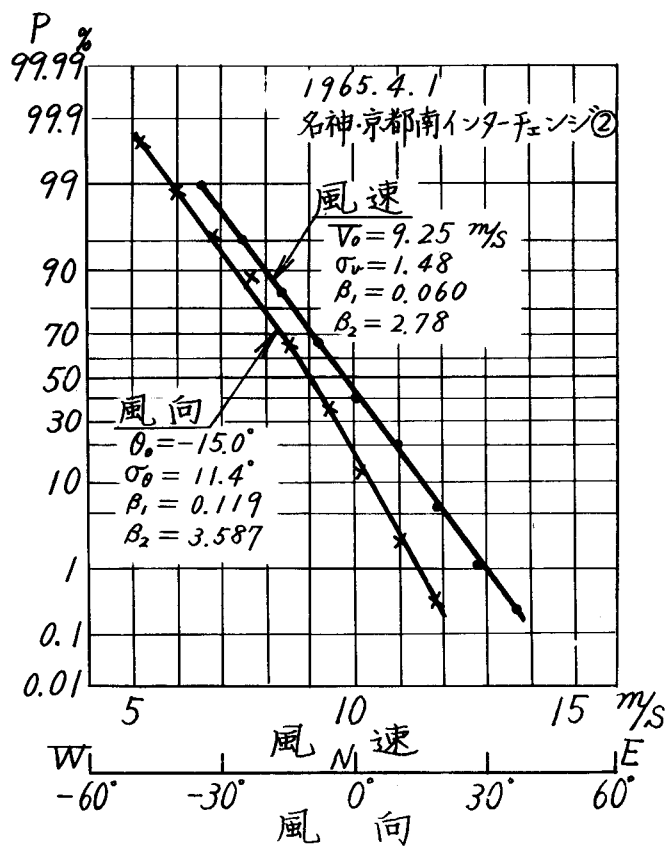
また、自動車の応答を検討する場合、重要なことは風向変動の測定で、従来の矢羽根式のものでは応答がおそく、正確な風向測定が困難である。

突風に対する自動車の応答関数を算出するには、走行中に自動車が受ける空気外力を測定する必要があり、車載可能な風速計が要求される。

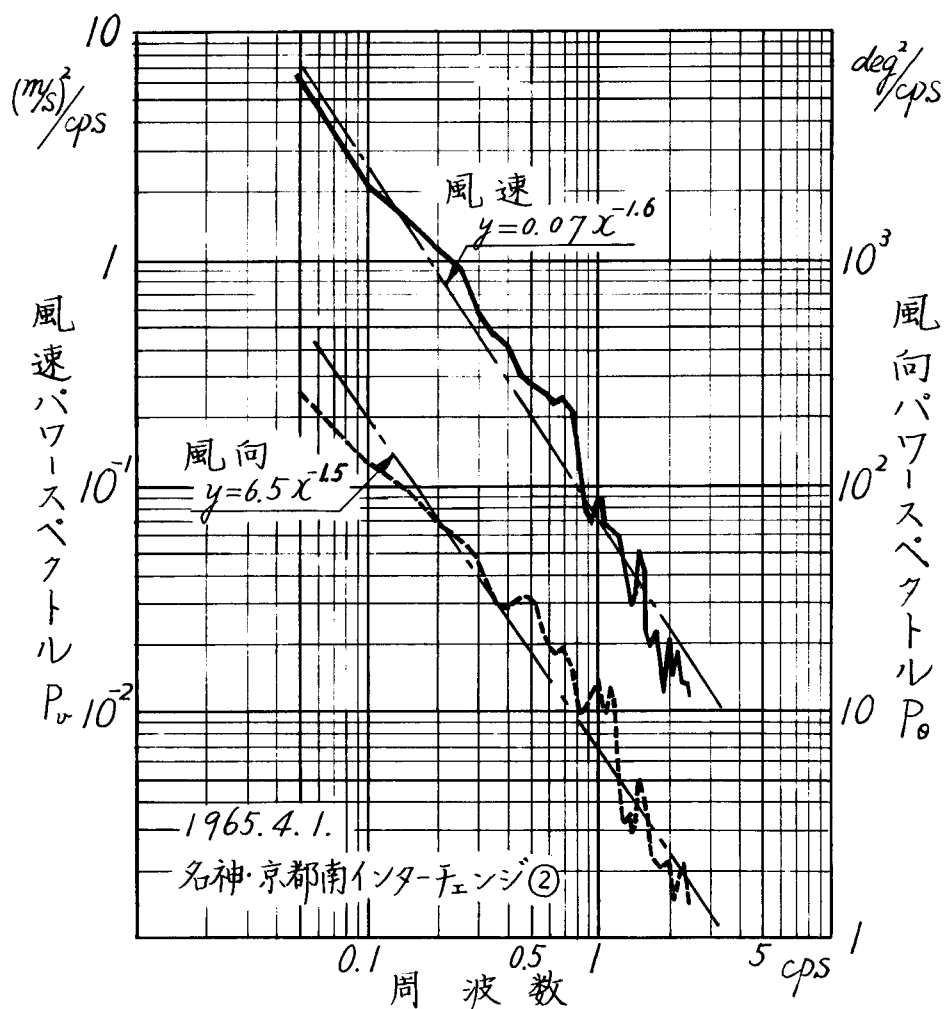
このようなことから前章で述べたような球型風速・風向計を開発し、短周期の風の乱れを測定できるようになったので、名神高速道路附近の比較的、地形変化の少ない平坦な場所でのいわゆる定地点の風速・風向を測定した。

これらの測定結果から風速、風向の分布状態を、また風の変動率、突風率の値を求め、不規則波形のスペクトル解析から風の周波数成分を解析した。

また、風速・風向計を車に搭載して、走行中に自動車が受ける風と定地点の風とが同じ性質かどうかを確かめてみた。



第6-1図 風速・風向の正規確率表示



第6-2図 風速・風向のパワースペクトル

6.2 定地点での風の性質について

6.2.1 風速、風向のパワー・スペクトル

気象関係での風速の測定は10分間の平均値で表示する場合が多い。このように平均値をとるのは気象条件の変化を調べるためで、風の短周期の変動のように主に地表のあらさに起因した乱れは平滑化してしまう必要があるからである。したがって、自動車の応答のように短周期の風の乱れを問題とする場合は、乱れについては気象現象と独立して取扱¹⁾つてもよいようであり、気象条件の変化のように周期の非常に大きい変動は平均風速として取扱えばよいだろう。このようなことから測定時間2～3分の変動を解析した。

第6-1図は名神高速道路・京都南インターチェンジ附近で測定した結果を正規確率紙に表示したもので、風速・風向ともに大体正規分布していることを示している。

いま、時刻 t の風速 $V(t)$ が $V(t) = V_0 + v(t)$ で表わされると、平均風速 V_0 は

$$V_0 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T V(t) dt \quad (6-1)$$

であり、風速変動値は

$$\sigma_v^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T v^2(t) dt \quad (6-2)$$

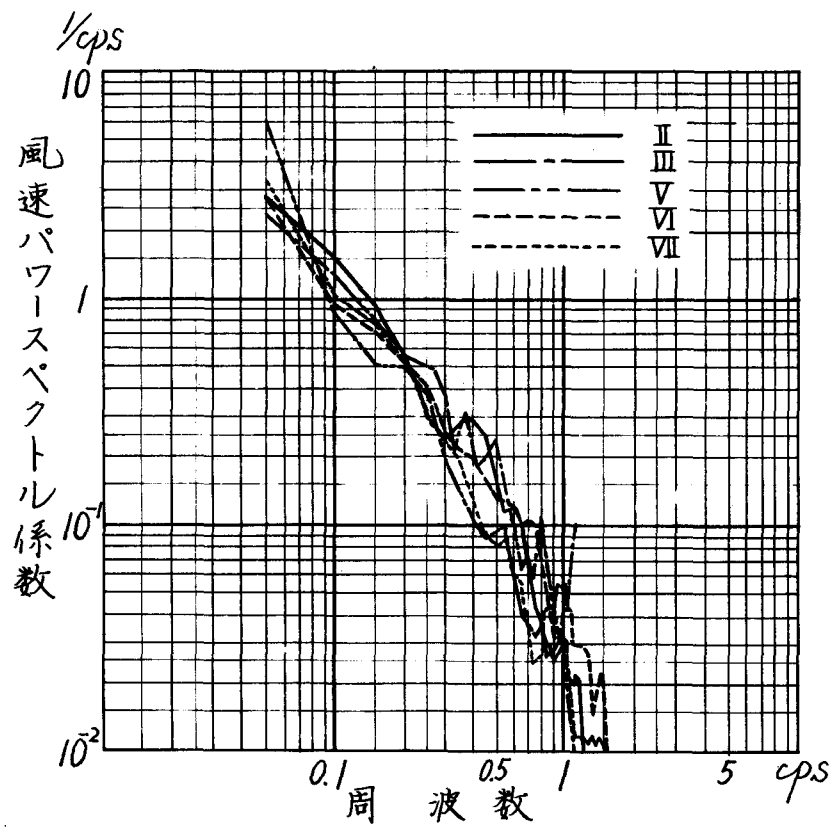
で示される。また、自己相関関数 R_v は

$$R_v(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T v(t+\tau) \cdot v(t) dt \quad (6-3)$$

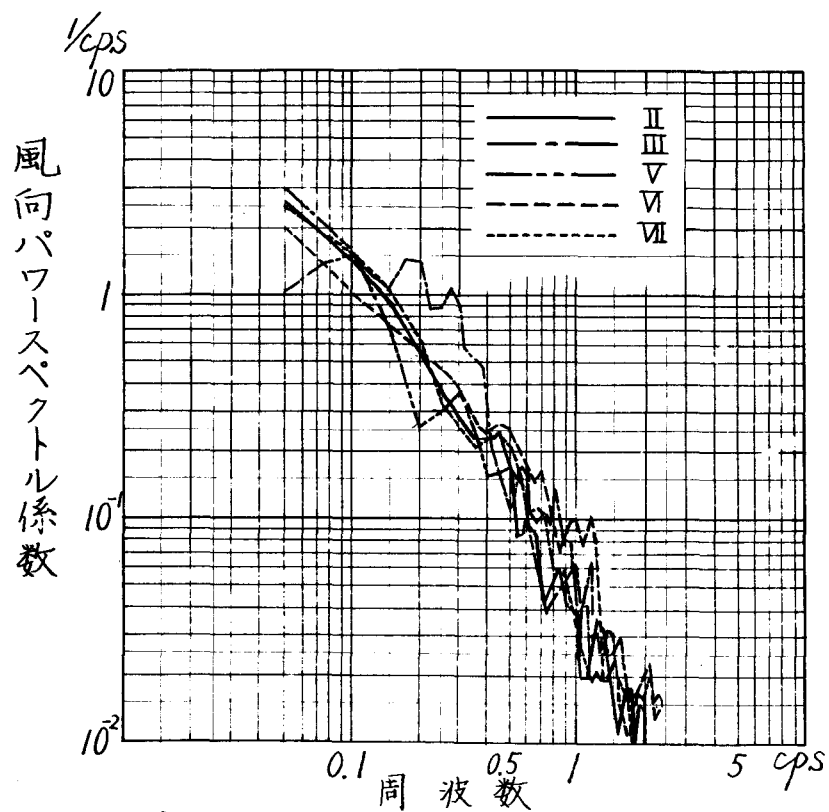
パワースペクトル $P_v(f)$ は

$$P_v(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_v(\tau) \cdot e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (6-4)$$

で計算²⁾できる。また、風向 θ についても同様である。



第6-3図 風速パワースペクトル係数



第6-4図 風向パワースペクトル係数

第 6-2 図は風速・風向をスペクトル解析した結果の一例である。
風の乱れの周波数が低くなるほどパワーが大きくなっており、1 sec.
以上の周期の大きい成分が自動車の応答に関連してくるものと考えられ
る。

いま、風速のパワースペクトルを y 、周波数を x とすれば、その間の
関係は

$$y = a x^{-n} \quad (6-5)$$

で近似しうる。そして、10 数種の測定結果では、指数 n は 1.0 ~ 2.0
の範囲に入る。

乱流理論よりの推定値は $5/3$ といわれているが、この値はそれに近い。³⁾

風向についても風速と全く同様な関係にあり指数もこの範囲に入る。

次に、パワースペクトルの値を変動値 σ_v^2 および σ_θ^2 で割って無次元
化し、パワースペクトル係数を求め各測定値をプロットすれば第 6-3
図・第 6-4 図のようになる。⁴⁾ ある幅を持つてはいるが、各測定値は
大体近い値でしかも風速と風向は同じ結果がえられている。

6.2.2 風速、風向の変動値、突風率

自動車に突風が加わる場合、車全体に一樣に風が当るであろうか。
もし、前方とかあるいは後方のみに局部的に加わるのであれば、風洞試
験などで求めた空気力学特性と当然異なつたものになる。このような
現象を解明するには突風の広がりを考えればよい。

突風の風向方向の広がりについては突風の持続時間と風速との積とし
てよいであろう。⁵⁾ 測定結果を見ても最大風速の持続時間は 1 sec. 程度
はあるから、いま、風速を 15 m/s とすれば、突風の風向方向の広が
りは 15 m になる。突風の櫛の広がり（風向と直角方向の広がり）は
風向方向の広がりの方倍という Panofsky の報告もあるので、先の例では
数 m の広がりを持つものと考えられる。

自動車が走行中に受ける風は、車速および突風の合成風速として大部
分斜め前方から入射される。

以上のことがらによつて、突風は自動車全体に一樣に加わると考えて
間違いなさそうである。

気象条件による平均風速の変動と風の乱れの様子とは切離して考えてもよいといわれているので、先に測定した平均風速と変動値との比 σ_v/v_0 を取つて変動率、また、平均値と瞬間最大風速との比 V_{max}/V_0 を突風率と呼ぶことにする。一方、風向の平均値 θ_0 は風の吹いてくる方位を示すもので、変動値 σ_θ は変化の度合を示す。

第6-1表は各地点・各日時の測定結果よりえられた各種の値を表にしたものである。

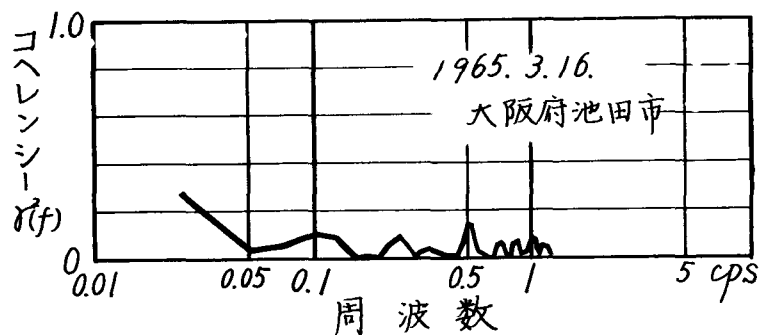
今回の測定最大風速の $10\text{ m/s} \sim 20\text{ m/s}$ の範囲では変動率が $0.1 \sim 0.3$ である。もし、仮に、変動率が大体一定の値をとれば、平均風速から風の乱れの値も推定でき、風の分布が正規分布に近くなることから風の発生確率も予想しうることになる。

風の乱れは地表の状態と関連するが、特異な地形のところでは予想できないといわれている。したがって、特異な地形の場所で先に述べたような値を実測しておけば、風の乱れを推定しうるものと考える。

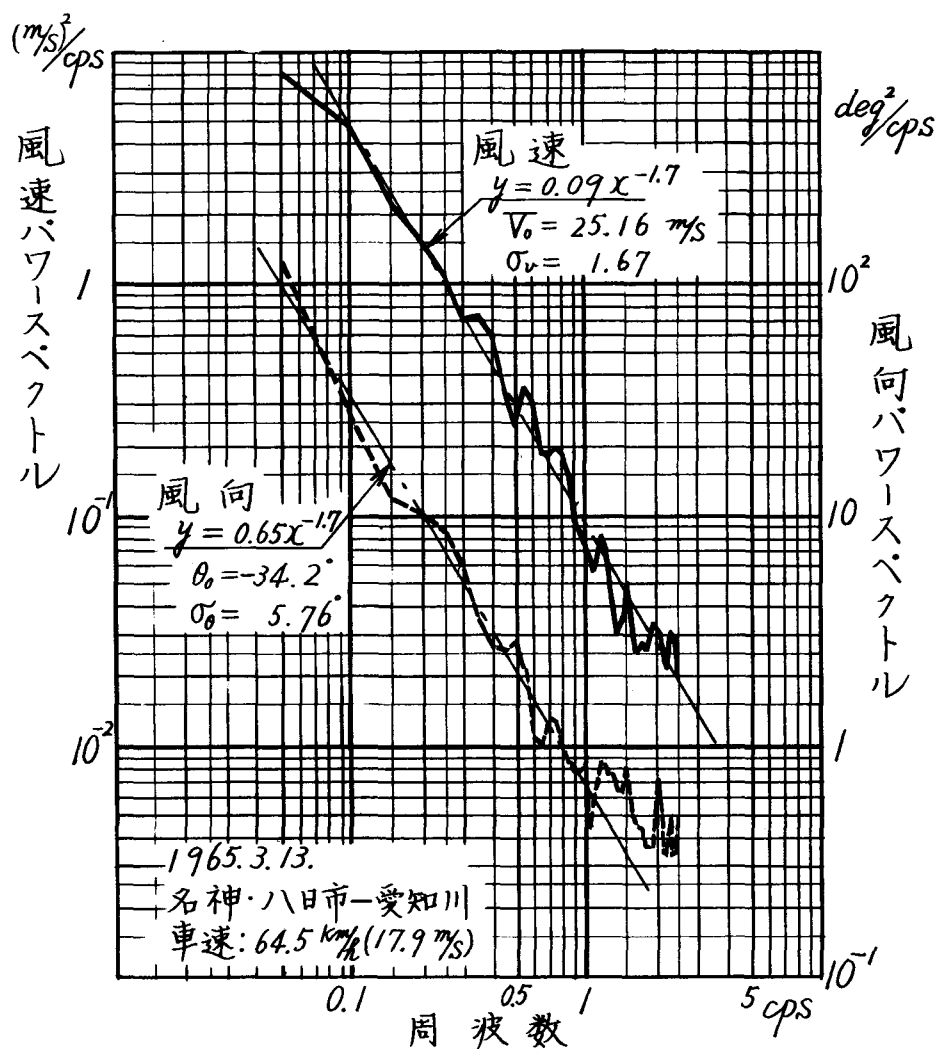
第6-1表 各地点での測定結果

データ No.	測定場所	年月日	風 速						風 向		
			V_0/s	σ_{vm}/s	V_{max}/s	σ_v/V_0	V_{max}/V_0	n	$\theta_0 \text{ deg}$	$\sigma_\theta \text{ deg}$	n
I	大阪府池田市	1965.130	7.02	1.81	11.51	0.258	1.64	1.5	57.2 (NE)	38.4	1.2
II	"	3. 6	5.06	1.54	9.47	0.304	1.87	1.8	7.8 (N)	45.3	1.5
III	"	3.16	9.71	1.28	15.5	0.132	1.59	2.0	132.3 (SE)	11.3	2.2
IV	名神・黒丸 パーキング	3.16	8.16	0.956	11.0	0.117	1.35	1.7	-160.8 (SSW)	28.2	1.6
V	名神・京都南 I.C. ①	4. 1	10.13	1.87	16.7	0.185	1.65	1.9	-144 (NNW)	12.9	1.6
VI	" ②	4. 1	9.25	1.48	13.7	0.160	1.48	1.6	-150 (NNW)	11.4	1.5
VII	" ③	4. 1	8.76	1.54	13.1	0.176	1.49	1.9	-12.1 (NNW)	12.1	1.7

風の性質が変えられる場所としては、たとえば、名神高速道路で比較的多く見られる築堤が考えられる。築堤を横切る風のときは築堤上⁶⁾で周囲の約1.2倍になるという報告もある。次に、山と山との間、いわゆる“山あい”で強風が吹くことがある。これは流れを絞られるため



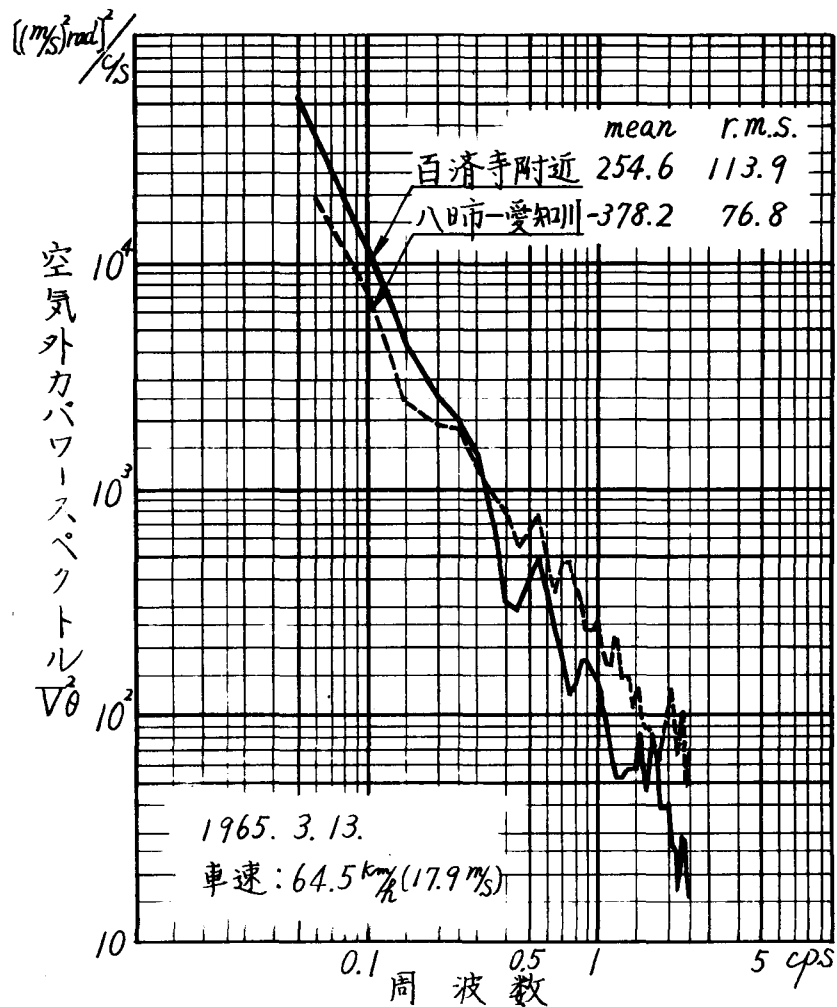
第6-5図 風速・風向のコヘレンシー



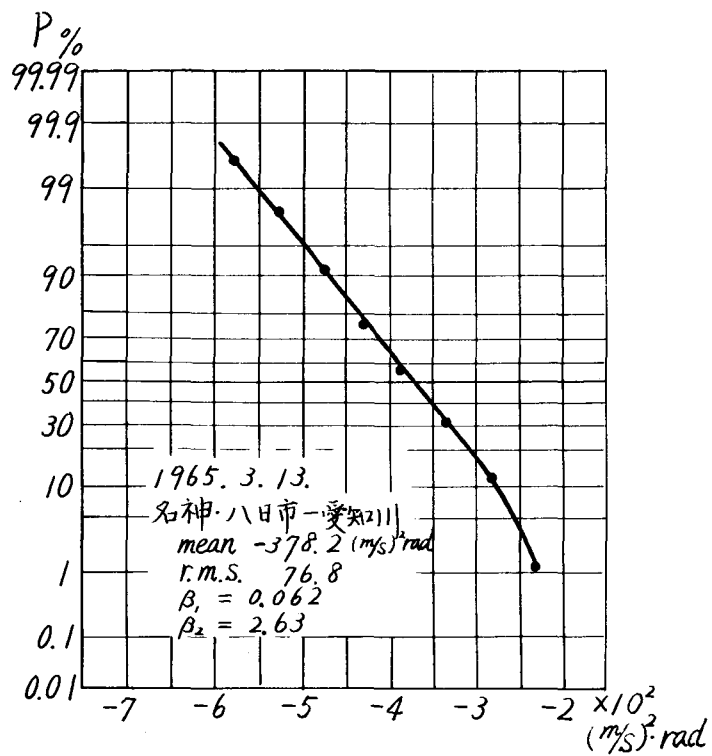
第6-6図 対車風速・風向のパワースペクトル

したがって、風速および風向が無関係の要素であれば、共に正規分布をしていることから、両者の種の発生確率も想定しうることになり、理論解析に重要な意味を持つものと考ええる。

いずれにしても、今回の測定例は数個に過ぎず、もつと多くのデータより結論を下すべきものと考ええる。



第6-7図 空気外カパワースペクトル



第6-8図 空気外力の正規確率表示

6.3 走行中の自動車にかわる風の性質について

自動車は移動するから定地点での測定結果とは多少異なつたものになるかもしれない。このようなことから、風速計を車に搭載し走行中の対車風速・風向を測定し、この値より対路面風速を計算した。

第6-6図は車速64.5 Km/h (17.9 m/s)で名神高速道路・八日市-愛知川間を走行中の風速・風向の測定結果から対車風速・風向のパワースペクトルを求めたものである。

この場合の風速は車速による風速も合成されたもので、風向は進行方向に対する入射角で表わしている。

スペクトルの形は先の定地点での測定結果と同様、 $y = ax^{-n}$ の形で近似でき、指数 n の値も大体同程度である。

次に、空気外力のパラメータと考えられる風速と風向の積 $V^2\theta$ のパワースペクトルを第6-7図に示す。これは風速・風向のスペクトルと同様に指数関数で表わされ、周期の大きい成分のパワーが強い。このことは、比較的低周波域での自動車の周波数応答特性が高速安定性にとって重要なことを意味する。

第6-8図はこの空気外力を正規確率表示したもので大体正規分布と見なせる。

走行中に測定した対車風速・風向から対路面風速・風向を算出した。この結果では、風速・風向の分布も正規分布を示しており、しかも、スペクトル解析の値も定地点測定結果と全く同様な傾向を示している。また、風速・風向のコヘレンシーの値も小さく、両者の関連性が少ないことも示している。

第6-2表に風速・風向などの平均値・変動値などを示した。データ数が少ないので定地点での測定値と十分の比較はできないが、変動率・突風率・指数なども第6-1表の値と大体同程度の範囲内に入っている。

第 6 - 2 表 走行時の測定結果から算出した対地風速

データ No	測定場所	年月日	風 速						風 向		
			V_0 m/s	σ_v m/s	V_{max} m/s	σ_v/V_0	V_{max}/V_0	n	θ_0 deg	σ_0 deg	n
1	栗 東 P	1965.4. 5.	7.26	0.86	9.75	0.118	1.34	1.4	93.3	13.2	1.9
2	瀬 田 P	4. 5.	4.37	2.30	11.76	0.527	2.69	1.7	95.8	50.0	1.6
3	京都南-山 科	4.20.	8.19	2.57	12.20	0.314	1.49	0.8	57.0	13.9	1.1
4	西 宮-尼 崎	5.13.	7.21	1.41	10.92	0.196	1.51	1.2	46.1	14.1	1.3
5	茨 木-京都南	5.15.	5.69	2.10	9.78	0.369	1.72	0.8	58.7	18.7	1.1
6	京都南-茨 木	5.21.	6.55	2.23	12.67	0.340	1.93	1.4	40.1	24.3	1.3
7	京都南-山 科	5.21.	7.74	1.65	13.20	0.214	1.70	1.4	111.0	12.0	1.5
8	京都南-茨 木	5.21.	7.67	1.86	13.47	0.243	1.76	1.3	16.2	15.7	1.1
9	尼 崎-西 宮	5.27.	5.06	1.26	9.17	0.249	1.81	1.5	26.9	18.6	1.2
10	茨 木-京都南	5.27	8.56	1.65	14.47	0.193	1.69	1.6	32.9	8.6	1.2
11	京都南-京都東	6.10.	5.63	1.42	10.28	0.252	1.83	1.2	46.0	14.6	1.3
12	山 科 B S	6.29.	5.56	1.10	9.41	0.197	1.69	1.2	28.9	13.8	1.3

以上のような結果から、気象条件・地形・進路方向などに急激な変化のないごく短区間の道路については、その附近の定地点の測定結果から走行中に自動車を受ける突風を推定できるのではなかろうかと考える。

しかし、風の性質を示す各種の値が、大体同程度の範囲内にあることが確かめられただけで、定地点の風と走行中に受ける風の性質が同じか否かは同一地点での同時測定から詳細に検討する必要がある。

先の結果からも明らかなように風速・風向は共に正規分布をしており、この両者には相関性があまり認められないから、自動車に加わる空気攪乱外力の分布も正規分布を示す。このことは第 6 - 8 図からも実証されている。

したがって、定地点における風の測定結果から、ある車速で走行中の自動車を受ける空気攪乱力を推定しうるものと考ええる。

また、風速の変動率や風向の変動値などもある範囲に入るものと推定

されるから、おおきかな概略値であれば、平均風速・風向のみが与えられただけで自動車を受ける空気攪乱外力の発生確率が予測できるのではなかろうか、とも推察される。

6. 4 結 論

先に開発した風速計を用いて、名神高速道路附近の比較的地形変化の少ない平坦な場所でのいわゆる定地点の風の性質と走行中に自動車を受ける風の性質を調べた。

- 1) 風の発生確率は風速・風向共に正規分布を示し、スペクトル成分 y は周波数 x に対し

$$y = ax^{-n}$$

なる関係で近似され、指数関数 n は 1.0 ～ 2.0 の範囲に入る。

- 2) 自動車に突風が加わる場合、車全体に一樣に風が当たるか否かを突風の拡がりについて調べた結果、平坦な場所では大体一樣に加わると考えて差支えない。

- 3) 風速および風向のコヒーレンシーを計算し、両者の関連性を調べたところ、短周期のところでは風速と風向の相関が少ないことを示している。長周期の部分で多少関連が見られるのは、気象条件の要素が含まれてくるためと想像される。

風速と風向が無関係な要素であれば、共に正規分布をしていることから、両者の積の発生確率も想定しうることになり、理論解析に重要な意味をもつものと考えられる。

- 4) 風速計を車に搭載し、走行中の対車風速・風向を測定した結果、このスペクトルは定地点のものと同様な傾向が認められた。

- 5) 対車風速から対路面風速を計算し、定地点での値と比較した。風速・風向などの平均値、変動値など風の性質を示す各値は大体同程度の範囲に入っている。

定地点の風と走行中に受ける風の性質が同じか否かは同一地点での同時測定から詳細に検討する必要がある。

- 6) 空気外力とみなされる風速と風向との積 θV^2 は正規分布に近い値になることから、自動車に加わる突風外力は定常確率過程として取扱いうるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) Davenport, A.A.; "The Relation of Wind Structure to Wind Loading."
Paper presented at the " International Conference
on the Wind Effects on Buildings and Structures. "
1963
- 2) L.L.Fontenot; " The Response of a Flexible Missile to Ground Winds."
Proceedings of the National Symposium on Winds
for Aerospace Vehicle Design.
- 3) 光田 ; " 強風時における乱れのスペクトル "
京都大学防災研究所年報 第6号 昭和38年7月
- 4) Singer; "Wind Gust Spectra."
New York Academy Science.
- 5) 石崎, 光田 ; " 強風時における突風の広がり突風率について "
京都大学防災研究所年報 第5号A 昭和37年3月
- 6) 光田 ; " 風 荷 重 "
土木学会 昭和38年講習会テキスト

第7章 突風による自動車の応答について

その三 自動車の応答関数

7.1 緒言

自動車の高速安定性を解析するためには、まず突風が加わった時の自動車の応答関数を知る必要がある。従来の研究は自動車に働く横方向力とヨーイングモーメントの外力に対する高速安定性を検討し、一方空気外力に関しては風洞試験と、それぞれ別個に研究されているだけで、この両者を結びつけた研究は余り見当たらないようである。しかもこれらの研究は一定外力、すなわち定常風に関するものか、あるいはステップ状入力に対するものが大部分で、自然風についての高速安定性の解析は行なわれていない。

そこで筆者は第5章で開発した球型風速計で走行中の自動車を受ける空気外力を測定し、この時の自動車の運動測定結果から、不規則波形のスペクトル解析の手法を用い、突風に対する車の応答解析を試みた。

これらの応答関数は実際の作動状態での応答関数を求めたいが、普通の運転状態では突風に対しての修正操舵を余義なくされるから、自動車に加わる入力には突風外力と人間の操舵によるものとの2入力になる。したがって、今回は多入力系のスペクトル解析の手法を高速安定性の解析に適用することを考え、その解析例を示した。

7.2 解析方法

風速 V なる風が入射角 θ で自動車に加わった場合、横抗力 F_y 、ヨーイングモーメント M_n は次のように表わされる。

$$F_y = \frac{\rho}{2} C_y(\theta) A V^2 = \frac{\rho}{2} K_y \cdot A \cdot \theta V^2 \quad (7-1)$$

$$M_n = \frac{\rho}{2} C_n(\theta) A V^2 = \frac{\rho}{2} K_n \cdot A \cdot \theta V^2$$

A は自動車の投影面積、 ρ は空気密度である。 $C_y(\theta)$ 、 $C_n(\theta)$ は横抗力係数、ヨーイング・モーメント係数で、入射角 θ が小さい範囲では一般に θ に比例して直線的に増加する。したがって、 θV^2 が空気外力のパラメータと考えられる。横抗力係数 K_y 、ヨーイング・モーメント係数 K_n の値は自動車によつて異なり模型による風洞試験で求められているが、実車との対応性にまだ疑問もあるので、 θV^2 を空気外力の入力とし突風時の自動車の運動を解析した。したがって、今回求めた突風に対する自動車の応答関数には空気力学特性も含まれている。

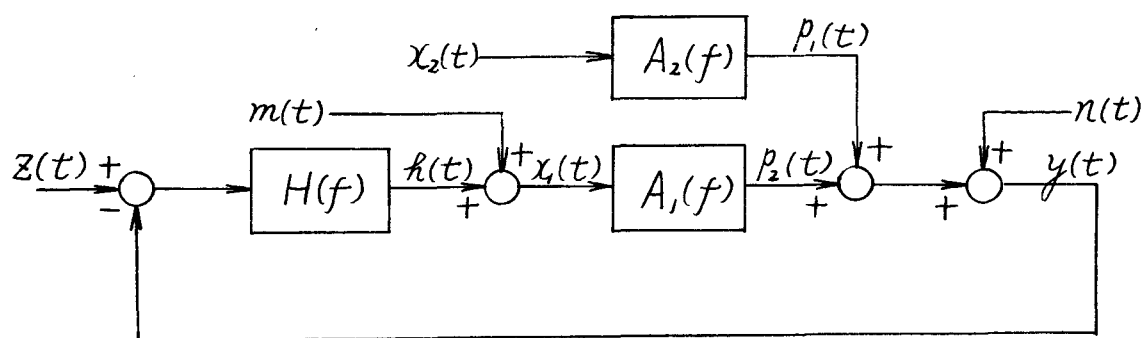
θV^2 の性質については第 6 章に報告したように、パワースペクトルは $y = ax^{-n}$ で近似することができ、指数 n は $n = 1.0 \sim 2.0$ の範囲に入り、しかも正規分布に近い発生確率になることから、定常確率過程として取扱えるものとする。

突風応答測定時の運転方法であるが、ハンドル固定の状態では測定する方法も試みたが、突風時、この状態では短時間しか走行できない欠点がある。また、運転者がハンドルを固定する時には、かなり運転に留意しても操舵成分が入ってくるので誤差の原因になる。ハンドル固定時の測定波形をつなぎ合わせて入・出力間のパワースペクトルからゲインのみを求めてみたが、計算結果の精度も悪く、しかも、クロス・スペクトルによる解析のように位相も求められない難点がある。

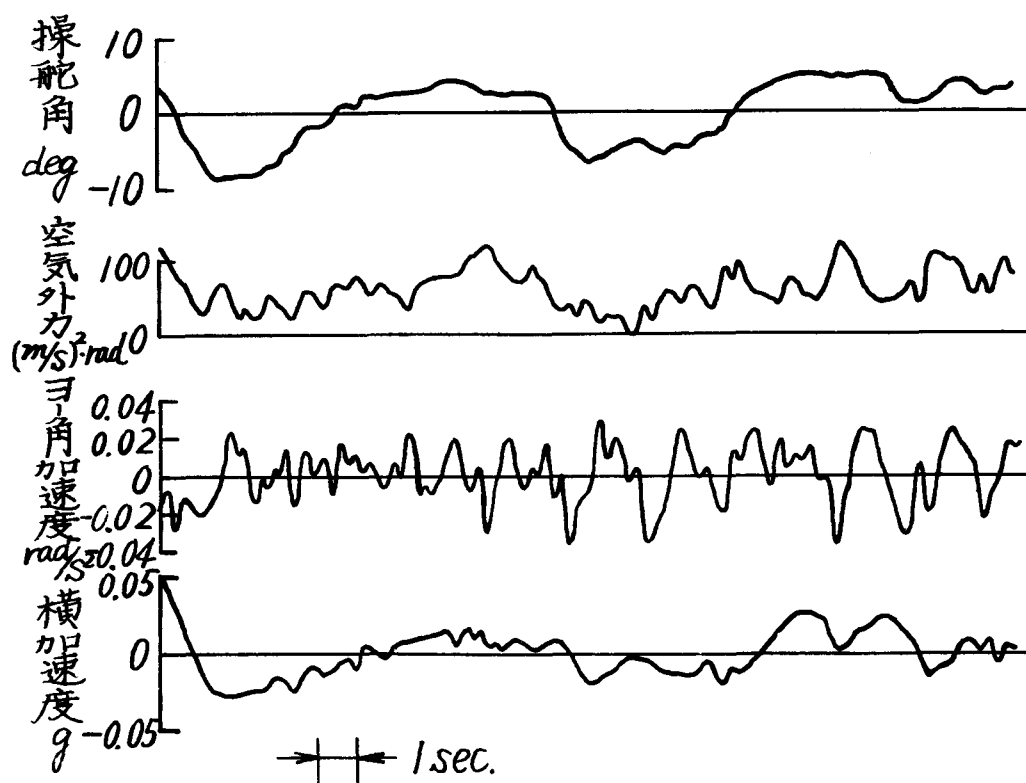
また、固定の場合は一般の運転状態とハンドル保持状態が異なることも考えられる。このようなことから、一般の運転状態のように突風に対しての修正操舵をしながら突風応答関数を求める方法を考えた。

7.3 突風時の自動車応答系

$x_2(t)$ なる突風外力が加わると、 $A_2(f)$ なる系を通つて横方向、ヨーイングなどの運動を起す。一方、人間による操舵入力 $x_1(t)$ は $A_1(f)$ なる系を通り運動する。 $A_1(f)$ は操舵による応答関数、 $A_2(f)$ は突風に対する応答関数であるから、一部は自動車の同一回路を通る。しかし、 A_1 、 A_2 と別回路として伝達関数を求めたいので、一応分離した形で考えた。



第7-1図 突風時の自動車応答系



第7-2図 測定波形の一例

第 7-1 図のように突風およびハンドル入力の両者により生じた横方向、ヨーイングなどの運動は外部雑音 $n(t)$ を含んで $y(t)$ として検出できる。人間はこれらの運動に反応して、人間応答関数 $H(f)$ で修正動作を行なうわけであるが、人間には無意識に操作するいわゆる人間が発するノイズ操舵 $m(t)$ もある。実際に測定できるのは人間の発するノイズ操舵も含めた操舵入力 $x_1(t)$ である。 $z(t)$ はコースによる入力で直進中は 0 と考えられる。

第 7-1 図のブロック線図で実測できるのは $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 、 $y(t)$ で、これらの実測値から伝達関数 $A_1(f)$ 、 $A_2(f)$ を求める方法を考える。

$$x_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{2\pi f t i} dx_1(f) \quad (7-2)$$

$$x_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{2\pi f t i} dx_2(f) \quad (7-3)$$

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{2\pi f t i} dy(f) \quad (7-4)$$

1)
とすると、

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{2\pi f t i} \{ dy(f) - A_1(f) dx_1(f) - A_2(f) dx_2(f) - dn(f) \} = 0 \quad (7-5)$$

がえられる。したがって、

$$dy(f) = A_1(f) dx_1(f) + A_2(f) dx_2(f) + dn(f) \quad (7-6)$$

ゆえに、

$$\begin{aligned} P_{yx_1}(f) &= A_1(f) P_{x_1 x_1}(f) + A_2(f) P_{x_2 x_1}(f) + P_{nx_1}(f) \\ P_{yx_2}(f) &= A_1(f) P_{x_1 x_2}(f) + A_2(f) P_{x_2 x_2}(f) + P_{nx_2}(f) \end{aligned} \quad (7-7)$$

ここで、

$$P_{x_1 x_1}(f) = G_{x_1 x_1}(f) = x_1(t) \text{ のパワースペクトル}$$

$$P_{x_2 x_2}(f) = G_{x_2 x_2}(f) = x_2(t) \quad //$$

$P_{yy}(f) = C_{yy}(f) = y(t)$ のパワースペクトル

$P_{x_1x_2}(f) = C_{x_1x_2}(f) + iS_{x_1x_2}(f) = x_2(t)$ と $x_1(t)$ のクロススペクトル

$P_{x_2x_1}(f) = C_{x_2x_1}(f) + iS_{x_2x_1}(f) = x_1(t)$ と $x_2(t)$ "

$P_{yx_1}(f) = C_{yx_1}(f) + iS_{yx_1}(f) = x_1(t)$ と $y(t)$ "

$P_{yx_2}(f) = C_{yx_2}(f) + iS_{yx_2}(f) = x_2(t)$ と $y(t)$ "

$P_{nx_1}(f) = C_{nx_1}(f) + iS_{nx_1}(f) = x_1(t)$ と $n(t)$ "

$P_{nx_2}(f) = C_{nx_2}(f) + iS_{nx_2}(f) = x_2(t)$ と $n(t)$ "

$n(t)$ と $x_1(t)$ および $n(t)$ と $x_2(t)$ とがおのおの無相関であれば

$$P_{nx_1} = P_{nx_2} = 0$$

となる。 $x_2(t)$ と $n(t)$ とが無相関であることは推定できるが、 $x_1(t)$ と $n(t)$ は閉ループの内を通るから一般には $P_{nx_1} \neq 0$ となる。自動車の運動を考える場合、 $n(t)$ としては路面の不整地外力によるもの、車体振動などが考えられるが、さきの操舵による応答の測定結果から明らかなように、ノイズ $n(t)$ の影響はわずかである。また、車体振動などによるノイズは比較的高周波であり、人間応答関数から考えてフィード・バックされる量はわずかである。このようなことから、 $n(t)$ を無視してもその誤差は小さいものと推察される。以上のようなことから

$$\begin{bmatrix} P_{x_1x_1}(f) & P_{x_2x_1}(f) \\ P_{x_1x_2}(f) & P_{x_2x_2}(f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1(f) \\ A_2(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{yx_1}(f) \\ P_{yx_2}(f) \end{bmatrix} \quad (7-8)$$

なる Complex Matrix を各周波数について計算し $A_1(f)$, $A_2(f)$ を求めた。

7.4 多入力系伝達関数の推定

入力が、 $x_1(t)$, $x_2(t)$, -----, $x_N(t)$ で出力 $y(t)$ がインパルス応答関数 $h_j(\tau)$ ($j=1, 2, \dots, N$) によつて、

$$y(t) = \sum_{j=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} x_j(t-\tau) h_j(\tau) d\tau \quad (7-8)$$

と与えられる場合については、 j 入力系の周波数応答関数 $A_j(f)$ はインパルス応答関数のフーリエ変換として、次のように表わされる。

$$A_j(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h_j(\tau) e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (j=1, 2, \dots, N) \quad (7-9)$$

x_j と y とのクロススペクトルを $P_{yx_j}(f)$ とすると

$$P_{yx_j}(f) = \sum_{k=1}^N A_k(f) P_{x_k x_j}(f) \quad (k=1, 2, \dots, N) \quad (7-10)$$

となる。そこで

$$P_{x_k x_j}(f) \approx 0$$

ならば

$$\begin{bmatrix} A_1(f) \\ A_2(f) \\ \vdots \\ A_N(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{x_1 x_1}(f) & P_{x_2 x_1}(f) & \cdots & P_{x_N x_1}(f) \\ P_{x_1 x_2}(f) & P_{x_2 x_2}(f) & \cdots & P_{x_N x_2}(f) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{x_1 x_N}(f) & P_{x_2 x_N}(f) & \cdots & P_{x_N x_N}(f) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{yx_1}(f) \\ P_{yx_2}(f) \\ \vdots \\ P_{yx_N}(f) \end{bmatrix} \quad (7-11)$$

として $P_{x_k x_j}$, P_{yx_j} がわかれば $A_j(f)$ が求められる。 $y(t)$ の代りに $P_{nx_j}(f) \approx 0$ となるような、いわゆるノイズ $n(t)$ が加わつて $z(t)$ が

$$z(t) = y(t) + n(t) \quad (7-12)$$

なるときは、 $P_{yx_j}(f)$ の代りに $P_{zx_j}(f)$ に置きかえればよい。

次に出力のパワースペクトル $P_{yy}(f)$ は

$$P_{yy}(f) = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N A_j(f) \cdot A_k(f) \cdot P_{x_j x_k}(f)$$

がえられる。また上記 $z(t) = y(t) + n(t)$ については

$$P_{zz}(f) = P_{yy}(f) + P_{nn}(f)$$

となる。

実際の伝達関数の推定は次のような方法²⁾で行なつた。入力を $x_1(t)$, $x_2(t)$, ..., $x_k(t)$ で表わし、出力を $y(t) = x_0(t)$ と表わす。 $x_i(t)$ と $x_j(t)$ との間のクロススペクトル密度関数の推定値 $P_{j1}(f)$ を第3章と同様な方法で計算する。

この $P_{j1}(f)$ を次のような行列に配列して、

	第1列	2列	k列	k+1列	k+2列	k+3列	第2k+1列
第1行	$P_{11}(f)$	$P_{12}(f)$	$P_{1k}(f)$	$P_{10}(f)$	1	0	0
第2行	$P_{21}(f)$	$P_{22}(f)$	$P_{2k}(f)$	$P_{20}(f)$	0	1	0
第K行	$P_{k1}(f)$	$P_{k2}(f)$	$P_{kk}(f)$	$P_{k0}(f)$	0	0	1
第K+1行	$P_{01}(f)$	$P_{02}(f)$	$P_{0k}(f)$	$P_{00}(f)$	0	0	0

(7-16)

この行列の第k行までを単位マトリックスになるように計算すると次のような形の行列がえられる。

第1列	第2列	k列	k+1列	k+2列	k+3列	第2k+1列
1	0		$\alpha_1(f)$	$\tau_{11}(f)$	$\tau_{12}(f)$	$\tau_{1k}(f)$
0	1		$\alpha_2(f)$	$\tau_{21}(f)$	$\tau_{22}(f)$	$\tau_{2k}(f)$
0	0	1	$\alpha_k(f)$	$\tau_{k1}(f)$	$\tau_{k2}(f)$	$\tau_{kk}(f)$
0	0	0	$\varepsilon(f)$	$\beta_1(f)$	$\beta_2(f)$	$\beta_k(f)$

(7-17)

求める周波数応答関数の推定値 $A_j(f)$ ($j=1, 2, \dots, k$) は

$$A_j(f) = -\beta_j(f) = \alpha_j(f) \quad (7-18)$$

となる。multiple coherency $\gamma_{0,12\dots k}^2(f)$, Partial coherency ³⁾

$\gamma_{0j,12\dots \hat{j}\dots k}^2$ は

$$\gamma_{0,12\dots k}^2(f) = 1 - \frac{\varepsilon(f)}{P_{00}(f)} \quad (7-19)$$

$$\gamma_{0j,12\dots \hat{j}\dots k}^2(f) = \frac{|\alpha_j(f)|^2 \gamma_{j\hat{j}}^{-1}(f)}{\varepsilon(f) + |\alpha_j(f)|^2 \gamma_{j\hat{j}}^{-1}(f)} \quad (7-20)$$

推定値の信頼度 δ の相対誤差 $R_{j,\delta}(f)$ は ⁴⁾

$$R_{j,\delta}(f) = \sqrt{\frac{1}{n-k} \frac{\varepsilon(f) \gamma_{jj}(f)}{|\alpha_j(f)|^2} F(2, 2(n-k), \delta)} \quad (7-21)$$

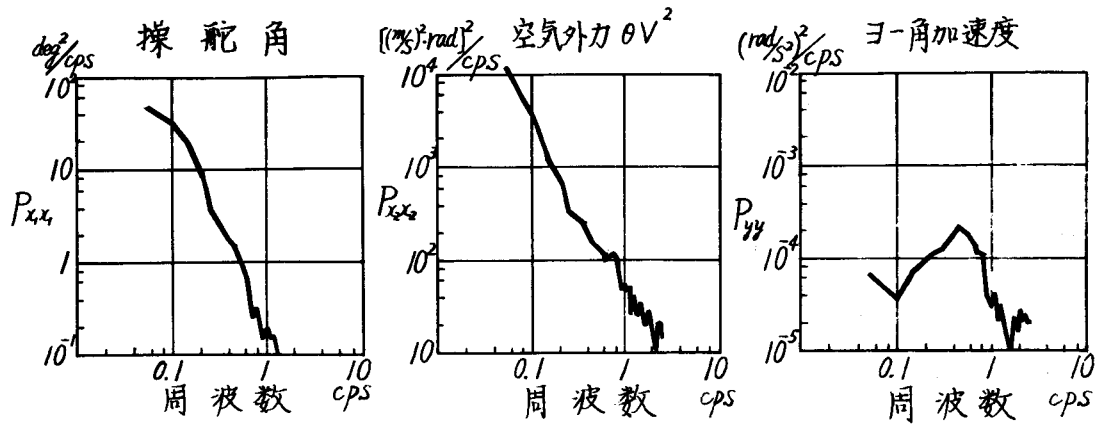
で表わされる。ただし n は

$$n = \frac{M}{h} \left(2 \sum_{v=-k}^k a_v \right)^{-1} \quad (7-22)$$

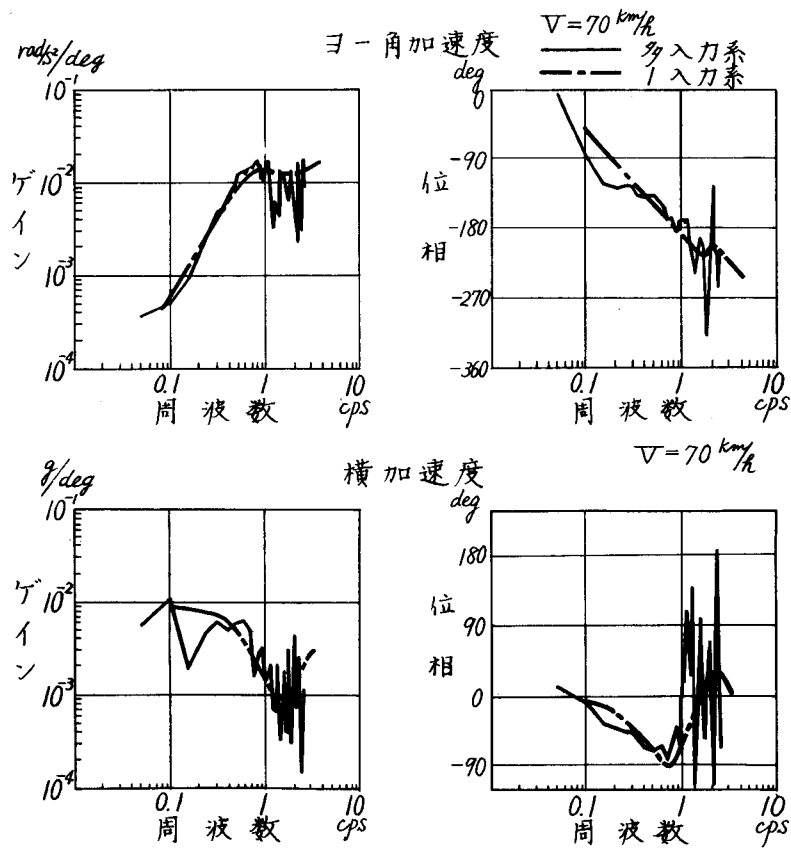
に最も近い整数を用いる。 a_v はスペクトルウインド W_1, W_2, W_3 を使用した。 ⁵⁾

これらの計算はすべて、電子計算機で行なつたが自由度 $2, 2(n-k)$ の F 分布は信頼度 $\delta = 0.95$ について次の様な近似式 ⁶⁾ を使用した。

$$F(2, 2(n-k), 0.95) \doteq 3.00 + \frac{10.00}{(n-k) - 1.40} \quad (7-23)$$



第7-3図 パワースペクトルの一例



第7-4図 操舵による応答関数(操舵角入力)

7.5 解 析 例

風速・風向計を自動車に搭載し、走行中の突風、操舵角、操舵力、横加速度、ヨー角加速度などを同時計測した。測定時間は2～3分で、データは0.2 sec ごとにサンプリングしたから、解析周波数は2.5 cps である。

昭和40年4月5日、名神高速道路・草津－瀬田間で計測した測定波形の一例を第7-2図に示す。空気外力は風速・風向の実測値から算出した θV^2 で表わした。

第7-3図はパワースペクトルの解析例で、第1入力である操舵角パワースペクトル $P_{x_1 x_1}$ 、第2入力の空気外力(θV^2)パワースペクトル $P_{x_2 x_2}$ 、出力であるヨー角加速度 P_{yy} を示したものである。空気外力パワースペクトルは $P_v = a f^{-n}$ で近似できるが、操舵角のスペクトル成分もこれに近い傾向を示している。一方、ヨー角加速度のスペクトルは0.5～0.6 cps にパワーの大きい部分が認められる。

小型自動車の操舵および突風による応答関数の解析例を第7-4, 5図に示す。

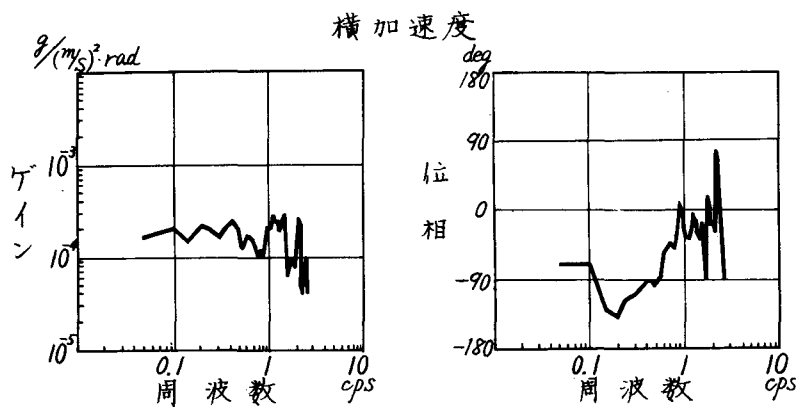
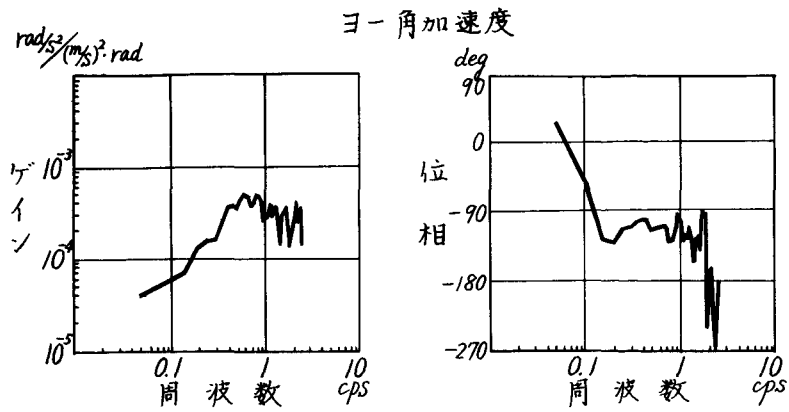
これらの結果は、操舵角・空気外力を入力としヨー角加速度を出力としたものと、同じ入力に対して横加速度を出力としたものとの2つの計算結果からえられたものである。

第7-4図は操舵による自動車の応答をヨー角加速度、横加速度について求めたものである。実線は多入力系、すなわち、突風時に修正操舵を行なっている一般運転状態で測定したものであり、一方、一点鎖線は無風状態のとき、操舵入力のみを与えた場合の一入力系で測定した操舵による自動車の応答関数を示したものである。この両者を比較すると、ゲイン・位相とも大体同一の結果がえられている。

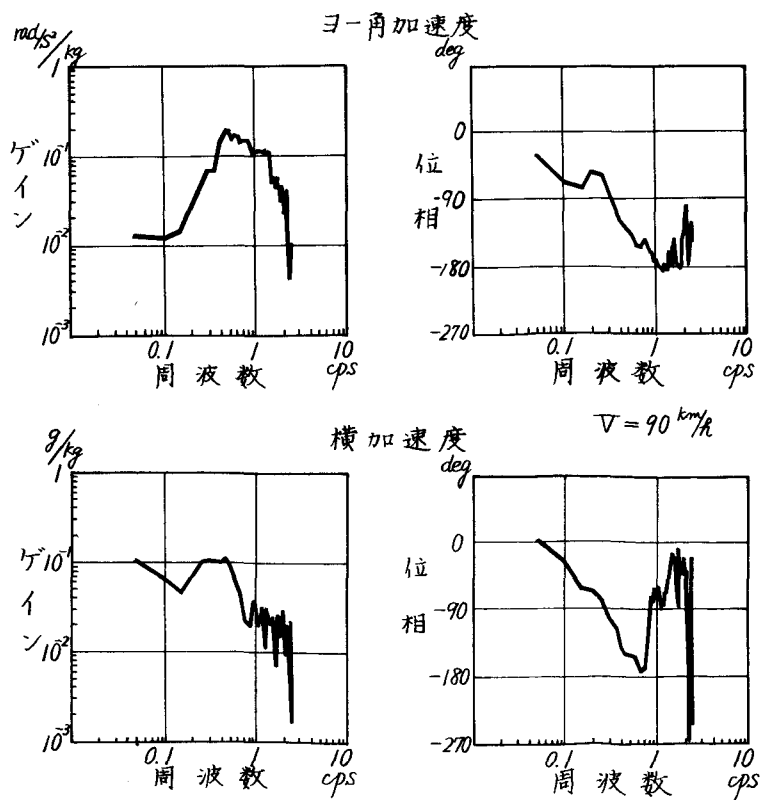
第7-5図は突風による自動車の応答関数をヨー角加速度、横加速度について算出した解析例であるが、第7-4図の操舵^よに^入応答関数と同じような傾向を示している。

次に、操舵力入力に対するヨー角加速度、横加速度の応答特性を第7-6図に表わした。

この解析は、入力として操舵力・突風外力の2入力に対し、ヨー角加速度、横



第7-5図 突風による応答関数 ($V=70 \text{ km/h}$)



第7-6図 操舵による応答関数 (操舵力入力)

加速度をそれぞれ出力として計算したものである。

次に求まった応答関数の精度について検討して見る。 相対誤差の計算は、(7-19)～(7-21)式を用い、信頼度95%で算出した。 第7-7, 8図は操舵角および突風によるヨー角加速度応答関数の相対誤差を計算したものであるが、操舵による応答関数 $A_1(f)$ は40～50%の信頼巾であるのに対し、突風入力によるもの $A_2(f)$ は50～70%と、突風入力の応答関数の方が精度が悪い。 勿論、突風の大きさによっても精度は相違するわけで、突風が強いときに測定したものが精度は良くなる。

第3章の操舵入力のみの場合の応答関数(一入力系)では10～20%の信頼巾があつたのに較べると精度が悪い。 これは入力数が増加したことがその主原因であり、多入力系の解析で一番問題になる事項である。 これを補つ方法はデーター数を増すことしか、その方法はないが、たとえデーター数を倍にしても精度の向上は余り期待しえない。

7.6 結 論

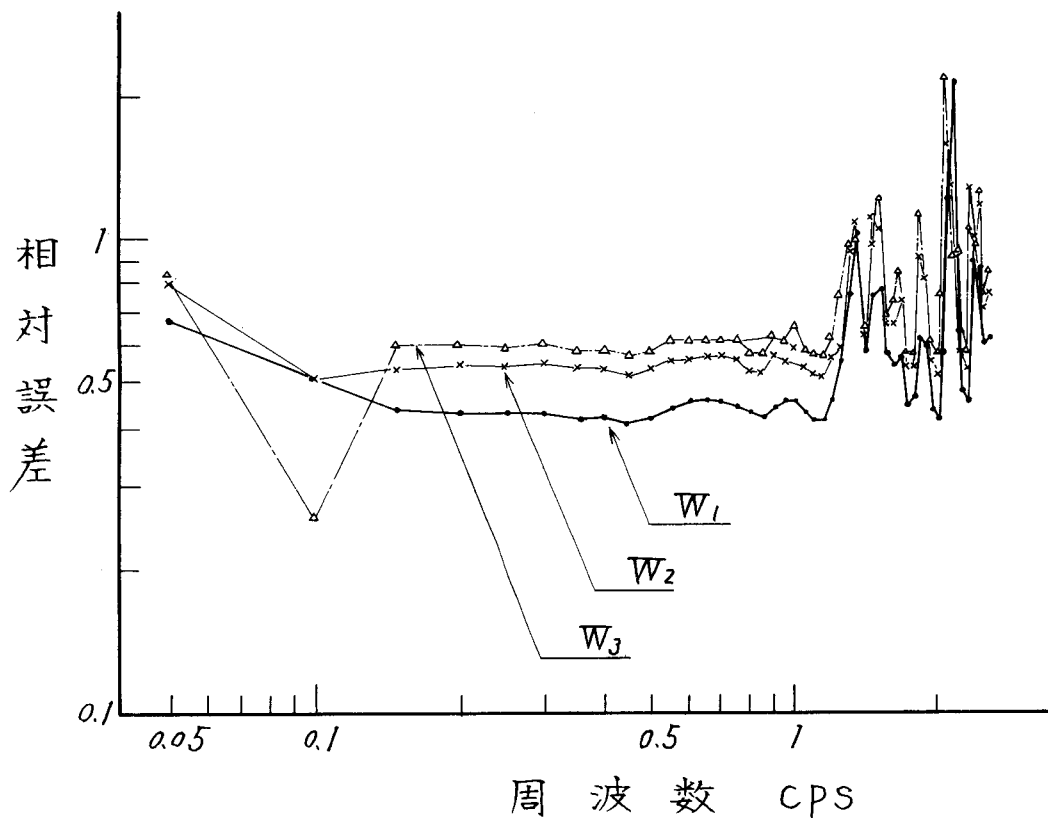
自動車が走行中に受ける突風外力と自動車の運動の測定結果から、不規則波形のスペクトル解析の手法を用い、突風に対する車の応答解析を試み、解析例を示した。

突風応答測定時の運転方法であるが、ハンドル固定状態で測定することは種々の弊害を伴うので、一般の運転状態のように突風に対しての修正操舵を行なう、実際の作動状態での応答関数を求める方法を考えた。

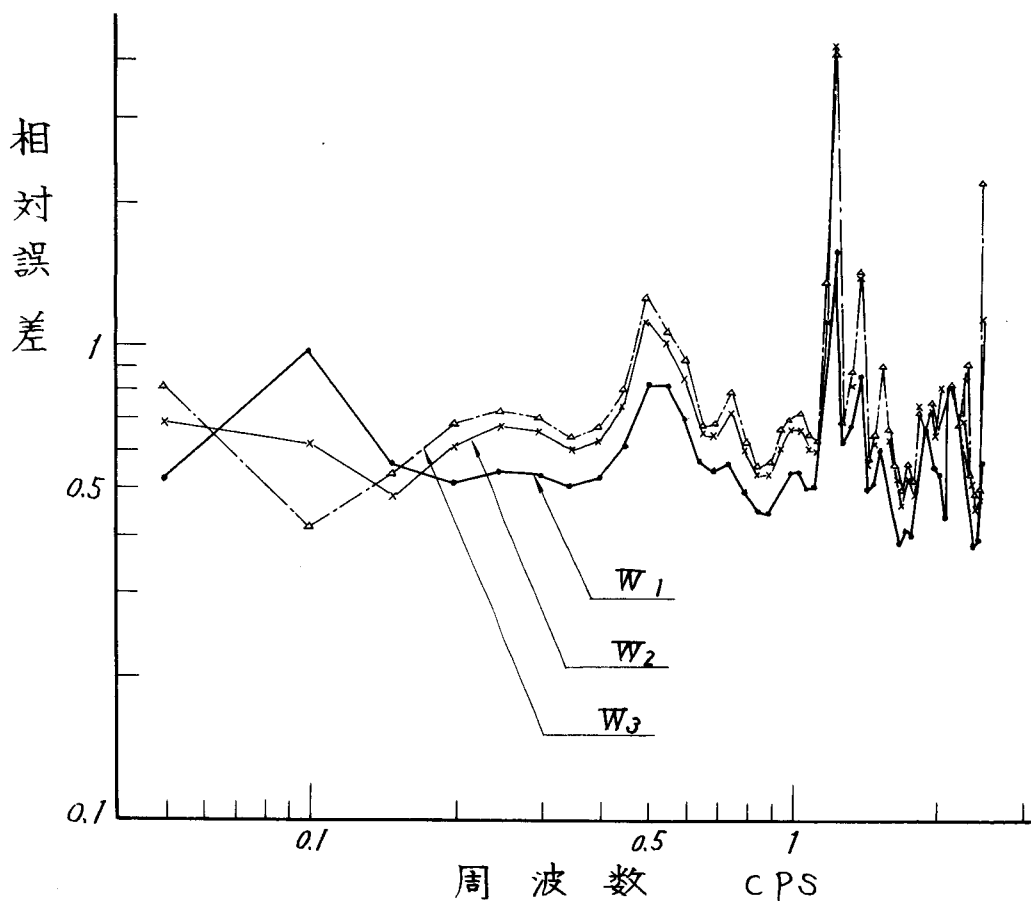
この方法では入力として、突風外力と人間による操舵の2入力として取扱うから、自動車の操縦性・安定性の評価に必要な操舵入力、攪乱外力に対する応答関数が一度に求められる利点がある。

応答関数の出力である自動車の運動には入力に無関係な要素、いわゆるノイズが含まれると、突風時の自動車応答系は閉ループを形成するから、入力とは無相関にならない。 したがつて、このような系は解析不能になる。

今回は、このノイズが僅少で無視しうると仮定し解析を進め、無風状態での操舵入力のみを与えた場合の一入力系で解析した、操舵による自動車の応答



第7-7図 操舵による応答関数 $A_1(f)$ の相対誤差



第7-8図 突風による応答関数 $A_2(f)$ の相対誤差

関数と比較した。この結果では両者は大体同一の値がえられているので、今後このような仮定を設けても実用上差支えないものと思われる。

突風による応答関数の解析例は今回のものが、恐らく最初のもので、これと比較検討する資料は見当たらないが、応答関数としては一応、納得しうる形状を示している。多入力系のスペクトル解析は、入力の数を増加するほど相対誤差が増加し、精度が劣化する。これを改善する方法はデータ数を増すしか方法がないものと思われるが、データ処理が一層、煩雑になる。

不規則波形のスペクトル解析から、種々の自動車応答関数が実際の作動状態で解析しうる事が明らかになつたので、今後、この種の解析方法が操縦性・安定性の解析に重要な役割を果たすものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 赤池 ; “定常確率過程の諸問題”

統計数理研究所 1964

- 2) Akaike ; “On the Statistical Estimation of the Frequency Response
Function of a System Having Multiple Input.”

Annals of the Institute of Statistical Mathematics.

Vol. 17 №2 1965

- 3) 赤池 ; “スペクトル推定の統計理論”

統計数理研究所 1964

- 4) 赤池 ; “スペクトル推定の実際”

統計数理研究所 1964

- 5) Akaike ; “On the Design of Lag Window for the Estimation of Spectra.”

Annals of the Institute of Statistical Mathematics.

Vol. XIV , №1

- 6) 4) の文献参照

第8章 自動車の高速安定性と人間の応答

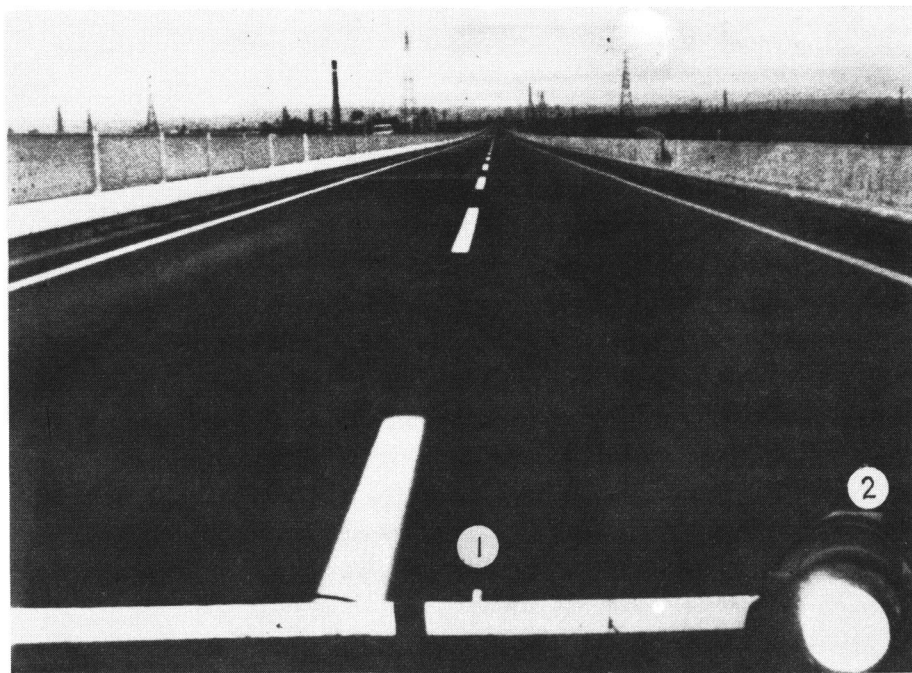
8.1 緒 言

前章で説いたように、不規則波形のスペクトル解析から、自動車の操縦性・安定性の評価に必要な操舵入力、攪乱外力に対する応答関数が実際の作動状態で算出できることが明らかになったが、どのような応答関数が高速安定性に対して望ましいか評価基準を確立する必要がある。

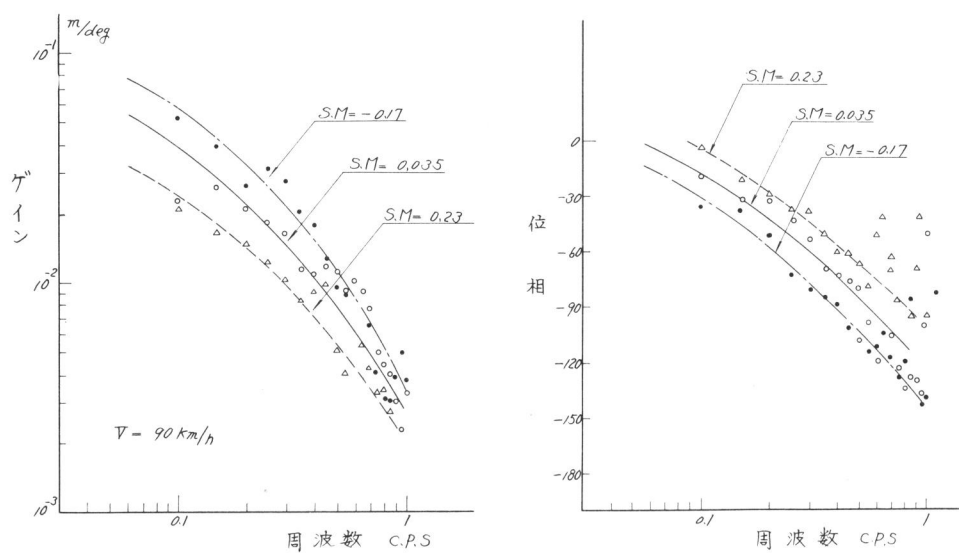
そこで、まず自動車の主要因子を変更したときの操舵および、突風入力に対する応答関数を第7章の解析方法を用いて算出し、比較検討を行なった。

次に人間がコースを操縦しているときの操舵力－操舵角特性は運転者の腕の運動特性と考えられるから、この特性値から自動車の特性や外乱の大きさ、環境条件によつて、人間はどのように反応するかを調べた。これらの結果からどんな特性の自動車が人間に適しているかを判定し、高速安定性の評価基準を明らかにした。

また、突風などの攪乱外力を受けたとき、どの程度の制御誤差で運転しうるかを、自動車のコースのずれ、姿勢角、操舵角などの統計的諸量で調べ、人間を含めたいわゆる人間－自動車系の総合特性を検討した。



第8-1図 16mmシネカメラでの測定写真
(基準ターゲット①, フラッシュライト②)



第8-2図 重心点の横変位の応答関数
(操舵による応答)

8. 2 突風時の高速安定性

8. 2. 1 自動車の姿勢角、横変位の測定

高速安定性の解析では横加速度、ヨー角加速度で自動車の運動を測定していたが、外乱に対する影響を調べるためにはコースに対するずれ量、姿勢角などの変位量の測定も重要である。横変位、姿勢角の測定は第4章のように残跡装置で画かれた自動車の軌跡を路面上で測定する方法も考えられるが、名神高速道路のような公道では不可能である。突風に対する高速安定性の解析は測定走行距離、外部条件などから考え、どうしても一般公道で実施したい。

そこで16mmシネ・カメラを試験車に搭載し、高速道路の走行区分線を基準にして重心点の横変位、姿勢角の測定を行なった。

第8-1図は16mmシネ・カメラでの測定写真のコマである。自動車の前端に取付けた基準ターゲットと走行区分線との関係を1コマずつ解析し、各時刻における横変位量、姿勢角を電子計算機で算出した。操舵角、操舵力、風速、風向などの測定は電磁オシログラフで実施したので、これと16mmシネとの同期を完全にするため16mmシネの画面にフラッシュ・ライトで0.2秒毎にタイムマークを入れるようにした。

第8-2図は上記のような16mmシネ・カメラからの自動車重心点測定波形から操舵による応答関数を算出したものである。解析は突風による入力と操舵による入力の2入力系のスペクトル解析で行なった。

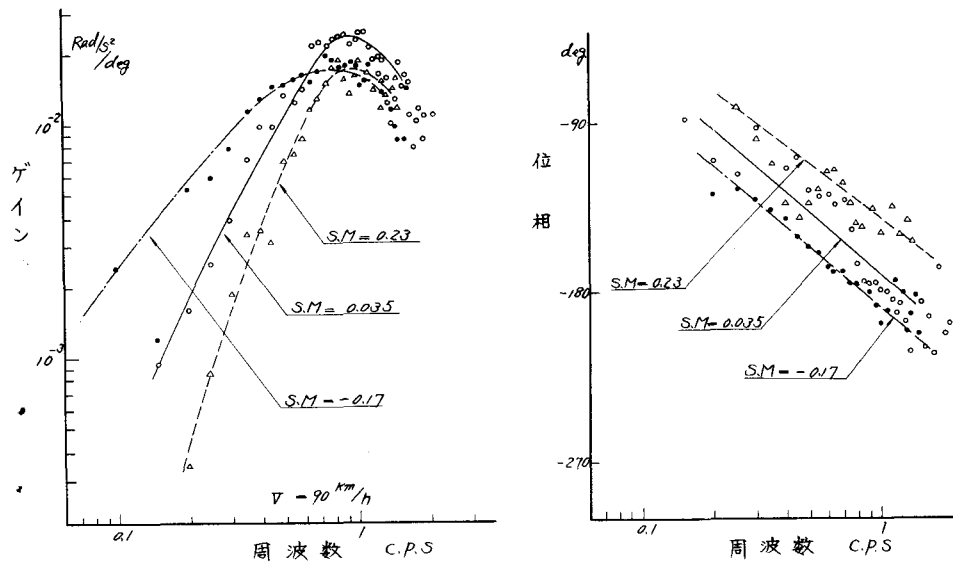
解析結果は車速 $V = 90 \text{ km/h}$ のときのもので、Static Margin の値を $S.M. = 0.23, 0.035, -0.17$ の三種について比較している。

$S.M. = -0.17$ の場合、すなわち、over-steer のときはゲインが増大し、位相遅れも大きい。

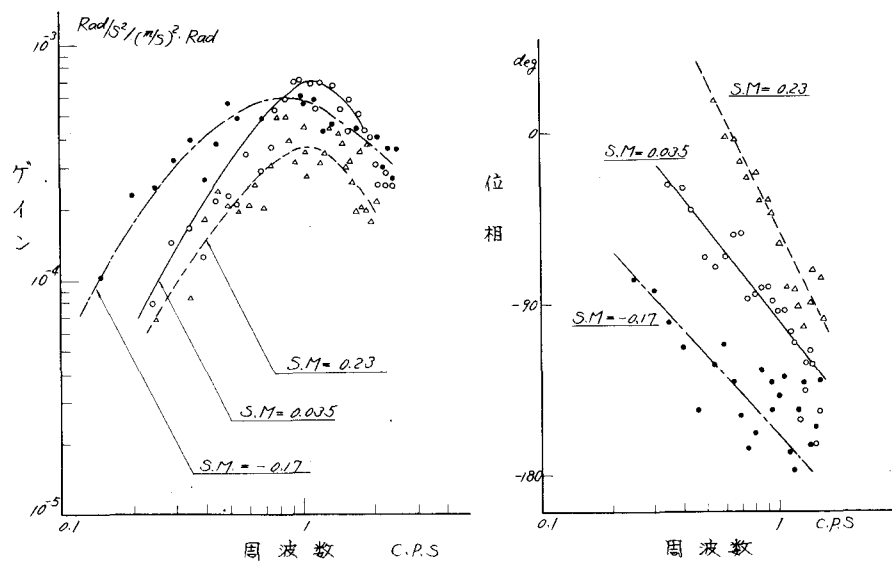
8. 2. 2 under, over-steer 特性と高速安定性

第7章のような解析手法を用いると操舵入力と突風外力に対する応答関数が求められる。したがって自動車の主要因子を変えて、これらの応答関数を解析すれば各因子の検討が可能になる。

そこで前後輪のタイヤ圧を変更し、under, over-steer 特性の影響を



第8-3図 Under Over-Steer 特性と高速安定性 (1)
(操舵による応答関数 A_1)



第8-4図 Under Over-Steer と高速安定性 (2)
(突風による応答関数 A_2)

検討した。第 8 - 3 図は操舵による応答関数を求めたもので、Static Margin の値を三種類変えて比較している。第 3 章で解析した操舵による応答関数と同様な傾向が認められる。一方、突風による応答関数を第 8 - 4 図に示す。第 8 - 3 図の操舵による応答関数と同様に、over-steer の場合はゲインが大きく、位相遅れが増加する。

このことは over-steer になると突風外力による影響を大きく受けることを意味する。

突風などの外乱による影響が小さければ、人間の補償操舵を必要としないから、高速安定性の見地からはなるべくこの応答のゲインを減少させ、影響度を小さくすることが望ましいものと考えられる。

突風外乱を受け、自動車のコースがずれると運転者はハンドルを操舵して、元のコースにもどす。すなわち、外乱を受けた自動車の運動は操舵による応答関数と突風による応答関数の二つの応答関数によつて構成される。この二つの応答関数は力学系は大体同じで、入力の種類異なるものであるから、先の結果からも明らかなように同じ傾向になる場合が多い。突風による影響度を小さくする方法はいくつか考えられるが、操舵による応答関数もその影響を受けやすい。

したがって、自動車の因子を変更し、高速安定性の改善を計ることは、このような制約を受け、かなりむずかしい問題である。たと High Cornering タイヤを使用すると、突風および操舵の両方の応答関数を改善しうるから、高速安定性の向上には望ましい方法である。

また空気力学特性を改善し、突風による外力を低減することは、自動車の力学系の変更なしに実施しうる対策であるから、従来からいわれているように重要な事項と考えられる。

8.3 突風時の人間の緊張度について

8.3.1 自動車を運転している場合の腕の運動

人間が自動車のかじ取りをする場合、人間と自動車の結合点はハンドルであつて、ハンドルから先の自動車が人間の負荷になり、ハンドル角^{1) 2)}を出力信号とする、かじ取りサーボ機構を構成しているものと考えられる。

したがつて、人間がコースを操縦している場合の操舵力 $\Theta(t)$ を入力とし、操舵角 $x_1(t)$ を出力とする伝達関数 $G_c(f)$ は運転者の腕の筋肉などの運動を表わすものと思われる。

一般路面を走行中の操舵力、操舵角の波形は不規則波形になるから、スペクトル解析から算出する必要がある。

今、操舵力、操舵角の自己相関関数を $R_{cc}(\tau)$ 、 $R_{x_1 x_1}(\tau)$ 、相互相関関数を

$R_{x_1 c}(\tau)$ とすれば

$$R_{cc}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T c(t+\tau) \cdot c(t) dt \quad (8-1)$$

$$R_{x_1 x_1}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x_1(t+\tau) \cdot x_1(t) dt \quad (8-2)$$

$$R_{x_1 c}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x_1(t+\tau) \cdot c(t) dt \quad (8-3)$$

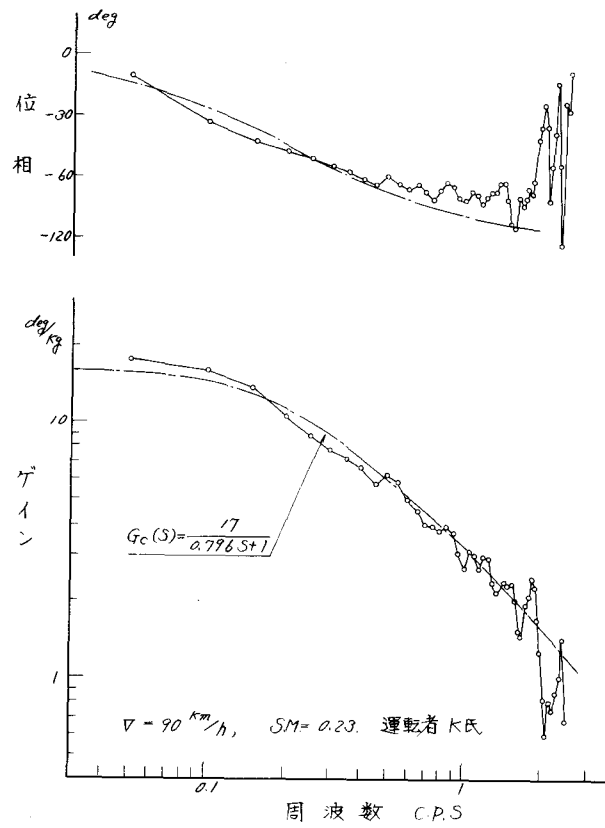
またパワー、クロススペクトルは

$$P_{cc}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{cc}(\tau) \cdot e^{-2\pi f \tau i} d\tau \quad (8-4)$$

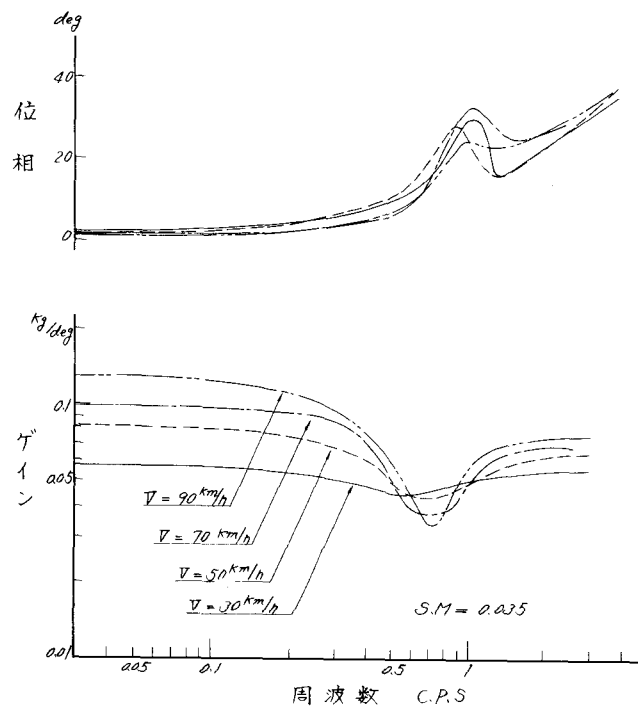
$$P_{x_1 c}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{x_1 c}(\tau) \cdot e^{-2\pi f \tau i} d\tau \quad (8-5)$$

パワー、スペクトルとクロススペクトルと周波数応答関数 $G_c(f)$ との間には

$$P_{x_1 c}(f) = G_c(f) \cdot P_{cc}(f) \quad (8-6)$$



第8-5図 人間が操縦している場合の
操舵力-操舵角特性



第8-6図 自動車の操舵角-操舵力特性

の関係があるから、運転者の筋肉の応答関数 $G_c(f)$ が上記の関係式から求められる。このようにスペクトル解析の手法を使用すると一般公道を走行中とか、突風時など実際の作動状態での応答関数が求められる利点がある。

第 8-5 図は名神高速道路を車速 $V = 90 \text{ km/h}$ で走行したときの解析例で、無風状態の外部攪乱力が加わらない場合である。この応答特性は

$$G_c(s) = \frac{K_P}{T_N s + 1} \quad (8-7)$$

なる一次おくれの関数で近似しうる。ここで K_P はゲイン、 T_N は時定数を示す。

この腕の運動について井口³⁾、菊池氏⁴⁾は二次おくれ特性として取扱っているが今回の測定例、数十個の内、二次おくれ特性に近い傾向を示したのは、極端に不安定な条件下で、二・三例が認められたのみで、大部分は一次おくれ特性に近似しうる。

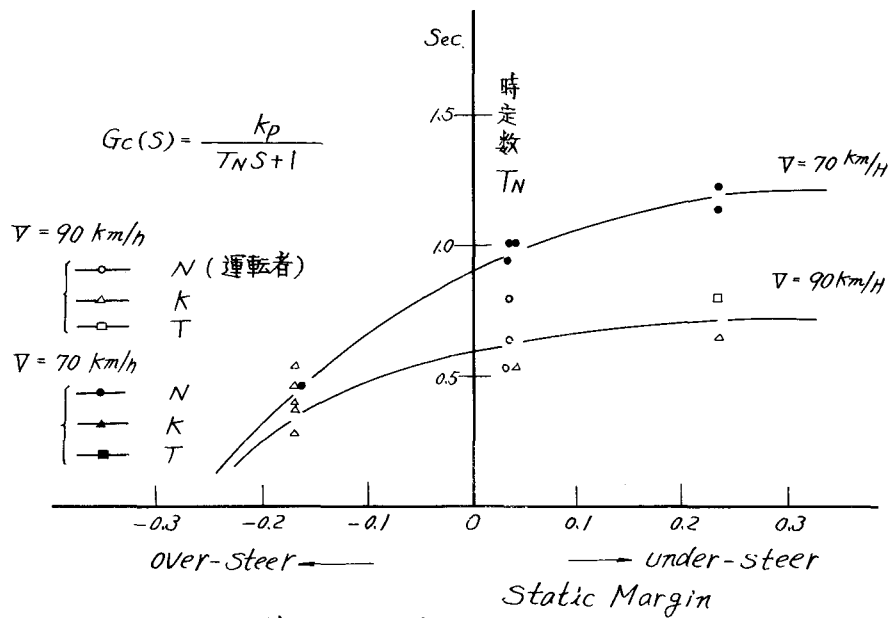
人間の伝達関数については多くの研究者がいろいろの形の伝達関数を提案しているが^{5) 6) 7)} (8-8) 式のような部分から組立てられている例が多い。^{8) 9)}

$$Y_p(s) = \left[K \frac{T_L s + 1}{T_I s + 1} \right] \left[\frac{1}{T_N s + 1} \right] \left[e^{-sL} \right] \quad (8-8)$$

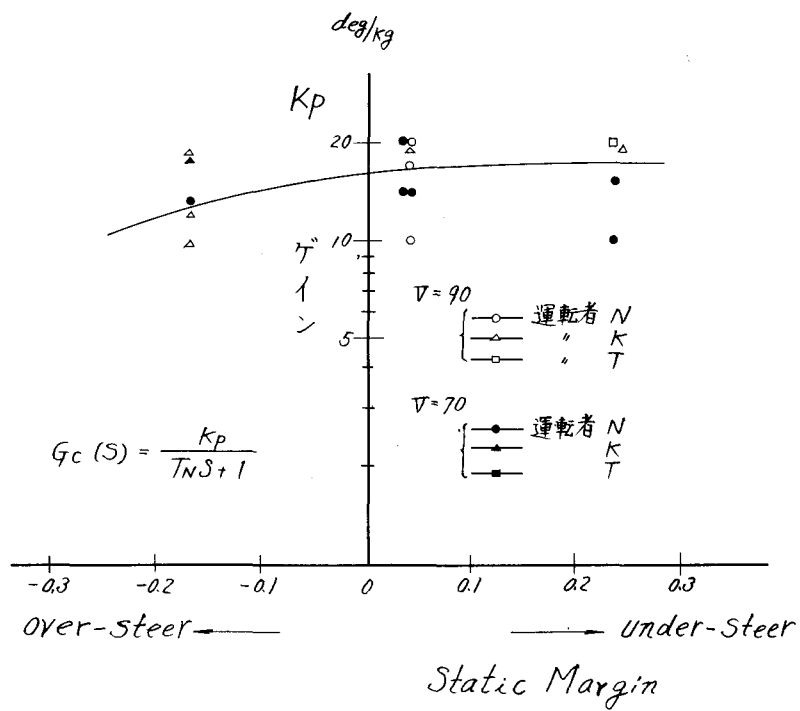
右辺第一項は目で読みとつた信号により行なう演算部分で、人間が意識的に調整可能なゲイン、リード項、ラグ項で第二項は手を使つて機械に信号を伝えようとする時の手の運動を示す部分、また第三項は反応時間遅れの部分を表わしている。

第一項は人間が意識的に調整可能であるが、第二、三項は人間に固有なものであり、被制御系、環境条件などにより左右されるものと考えられる。

今回測定した腕の運動特性は (8-8) 式の第二項と同じ一次遅れ特



第8-7図 突風時の時定数 T_N



第8-8図 突風時のゲイン K_p

性を示してゐる。

次に周波数応答試験で自動車自体の操舵角－操舵力特性を測定し第8－6図に示した。車速の増加に伴いゲインが大きくなり、ハンドルが重くなることを示している。また0.70PS附近にハンドルの軽くなる特異点があり、位相¹⁰⁾は周波数が高くなるほど進む傾向が見られる。

人間は自動車から負荷を与えられるが、この自動車の特性（自動車のインピダンス）と人間の腕の特性（人間のインピダンス）が整合する時、人間のエネルギーが最も有効に自動車に供給されるから、ハンドルは重過ぎず、軽過ぎず自動車を操縦しやすいとの考えを菊池¹⁰⁾氏は提起している。

8.3.2 自動車の安定性と人間の緊張度

突風のような空気攪乱外力を受けた場合、高速走行中に人間がどのような反応を示すかを人間の腕の運動から調べ、車速や under,over-steer 特性など自動車の安定性との関連を検討した。

測定時の風の強さであるが、各測定条件とも完全に同一ではないが、対地最大風速に換算して大体 10 m/s 前後である。空気攪乱外力 $\theta \text{ V}^2$ では平均値が $100 (\text{m/s})^2 \cdot \text{Rad}$ 、変動値 (r.m.s.) は $50 (\text{m/s})^2 \cdot \text{Rad}$ 程度である。この試験には全て、雨の降らない状態を選んでおり、環境条件としては晴天の場合と大差ない。

運転者は経験年数4～5年の運転の上手な者、4名である。今回の測定結果では運転者による個人差は余り認められず、腕の特性変化も無意識に行なわれているようである。

自動車が空気攪乱外力を受けた状態での自動車の安定性と人間の反応との関連性を調べたのが第8－7図である。腕の特性が一次遅れ特性に近似できることから、時定数 T_N の値で、under,over-steer 特性による相違を比較している。

車速による影響を調べると車速 90 Km/h のときは 70 Km/h の場合に較べ T_N の値が、各 Static Margin において小さくなっている。

T_N の値が小さいことは第8－5図の特性が、高い周波数まで伸び、位

相遅れも減少することを意味する。

これは腕の筋肉を固くして、高い周波数帯域にも応答しようとしていることで人間の緊張度が表われているものと考えられる。したがって、高速になるほど人間が緊張していると解釈できる。

次に under, over-steer 特性による影響であるが、over-steer 特性では T_N の値が急激に低下し、運転者が非常に緊張していることを示している。

under-steer 特性の場合にはこの度合を強めても差程、緊張度は変化していない。

over-steer の車の周波数応答特性は位相遅れが大きいのが、人間は位相遅れの補償は苦手であるから、この位相遅れのために緊張度を増すものと推察される。

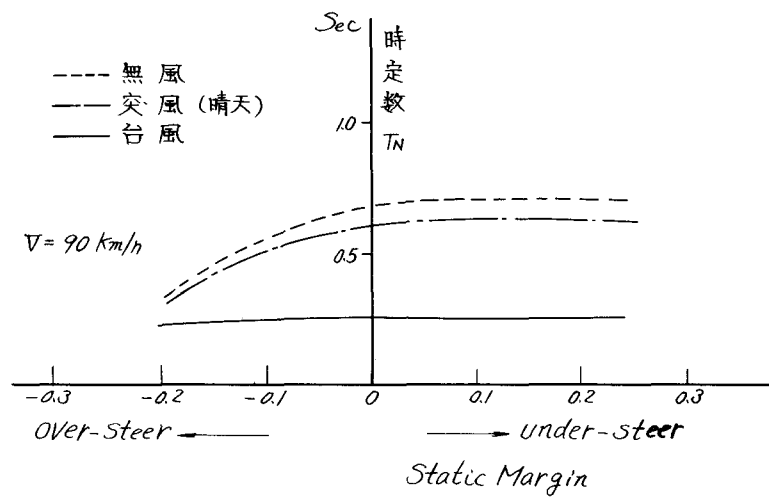
これらの結果から判断すると高速走行時の攪乱外力に対し、over-steer の車は運転者を緊張させ、疲労が大きくなるから、under-steer の車が望ましいものと思われる。

一方、ゲイン K_P を第 8-8 図に示す。値のパラツキはかなり認められるが、第 8-6 図のゲインの値の逆数に近い値である。

今回測定した T_N の値、すなわち、腕の特性と運転者のフイーリングとは非常によく一致しているので、この値が自動車の安定性の評価に利用できるのではなかろうかと推察する。

8.3.3 外乱の大きさと環境条件の影響

外乱の大きさの影響を調べるため、無風、突風、台風の各状態での腕の特性を名神高速道路で検討した。突風状態とは先のとおりと同様に対地最大風速が 10 m/s 前後、空気外力 θV^2 は平均値 $100 (\text{m/s})^2 \cdot \text{Rad}$ 、変動値 $50 (\text{m/s})^2 \cdot \text{Rad}$ であるが台風状態とは昭和 40 年 9 月 17 日第 24 号台風の襲来したときに測定したもので対地最大風速が 20 m/s 、空気外力の平均値が $180 (\text{m/s})^2 \cdot \text{Rad}$ 、変動値 $90 (\text{m/s})^2 \cdot \text{Rad}$ 程度である。たと突風時には降雨状態でないが、台風時には非常に強い雨が降ると同時に暗い状態で視界は極めて悪い。

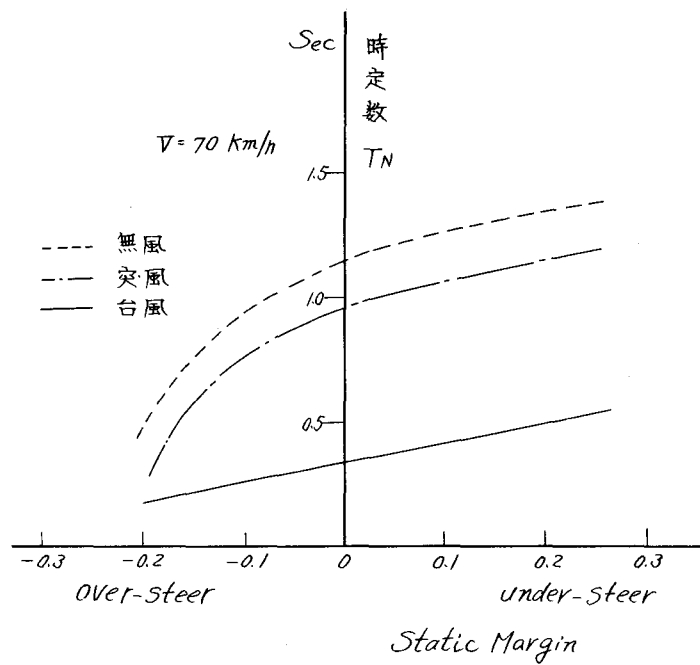


第8-9図 外乱の大きさ, 環境条件の影響 (1)

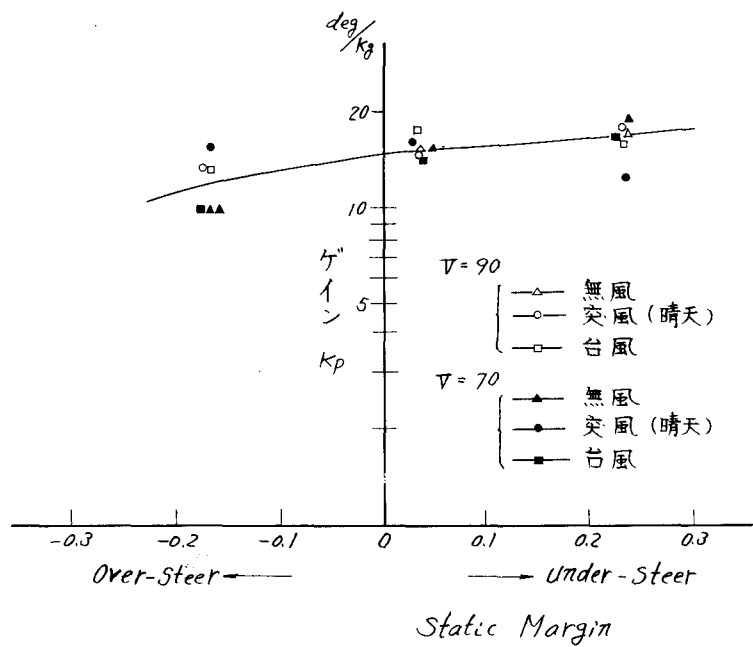
したがってこの場合には外乱の大きさと、環境条件が同時に含まれている。

第 8 - 1 表 各試験条件での運転者の腕の特性

車速 Km/h	風の状態	S.M = 0.23			S.M = 0.035			S.M = -0.17		
		T _N	K _P	運転者	T _N	K _P	運転者	T _N	K _P	運転者
V=90	無 風	0.80	17	N	0.76	11	N	0.4	10	N
		0.80	18	K	0.64	19	K	0.4	10	K
		0.80	20	T	0.80	10	N	0.47	9.5	K
	突 風	0.64	19	K	0.64	20	N	0.28	12	K
					0.53	17	N	0.40	17	K
					0.53	19	K			
	台 風	0.32	17	N	0.23	15	N	0.23	13	N
					0.27	20	K			
V=70	無 風	1.59	20	N		13	N	0.64	10	N
		1.06	13	K	1.22	18	K	0.70	9.8	K
	突 風	1.22	10	N	0.94	14	N	0.53	18	K
		1.14	15	K	1.06	20	N	0.40		K
					1.06	14		0.47	13	K
	台 風	0.53	19	N	0.32	14	N	0.20	9.5	N



第 8-10 図 外乱の大きさ, 環境条件の影響 (2)



第 8-11 図 外乱の大きさ, 環境条件の影響 (3)

第 8 - 1 表は車速、外乱の大きさ、環境条件、Static Margin を変えたときの時定数 T_N 、ゲイン K_P の値を調べたものである。

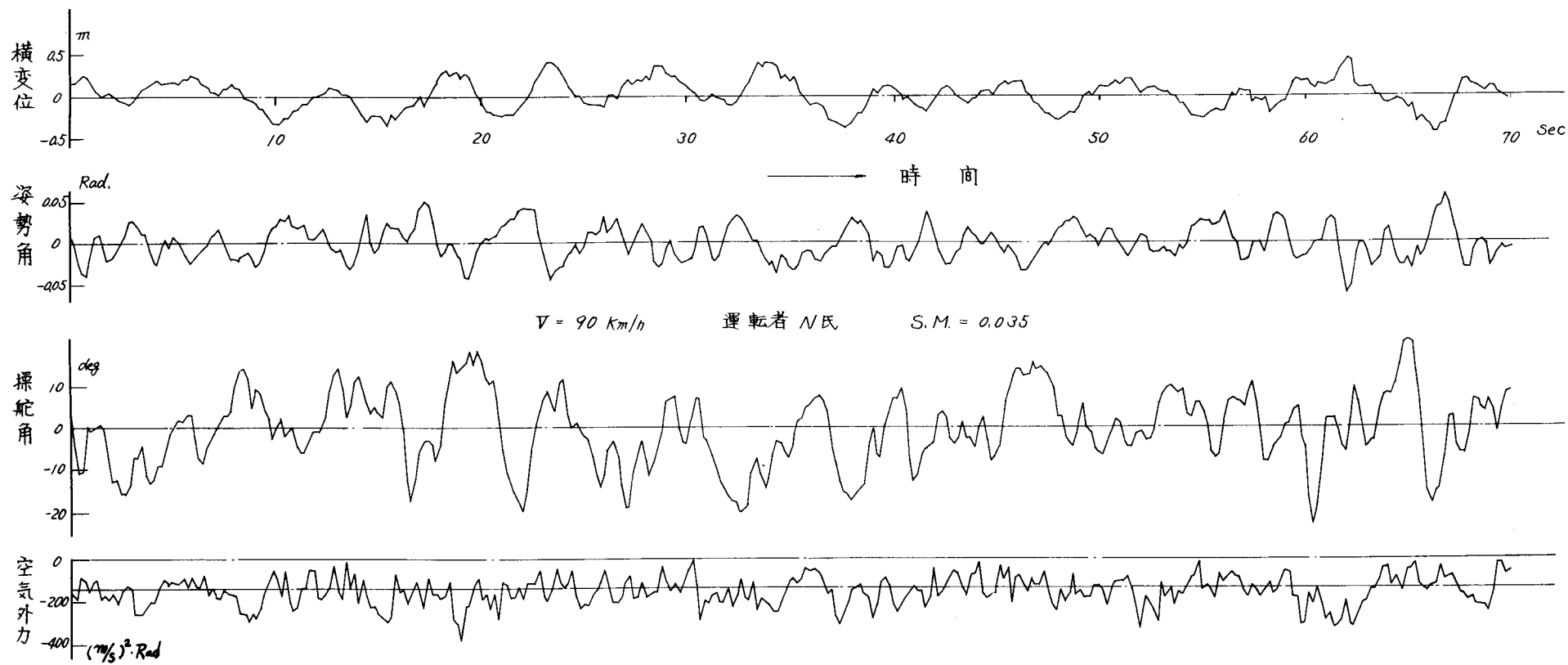
この表の T_N の平均値を求め車速 $V = 90 \text{ Km/h}$ の場合をプロットした。(第 8 - 9 図) この結果では外乱の大きさが大きいほど T_N の値は小さくなり、腕の筋肉を固くしていることがわかる。

台風での測定結果では視界が悪いため特に緊張し、under-steer の条件でも T_N の値が増加していない。

人間が発揮しうる時定数 T_N の限界については Franklin,¹¹⁾ 武田¹²⁾ は $T_N = 0.1 \text{ sec}$ 程度まで出しうると報告しているが、今回の車速 $V = 90 \text{ Km/h}$ 、Static Margin = -0.17 の台風状態より悪条件下では事実上走行しえないものと考えられるから、自動車を操縦する場合は $T_N = 0.2 \text{ sec}$ がその限界と推論される。

第 8 - 10 図は車速 $V = 70 \text{ Km/h}$ のときのもので、第 8 - 9 図の場合と同様、外乱の大きさ、環境条件、Static Margin などの影響が歴然と認められる。

次にゲイン K_P の値について第 8 - 11 図で検討した。 K_P の値がかなり、ばらつくので明確なことは判断しにくい、が、車速、外乱の大きさ、環境条件の影響は受けていないようであるが、over-steer 特性のとき K_P が減少する傾向が認められる。



第 8-12 図 測定波形例 (1)

8.4 突風時のトラッキング特性

走行中の自動車に突風のような空気攪乱外力を受けると、運転者が目標コースに対して進路のずれを小さくするように補償操舵を行なう。

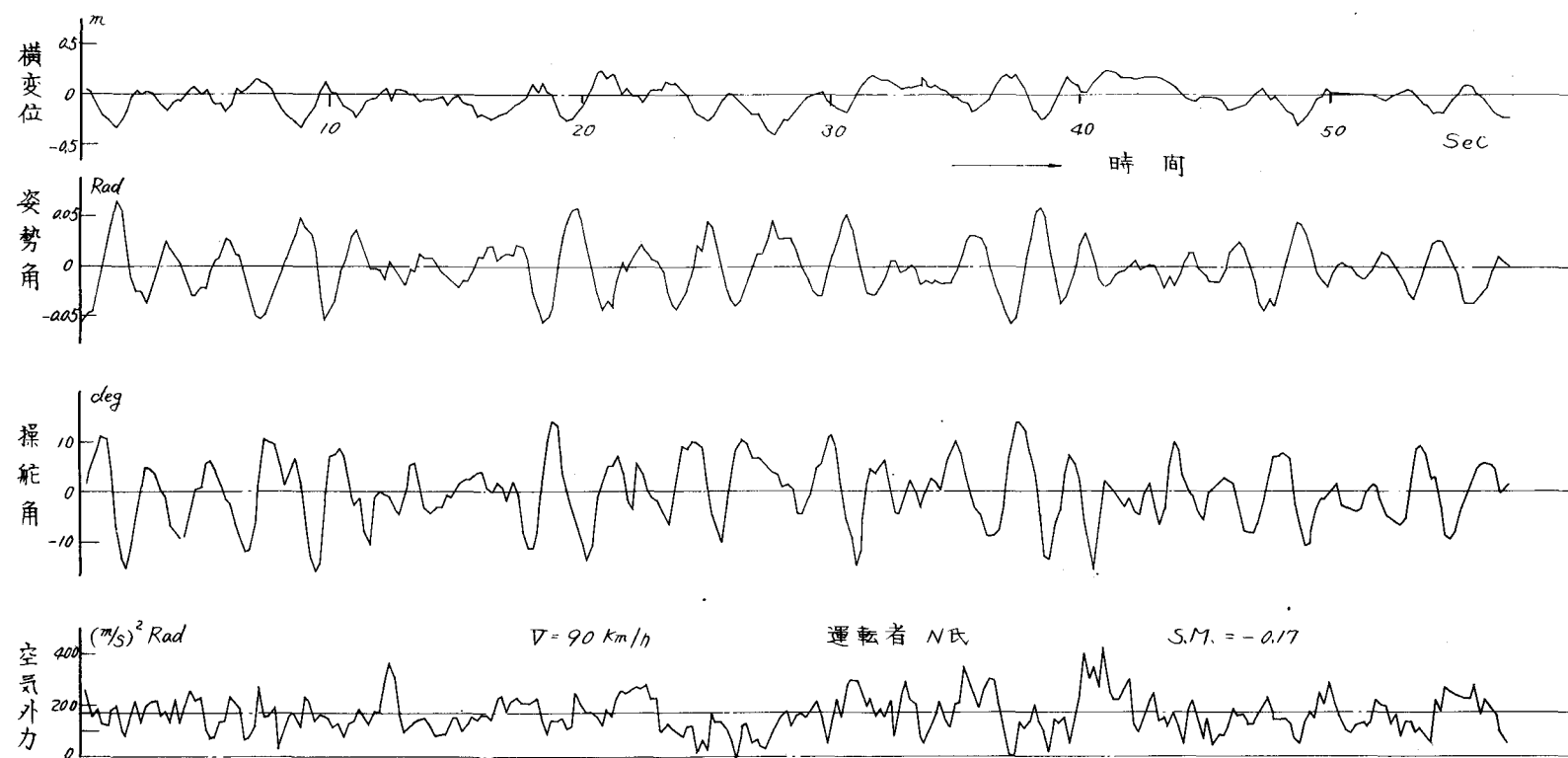
もちろん、このような場合の人間の動特性が把握できれば自動車の高速安定性に関する評価も可能になる。しかし突風時の人間応答関数を解析することを色々試みたがかなり困難なことで、十分信頼しうる値がえられていないのが現状である。

そこで、自動車の動特性をどのようにすれば外乱に対する偏差を小さくし、運転しやすいかを調べるため、車速、Static Margin などの条件を変更したときの進路に対する追従性を測定し、人間をも含めた総合特性から安定性に関する評価基準を検討した。

名神高速道路の直線部分を使用し、走行車線と追越し車線との区分線（レーンマーク）を目標コースとして運転させた。測定はこの区分線を基準にして、自動車重心点の横変位、姿勢角を 16 mm シネで、また操舵角、操舵力、横加速度、ヨー角加速度、突風の風速、風向などを電磁オシログラフで行なった。測定時間は2～3分で走行距離は4～5 Km である。

第8-12、8-13図は車速 $V = 90\text{ Km/h}$ での重心点の横変位、姿勢角、操舵角、空気外力の測定波形例である。空気外力は走行中に測定した対車風速、風向から計算したものである。

under, over-steer 特性の変更は前後輪のタイヤ圧を変え、Static Margin でその度合を示したもので、第8-12図は $S.M = 0.035$ 、第8-13図は $S.M. = -0.17$ の条件での測定結果である。



第 8-13 図 測定波形例 (2)

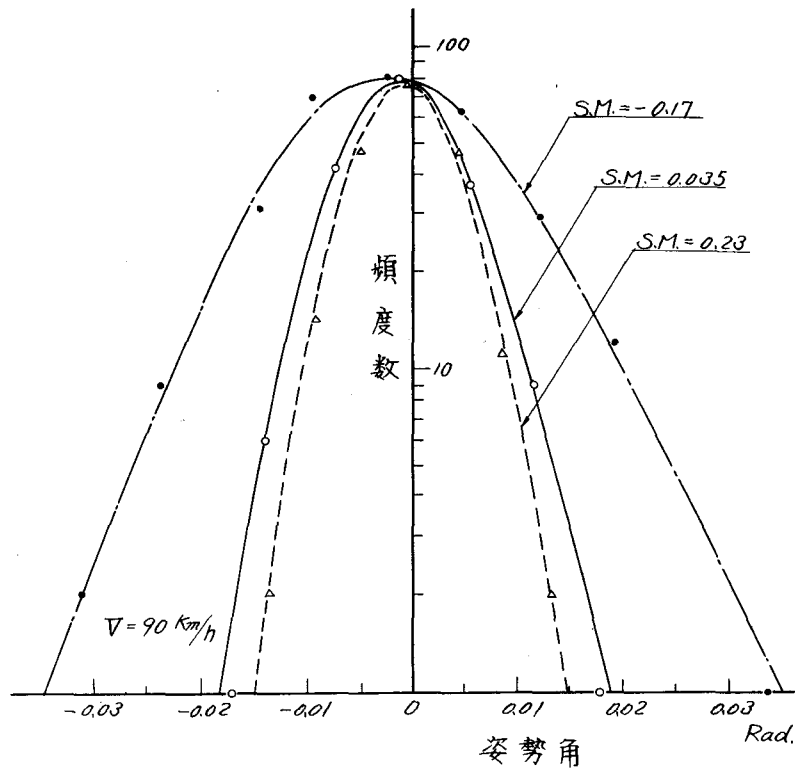
第 8 - 2 表 試験時の風の状態

車 速 Km/h	Static	空 気 外 力 $\theta V^2 (\text{m/s})^2 \text{ Rad}$		対 地 風 速 ・ 風 向				
				風 速 m/s			風 向 deg	
	Margin	$\bar{X}$	σ	V_0	σ_v	Vmax	θ_0	σ_θ
V=70	0.23	178.9	114.5	10.2	3.5	21.0	99.7	42.1
	0.035	108.2	42.8	6.1	1.7	10.9	55.4	17.4
	-0.17	169.2	95.1	8.2	3.3	23.3	64.1	19.0
V=90	0.23	189.3	62.3	7.7	1.9	13.9		
	0.035	194.1	84.9	7.6	2.7	19.4	82.6	16.4
	-0.17	172.2	78.6	7.5	3.0	15.9	101.6	22.0

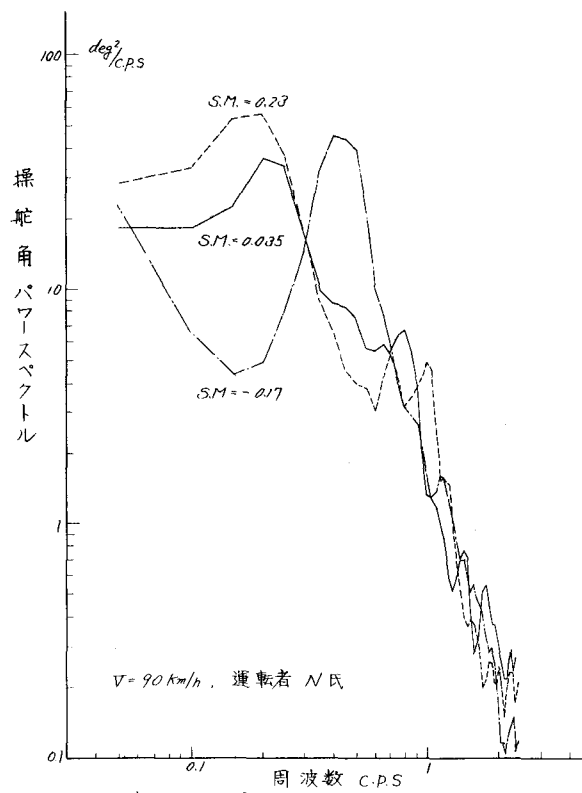
自動車の特性による影響を調べる場合、外乱の大きさ、すなわち、突風の状態、環境条件を同一にすることが望ましいが、完全に一致させることは不可能なことである。

そこで数多くの測定結果の中から、昭和40年9月17日の台風第24号が襲来したときの測定結果で比較する。第8-2表は各試験条件での突風の状態を示したものである。走行中に測定した対車風速、風向から、空気外力 θV^2 、対路面での風速、風向を算出した。車速 $V=70$ 、Static Margin = 0.035の試験条件で風が弱い、その他は最大風速20 m/s前後のかなり強風状態である。また豪雨で、薄暗く視界は非常に悪い。

第8-12、8-13図などの測定結果を0.2 sec、ごとにサンプリングして、データ総数約1000ケの実効値(r.m.s)を横変位、姿勢角、ヨー角加速度、操舵力、操舵角について計算し、試験条件による相違を比較した。(第8-3表)このときの運転者は各試験条件ともすべてN君である。



第 8-14 図 姿勢角の頻度曲線



第 8-15 図 突風時の操舵角スペクトル

第 8 - 3 表 突風時のトラッキング特性

車 速 Km/h	Static Margin	ヨー角加速度 Rad/s ²	横加速度 g	横変位 m	姿勢角 Rad	操舵角 deg	操舵力 Kg
V=70	0.23	0.053	0.019	0.09	0.0057		
	0.035	0.040	0.014	0.10	0.0049	4.3	0.36
	-0.17	0.062	0.024	0.12	0.0091	4.3	0.33
V=90	0.23	0.055	0.017	0.120	0.0050	5.7	0.38
	0.035	0.064	0.020	0.096	0.0059	5.0	0.34
	-0.17	0.077	0.030	0.128	0.0110	5.6	0.30

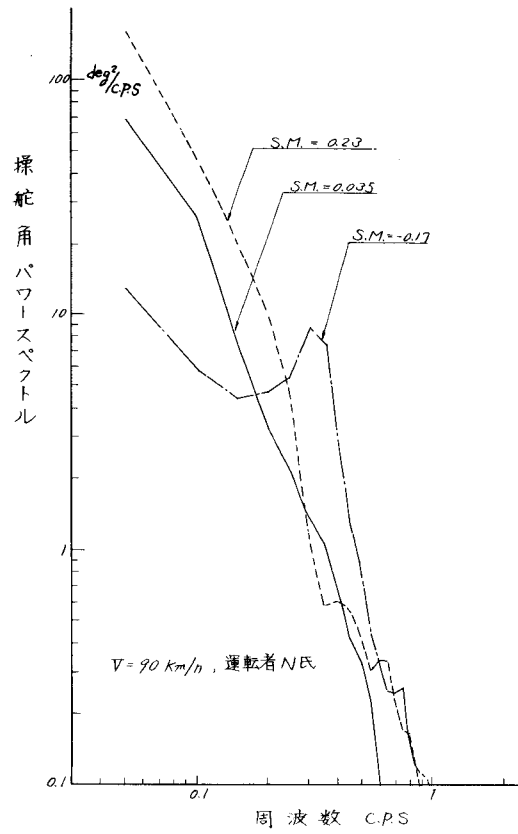
この結果で特に目立つ傾向はヨー角加速度、横加速度、姿勢角が S.M. = -0.17 のとき、すなわち over-steer 特性のとき大きい値を示し、自動車の動揺が大きいことである。たとえば姿勢角の不規則波形を頻度分類（経過頻度で表示した）した結果を Static Margin によって比較すると第 8 - 14 図のように over-steer 特性では大きな値の頻度が多い。

第 8 - 15 図は操舵角のパワー・スペクトルを表わしたもので、特定の周波数成分で卓越した部分が認められる。S.M. = -0.17 のときは 0.40 PS のパワーが大きく、この周波数でハンドルを操舵している場合が多いことを物語っている。

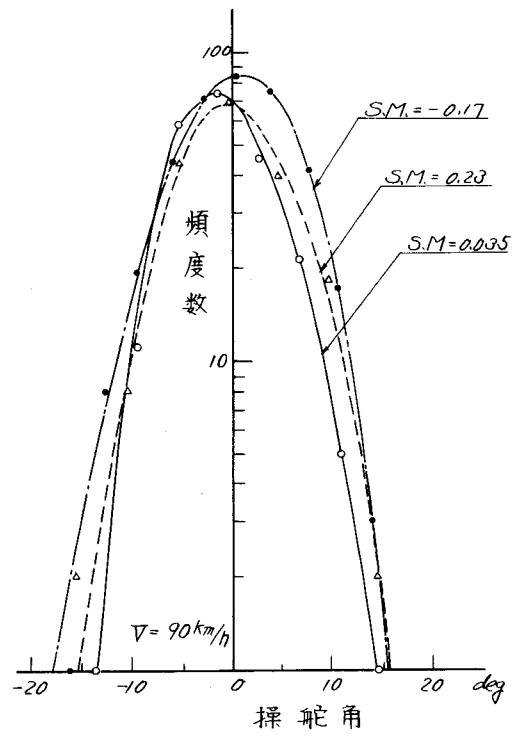
一方、under-steer 特性では 0.15 ~ 0.20 PS の操舵サイクルであるから、over-steer の場合は忙がしく補償操舵していると考えられる。

以上は突風時の操舵角パワースペクトルを示したが、無風時でも卓越した周波数成分が、over-steer 特性の状態と認められるが、under-steer 特性では卓越した部分はなく、 $y = ax^{-n}$ の指数関数に近い傾向がみられる。（第 8 - 16 図）

自動車の操舵角 - 操舵力特性で、ゲインが急激に低下し、ハンドルの



第 8-16 図 無風時の操舵角スペクトル



第 8-17 図 操舵角の頻度曲線

軽くなる部分が現れていたが（第8-6図）、over-steer特性では、この谷が非常に深く、しかも周波数も0.40PS附近であるから、上記の操舵サイクルと関連があるかも知れない。

次に操舵角を頻度分類したものが第8-17図である。over-steer特性の場合には操舵回数が多いことを示している。

over-steer特性のときヨー角加速度、横加速度、姿勢角の値が大きく、自動車の動揺が大きいことを示していたが、この原因については先の操舵角の検討で明らかになつたように操舵周波数が高く、操舵頻度が大きいこと、また over-steerの車では操舵による自動車の応答関数のゲインが高いことなどが相俟つて、動揺が大きくなつたものと解釈される。

以上のような結果は運転者を変えても同様な傾向がみられた。

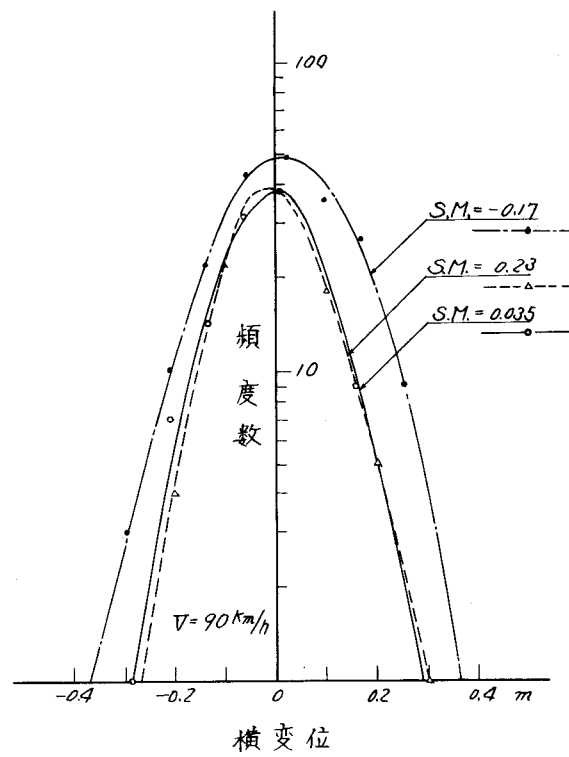
次に自動車の横変位量について調べると、第8-18図の頻度曲線から明らかなようにコースからのずれ量が over-steerの場合大きいようであるが、ヨー角加速度、横加速、姿勢角の値のような大きな相違はない。コースからのずれ量は実効値（r.m.s）で表わして0.1m程度で、無風時の直進走行での値0.07mよりは偏差が大きい。

また、車速が高くなると車の動揺が大きく、操舵速度も早く、しかも操舵角も大きくなっていることから、高速では操縦が困難になり、外乱に対する追従性が悪化するものと思われる。

これらの結果を総合して考察すれば、over-steer特性の車では操舵速度（操舵の周波数が高いこと）が大きく、操舵の回数も多く、忙がしい操舵を余儀なくされているようで、運転者にはかなりの負担を与えているものと推察される。このことは先の腕の運動からも明らかである。また自動車の動揺は大きく、コースからのずれ量も大きくなることから over-steerの車は不適當と考えられる。

このように under-steer特性が望ましいが、under-steer特性の度合については二つの under-steer特性を比較した結果では大きな差異は認められない。

種々の結果から総合的に判断すれば $S.M. = 0.035$ の軽い under-steer特性が望ましいものと考えられる。



第8-18図 重心点横変位の頻度曲線

8.5 結 論

本章の結果を要約すれば次の通りである。

- 1) 前後輪タイヤ圧を変更し、under, over-steer 特性の影響を検討した結果、突風による応答関数は操舵によるものと大体同様な傾向を示し、over-steer になるとゲインは増加すると同時に位相遅れも大きくなる。突風による応答関数のゲインが増加することは突風による影響度が大きいことを示しているもので、高速安定性の見地からはなるべくこの応答のゲインを減少させることが望ましい。
- 2) 人間がコースを操縦しているときの操舵力を入力として、操舵角を出力とする伝達関数は運転者の腕の筋肉運動を表わすものと考えられるから、不規則波形のスペクトル解析からこの伝達関数を解析することを始めて試みた。この応答特性は一次おくれ特性を示し、McRuer, Krendel などの研究者が示している特性と同様な結果がえられた。
- 3) 各車速での腕の運動を解析した結果、高速になるほど一次おくれ特性の時定数の値が減少する傾向が認められる。
このことは腕の筋肉を固くして、高い周波数にも応答しようとしているもので、人間の緊張度が表われているものと考えられる。したがって、高速になるほど人間が緊張していると解釈できる。
- 4) over-steer の車を運転する場合、運転者は腕の筋肉を固くして、非常に緊張している。over-steer 車の応答特性は位相遅れが大きい、人間は位相遅れの補償が苦手であるから緊張度を増すものと推察される。このようなことから判断すると高速安定性に対しても under-steer の車が望ましい。
- 5) 外乱の大きさと環境条件の影響を調べた結果、外乱が大きくなると、腕の筋肉を固くし、緊張が強くなる。また環境条件、特に台風襲来時のように雨や、暗い状態などの視界が悪い場合も緊張が強くなる。このように操縦された自動車の操舵力-操舵角特性から運転者の状態を把握しうることが立証されたので、今後この特性を自動車の高速安定性の評価に利

用しうるものと考える。

- 6) 突風などの攪乱外力を受けたとき、どの程度の制御誤差で運転しうるかを、人間を含めた人間－自動車系の総合特性から検討した。自動車の主要因子を変更して、運転者の状態を調べると同時に進路に対する追従性を解析した結果、高速安定性に関する評価基準はかなり明らかにすることができた。

参 考 文 献

- 1) 菊地 ; “ 人間 - 自動車系のかじ取り伝達関数 ”
自動車技術会 昭和 39 年秋講演会 前刷
- 2) 菊地 ; “ 適応制御系としてみた自動車の操縦性 ”
自動車技術 Vol. 18, № 11, 1964
- 3) 井口 ; “ 運転者の運動特性から見た自動車の走行安定性 ”
機械学会誌 第 62 巻 , 第 491 号
- 4) 1) の文献参照
- 5) D.T.McRuer, E.S.Krendel ; “ The Human Operator as a Servo System Element
Journal of the Franklin Institute, Vol. 5 and 6, 1959
- 6) R.G.E.Epple ; “ The Human Pilot.”
Bureau of Aeronautics (BU AER) Report AE-61-41, 1955
- 7) I.L.Ashkeans, D.T.McRuer ; “ A Theory of Handling Qualities derived from
Pilot-Vehicle System Considerations.”
Institute of the Aerospace Science
Paper № 62-39, 1962
- 8) 武田 ; “ 人間の静的不安定系の制御能力 ”
航空宇宙技術研究所報告 NAL TR-51, 1963
- 9) 井口 ; “ 機械運転者の動作特性 ”
自動車技術会 講習会教材 昭和 39 年

- 10) 菊池；“変位インピーダンスによる自動車の操縦性の評価”
自動車技術 Vol. 17, No. 3, 1963
- 11) 5) の文献参照
- 12) 8) の文献参照

第9章 総 括

第8章までの研究結果のとりまとめは各章ごとに行なつたので、本章では第8章までの研究結果の要点を列挙することにする。

(I) 第1章は緒論で本研究の持つ意義、必要性、研究の方針などの研究目的と従来の研究について述べている。自動車自体の運動特性の研究は以前から行なわれており、運動理論として体系化されつつあるが、どのような特性の自動車が操縦しやすいのか、あるいは安定なのか評価基準が確立されていない。これは、自動車は人間によつて操縦されるから人間に適した性質をもつようにすべきであるが、人間が自動車を操縦するときの特性が明らかでないためである。

そこで、自動車の動特性を周波数応答特性で解析する方法を検討し、自動車の主要因子を変えたときの自動車自体の動特性を調べた。次に人間も含めた、いわゆる人間－自動車系の総合特性を解析する方法を開発し、どのような特性が操縦しやすいかをこの総合特性から間接的に検討した。

高速走行中に自動車が受ける攪乱外力は大部分、突風などの空気攪乱外力と想定されるから、自動車の応答解析に適した短周期変動測定用の風速計を開発し、自動車が受ける突風の性質を調べたのち、多入力系スペクトル解析から、突風時の自動車の応答関数を実際の作動状態で解析することを試み、解析例を示した。

最後に、突風を受けた自動車を運転しているときの人間の緊張度を筋肉の運動から測定し、自動車の安定性の評価を試みた。

(II) 第2章は自動車の周波数応答特性を解析する三つの方法を検討した。解析方法としては周波数応答試験、過渡応答試験および相関関数による統計的手法が考えられるが、自動車にとり入れる場合には種々の制約を受ける。

周波数応答試験はえられた結果の数値的評価は簡単であるが、自動車に完全な正弦波入力を加えることがかなりむずかしい。運転者により周期的に操舵する方法を採用したが、測定値のばらつきが認められる。また、この試験には道巾、長さなどかなり大規模のテストコースを必要とする。

過渡応答試験は測定時間が短かく、テストコースも小規模なもので間に合う

し、測定後のデータ処理、計算が、比較的簡単であるが、入力波形、計算方法などで精度が左右されるので精度を十分検討する必要がある。

自動車の操縦性・安定性の解析に不規則波形のスペクトル解析の手法を適用することを初めて試みたが、良好な結果がえられている。したがって、不整地や突風などの不規則外力に対する自動車の応答を解析しうる可能性が見出された。

Ⅳ 自動車の周波数応答解析が注目されているが、どのような応答関数が操縦しやすいのか、あるいは安定であるのか応答関数の評価基準が確立されていないようである。

そこで、まず自動車自体の応答関数を完全に把握すべきものと考え、第三章では主要因子を変更した場合の操縦性・安定性におよぼす影響を検討した。

まず、under, over-steer 特性との関連であるが、over-steer の車の応答関数はゲインが高く、位相遅れが増大する傾向がある。under, over-steer のいずれの特性の車が運転しやすいかは、人間の補償動作がゲイン、位相のどちらが得意かによつて判断しうるものとする。

高速になるとゲイン余裕、位相余裕の両者共、減少し不安定になる。また High Cornering Power のタイヤを使用すると操縦が容易になり、しかも外乱による攪乱も小さくなるので、高速走行には望ましいタイヤである。

次に車架バネの影響、特にロール剛性についてはタイヤ Cornering 特性のような主要因子ではないが、車全体のロール剛性を増加し、特に前輪の分担比を大きくすることが望ましい。しかし自動車の振動乗心地と相矛盾する関係にあるので妥協点を見出す必要がある。

周波数応答関数からインパルス応答関数を算出し、任意に操舵した場合の進路予測を試みたが、良好な結果がえられているので、種々の解析に利用しうるものとする。

(IV) 第4章は自動車を操縦するときの人間の特性を直接測定することは非常に困難なことから人間を含めた人間－自動車系の総合特性から、どのような特性の自動車が操縦しやすいかを検討した。目標コースを設定し、人間がコースを見て操縦したときの自動車の軌跡を測定して、コースを入力として軌跡を出力とする応答関数が人間－自動車系の特性と考えられる。

そこでこの応答関数を過渡応答試験、相関関数による二つの方法で解析した。

自動車の応答特性は over-steer になると位相遅れが大きくなるが、人間は位相遅れの補償は苦手のように、人間－自動車系の位相遅れが増大し、コースに対する追従特性が悪化する。運転者にとって位相遅れの補償はかなりの負担になると考えられるから over-steer より under-steer の車が運転しやすいものと考えられる。

同一コースを車速を変えて運転した結果、高速になるとコースの短い波長に対するゲインが低下すると同時に位相遅れが増加し、追従性が悪化することが明らかになった。このことは高速になると操縦しにくいという、運転の常識を裏付けるものと考えられる。

自動車の応答特性を波長で整理すると、高速ではゲインは低下し、位相遅れは大きくなる。高速で自動車を運転する場合、このような自動車の速度による特性変化と高周波に対する人間特性の低下の二つの原因でコースに対する追従が悪くなる。

その他、色々の因子についても検討したが、人間は制御対象により動特性を変更しうる、いわゆる適応制御系で、ゲインの変更は比較的容易に行なえるが、位相遅れの補償は困難なようである。したがって位相遅れの小さい応答特性の自動車が運転しやすいものと推察される。

(V) 第5章は従来の風速計の動特性を解析し、新たに開発した球型風速・風向計について述べる。気象観測用として使用されている風速計の中で動特性が最も良好とされているプロペラ式風速計でも応答特性を解析した結果、応答周期は数秒以上である。しかも風向が変動するときは矢羽根の動くまでの時間遅れがあるから、風向変動によりかなり動特性が低下する。

自動車の応答解析には数サイクル程度の変動風速の測定が必要であるから、

従来の気象用測定器を利用することは無理で、しかも車載する場合には、計器の寸法、重量、電源などに制約を受ける。このようなことから、自動車の応答解析に適した球型風速計を開発した。この風速・風向計も開発初期にはいろいろ問題があつたが、球に穴をあけることによつて抗力係数も風速に対し一定となり、不安定な現象を除去できた。

(VI) 第6章は先に開発した風速計を用いて、名神高速道路附近の比較的地形変化の少ない平坦な場所での定地点の風の性質と走行中に自動車が受ける風の性質を調べた。

定地点での風の乱れの性質について調べた結果、風速・風向は同様な性質を有し、変動値・指数などの風の性質を示す各値はある範囲内にあるものと推定される。

走行中に自動車が受ける突風の測定結果から対車風速を算出した結果、定地点での風の性質と同様な傾向を示すことから、気象条件・地形・進路方向などに急激の変化のないごく短区間の道路などでは、定地点の測定結果から走行中に自動車が受ける突風の推定も可能であろうと想像される。しかし定地点の風と走行中に受ける風の性質が同じか否かは同一地点での同時測定から詳細に検討する必要がある。

また、風速・風向が共に正規分布で、しかも、両者の相関関係が少ないことから、自動車に加わる空気攪乱外力の発生確率も想定できるのではなからうか。いずれにしても、今回の測定データは数例に過ぎず、今結論を下すのは早計と考えられる。今後、数多くの資料が収集されることが望まれる次第である。

(VII) 自動車の高速安定性を解析するためには、まず突風が加わった時の自動車の応答関数を知る必要がある。従来の研究は自動車に働く横方向力とヨーイングモーメントの外力に対する高速安定性を検討し、一方空気外力に関しては風洞試験と、それぞれ別個に研究されているだけで、この両者を結び付けた研究は余り見当たらないようである、しかもこれらの研究は一定外力、すなわち定常風に関するものか、あるいはステップ状入力に対するものが大部分で、自然風についての高速安定性の解析は行なわれていない。

第7章は多入力系スペクトル解析の手法を応用し、突風に対して修正操舵を行なった一般運転状態で、操舵および突風による応答関数を求める方法を検討し解析例を示した。

このような手法を利用すると、自動車の操縦性・安定性の評価に必要な操舵入力、攪乱外力に対する各種の応答関数が一度に求められる利点がある。

不規則波形のスペクトル解析から種々の自動車応答関数が実際の作動状態で算出できることが明らかとなつたので、今後、この種の解析方法が操縦性・安定性の解析に重要な役割を果すものと考えられる。

(Ⅷ) 第7章のような解析手法を用いると操舵入力と突風外力に対する応答関数が実際の作動状態で求められるから、自動車の因子を変えて、これらの応答関数を解析すれば各因子の検討が可能になる。そこで第8章では、まず前後輪のタイヤ圧を変更し、under, over-steer特性の影響を検討した。突風による応答関数は操舵によるものと大体、同様な傾向を示し、over-steerになるとゲインは増加すると同時に位相遅れも大きくなる。

突風による応答関数のゲインが増加することは突風による影響度が大きいことを示しているもので、突風などの外乱による影響が小さければ、人間の補償操舵を必要としないから、高速安定性を見地からはなるべくこの応答のゲインを減少させ、影響度を小さくすることが望ましい。

次に人間がコースを操舵しているときの操舵力ー操舵角特性を不規則波形のスペクトル解析から算出することを試み、この伝達関数が人間の腕の運動特性を表わしているから、これから人間の緊張度を判定しうることを明らかにした。

解析結果では、高速になると運転者は腕の筋肉を固くして、緊張しており、高速走行は運転者にかかなりの負担であることが認められる。また over-steerの車を運転した場合、運転者は緊張するから、高速安定性に対しても under-steerの車が望ましい。

外乱が大きくなつたり、視界などの環境条件が悪化すると運転者は緊張することも認められた。このように操縦された自動車の操舵力ー操舵角特性から運転者の状態を把握しうることを立証できたので、この特性を自動車の安定性の評価に利用することを提唱したい。

次に、突風などの攪乱外力を受けたとき、どの程度の制御誤差で運転しうるかを、自動車のコースのずれ、姿勢角、操舵角などの統計的諸量から調べ、人間を含めた人間－自動車系の総合特性を検討した。

このように自動車の主要因子を変更して、運転者の状態を調べると同時に進路に対する追従性を解析した結果、高速安定性に関する評価基準はかなり明らかになり、本論文の目的を達成することができた。

謝

辞

終りに臨み、本研究を行なうにあたり、種々懇切なご指導、ごべん達を賜わった大阪大学工学部 千田香苗教授、また本研究を行なうについて示唆を賜わり絶えず御激励下さったダイハツ工業株式会社顧問 藪健一氏ならびにダイハツ工業株式会社研究部長 林守雄氏に謹んで感謝の意を表する。

さらに、本研究の実施に際して、終始懇切なご教示とご支援を戴いた文部省、統計数理研究所 赤池弘次室長、ダイハツ工業株式会社 研究部研究第二課 雨宮陽三課長および研究の実施に直接協力下さった電子計算機室 連口清隆君、研究第二課 秋山輝男、黒瀬惇君その他多くの方々に厚く感謝の意を表する。