

道路走行シミュレータに関する
共同研究報告書(その3)

平成7年3月

建設省土木研究所
財団法人日本自動車研究所

道路走行シミュレータに関する 共同研究報告書（その3）

建設省土木研究所

（財）日本自動車研究所

道路部 部長	神崎 紘郎 ^{*)}	研究担当理事	岩元 貞雄
総合交通安全研究官	松村 哲男	研究主管主任技術研究員	平松 金雄
道路研究室長	中村 亮	第二研究部技術研究員	佐藤 健治
道路研究室主任研究員	日置 洋平 ^{**)}	〃 〃	相馬 仁
道路研究室研究員	今長 信浩	〃 副研究員	宇野 宏
道路研究室	池原 圭一	〃 技師補	若杉 貴志

*) 現 (財) 土木研究センター技術研究所 常任参与

**) 現 日本道路公団東京第一管理局技術部交通技術課 課長代理

要 旨

本報告は、建設省土木研究所と（財）日本自動車研究所との共同研究として平成2年度から平成4年度まで実施した、「道路走行シミュレータに関する研究」について平成4年度分の最終成果についてとりまとめたものである。

本共同研究は、道路走行シミュレータの開発にあたって必要となる車両運動方程式等について検討を行うものである。平成4年度は、ABS、TCS、4WS等の新しい動力性能をもった車両の運動特性、普及状況等を調査し、それらの運動特性を道路走行シミュレータで模擬する場合の可能性について検討した。

キーワード : シミュレータ、車両運動方程式、ABS、TCS、4WS

目 次

1. はじめに	1
1. 1 共同研究の目的	1
1. 2 共同研究の実施内容	1
2. 新しい車両機能に関する検討	4
2. 1 走行性能に関する新しい車両機能	4
2. 2 新しい車両機能を有した車両の普及状況	8
3. 新しい車両機能をもった車両と従来の一般車両との走行性能に関する差異	12
3. 1 A B S	12
3. 2 T C S	15
3. 3 4 W S	17
4. 新しい車両機能（A B S、T C S、4 W S）に関する車両運動模擬の可能性検討...	22
4. 1 車両運動模擬の際の留意点	22
4. 2 新しい車両機能の土木研究所所有シミュレータへの適用について	24
5. その他の検討事項	
5. 1 駆動軸を変更した場合の車両運動模擬	27
6. おわりに	28
参考文献	29
巻末資料－1	30
巻末資料－2	48

1. はじめに

1. 1 共同研究の目的

近年、道路交通の増大及び運転者の高齢化や女性ドライバーの増加に伴って、道路に対するニーズも多様化してきており、中でも質的な安全性、快適性に優れた道路の整備が強く要求されている。また、都市化の進展により道路の構造が益々複雑化するなかで、より一層安全性、快適性に優れた道路整備の必要性が求められている。

このような社会的要請に対して、従来の実車を用いた現場走行実験や試験走路での実物大走路模型実験だけでは設定条件、被験者等に制約があり、特に高速走行時における各種多様な実験、高齢者・女性・身体障害者を被験者とした実験、人間工学的指標の評価に関する実験等においては被験者の安全性や実験条件の再現性に問題が多く、実施が困難なものとなっている。

そこで、実走行によるデータ収集が困難な実験についても安全性と再現性を確保しながら広範囲の条件のもとで精度良く実験を行う手段として、道路走行シミュレータの開発が必要である。道路走行シミュレータにおいては、被験者が模擬運転席から見える道路状況に従って、ハンドルやブレーキなどの運転操作を行うが、そのときの道路状況は時々刻々における被験者の運転操作に従った車両の位置や走行速度をもとに計算されたものである必要がある。このようなことから、道路走行シミュレータの開発にあたっては、ハンドルやブレーキなどの運転操作に従った車両の位置や速度を計算するために必要な車両運動方程式を検討することを目的として平成2年度から3ヶ年計画で共同研究を開始した。

1. 2 共同研究の内容

本共同研究では、車両の挙動に関する基礎資料をもとに、開発された車両運動方程式プログラムの再現範囲・再現レベル等に関してプログラムの妥当性を検討するとともに、道路走行シミュレータを具体的に開発する際に必要となる道路走行シミュレータにおけるハード機能とソフト機能に関する検討を行う。また、新しい車両特性（ABS、TCS、4WSなど）に関する車両運動模擬の可能性について検討を行う。なお、平成2年度～平成4年度の3年間にわたる共同研究の研究項目としては、表1.1に示すとおりである。また、共同研究の研究項目のフローは図1.1に示すとおりである。なお、平成4年度の検討課題である新しい車両特性に関する車両運動模擬の可能性検討については、当初計画では新しい車両特性に関する車両運動プログラムの開発までを予定していたが、土木研究所のシミュレータに組み込まれた運動方程式が簡易式であること、モーションベースが無いこと等を考慮し、当初計画のプログラムの開発までは行わず、走行性能に関する一般車との差違を整理するに留めた。

道路走行シミュレータに関する共同研究に関する研究フロー

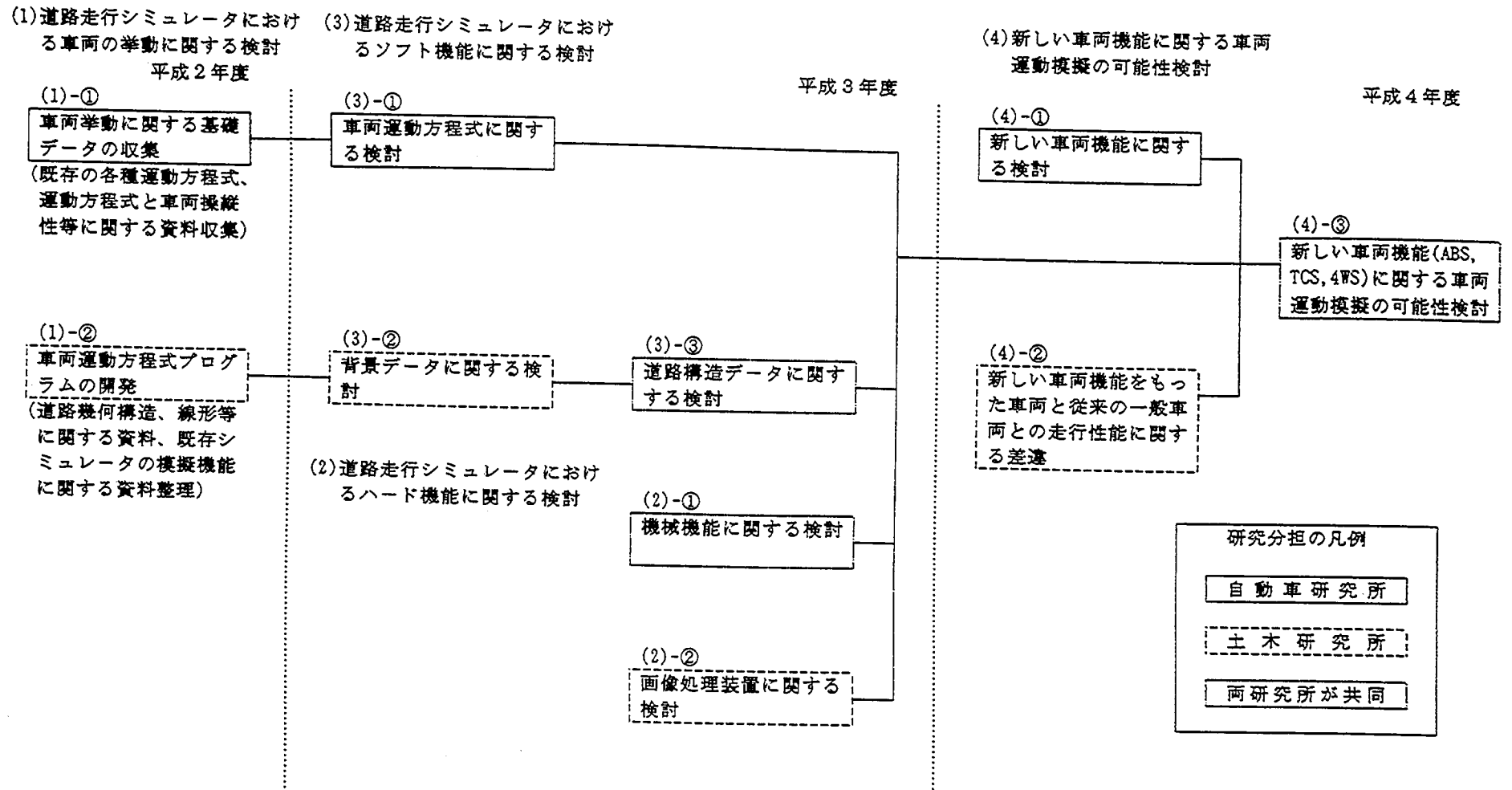


図-1.1 道路走行シミュレータに関する共同研究に関する研究フロー

表 1. 1 研究項目および実施年度

研 究 項 目	実 施 年 度		
	2 年 度	3 年 度	4 年 度
(1)道路走行シミュレータにおける車両の挙動に関する検討	—		
(2)道路走行シミュレータにおけるハード機能に関する検討			
(3)道路走行シミュレータにおけるソフト機能に関する検討			
(4)新しい車両機能に関する車両運動模擬の可能性検討			

1. 3 平成4年度の研究実施内容

平成4年度においては、土木研究所と日本自動車研究所は表-1. 2に示す研究項目及び研究分担で研究を実施した。

表 1. 2 平成4年度の研究細目及び研究分担

研 究 項 目	研 究 細 目	研究分担	
		PWRI	JARI
(1)新しい車両機能に関する検討	①車両の高性能化 ②新しい車両特性を搭載した車両の普及状況	○ ○	
(2)新しい車両機能をもった車両と従来の一般車両との走行性能に関する差異	①A B S ②T C S ③4 W S		○ ○ ○
(3)新しい車両機能 (ABS、TCS、4WS)に関する車両運動模擬の可能性検討	①車両運動模擬の際の留意点	○	○

(注) PWRI：土木研究所、JARI：日本自動車研究所

2. 新しい車両機能に関する検討

近年、自動車の動力性能、走行性能及び安全性向上のための技術は著しく進歩し、いわゆる新しい車両機能を有する自動車の普及も進みつつある。そこで、道路構造令の前提となっている車両構造、性能等に関する車種別特徴や経年変化を把握することは、道路走行シミュレータにおいて幾何構造関連の実験解析を行う際に、模擬車の初期諸条件を設定する上で大変重要となる。

以下、各種統計資料及び文献より車両特性について調査した結果を示す。

なおここでは、道路走行シミュレータにおける模擬の可否にとらわれずに車両特性値変化の一般論としての記述とした。

2. 1 走行性能に関する新しい車両機能

(1) 車両寸法

全長、全幅、全高、車両重量及び車両総重量は、1965年以降全車種とも、横ばいもしくは、大きくなる傾向にある。ここで、大型貨物車（10～11t積）では全長、全幅、全高、車両重量及び車両総重量は道路運送車両法及び道路交通法に規定される限界値直前まで到達していることがわかった。図2-1及び図2-2は普通乗用車（3、5、7ナンバー車）の全長、全幅、全高、車両重量及び車両総重量の変化を、また図2-3及び図2-4は普通貨物車のそれを示したものである。

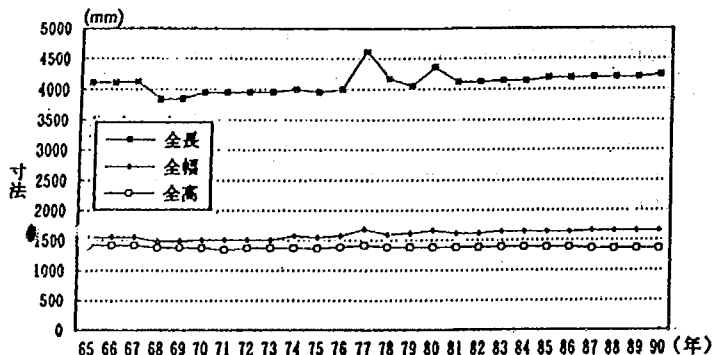


図2-1 全長・全幅・全高の推移（普通乗用車）

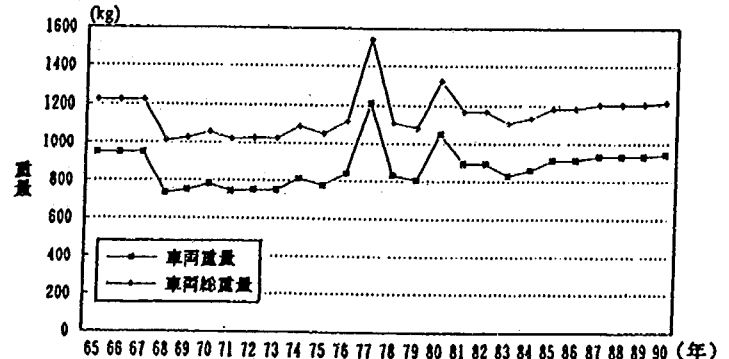


図2-2 車両重量・車両総重量の推移（普通乗用車）

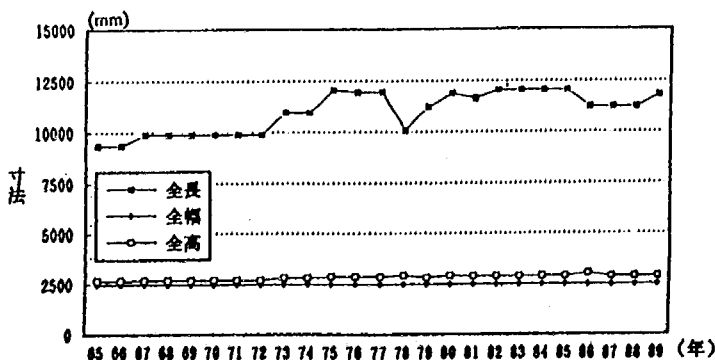


図2-3 全長・全幅・全高の推移（大型貨物車）

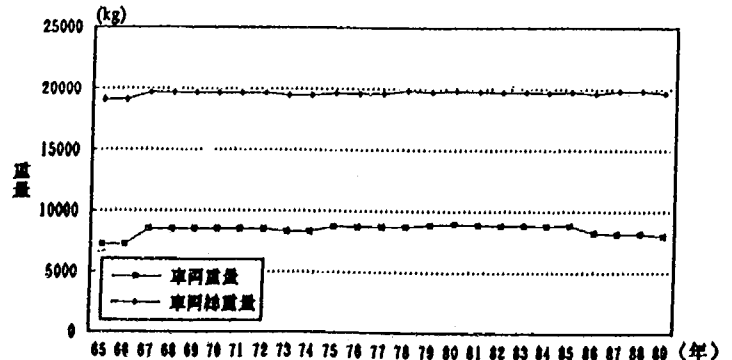


図2-4 車両重量・車両総重量の推移（大型貨物車）

(2) 動力性能

1) 排気量・最高速度

排気量は、長距離型バス及び大型貨物車を除けば全般に大きくなる傾向にある。図2-5は普通乗用車、図2-6は長距離型バスの排気量の変化を示したものである。

最高速度は全車種とも大きくなる傾向にあるが、近年の傾向をみると車種によってかなり差があり、普通自動車は180km/h前後、大型貨物車、長距離バス及びセミトレーラが140km/h前後、小型貨物車及び路線用バスが110km/h前後となっている。

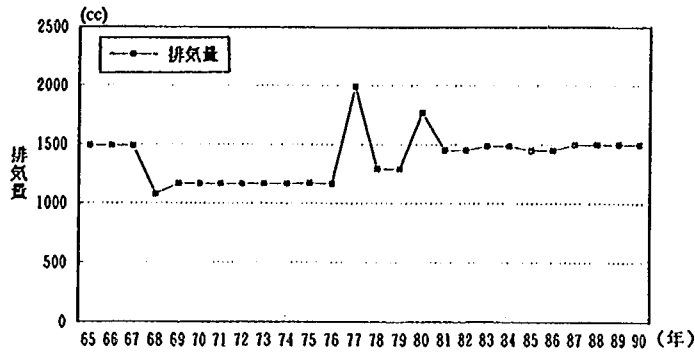


図2-5 排気量の推移（普通乗用車）

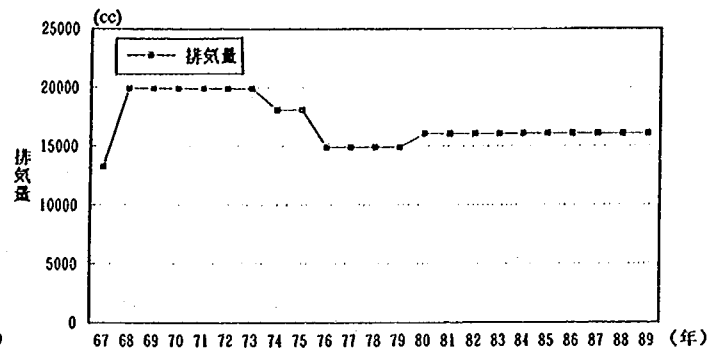


図2-6 排気量の推移（長距離型バス）

2) 登坂能力

登坂能力は1965年以降普通乗用車及びセミトレーラでは横ばい傾向にあるが貨物車及びバスは性能が上昇傾向になっている。これは従来、乗用車に比較して低性能の傾向にあった両車種の性能の向上を物語っているといえる。図2-7は普通自動車、図2-8はバスの登坂能力の変化を示したものである。

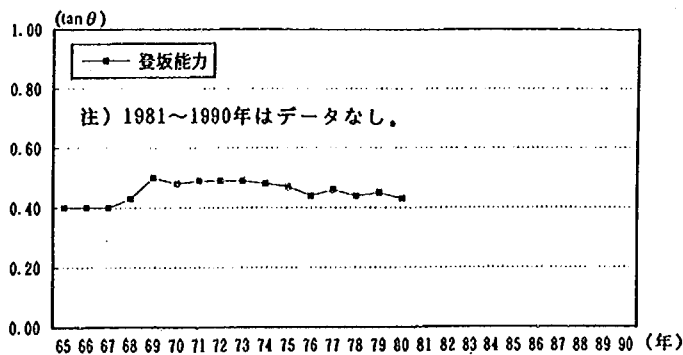


図2-7 登坂能力の推移（普通乗用車）

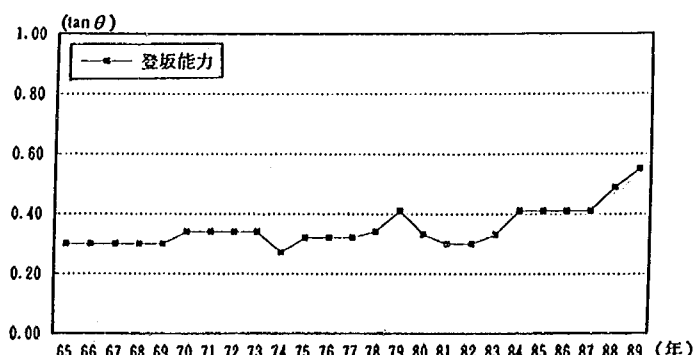


図2-8 登坂能力の推移（小型貨物車）

3) エンジン性能

エンジンの性能に係わる最高出力、車両重量当り出力（トン当りの馬力）及び最大トルクは全車種とも1965年以降上昇しておりエンジンの高出力化が進んでいることがわかる。図2-9に普通乗用車の最高出力、トン当たりの馬力の変化を示す。

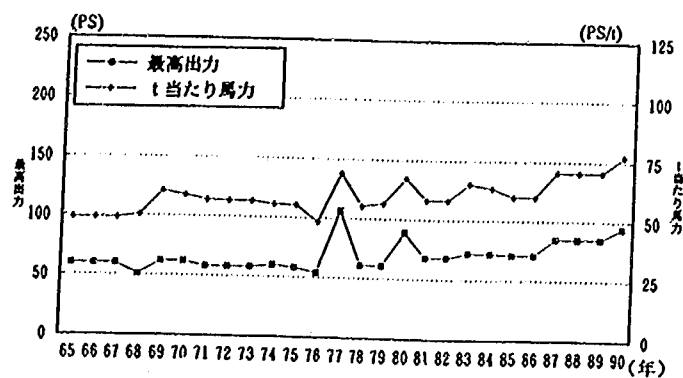


図2-9 最高出力・トン当り馬力の推移（普通乗用車）

(3) 車両性能基準の変遷

一例として、道路構造令（昭和33年制定、45、58年全面改訂）における縦断勾配の基準値算定根拠に用いられた自動車性能基準の変遷について述べる。

基準の算定方針としては、制定以来一貫して次に示すとおりである。

- ・乗用車に対しては、ほぼ平均走行速度で登坂できるように定める。
- ・普通トラックに対しては、ほぼ設計速度の1/2の速度で登坂できるように定める。

すなわち、これらの条件のもとに、各改訂年代の乗用車及び普通トラックの基準となる重量当りの馬力を設定することで、車種別の走行性能曲線を描き、設計速度に応じた登坂可能勾配を算出している。

各年代（昭和33、45、58年）の道路構造令において、車両性能の基準となった国内生産車の馬力に関する諸元の標準値一覧を表2-1に示す。

【'65～'90にかけてのトン当り馬力の連続的推移は前項の図2-7を参照】

表 2 - 1 各年代における国内生産車の標準的諸元

			出 力	最高速度	車両重量	最大積載	車両総重量	トン当り馬力
3 3 年	乗 用 車	A	62PS	110Km/h	1,250Kg	330Kg	1,580Kg	39.2PS/ton
		B	43	115	870	295	1,165	36.9
		C	21	100	665	220	885	23.7
		D						
	ト ラ ッ ク	A	155	85	5,755	8,000	13,755	11.3
		B	125	69	4,505	6,000	10,505	11.9
		C						
		D						
4 5 年	乗 用 車	A	105PS	155Km/h	1,280Kg	330Kg	1,610Kg	65.0PS/ton
		B	62	130	1,065	330	1,395	45.0
		C	43	120	1,890	275	1,166	40.0
		D	45	120	735	275	1,010	45.0
	ト ラ ッ ク	A	155	85	5,590	8,000	13,590	11.5
		B	125	90	4,425	6,000	10,425	12.0
		C	135	90	4,920	6,000	10,920	12.5
		D	70	95	2,000	3,000	5,000	14.0
5 8 年	乗 用 車	A	135	160	1,460	275	1,735	77.8
		B	110	165	1,110	275	1,385	79.4
		C	100	160	985	275	1,280	78.1
		D	71	150	810	275	1,085	65.4
	ト ラ ッ ク	A	185	95	5,880	8,000	14,040	13.2
		B	135	90	4,615	6,000	10,780	12.5
		C	155	105	4,595	6,000	10,760	14.4
		D						

このように、登坂性能を示すファクターである最大積載時のトン当りの馬力は年々向上しており、今後は、縦断勾配区間の定常走行あるいは高速走行が確保されていくものと考えられる。

2. 2 新しい車両機能を有した車両の普及状況

(1)エンジン性能

普通乗用車のうちE G I及びD O H Cエンジン装着車は図2-10に示すように1977年以降著しい増加傾向にあり、近年では新車登録台数の約60%に達している。しかし、普通乗用車のうちターボ車は横ばい傾向にあり近年でも約10%に止まっている。

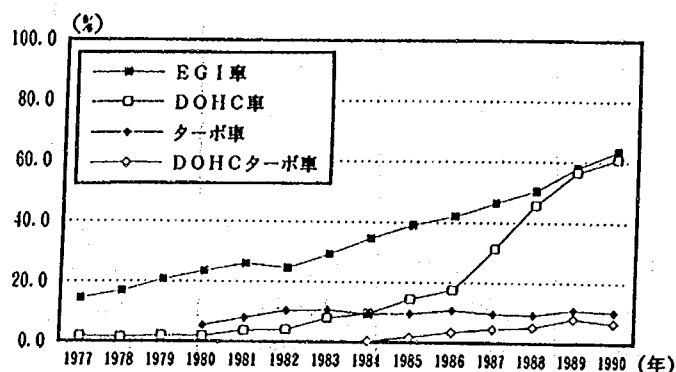


図2-10 動力性能別新車登録状況(普通乗用車)

(2)駆動機能

図2-11にF F車、オートマチック車、4WD車の変化の傾向を示す。これによると1975年以降の傾向を見ると普通乗用車のうちF F車、オートマチック車の占める割合は増加の傾向にあり、1990年には、両者とも70%に達している。これは、より居住空間の広いF F車や操作の容易なオートマチック車がドライバーにこのまれる傾向にあるからだと思われる。しかし、4WD車は10%程度であり、増加傾向にあるといっても、現時点ではまだ、特殊な用途車を目的として保有されていると思われる。

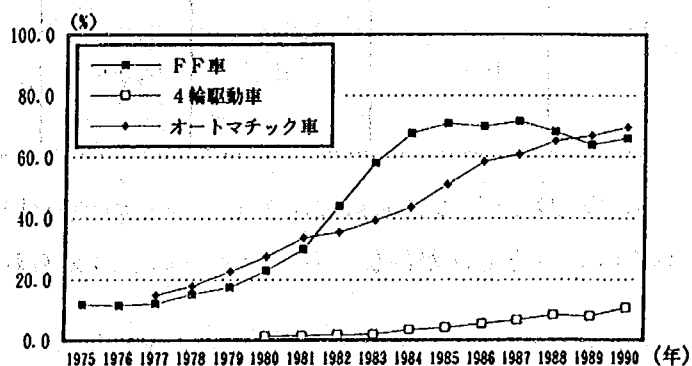


図2-11 駆動機能別新車登録状況(普通乗用車)

(3) タイヤ種別

図2-12に乗用車用タイヤの生産本数とラジアルタイヤの生産比率の変化を示す。これによるとラジアルタイヤの比率が約90%まで高まっていることがわかる。トラック及びバス用のラジアルタイヤも同様の傾向にあり、1990年ではトラック及びバスが約70%、小型トラック用が約55%となっている。また、新車用・補修用ラジアルタイヤの販売比率も同様に増加の傾向にあり、乗用車用では1990年時点で、約90%を占めている。また、冬用タイヤの生産比率をみると図2-13に示すようにトラック及びバスは増加の傾向にあるが、小型トラック及び乗用車は横ばいの傾向にあり、1990年ではトラック及びバス用が約43%、小型トラック用が約21%、乗用車用が約25%となっている。次に冬用タイヤの販売種別を見ると図2-14に示すように近年のスパイクタイヤの禁止等の社会背景からスタットレスタイヤが急激に増加する傾向にあり、1990年には、全冬用タイヤの約60%を占めるまでにいたっている。

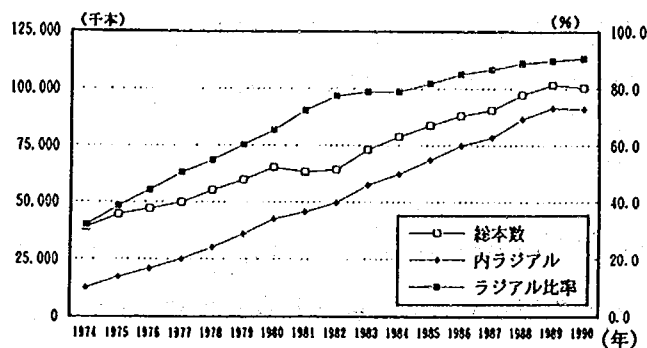


図2-12 ラジアルタイヤの生産比率の推移 (普通乗用車)

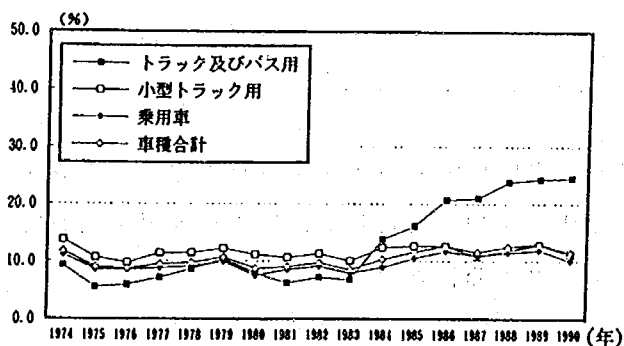


図2-13 冬用タイヤの生産比率

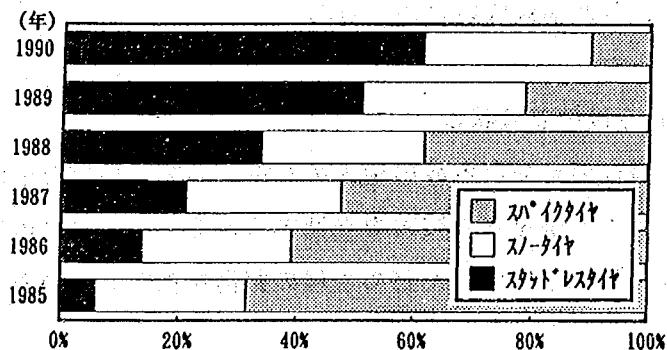


図2-14 冬用タイヤの販売比率

(4) 制動機能

ABS (アンチロックブレーキシステム) については現在12トン以上の一般路線バス以外のバスと13トン以上のトラクターに義務づけられている(「道路運送車両の保安基準」)。また、近年はかなりの車種の乗用車にもオプション装備として設定されている。しかしながら現時点での普及率は低く、まだあまり一般的な装備とはいえないであろう。なお、リターダーについてはトラックやバスなどの大型車両に補助ブレーキとしてかなり普及していると推計される。

(5)操縦機能

近年のパワーステアリングの装着率を図2-15に示す。これによるとパワーステアリングは著しいのびを示しており1988年には約94%の新車に装備されておりごく一般的な装備になりつつある。また、近年のパワーステアリングシステムは運転者の一般的な操作を考慮して操縦安定性を向上させる車速感応型パワーステアリングシステムが主流となりつつある。

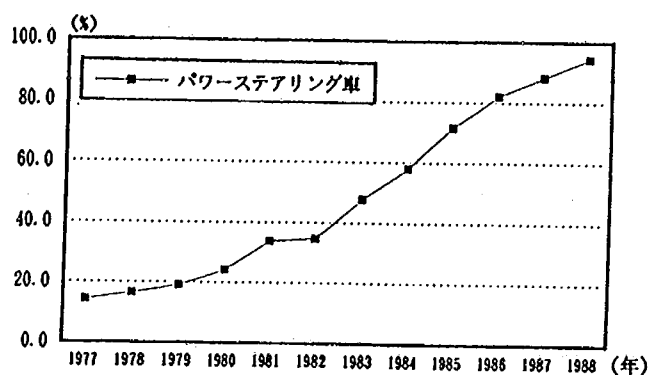


図2-15 パワーステアリングの装着率 (普通乗用車)

(6)操舵機能

近年では、自動車の高性能化に伴い、四輪操舵(4WS)システムが注目を集めている。現時点は、操安性向上を課題として、他のシステムとの組合せ、例えばABSとの連動性、前後輪アクティブ4WS等さまざまな研究が続けられている段階であり、普及状況は、乗用車に1985年8月に世界初の4WSが国産車に採用されたが、今のところ、一部の車種にオプション装備として設定されている程度であり、普及率は低いと思われる。

(7)今後の普及状況

最近の自動車事故の増大の対策として、事故を未然に防ぐ車両自体の事故回避装置の開発や事故から人の安全を守り被害を軽減する性能の向上などの安全車両対策の一貫として、日本自動車工業会では、1993年にほとんどの車種の整備を検討している(表2-2参照)。

表 2-2 車両の安全対策強化の実施状況（装備率）と今後の計画（乗用車）（％）

項 目	1989年	90	91	92	93	94	備考(軽)
エアバッグ	11.2	19.1	—	—	→	*100	*94年
後席3点式座席ベルト	42.9	65.2	→	100			*93年
ハイマウントストップランプ	70.1	83.5	—	→	*100		90年完了
二重ブレーキリターンシステム	85.0	98.3	100				90年完了
燃料噴出防止装置	63.2	77.2	—	→	100		93年
ロータールーフまたは相当品	44.3	57.0	→	100			92年
サイドビーム	0	19.1	—	→	100		93年
シートベルト装着警報装置	4.7	11.3	—	→	100		94年
室内難燃化材料	2.8	20.0	—	→	100		93年
アンチロックブレーキ	66.4	76.5	—	→	*100		*93年
四輪駆動機構など	72.9	81.7	—	→	100		91年

注：1. 装備率＝装備車種数／総車種数、軽乗用車を含む。
 2. *印は、ほとんどの車種の適用時期。
 3. 「四輪駆動機構など」とは、四輪駆動機構のほかにLSD（リミテッドスリップデフ）、TCS（トラクションコントロールシステム）を含み、これらのいずれかを装備することを意味する。

このことから、現在急速に車の性能が向上していると考えられ、1990年代後半には相当数の車両に対して基本性能の向上とともに安全対策性能の付加がなされると予想される。

以上、本章では近年の車両の高性能化とその普及状況について述べてきた。

以下に、シミュレータで模擬する基本性能として駆動、制動、操舵の3つの観点で考察する。

駆動性能としては、4輪駆動（4WD）をはじめTCS（トラクションコントロールシステム）、LSD（リミテッドスリップデフ）が普及し始めている。

この内、今後の普及性を考慮して、ドライバーのアクセル操作量によらずに有効な駆動力と車両の安定性を確保する制御機能であるTCSについて検討を進める。

次に、制動機能としては、ABSが今後普及すると考えられる。特に、ABSの効果である雪道での制動安定性や大型車の横滑り防止機能は道路の幾何構造を計画、基準化する上で配慮検討すべき点と言える。

さらに、操舵機能としては、高速での安定性、低速での小回り回転を確保できる4WSが近年注目されている。

以上の点より、検討対照とする新しい車両特性として駆動特性についてはTCS、制動特性についてはABS、操舵特性については4WSとした。次章よりそれらの特性について詳細に記述していく。

3. 新しい車両機能をもった車両と従来の一般車両との走行性能に関する差異

3.1 アンチロックブレーキシステム (ABS)

(1) ABS の機能

ABSの装着されていない従来の車両では、路面とタイヤの摩擦限界を超えるようなブレーキ操作を行うと車輪がロックすることがある。タイヤと路面の前後方向摩擦特性は一般に図-3-1のようにスリップ比に対する駆動力・制動力として表される。図中のスリップ比は以下の式で定義される。

$$s_b = (V_v - V_T) / V_T \quad \dots\dots\dots \text{制動スリップ比}$$

$$s_d = (V_v - V_T) / V_v \quad \dots\dots\dots \text{駆動スリップ比}$$

ここで、 V_v は車体の速度であり、 V_T はタイヤの周速度である。図をみると車輪がロックするスリップ比1.0では、スリップ角に関係なくコーナリングフォースがゼロとなっている。これは、車輪がロックした状態では前後方向の力は得られるが横方向の力は得られないことを意味している。すなわち、前輪がロックすれば操舵しても進路変更ができず、また後輪がロックすれば車体姿勢が不安定になるということがわかる。

ABS装着車では車輪のロックが防止されるため、横方向のタイヤ摩擦力がある程度得られ、その結果、制動中の進路変更や姿勢安定性を確保することが可能になる。いっぽう、タイヤの前後摩擦力（図中の制動力）はスリップ比0.1～0.2程度のところにピークをもっており、このスリップ比領域を連続して利用できれば制動距離が短縮することも考えられる。

このように、ABSは制動時の安定性や事故回避特性を向上させるとともにタイヤと路面の摩擦特性を有効に利用できる可能性をもった新技術であるといえる。

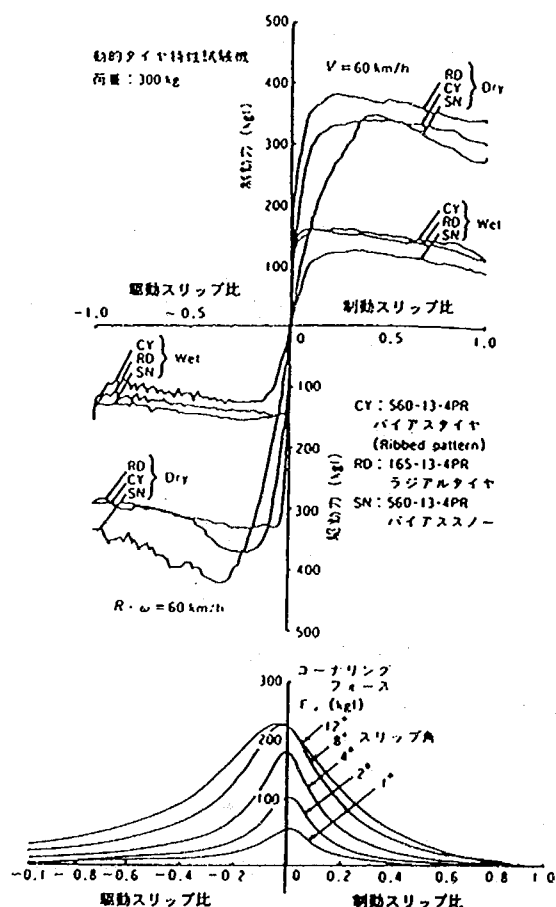


図-3.1 タイヤの駆動・制動特性の例⁽⁴⁾

(2) ABS の作動原理

近年普及しつつある乗用車用ABSは4輪すべてのロックを防止するものであり、デジタルコンピュータを用いてブレーキ液圧の制御を行っている。この液圧制御は車輪がロックしてから行うのではなく、ロックしそうな状況を検出して行っている。このためコンピュータ内部で

スリップ比を求め、各輪のスリップ比がある基準値を超えるとロックしそうな状況と判断して液圧を制御しロックを防止する。なお、スリップ比の算出に必要な車体の速度

(速度計指示値とは異なる対地速度)は、回転センサにより得られる車輪回転速度から推定している。

ABSの液圧制御はソレノイドバルブを用いて行っており、複数のバルブを組み合わせることにより、液圧を“減圧”・“増圧”・“保持”させるような機能をもたせている。具体的なABSの作動に

ついて模式化した図を図-3.2に示す。図中のA点以前ではABSが作動していない状態、A点以降では作動している状態を示している。A点で車輪がロックしそうなと判断し“減圧”指令を出す。その後、車輪回転の復帰が始まったC点で元の液圧に徐々に戻すため“増圧”指令を断続的に出すといった制御が繰り返される。

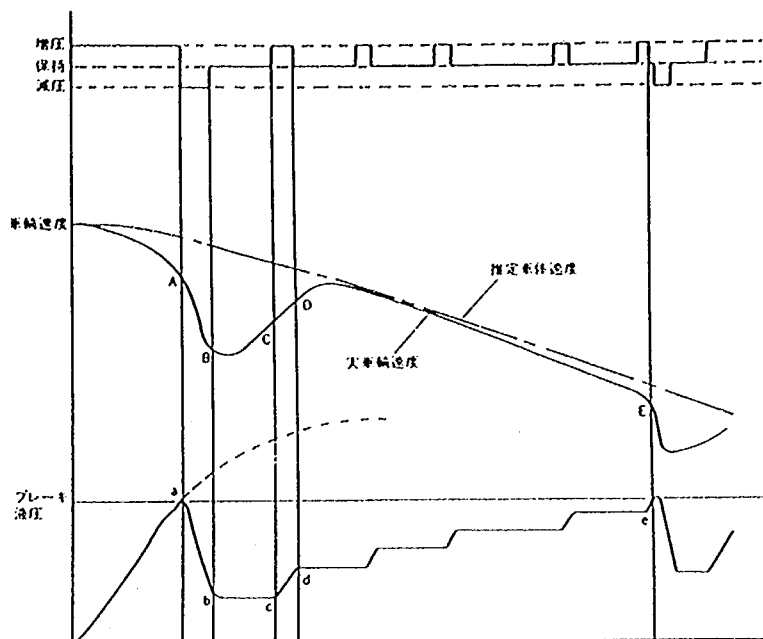


図-3.2 ABSの制御概念図⁽²⁰⁾

(3) ABSの基本構造

ABSの基本的なシステム構成は図-3.

3に示すようにセンサ部、制御部およびアクチュエータ部から成っている。センサ部は各車輪の回転速度を検出する部分であり、電磁ピックアップを用いた検出方法としている。ABSの種類によってはこれらの回転センサのほかに車体の加速度を検出するセンサを備えたものもある。

制御部は、センサ部により得られた各車輪の回転速度から車体速度を推定し、各輪のスリップ比を求めて車輪ロックが生じないようにアクチュエータ部に指令を出す働きをする。アクチュエータ部は、制御部からの指令により車輪側のブレーキ液圧を調整する働きをする。車輪のスリップ比が大きくなり過ぎるとアクチュエータが液圧を減ずるよう作動する。こ

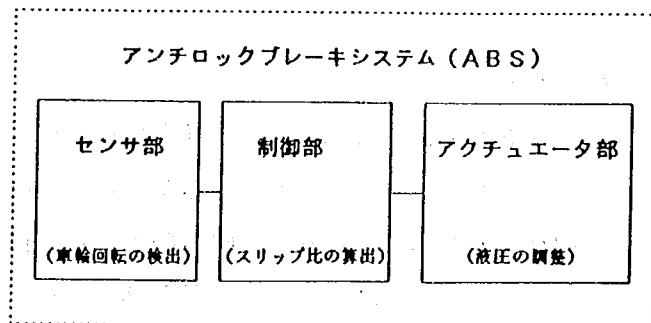


図-3.3 ABSのシステムブロック図

の場合、大きくなったスリップ比を元にもどすためには車輪の回転を上昇させる必要がある。通常のABSではブレーキ液圧が減少するとタイヤの摩擦力により車輪回転が上昇するような方式となっているが、車輪回転の復帰を早めるため積極的に駆動力を与える方式も一部にみられる。

具体的なABSの構成例として、4センサ2チャンネル方式、3センサ3チャンネル方式、4センサ3チャンネル方式（図-3.4参照）、4センサ4チャンネル方式などがある。

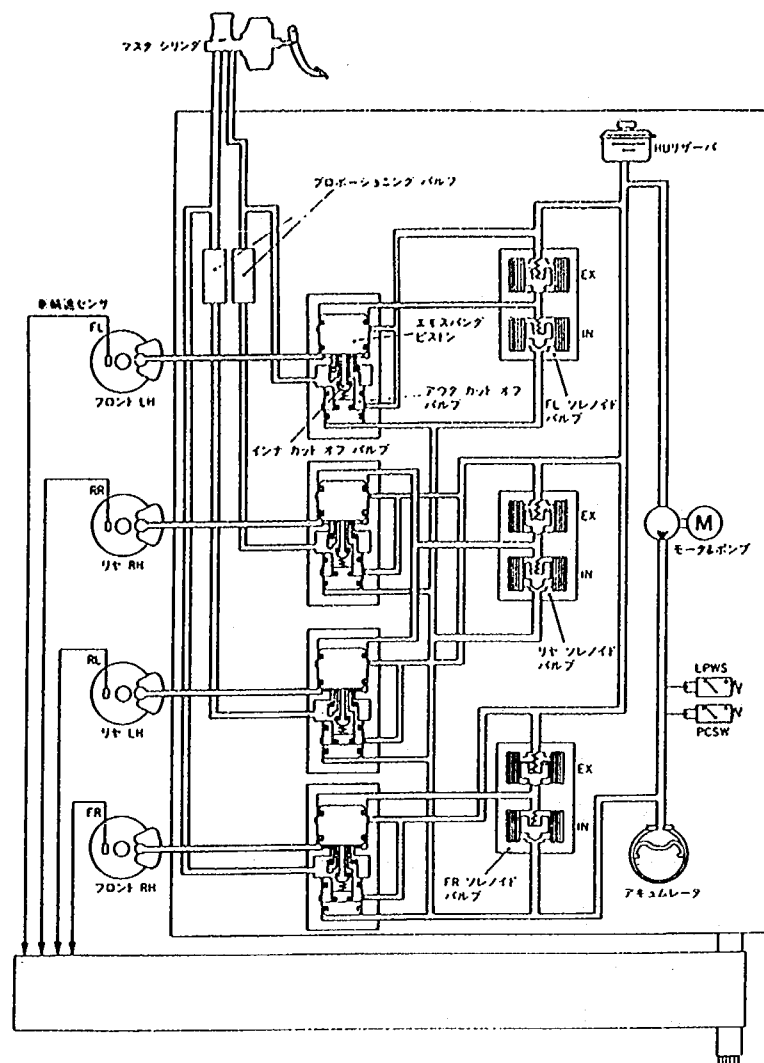


図-3.4 ABSの液圧回路図 (20)

(4センサ3チャンネル方式の例)

(4)ABSの効果

ABS非装着車の場合、制動中に車輪ロックが生じると図-3.1に示したようにタイヤのコーナリングフォースが発生しなくなるため、路面状態（摩擦係数の左右差や変動、道路の横断勾配など）や車両の状態（制動力の左右差、荷重配分など）で生じるわずかな外乱により、車体姿勢が不安定になりやすい。車体姿勢が不安定となる典型的な状態として、摩擦係数の異なる2種類の路面をまたいで走行した場合があげられる。このような厳しい条件におけるABS装着車と非装着車との姿勢変化について比較した例を図-3.5に示す。この例か

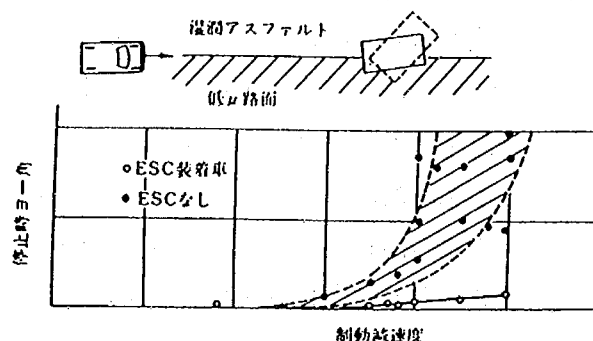


図-3.5 ABSによる姿勢安定性向上の例 (7)

ら、ABS（図中では“ESC”と呼称）によって姿勢変化（図中の“停止時ヨー角”）が大幅に減少することがわかる。

ABS装着車では、このように姿勢安定性が向上するだけでなく、急制動中でも操舵による進路変更が可能となる。図-3.6は急制動中のハンドル角に対する応答を最大ヨーレイトで示した例である。ABS非装着車（図中の“ESCなし”）では操舵してもヨーレイトがほとんど生じないのに対し、ABS装着車では制動なしの場合（図中の“操舵のみ”）とそれほど変わらない応答が得られている。このような効果により、事故回避性能が向上するものと考えられる。

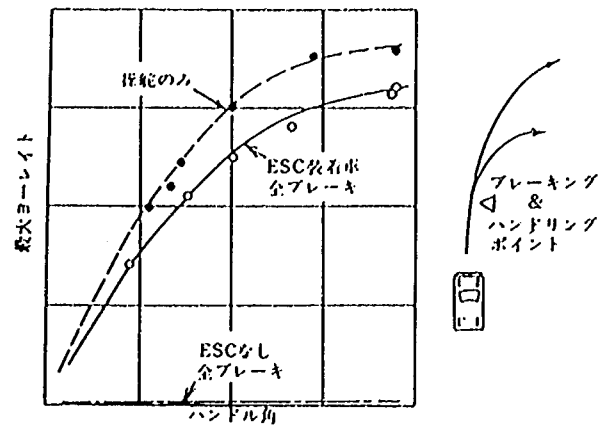


図-3.6 制動中のヨーレイト応答の例⁽¹⁾

3.2 トラクションコントロールシステム（TCS）

(1) TCSの機能

TCSの装着されていない従来の車両では、路面とタイヤの摩擦限界を超えるような駆動力をかけると駆動輪が空転してしまう。とくに雪路や凍結路などのすべりやすい状態では微妙なアクセル操作が必要となる。また旋回走行中に過度の駆動力がかかるとステア特性が変化し、場合によってはスピンなどの異常挙動に至ることも考えられる。このように必要以上の駆動力が作用した場合、路面とタイヤの摩擦を有効に利用できるよう駆動力を制御するシステムがTCSである。なお、トラクションコントロールシステムの略称としてTCSのほかに「TCL」、「TRC」、「ASR」などが用いられている。

(2) TCSの作動原理

TCSの作動原理は、基本的には前述のABS（図-3.2参照）と同じであり、車輪の回転速度から車体の速度を推定し各輪のスリップ比を求めて、適切なスリップ比になるよう制御するものである。TCSの典型的な構成例を図-3.7に、またこの構成のTCS制御につ

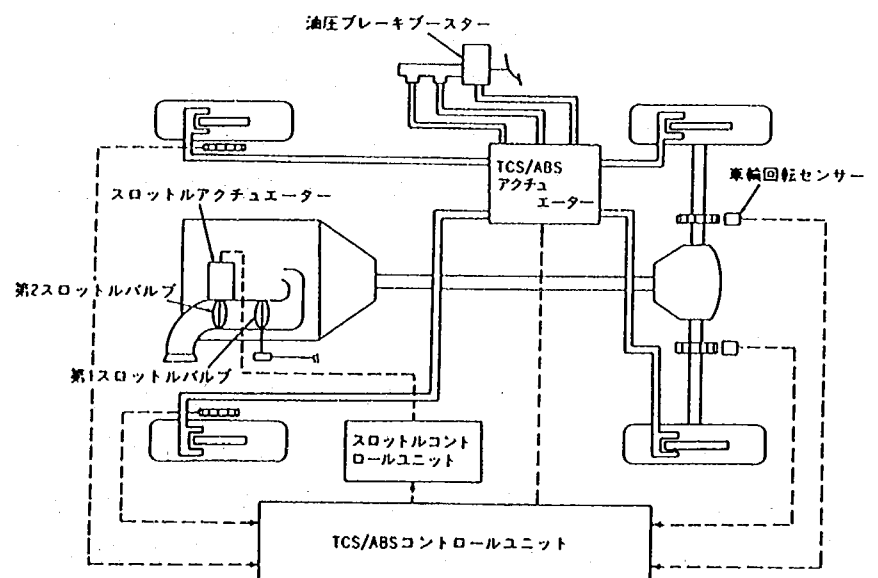


図-3.7 典型的なTCSの構成⁽²²⁾

いて模式化したものを図-3.8に示す。図-3.8は発進時におけるTCS制御を示したものである。ドライバが操作するアクセルペダルに連動した第1スロットルバルブがフルスロットル近くまで開き、駆動力が過剰となって駆動輪が空転を始める。これを検出してTCSが働き、まずエンジンの出力を低下させるような制御（図中の第2スロットルバルブ）を行う。それでも車輪回転が低下しない場合にはABSにより駆動輪ブレーキに液圧をかける（図中の後輪ブレーキ液圧）といった制御を行う。TCS装着車では駆動力が過剰になった場合、このような制御が繰り返し行われることになる。

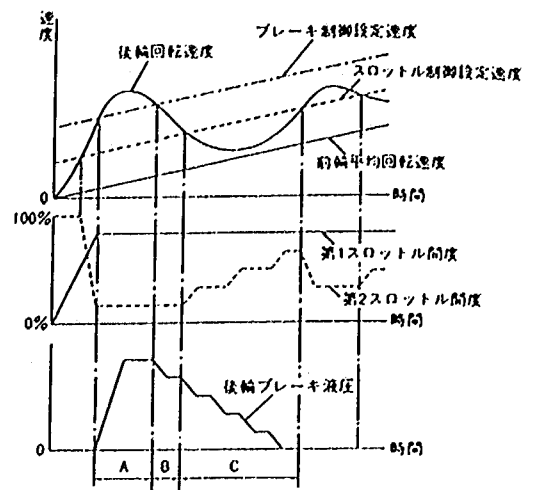


図-3.8 TCSの制御概念図 (22)

(3)TCSの基本構造

図-3.7からわかるようにTCSはABSと基本構成が類似しているため、ABSと組合せて装着し構成要素の共有化が計られている。車輪の回転速度検出には電磁ピックアップを用い、ABSと共有する形となっている。TCSの種類によっては、これらの車輪回転センサのほか、コーナリング中の駆動力制御のためのハンドル角センサを備えたものもみられる。制御部では、車体速度を推定し各輪のスリップ比を求めるわけであるが、TCSの場合非駆動輪（従動輪）の平均速度を車体速度とみなしている。駆動力の制御を行うアクチュエータ部にはさまざまな方式があり、主なものとして以下のような方式が挙げられる。

- ①エンジンのスロットル部に補助スロットルバルブを設置し、この開度を変化させることでエンジン出力を制御する方式（図-3.7中の“第2スロットルバルブ”参照）
- ②エンジンの点火時期を変化（遅角）させることで出力を制御する方式
- ③燃料噴射式エンジンの噴射方法を変えることで出力を制御する方式
- ④ABSを利用し、過剰な駆動力を制動力で相殺する方式
- ⑤上記①～④を組み合わせた方式

(4)TCSの効果

TCSを装着していない従来の車両では、雪路など摩擦係数の低い路面における発進時に不用意なアクセル操作を行うと尻振りなどが生じ車体姿勢が不安定になる（とくに後輪駆動の場合）。このような現象は、タイヤの駆動スリップ比が過度に大きくなりタイヤの横方向摩擦力が得られなくなるためであり、ABS非装着車で急制動（ロック制動）した場合と同様な現象と考えられる。したがって、ABSのようにスリップ比をある一定の範囲に制御してやれば、このような車両挙動を抑え安定した発進ができることになる。また図-3.1のタイヤ特性にみら

れるようにタイヤと路面の最大摩擦力が得られるようなスリップ比に制御できれば、タイヤと路面の摩擦力を有効に利用できると考えられる。

図-3.9は圧雪路および氷上路における発進加速時の区間タイムでTCSの効果を示したものである。TCS装着車は非装着車に比較し区間タイムが短縮しているのがわかる。また、このようなすべりやすい路面では非装着車での発進に微妙なアクセル操作を要し、ドライバの技量によるバラツキが生じやすい。図-3.9では、TCSによりこのバラツキ幅が減少することを示している。

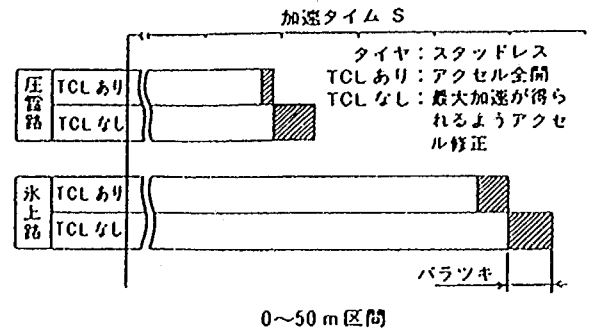


図-3.9 TCSによる発進性能向上の例⁽⁹⁾

3.3 4輪操舵システム(4WS)

(1) 4WSの機能

前述したABSおよびTCSは主に車両の前後方向運動にかかわるシステムであるのに対し、4WSは車両の横方向運動にかかわるシステムである。通常の車両は前輪のみで操舵する機構(2WS)になっ

ており、その横運動応答特性は一般に図-3.10のようになる。図に示した例では、車速の増加とともにヨーレートおよび横加速度のゲインが増加し、1 Hz付近における横加速度の位相遅れが増大している。これは、高速になるとハンドル操作に対する

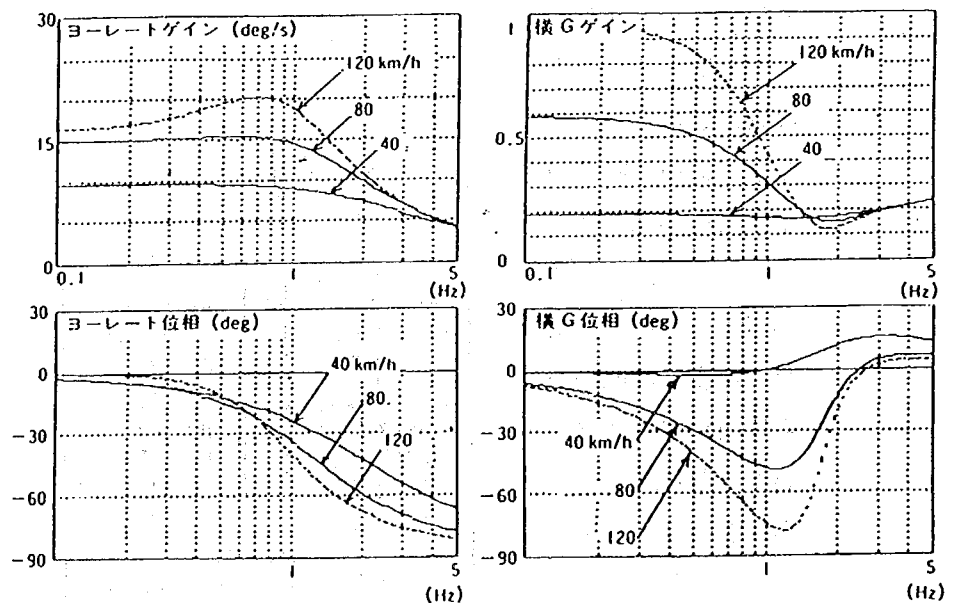


図-3.10 2WS車の操舵応答特性の例⁽¹⁰⁾

車両の応答感度が高くなり、またヨーレートと横加速度との応答遅れにずれが生じて、その結果、高速走行時にドライバのハンドル制御がむずかしくなるものと考えられる。このような2WS車の高速走行におけるハンドル操作のむずかしさを補う働きをするシステムが4WSである。

(2) 4WSの作動原理

通常の2WS車が直進運動から旋回運動に移る場合の過程を図-3.11に示す。ハンドル操作によりまず前輪に横すべり角が発生し、その結果生じるヨー運動によって後輪タイヤに横すべり角が発生する。このように前後の横すべり角発生に時間差が生じるため、2WS車では図-3.10に示したように横加速度の位相遅れが大きくなる。これに対し、4WS車では図-3.12に示すように前輪と後輪のスリップ角を並行して発生させるよう

な制御を行う。この結果、横加速度の位相遅れを小さくでき、また図-3.11と図-3.12を比較してわかるように旋回中の車体横すべり角（重心点における車体中心線と速度ベクトルとのなす角）を小さく（図-3.12ではほぼゼロ）できることになる。

ところで、この車

体横すべり角は、2WS車では図-3.13に例を示すように車速により大きく変化する。図-3.13の傾向は、車体の向きが低速の場合旋回方向の外側に、また高速の場合旋回方向の内側になることを意味する。このような2WS車の特徴に対し、4WS車では後輪舵角を図-3.14のよ

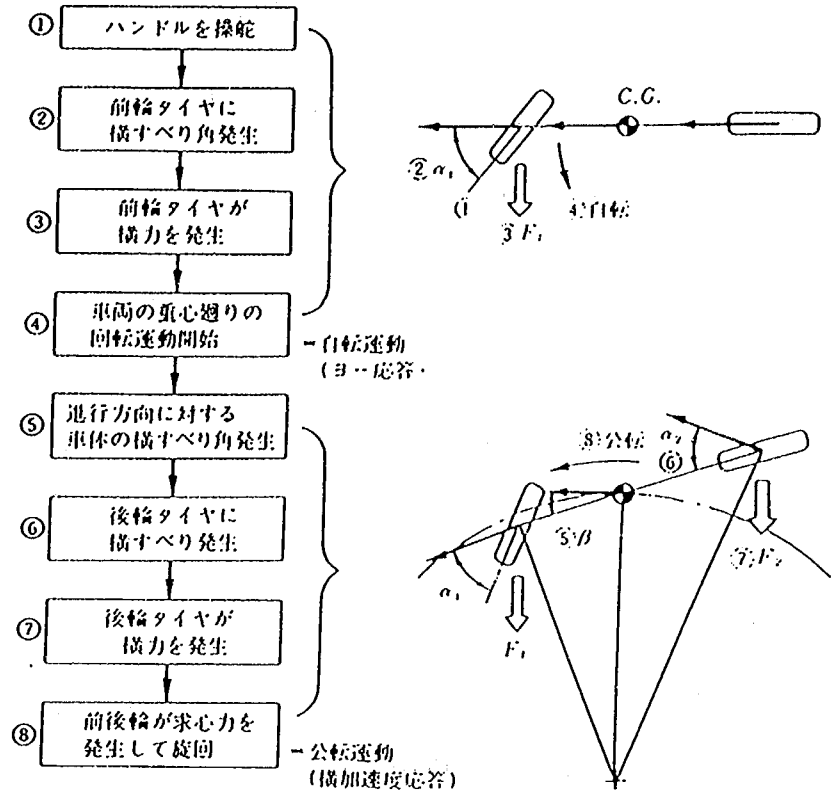


図-3.11 2WS車の操舵応答⁽¹²⁾

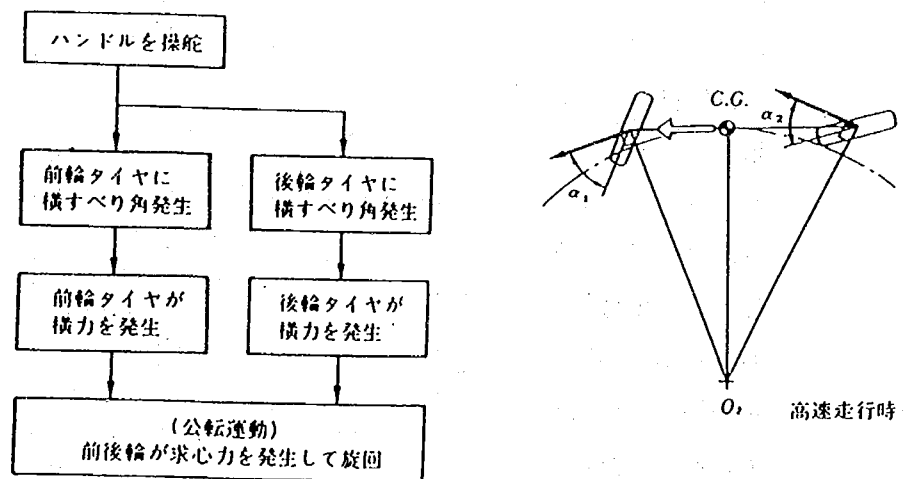


図-3.12 4WS車の操舵応答⁽¹²⁾

うに与えてやれば旋回中の車体横すべり角をゼロにすることができる。

(3) 4WSの基本構造

通常の2WS車が前輪にのみ操舵系を有し、後輪は固定された構造になっているのに対し、4WS車では後輪に前輪と同様な操舵機構が備えられている。4WS車の後輪にどのような舵角を与えるかという制御方式については、さまざまな種類のものがあり以下のように大別できる。

- ①比例制御方式：前輪の舵角に比例した後輪舵角を与える方式である。この比例定数を車速に応じて変化させる方式（図-3.15 参照）や前輪舵角に応じて変化させる方式（図-3.16 参照）などがみられる。
- ②一次遅れ制御方式：比例制御方式と基本的には同じ方式であるが、後輪の舵角に一次遅れ特性をもたせたものである。
- ③非最小位相制御方式：一次遅れ制御をさらに発展させた方式で、操舵初期に後輪に一瞬逆相の舵角を与える方式である。
- ④ヨーレイトフィードバック制御方式：上記①から③までの機能に加え、ヨーレイトを検出しフィードバックして後輪舵角を与える方式である。この方式の特徴は、ハン

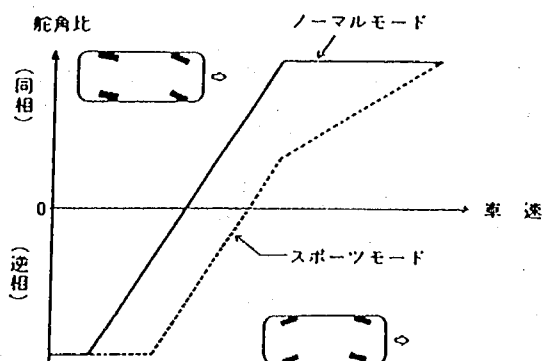


図-3.15 比例制御方式4WSの舵角特性の例⁽¹⁵⁾
(車速感応型)

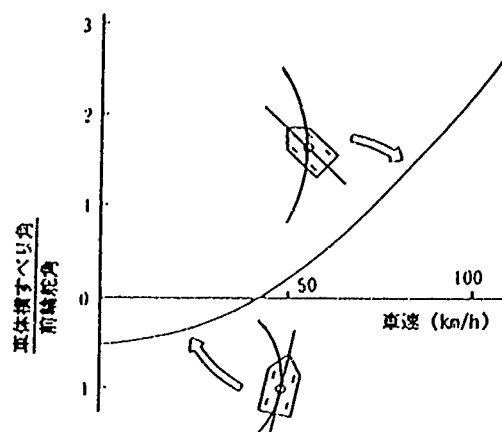


図-3.13 2WS車の車体横すべり角の例⁽¹³⁾

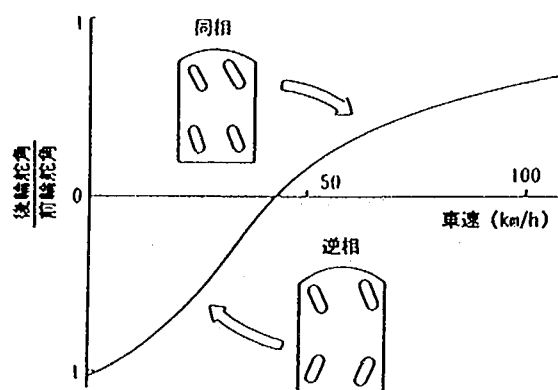


図-3.14 車体横すべり角をゼロとする
後輪舵角特性の例⁽¹³⁾

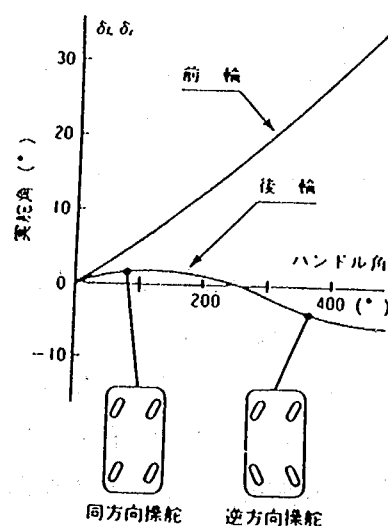


図-3.16 比例制御方式4WSの舵角特性の例⁽¹⁷⁾
(前輪舵角応動型)

ドルを固定した状況下でもヨーレイトが生じた場合に後輪が操舵されるというところにある。

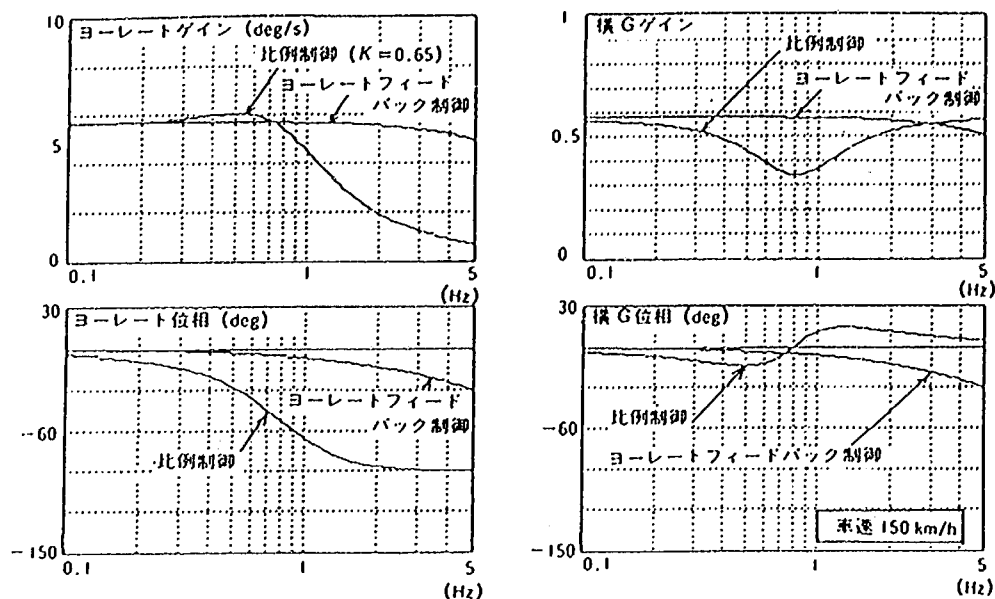


図-3.17 4WS車の操舵応答特性の例⁽¹⁸⁾

(4) 4WSの効果

比例制御方式およびヨーレイトフィードバック制御方式における操舵応答特性の例を図-3.17に示す。図-3.10に示した2WS車の特性に比べてゲインおよび位相の特性が向上しているのがわかる。とくに、ヨーレイトフィードバック制御方式ではヨーレイトの位相特性も向上している。

2WS車および4WS車を用いて行った実車走行実験の結果例を図-3.18および図-3.19に示す。図-3.18はスラローム走行時の区間通過時間であり、図-3.19はこのときのドライバの主観評価である。4WS車は2WS車に対し走行成績および主観評価とも向上しているのがわかる。

4WSの種類によっては図-3.15に示したように低速域で逆相（前輪とは逆向きの後輪舵角）に制御するシステムがあり、このように逆相にも作動する機能をもった4WS車では、図-3.20に示すような最小旋回半径の減少および図-3.21に示すような内輪差の減少

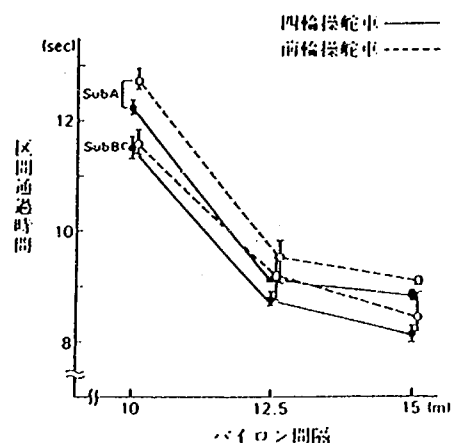


図-3.18 実車走行実験結果の例⁽¹¹⁾
(スラローム走行の区間通過時間)

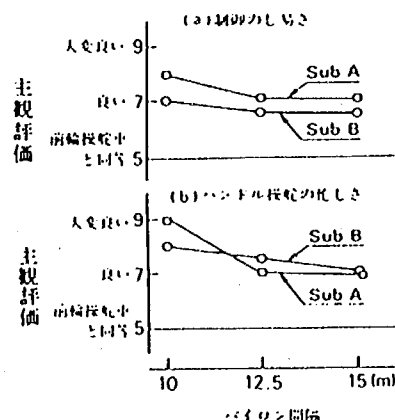


図-3.19 スラローム走行時の主観評価⁽¹¹⁾

といった効果も得られる。

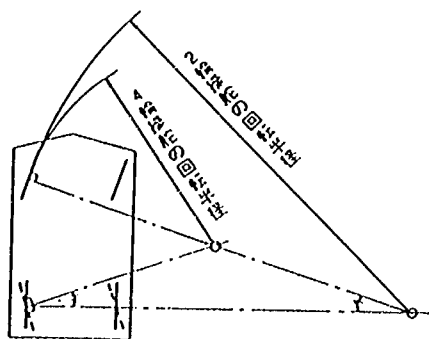


図-3.20 4WSによる最小旋回半径の減少⁽¹⁹⁾

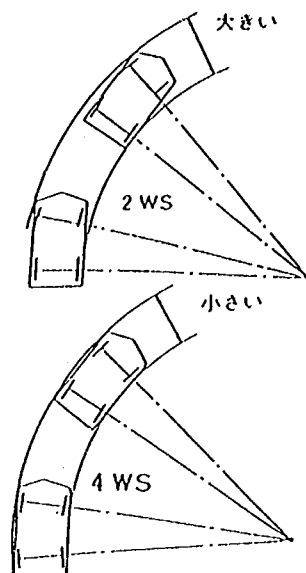


図-3.21 4WSによる内輪差の減少⁽¹⁹⁾

4. 新しい車両機能（ABS、TCL、4WS）に関する車両運動模擬の可能性検討

4. 1 車両運動模擬の際の留意点

ここでは、アンチロックブレーキシステム（ABS）、トラクションコントロールシステム（TCS）および4輪操舵システム（4WS）のような新技術を搭載した車両の運動模擬を行う際の留意点について述べる。

道路走行シミュレータは、ドライバが自動車を運転し道路上を走行するのに必要な情報を模擬してドライバの視覚・聴覚・運動感覚・操縦感覚などに与える（図-4.1参照）装置と考えることができる。したがって、車両特性の違いを模擬する場合には、図-4.1のドライバに与える情報が車両特性の違いを表し得るものでなければならない。すなわち、車両運動モデルの

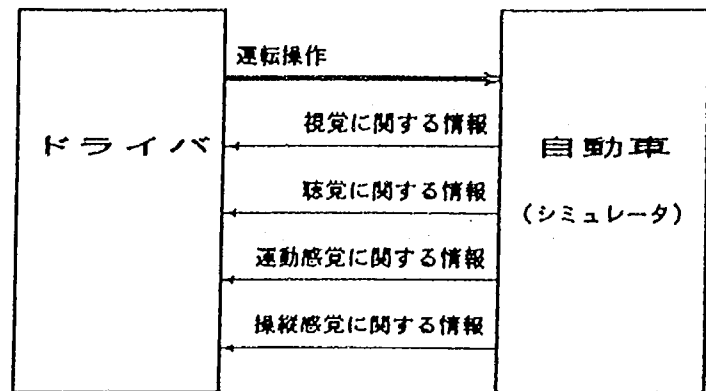


図-4. 1 ドライバが運転するのに必要な主な情報

中に特性の異なる要素を組み込んで数値演算を行った場合、シミュレータによる模擬情報からドライバがその差異を認識できなければならない。このような観点から、ABS・TCS・4WSのような新技術を備えた車両特性の違いをドライバがどのような情報から知ることができるかについて、現状の市販車から考え得ることを列挙してみる。なお、市販車では、従来の車両から新技術を搭載した車両に乗り換えても違和感が大きくなならないような味付けにしてあり、両者の違いは比較的わかりにくいのが現状と考えられる。また、個々の具体的な新技術は機構や制御方法が多様であり、以下に挙げる項目がかならずしも該当するわけではない。

(1) ABS 装着車の場合

ABS 装着車を運転した場合の特徴として以下のようなことが考えられる。

〔視覚に関する情報〕

- ・車体姿勢が安定しているため、前方視野の変化が少ない。
- ・ABS 制御により駆動輪のスリップ比が変化するため、速度計の指示値が変動する。

〔聴覚に関する情報〕

- ・車輪がロックしないためタイヤのすべり音が出ない。
- ・ABS のアクチュエータ作動に伴うわずかな音がする。

〔運動感覚に関する情報〕

- ・ABS の制御に伴い加速度が変動する。
- ・急制動中の操舵により横加速度やヨーレイトが生じる。

〔操縦感覚に関する情報〕

- ・ABS制御に伴いブレーキペダルにキックバックが生じる。
- ・急制動中に操舵したとき、ステアリングに反力が生じる。

(2)TCS装着車の場合

TCS装着車を運転した場合の特徴として以下のようなことが考えられる。

〔視覚に関する情報〕

- ・車体姿勢が安定しているため、前方視野の変化が少ない。
- ・TCSによりエンジン出力が制御されるため、アクセル操作量に対するエンジン回転計の応答が非作動時と異なる。

〔聴覚に関する情報〕

- ・アクセルを一杯踏んでもタイヤのすべり音が出ない。
- ・アクセル操作に対するエンジン音の応答が非作動時と異なる。

〔運動感覚に関する情報〕

- ・発進時の加速度変動が少ない。
- ・旋回走行中アクセル操作による横加速度などの変化が少ない。

〔操縦感覚に関する情報〕

- ・FF車における急発進時のハンドルとられが少ない。

(3)4WS装着車の場合

4WS装着車を運転した場合の特徴として以下のようなことが考えられる。

〔視覚に関する情報〕

- ・高速走行における前方視野の変化が少ない。
- ・低速旋回における前方視野の変化が大きい（逆相操舵）。

〔聴覚に関する情報〕

- ・横すべりによるタイヤ音が比較的出にくい。

〔運動感覚に関する情報〕

- ・横加速度とヨーレイトの立ち上がり方が2WSと異なる。
- ・ヨーレイトの収まりが早い。

〔操縦感覚に関する情報〕

- ・操舵量が2WSとやや異なる。

4. 2 新しい車両機能の土木研究所所有シミュレータへの適用について

前節では、新しい車両機能を再現する場合の一般的な留意点について記述を行った。本説では、それらの留意点を土木研究所所有シミュレータへ適用する場合の検討を行った。以下に概要を示す。

(1) 再現を必要とする項目

従来の車両と新しい車両機能をもった車両では前述のように視覚、聴覚、運動感覚、操縦感覚に差が生じている。しかしながら、土木研究所所有のシミュレータはモーションが付属していないので、加速度等の運動感覚に関する再現は不可能である。よって、検討は視覚、聴覚、操縦感覚に関する項目について実施した。表4-1に各車両特性毎の再現項目とその効果及び対応方針について示す。なお、運動方程式の改良にあたっては、土木研究所所有のシミュレータ自体が簡易的な運動方程式で再現されているために、実車の運動方程式に即した改良ではなく、視覚、聴覚、操縦感覚の出力結果が新しい車両機能に沿うような方向で検討した。なお、本文中に記載されている運動方程式については共同研究報告書1を参照されたい。

(2) 各機能毎の改良案

1) ABS、TCS装着車の再現

① 視覚による再現

ABS、TCSはメーカー毎に車両の制御方法が異なっている。そのため、再現する制御方法、ロジックを正確に模擬しないと正確な挙動は模擬できない。また、ABS、TCSの制御はタイヤの回転部分を制御しており、この回転運動は車両運動のうち最も高速での計算を要する部分である。従って土木研究所所有のシミュレータの30Hzという計算周期では正確な再現は困難である。しかし、ABS、TCSの最大の特徴である車両姿勢の安定による前方視野の変化の少なさのみの再現であれば、コーナリングフォースを安定させることで可能である。具体的な方法としてはタイヤの回転方向の合力 T_i （共同研究報告書1、P37参照）から横力 CF_i の最大値 $CF_{MAX i}$ を算出し、その定数を変化させる方法が考えられる。

$$CF_{MAX i} = b \sqrt{\frac{(\mu W_i)^2 - (T_i)^2}{a}}$$

この式の a の値を大きくすることにより車両姿勢を安定させる。

また、ABS車においては速度計、TCS車においてはタコメーターの針が激しく変化する現象の再現であるが、これらは、直接視野に入ってくる情報のため実感を増すためには再現した方が望ましい。これは、運動方程式とは直接連動してなくても問題はない。

② 聴覚による再現

聴覚による再現は、急制動時においても車輪がロックされないため、急制動音が出ないことを再現すればよい。ただし、土木研究所所有のシミュレータは現状では急制動音は再現していない。

③ 操縦感覚による再現

操縦感覚についてはABSにおいてはステアリング及びブレーキ反力の模擬、TCSについては加速度感の変化の少なさの模擬が考えられる。これらの模擬には反力を生じさせるためのハード機能（例えば、ハンドル反力であればサーボモーター）の追加が必要となる。

2) 4WS装着車の再現

① 視覚による再現

4WS車の特徴として車体姿勢の安定による前方視野角の安定と低速旋回による前方視野角の大きな変化が挙げられる。4WS車は後輪の転舵角を制御するものであり、制御に用いられている物理量は車速、操舵角等である。これらの物理量は土木研究所所有のシミュレータでも運動模擬計算に使用しているため、再現は可能である。具体的な方法についてはハンドル角 V_h に対して後輪舵角（右、左）を以下の式で決める。（共同研究報告書1、P33参照）なお、制御方法は比例制御を想定した。

$$\text{後輪舵角（右）} \quad \delta_3 = K_r \times V_h$$

$$\text{後輪舵角（左）} \quad \delta_4 = K_r \times V_h$$

ここで、 K_r は比例定数であり、例えば、+にすると同相制御、-にすると逆相制御となる。一般的にはこの K_r を車速に応じて変化させ、高速では+（同相）、低速では-（逆相）とする。さらに、CFの計算において α_3 、 α_4 を以下の式で決める。これにより、4WS装着車の車両運動は模擬できる。

$$\alpha_3 = (\beta - \arctan(\omega_{z12}/V_x) - \delta_3) \mu \alpha$$

$$\alpha_4 = (\beta - \arctan(\omega_{z12}/V_x) - \delta_4) \mu \alpha$$

② 聴覚による再現

聴覚による再現は、横滑り時において急制動音が出ないことを再現すればよい。ただし、土木研究所所有のシミュレータは現状では急制動音は再現していない。

表4-1 車両機能の再現項目とその効果及び対応方針

機 能 内 容		シミュレータ での再現効果	土木研究所のシミュレータでの 対応方向
A B S 装 着 車	〔視覚に関する情報〕 ① 車体姿勢が安定しているため、前方視野の変化が少ない	◎	運動方程式の改良
	② ABS制御により駆動輪のスリップ比が変化するため速度計の指示値が変化する。	○	速度メーターの触れの再現
	〔聴覚に関する情報〕 ① 車輪がロックしないため、タイヤの滑り音がでない。	◎	現状車両に滑り音を追加
	② ABSアクチュエータ作動に伴うわずかな音がする。	×	
	〔運動感覚に関する情報〕 ① ABSの変化にともない加速度が変動する。	◎	モーションが無いため対応不可能
	② 急制動時の操舵により横加速度やヨーレイトが生じる。	◎	〃
	〔操縦感覚に関する情報〕 ① ABS制御に伴いブレーキペダルにキックバックが生じる。	○	アクセルの反力の模擬
	② 急制動時の操舵により、ステアリングに反力が生じる。	○	ステアリング反力の模擬
T C S 装 着 車	〔視覚に関する情報〕 ① 車体姿勢が安定しているため、前方視野の変化が少ない	◎	運動方程式の改良
	② TCSにより、エンジン出力が制御されるため、アクセル操作量に対するエンジンの回転計の応答が非作動時と異なる。	○	タコメーターの触れの再現
	〔聴覚に関する情報〕 ① アクセルを一杯踏んでもタイヤの滑り音がでない。	○	現状車両に滑り音を追加
	② アクセル操作に対するエンジンの音が非作動時と異なる。	×	
	〔運動感覚に関する情報〕 ① 発進時の加速度変化が少ない。	◎	モーションが無いため対応不可能
4 W S 装 着 車	② 旋回走行中アクセル操作による横加速度の変化が少ない。	◎	〃
	〔操縦感覚に関する情報〕 ・FF車における急発進時のハンドルの取られ方が少ない。	◎	モーションが無いため対応不可能
	〔視覚に関する情報〕 ① 高速走行時の、前方視野の変化が少ない	◎	運動方程式の改良
	② 低速旋回による前方視野の変化が大きい。(逆相操舵)	◎	〃
4 W S 装 着 車	〔聴覚に関する情報〕 ① 横すべりによるタイヤの滑り音がでない。	○	現状車両に滑り音を追加
	〔操縦感覚に関する情報〕 ① 横加速度とヨーレイトの立上りが2WSと異なる。	◎	モーションが無いため対応不可能
	② ヨーレイトの収まりが早い。(運動間隔の異なり)	◎	〃
	③ 操舵量が2WSと異なる。	◎	〃

注) 効果の評価は以下の凡例による。

再現することによる効果は極めて大 -◎

再現した方が望ましい。 -○

再現しても効果はない。 -×

5. その他の検討事項

5. 1 駆動方式を変更した場合の車両運動模擬

駆動方式の違いによる車両挙動の違い（FR、FF、4WD）は各タイヤに対する駆動力配分を変更することで模擬可能となる。土木研究所所有のシミュレータでは、設定車種がFR車のため後輪のみで駆動力計算を行っているが、これを前輪の分も計算し、前輪と後輪の配分を0～100%の間で替えることによって実現できる。

例えば、駆動力配分を替えることにより以下の設定が可能となる。

前輪0%、後輪100%……………後輪駆動車（FR）

前輪100%、後輪0%……………前輪駆動車（FF）

前輪50%、後輪50%……………全輪駆動車（4WD）

ただし、ここで模擬を想定している全輪駆動車（4WD）は駆動力をセンターデフによって配分するタイプの4WDだけであり、例えばパートタイム4WD、電子制御式4WD等はその方式に応じて運動方程式を作成する必要がある再現は困難である。

6. おわりに

道路走行シミュレータに関する共同研究は本年度を持って終了する。3か年に渡って実施した共同研究にて、車両挙動に関する各種データの収集、道路走行シミュレータのハード機能として具備すべき機能の整理、車両運動方程式の作成、新しい運動機能を持った車両特性の再現の可能性等について検討を行った。これらの検討結果は共同研究と平行して実施した土木研究所の道路走行シミュレータに反映され十分な成果を納めた。今後は道路走行シミュレータを利用した道路構造に関する各種実験を実施していくとともに、道路走行シミュレータ本体の改良（急制動音の付加、ハンドル反力の再現等）も続けていく予定である。

なお、平成4年度の検討結果である、新しい車両特性（ABS、TCL、4WS）に関する車両運動模擬の可能性検討については日産自動車 総合研究所 車両研究所の山村氏に多大な協力を頂いた。紙面を借りて心から感謝する次第である。

(参 考 文 献)

- 1) 建設省土木研究所, 財団法人日本自動車研究所: 道路走行シミュレータに関する共同研究報告書(その1), 1991.
- 2) 建設省土木研究所, 財団法人日本自動車研究所: 道路走行シミュレータに関する共同研究報告書(その2), 1992.
- 3) 自動車技術会: 自動車技術ハンドブック, 1990.
- 4) 酒井: タイヤ工学(入門から応用まで), グランプリ出版, 1987.
- 5) 白石ほか: トラクション・コントロール・システムについて, 自動車技術会シンポジウム資料, 1989.
- 6) 西川ほか: 4WD車用アンチロックブレーキシステム, 自動車技術Vol. 42, No. 2, 1988.
- 7) 岡 ほか: アンチロック装置の現状と将来, 自動車技術Vol. 38, No. 3, 1984.
- 8) 池田ほか: トラクションコントロールシステムの動向, 自動車技術Vol. 42, No. 3, 1988.
- 9) 山崎ほか: 駆動力制御システム, 自動車技術Vol. 44, No. 9, 1990.
- 10) 田村ほか: トラクションコントロールシステムの開発動向, 自動車技術Vol. 45, No. 3, 1991.
- 11) 佐野ほか: 後輪舵角をハンドル角の関数で制御する四輪操舵システム, 自動車技術会学術講演会前刷集No. 861, 1986.
- 12) 古川: 四輪操舵システムによる操安性の改善, 自動車技術Vol. 40, No. 3, 1986.
- 13) 入江ほか: 後輪アクティブ制御による操縦性安定性の向上, 自動車技術Vol. 40, No. 3, 1986.
- 14) 吉田ほか: 四輪操舵車の操安性について, 自動車技術Vol. 41, No. 3, 1987.
- 15) 木津ほか: 車速感応型四輪操舵とアクティブコントロールサスペンションシステム, 自動車技術Vol. 44, No. 3, 1990.
- 16) 森 ほか: 後輪操舵の過渡制御による操安性向上, 自動車技術Vol. 44, No. 3, 1990.
- 17) 古川: ビークルダイナミックスからみた4WSの研究動向, 自動車技術Vol. 44, No. 3, 1990.
- 18) 秋田: 4WS技術の現状と将来, 自動車技術Vol. 45, No. 3, 1991.
- 19) 四輪操舵(4WS)とはどんなもの?, 自動車と整備, 1986. 5
- 20) 三菱自動車: 新型車解説書「ディアマンテ」, 1990.
- 21) トヨタ自動車: 新型車解説書「アリスト」, 1991.
- 22) 日産自動車: 新型車解説書「シーマ」, 1991.

以下に、今回の共同研究の成果ともいえる、道路走行シミュレータの概要についての紹介と、今後想定される実験の実施方法の提案を記す。

1 シミュレータの機能及び性能

1.1 全体構成

道路走行シミュレータの構成は、図1-1に示すように、模擬運転席系、車両運動計算系、画像発生表示系、音響発生系、制御卓系及びデータベース作成装置から構成される。各装置の概略機能については表1-1に示す。

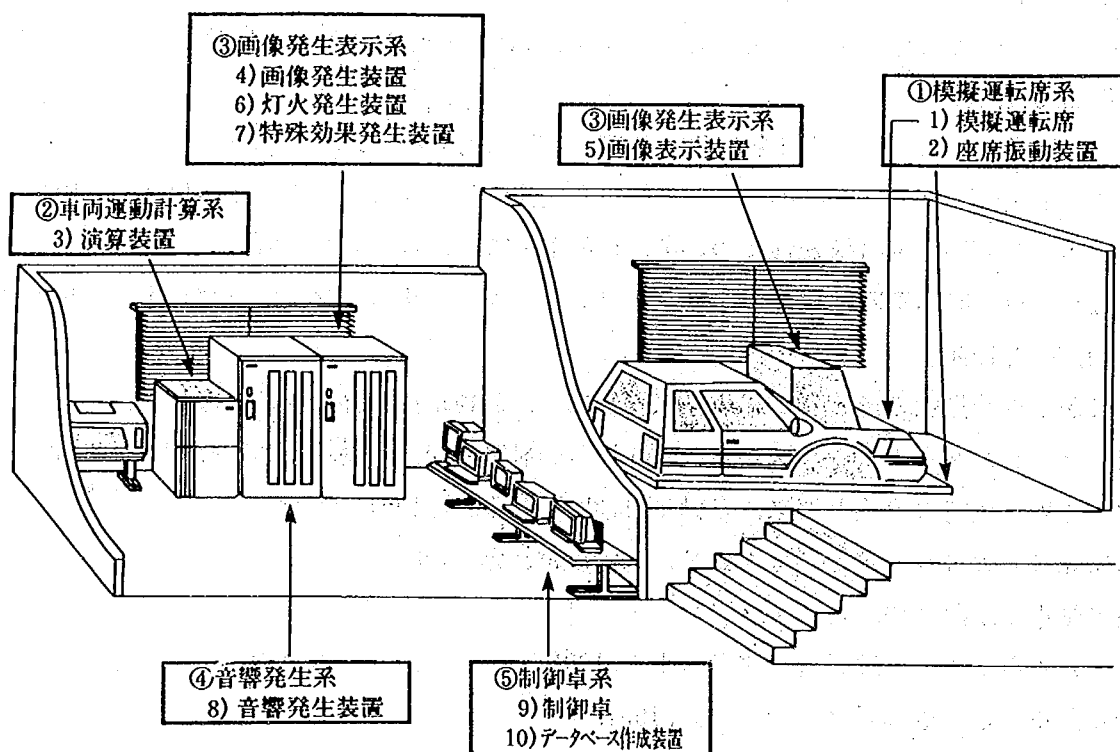


図1-1 装置の構成概要

表 1 - 1 各機器の概略機能

構 成	機 器	概 略 機 能
①模擬運転席系	1) 模擬運転席 (実車両を改造する)	・ 作動模擬 (ハンドル、ブレーキ、アクセル、方向指示器等) ・ 計器表示 (速度計、回転数計等)
	2) 座席振動装置	・ 10~30Hz程度の振動模擬
②車両運動計算系	3) 演算装置	・ 道路状況、運転操作に応じた車両運転模擬 ・ 車両運動計算周期30回/秒、遅延時間 150ms ・ データベース容量 5000平面
	4) 画像発生装置	・ 画像更新1/30秒 ・ 画面表示能力 500平面 ・ 他車4台程度発生可能
③画像発生表示系	5) 画像表示装置 (無限遠結像CRT方式)	・ 視野角 H40° × V30° ・ 輝度 4ft・L (=13.7cd/m ²) ・ 走査線 1000×1280画素/画面 (解像度約3分程度)
	6) 灯火発生装置	・ 昼間、薄暮、夜間を再現可能
	7) 特殊効果発生装置	・ テクスチャ模様付加
④音響発生系	8) 音響発生装置	・ エンジン音、ブレーキ音など ・ 50Hz~3kHz、100dB程度
	9) 制御卓	・ システム全体の制御機能、監視機能、緊急停止機能 ・ 任意時刻の画像再生およびプレイバック機能
⑤制御卓系	10) データベース作成装置	・ データベースの作成および変更を行う装置

1. 2 模擬運転席系

模擬運転席は実車両を改造して使用している (写真1-1)。試験車両は一般的な普通乗用車 (4速オートマチック車、2000ccクラス) であり、実験において最高 180km/h程度の走行が可能である。

運転者によるハンドル、アクセル、ブレーキ、シフトレバーの操作は車両運動に反映され、速度計、回転数計、距離計については運動計算結果を表示する。前照灯は、ハイビームとロービームの2段階の切り替えが可能で

あり、夜間、薄暮、トンネル内走行時に前照灯の効果が得られる。また、臨場感を高めるために座席振動装置を設けてあり、模擬運転席に10~30Hz程度の微振動を与えている。

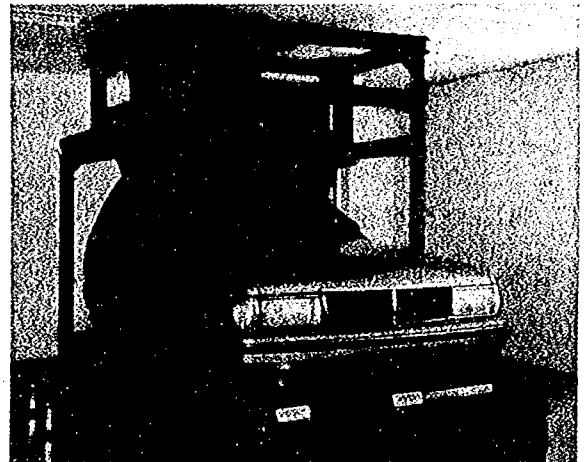


写真 1 - 1 模擬運転席部

1. 3 車両運動計算系

運転操作から画像発生における装置機能についてそのイメージを図1-2に示す。図から、運転操作データ（ハンドル角、アクセル・ブレーキ踏量）は、演算装置に入力され、リアルタイムで車両運動計算、画像処理計算を行う。次に計算された速度データ、画像データ等をもとに、関連装置において画像、走行音、振動を選び、模擬運転席へ送られる。そして、運転者はこの画像を見て運転を続ける。ここで、車両運動計算の周期は、1/30秒であり、運転操作から画像発生までのプロセス周期は最大150msである。

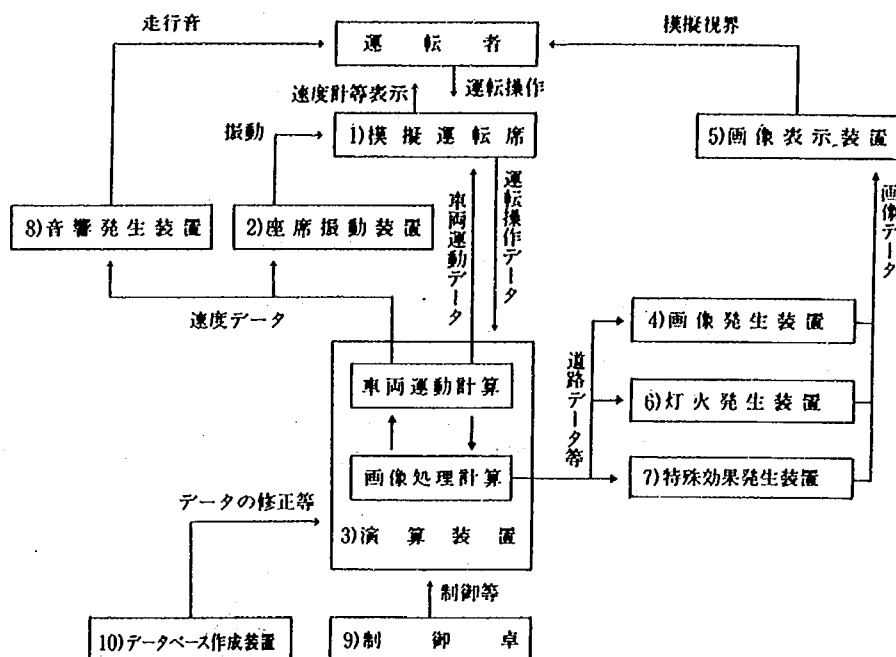


図1-2 装置機能イメージ

1. 4 画像発生表示系

自動車の運転において最も重要なのは、視覚情報である。よってシミュレータには、リアルタイムで更新されるよりリアルな画像が要求される。画像発生表示系では、演算装置において計算された車両の位置や向きの情報をもとに、更新時間1/30秒（これはテレビと同様である）においてCGI (Computer Graphics Image) 画像を発生、表示している。画像には、無限遠結像CRT方式を用いることによって、遠近感を与え、画像に2次元テクスチャを付加することによって、リアル感を与えている。また、車体のロール、ピッチ、ヨーにより画面も傾いたり上下したりするので、運転者は視覚により車体の傾きを知ることができる。

写真1-2に表示される道路画像の一例を示す。この画像は、フロントガラス付近に表示され、輝度は、 $4\text{ft}\cdot\text{L}(=13.7\text{cd}/\text{m}^2)$ である。また、画面の走査線は 1000×1280 画素であり、視野角（水平 40° 、垂直 30° ）の関係から解像度を計算すると、水平1.9分（ $=40\times 60/1280$ ）、垂直1.8分（ $=30\times 60/1000$ ）であり、合成解像度は、2.6分（ $=\text{約}3\text{分}$ ）である。ちなみに、解像度2.6分では道路における車線境界線（幅15cm）を約200m先まで表示可能である。

道路状況としては、後述のデータベース作成装置を使用することにより、平面線形の要素である直線、曲線、クロソイドを自由な組合せで再現でき、縦断線形の設置も可能である。また、道路の付属施設であるトンネル、ガードレール、道路照明、遮音壁等の再現も可能である。時間帯は、昼間・薄暮・夜間の3種類が再現でき、天候は、晴・曇・雨・雪・霧を再現することができる。

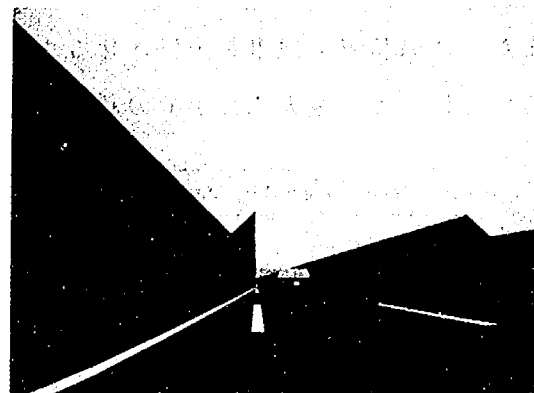


写真 1-2 模擬運転席からみた画像

1. 5 音響発生系

運転者がスピード感を得るには、速度計や景色のながれといった視覚情報とともにエンジン音や風きり音の聴覚情報も重要である。音源については、エンジン回転数毎のエンジン音、速度毎の走行音、風きり音を実車両において録音し、デジタルサンプラに収録してある。音響発生装置では、演算装置で計算された音響パラメータをもとに、音源を選択し、補間処理を行い、模擬運転席ボンネット内のスピーカにおいて再生している。ここで、音響の周波数帯域は50Hz～3kHzであり、音響レベルは100db程度である。

1. 6 制御卓系

制御卓においては、システム全体の制御、実験環境の設定（道路コース、時間帯、天候）、実験状況の監視を行っている。さらに、走行実験後に任意時刻の表示画像の再生及びスタート時からのプレイバック機能をもち、データ解析に必要な運転操作データ、車両運動データの記録制御も可能である。

1. 7 データベース作成装置

データベース作成装置は、制御卓計に付属し、演算装置及び画像発生表示装置とリンクすることで道路の幾何構造（平面・縦断線形、横断面構成）を中心とした実験用の道路コースの作成または修正を行うための装置である。

装置の構成は、路面画像及び路面に沿った施設（ガードレール、植樹帯等）を作成するための画像構築ソフトウェアと多座標施設（トンネル坑口、標識内の文字等）を作成するためのデジタイザ、及び作成された個々のライブラリを表示、編集を行うグラフィックディスプレイとタブレットから構成される。図1-3に道路コース作成のためのフローを示す。

道路コースは、全て三角形ないし四角形の平面の組合せにより作成しており、それぞれの平面にプライオリティをつけることにより、手前と遠方の景色を区別している。使用平面の

容量は、1画面当り 500平面であり、データベース全体の容量は、5000平面である。

また、この装置で他車を走行させるためのコース設定（座標値指定）、走行速度等を指定することにより、最大4台までの制御が可能となっている。

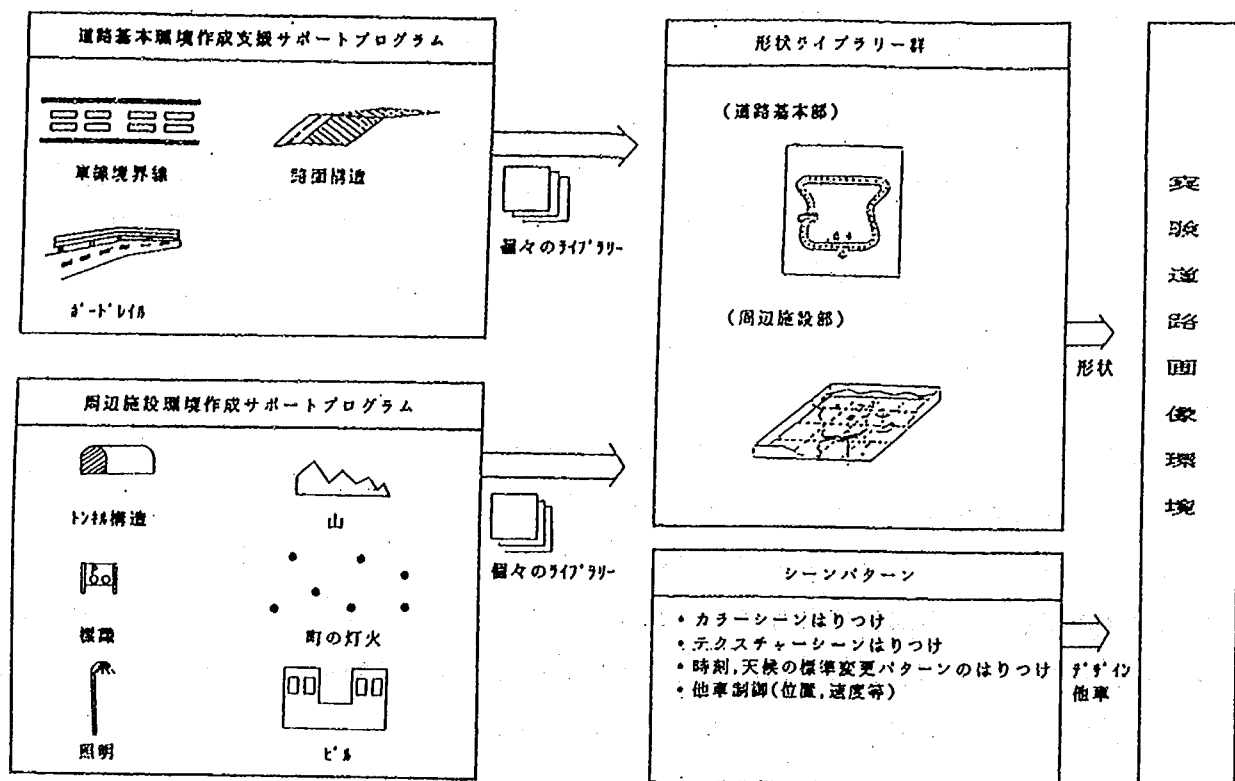


図1-3 データベース作成フロー

2 シミュレータを用いた実験

道路走行シミュレータは、座席固定式という車両運動加速度を体感できない構造であること、また、模擬運転席のモニターも1台であり画角も水平40°、垂直30°であることを考慮すると横方向の加速度があまりかからない高速道路上での視覚的要素に依存した実験が想定される。表2-2に想定される実験項目を示す。

今後このような実験を実施する場合、どのような計測機器を用い、計測データ内容、計測方法、計測タイミングで実施すればよいのかを以下に提案する。

表2-2 道路走行シミュレータで想定される実験

実 験 項 目
1. 高速道路構造等に関する実験
(1) 高速走行時の道路横断面構成（幅員構成）と走行性に関する実験 (2) 高速走行時の最小曲線半径に関する実験 (3) 高速走行時の道路線形（縦断、平面線形）に関する実験
2. 安全施設等に関する実験
(1) 視線誘導標の大きさ及び配置に関する実験 (2) 高速走行時の道路標識の位置、大きさ、色等視認性に関する実験
3. トンネルに関する実験
(1) トンネル内の横断面構成（幅員構成）と走行性に関する実験 (2) トンネルポータル形状が走行性に与える影響に関する実験 (3) トンネル長さとの走行速度に関する実験
4. 走行性に関する実験
(1) 下り勾配部の下り勾配長と走行速度に関する実験

表 2 - 2 実験項目と各計測機器及び計測データの着目点の提案

実験項目	評価項目	評価方法1 走行状況の変化	評価方法2 人間生理状況の変化	評価方法3 車両操縦特性の変化
1. 高速道路構造等に関する実験 (1) 走行時の道路横断面構成（幅員構成）と走行性に関する実験	計測機器 データ内容 計測方法 計測タイミング	データブレイバック装置 走行位置 走行速度 走行車線 MTへ連続、自動記録 連続計測、幅員構成に変化が生ずる箇所とデータが対応すること。	心拍計 皮膚電位計 心拍数 発汗 データレコーダ又はフロッピーへ連続、自動記録 連続計測、幅員構成に変化が生ずる箇所とデータが対応すること。	舵角計 アクセル踏量計 ブレーキ踏量計 ハンドル角 アクセル踏量 ブレーキ踏量 データレコーダ又はフロッピーへ連続、自動記録 連続計測、幅員構成に変化が生ずる箇所とデータが対応すること。
(2) 高速走行時の最小曲線半径に関する実験	計測機器 データ内容 計測方法 計測タイミング	データブレイバック装置 走行軌跡 位置 速度 MTへ連続、自動記録 連続計測、緩急曲線を含む曲線部と直線部のデータが対応可能となるようにしておくこと。	心拍計 皮膚電位計 眼移計 心拍数 発汗 眼の動き まばたき データレコーダへ連続、自動記録 連続計測、緩急曲線を含む曲線部と直線部のデータが対応可能となるようにしておくこと。	舵角計 アクセル踏量計 ブレーキ踏量計 ハンドル角 ハンドル角速度 アクセル踏量 ブレーキ踏量 データレコーダへ連続、自動記録 連続計測、緩急曲線を含む曲線部と直線部のデータが対応可能となるようにしておくこと。
(3) 高速走行時の道路形状（縦断、平面形状）に関する実験	計測機器 データ内容 計測方法 計測タイミング	データブレイバック装置 走行軌跡 位置 速度 MTへ連続、自動記録 連続計測、立体形状に変わる箇所とデータが対応できるようにしておくこと。	心拍計 皮膚電位計 筋電計 心拍数 発汗 筋電図 データレコーダ又はフロッピーへ連続、自動記録 連続計測、立体形状に変わる箇所とデータが対応できるようにしておくこと。	舵角計 アクセル踏量計 ブレーキ踏量計 ハンドル角 ハンドル角速度 アクセル踏量 ブレーキ踏量 データレコーダ又はフロッピーへ連続、自動記録 連続計測、立体形状に変わる箇所とデータが対応できるようにしておくこと。
2. 安全施設等に関する実験 (1) 視認性、車線幅員、及び配置に関する実験	計測機器 データ内容 計測方法 計測タイミング	データブレイバック装置 走行軌跡 位置 速度 MTへ連続、自動記録 連続計測、設置条件（バターン）が変わる箇所でのデータの対応が可能であること。	皮膚電位計 アイカメラ フリッカー 発汗 注視位置 疲労 データレコーダへ連続、自動記録 連続計測、設置条件（バターン）が変わる箇所でのデータの対応が可能であること。	舵角計 アクセル踏量計 ブレーキ踏量計 ハンドル角 ハンドル角速度 アクセル踏量 ブレーキ踏量 データレコーダへ連続、自動記録 連続計測、設置条件（バターン）が変わる箇所でのデータの対応が可能であること。
(2) 高速走行時の道路標識の位置、大きさ、色等視認性に関する実験	計測機器 データ内容 計測方法 計測タイミング	データブレイバック装置 走行軌跡 位置 速度 MTへ連続、自動記録 連続計測、各ケース毎にデータの対応ができるようにしておくこと。	眼移計 アイカメラ フリッカー 皮膚電位計 VTR 眼移 注視点 眼の疲労 発汗 被験者の動き データレコーダへ連続、自動記録 連続計測、各ケース毎にデータの対応ができるようにしておくこと。	舵角計 アクセル踏量計 ブレーキ踏量計 ハンドル角 ハンドル角速度 アクセル踏量 ブレーキ踏量 データレコーダへ連続、自動記録 連続計測、各ケース毎にデータの対応ができるようにしておくこと。
3. トンネルに関する実験 (1) トンネル内の横断面構成（幅員構成）と走行性に関する実験	計測機器 データ内容 計測方法 計測タイミング	データブレイバック装置 走行軌跡 位置 速度 MTへ連続、自動記録 連続計測、トンネルに入る毎にデータの対応ができるようにしておくこと。	心拍計 皮膚電位計 眼移計 脳波計 心拍数 発汗 眼の収縮 脳波 データレコーダへ連続、自動記録 連続計測、トンネル入口とトンネル中心部とのデータの対応ができるようにしておくこと。	舵角計 アクセル踏量計 ブレーキ踏量計 ハンドル角 ハンドル角速度 アクセル踏量 ブレーキ踏量 データレコーダへ連続、自動記録 連続計測、トンネル入口とトンネル中心部とのデータの対応ができるようにしておくこと。
(2) トンネルポータル形状が走行性に与える影響に関する実験	計測機器 データ内容 計測方法 計測タイミング	データブレイバック装置 走行軌跡 位置 速度 時間 MTへ連続記録 連続計測し、トンネル入口の形状が把握できる位置よりトンネル内に入る間のデータの対応が可能であること。	心拍計 皮膚電位計 眼移計 脳波計 心拍数 発汗 眼の動き 脳波 データレコーダへ連続記録 連続計測し、トンネル入口の形状が把握できる位置よりトンネル内に入る間のデータの対応が可能であること。	舵角計 アクセル踏量計 ブレーキ踏量計 ハンドル角 ハンドル角速度 アクセル踏量 ブレーキ踏量 データレコーダへ連続記録 連続計測し、トンネル入口の形状が把握できる位置よりトンネル内に入る間のデータの対応が可能であること。
(3) トンネル長と走行速度に関する実験	計測機器 データ内容 計測方法 計測タイミング	データブレイバック装置 走行軌跡 位置 速度 MTへ連続、自動記録 連続計測、トンネルに入る毎にデータの対応ができるようにしておくこと。	心拍計 皮膚電位計 眼移計 脳波計 心拍数 発汗 眼の収縮 脳波 データレコーダへ連続、自動記録 連続計測、トンネル入口とトンネル中心部とのデータの対応ができるようにしておくこと。	舵角計 アクセル踏量計 ブレーキ踏量計 ハンドル角 ハンドル角速度 アクセル踏量 ブレーキ踏量 データレコーダへ連続、自動記録 連続計測、トンネル入口とトンネル中心部とのデータの対応ができるようにしておくこと。
4. 走行性に関する実験 (1) 下り勾配の下り勾配長と走行速度に関する実験	計測機器 データ内容 計測方法 計測タイミング	データブレイバック装置 走行軌跡 位置 速度 時間 MTへ連続、自動記録 連続計測、一定距離毎（地点）における速度を測定することが可能とする一方、下り勾配毎の速度が測定可能とする。	心拍計 皮膚電位計 眼移計 フリッカー 心拍数 発汗 眼移 目の疲労 データレコーダへ連続、自動記録 連続計測、一定距離毎（地点）における速度を測定することが可能とする一方、下り勾配毎の速度が測定可能とする。	舵角計 アクセル踏量計 ブレーキ踏量計 ハンドル角 ハンドル角速度 アクセル踏量 ブレーキ踏量 データレコーダへ連続、自動記録 連続計測、一定距離毎（地点）における速度を測定することが可能とする一方、下り勾配毎の速度が測定可能とする。

2. 1 高速道路構造等に関する実験

(1) 高速走行時の道路横断面構成（幅員構成）と走行性に関する実験

実験内容：路肩幅員（1.75、3.00）と車道幅員（3.25、3.75）、車線数（2車線、3車線）を組合せた横断面構成の区間を各数km設定し、数種の速度でその区間を走行させ、そのときのデータを計測する。なお、幅員の変化点がドライバーに確認されやすい箇所とわかりにくい箇所も設定しておく。被験者は、性別、年齢を考慮して50人以上とする。また、シミュレータに慣れるため、実験前に一般的な道路を模擬し、10km程度運転させる。

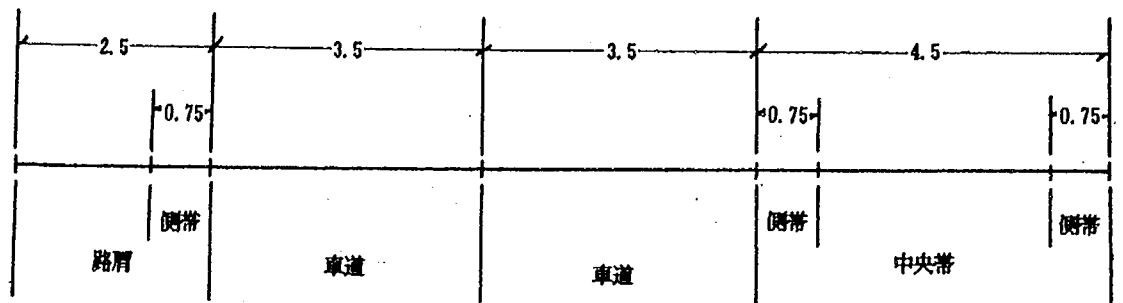


図 2-1 標準横断面構成

表 2-3 横断面の組合せ

	路 肩	車 道	車 道	中央分離帯
標準	2.5	3.5	3.5	4.5
1 案	1.75	3.5	3.5	4.5
2 案	3.0	3.5	3.5	4.5
3 案	1.75	3.25	3.25	4.5
4 案	3.0	3.25	3.25	4.5
5 案	1.75	3.75	3.75	4.5
6 案	3.0	3.75	3.75	4.5

評価方法 1 走行状況の変化

計 測 機 器 データプレイバック装置
 データ内容 走行位置、走行速度、走行車線
 計 測 方 法 MTへ連続、自動記録
 計測タイミング 連続計測、幅員構成に変化が生ずる箇所とデータが対応すること。

評価方法 2 人間生理状況の変化

計 測 機 器 心拍計、皮膚電位計
 データ内容 心拍数、発汗
 計 測 方 法 データレコードまたはフロッピーへ連続、自動記録
 計測タイミング 連続計測、幅員構成に変化が生ずる箇所とデータが対応すること。（走行状況と対応できるようにする）

評価方法3 車両機械特性の変化

計測機器	舵角計、アクセル踏量計、ブレーキ踏量計
データ内容	ハンドル角、アクセル踏量、ブレーキ踏量
計測方法	データレコーダまたはフロッピーへ連続、自動記録
計測タイミング	連続計測、幅員構成に変化が生ずる箇所とデータが対応すること。

(2) 高速走行時の最小曲線半径に関する実験

実験内容：走行速度別、曲線半径、緩和曲線、片勾配等を組合せる（表2-4）と同時に、曲線部と曲線部の間に10km程度の直線区間（幅員 3.5m、横断勾配 2.0%）を持つ道路を作成し、ドライバーに自由走行（60km/h以上）させたときのデータを計測する。なお、直線部と曲線部の緩和曲線がドライバーにわからないように設定しておくこと。

被験者は、性別、年齢を考慮して50人以上とする。また、シミュレータに慣れるため、実験前に一般的な道路を模擬し、10km程度運転させる。

表2-4 最小曲線半径

線形	速度 (km/h)	緩和曲線 (m)	曲線半径 (m)	片勾配 (%)
曲線部	120	100	570	10
	100	85	380	
	80	70	230	
	60	50	120	

評価方法1 走行状況の変化

計測機器	データブレイバック装置
データ内容	走行軌跡、位置、速度
計測方法	MTへ連続、自動記録
計測タイミング	連続計測、緩和曲線を含む曲線部と直線部のデータが対応可能となるようにしておくこと。

評価方法2 人間生理状況の変化

計測機器	心拍計、皮膚電位計、眼移計
データ内容	心拍数、発汗、眼の動き、まばたき
計測方法	データレコーダへ連続、自動記録
計測タイミング	連続計測、緩和曲線を含む曲線部と直線部のデータが対応可能となるようにしておくこと。

評価方法3 車両機械特性の変化

計測機器	舵角計、アクセル踏量計、ブレーキ踏量計
データ内容	ハンドル角、ハンドル角速度、アクセル踏量、ブレーキ踏量
計測方法	データレコーダーへ連続、自動記録
計測タイミング	連続計測、緩和曲線を含む曲線部と直線部のデータが対応可能となるようにしておくこと。

(3) 高速走行時の道路線形（縦断、平面線形）に関する実験

実験内容：平面線形と縦断線形の各種組合せ方（表2-5、図2-2）を基に、表2-6に示す数値を組合せて、立体線形区間を数kmずつ作成し、各区間を自由速度で走行したときのデータを計測する。また、各立体線形間には道路区間を設け、組合せ条件が明確に把握できるようにしておく。被験者は、性別、年齢を考慮して50人以上とする。また、シミュレータに慣れるため、実験前に一般的な道路を模擬し、10km程度運転させる。

表2-5 立体線形要素の採用

緩和曲線と円曲線を同一視する－4種類

平面形 縦断形	直線	曲線
直線	I	III
曲線	II	IV

緩和曲線と円曲線を区分する－6種類

平面形 縦断形	直線	円曲線	緩和曲線
直線	I	III	V
曲線	II	IV	VI

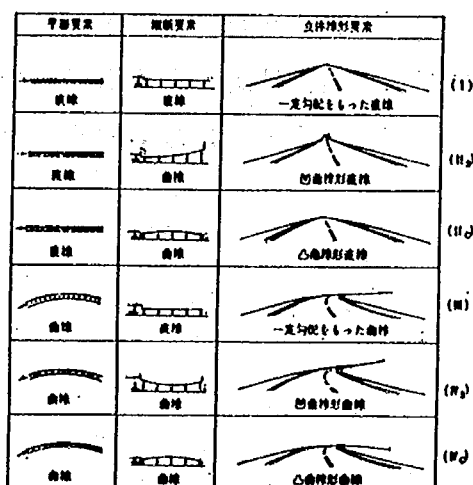


図2-2 立体線形の透視形状

表 2-6 平面と縦断曲線の半径の均衡

平面曲線半径 (m)	縦断曲線半径 (m)
500	10,000
700	12,000
800	16,000
900	20,000
1,000	25,000
1,100	30,000
1,200	40,000
1,500	60,000
2,000	100,000

評価方法 1 走行状況の変化

計 測 機 器	データブレイバック装置
デ ー タ 内 容	走行軌跡、位置、速度
計 測 方 法	MTへ連続、自動記録
計測タイミング	連続計測、立体線形に変わる箇所とデータが対応できるようにしておくこと。

評価方法 2 人間生理状況の変化

計 測 機 器	心拍計、皮膚電位計、筋電計
デ ー タ 内 容	心拍数、発汗、筋電図
計 測 方 法	データレコーダまたはフロッピーへ連続、自動記録
計測タイミング	連続計測、立体線形に変わる箇所とデータが対応できるようにしておくこと。

評価方法 3 車両機械特性の変化

計 測 機 器	舵角計、アクセル踏量計、ブレーキ踏量計
デ ー タ 内 容	ハンドル角、ハンドル角速度、アクセル踏量、ブレーキ踏量
計 測 方 法	データレコーダまたはフロッピーへ連続、自動記録
計測タイミング	連続計測、立体線形に変わる箇所とデータが対応できるようにしておくこと。

2. 2 安全施設等に関する実験

(1) 視線誘導標の大きさ及び配置に関する実験

実験内容：視線誘導標の設置高さ、間隔、大きさ及び設置、位置を表2-7に示す数値で組合せた区間を各数kmずつ作成し、自由速度で走行したときの速度と視認（注視）状況をデータとして計測する。なお、視線誘導標の設置条件がドライバーにわからないように設置しておく。

被験者は、性別、年齢を考慮して50人以上とする。また、シミュレータに慣れるため、実験前に一般的な道路を模擬し、10km程度運転させる。

表2-7 視線誘導標の組合せ

設置高さ (cm)	設置間隔 (m)	物の大きさ (ϕ)	備 考
80	50~30	5~20	角度なども検討するとよい
90			
100			
110			
120			
130			

評価方法1 走行状況の変化

計 測 機 器	データプレイバック装置
デ ー タ 内 容	走行軌跡、位置、速度
計 測 方 法	MTへ連続、自動記録
計測タイミング	連続計測、設置条件（パターン）が変わる箇所でのデータの対応が可能であること。

評価方法2 人間生理状況の変化

計 測 機 器	皮膚電位計、アイカメラ、フリッカー
デ ー タ 内 容	発汗、注視位置、疲労
計 測 方 法	データレコーダへ連続、自動記録
計測タイミング	連続計測、設置条件（パターン）が変わる箇所でのデータの対応が可能であること。

評価方法3 車両機械特性の変化

計 測 機 器	操舵計、アクセル踏量計、ブレーキ踏量計
デ ー タ 内 容	ハンドル角、ハンドル角速度、アクセル踏量、ブレーキ踏量
計 測 方 法	データレコーダへ連続、自動記録
計測タイミング	連続計測、設置条件（パターン）が変わる箇所でのデータの対応が可能であること。

(2) 高速走行時の道路標識の位置、大きさ、色等視認性に関する実験

実験内容：一般に現在使用されている道路標識（106型と113型）について、最適な設置位置と角度（降雪時、角度をつけると着雪防止効果がある）を組合せ、条件を設定する。設定された条件毎に走行速度と視認性のデータを計測するが、車線数の多い道路では視認する角度が異なるので、走行車線を走行しているときとする。

被験者は、性別、年齢を考慮して50人以上とする。また、シミュレータに慣れるため、実験前に一般的な道路を模擬し、10km程度運転させる。

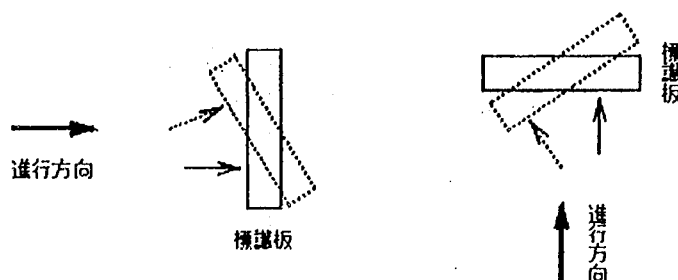


図 2 - 3 標識の設置角度

評価方法 1 走行状況の変化

計 測 機 器	データプレイバック装置
デ ー タ 内 容	走行軌跡、位置、速度
計 測 方 法	MTへ連続、自動記録
計測タイミング	連続計測、各ケース毎にデータの対応ができるようにしておくこと。

評価方法 2 人間生理状況の変化

計 測 機 器	眼移計、アイカメラ、フリッカー、皮膚電位計、VTR
デ ー タ 内 容	眼移、注視点、眼の疲労、発汗、被験者の動き
計 測 方 法	データレコーダへ連続、自動記録
計測タイミング	連続計測、各ケース毎にデータの対応ができるようにしておくこと。

評価方法 3 車両機械特性の変化

計 測 機 器	舵角計、アクセル踏量計、ブレーキ踏量計
デ ー タ 内 容	ハンドル角、ハンドル角速度、アクセル踏量、ブレーキ踏量
計 測 方 法	データレコーダへ連続、自動記録
計測タイミング	連続計測、各ケース毎にデータの対応ができるようにしておくこと。

2.3 トンネルに関する実験

(1) トンネル内の横断面構成（幅員構成）と走行性に関する実験

実験内容：2車線のトンネルにおける走行及び追越車線（左、右）側にある各路肩幅員の最適幅を把握するため、トンネル断面種とは関係なく、図2-4に示す標準横断面構成を変化させて条件の異なる断面を作成し、各条件の区間を指定した速度で走行させたときのデータを計測する。ただし、トンネル内でケースを変えることはせず、トンネルを1ケースとして実験を行う。従って、データは明り部から連続して計測する。ドライバーがトンネルに入るときに幅員の違い（ケース）が認知されないよう設定する。

被験者は、性別、年齢を考慮して50人以上とする。また、シミュレータに慣れるため、実験前に一般的な道路を模擬し、10km程度運転させる。

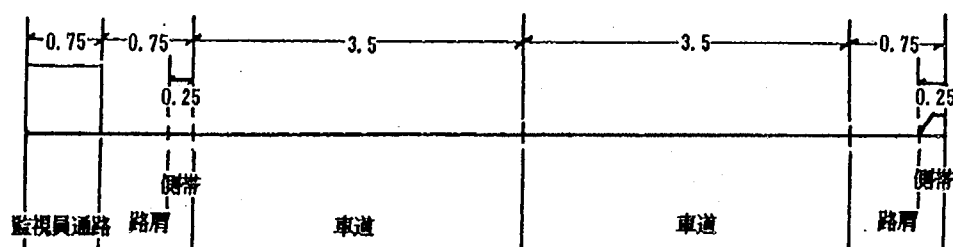


図2-4 トンネル横断面図

表2-8 横断面の組合せ

		路肩	車道	車道	路肩	道路幅員
標準	0.75	1.0	3.5	3.5	1.0	9.0
1案	0.75	1.25	3.5	3.5	1.25	9.5
2案	0.75	1.5	3.5	3.5	1.5	10.0
3案	0.75	1.0	3.75	3.75	1.0	9.5
4案	0.75	1.25	3.75	3.75	1.25	10.0
5案	0.75	1.5	3.75	3.75	1.5	10.5

評価方法1 走行状況の変化

計測機器 データブレーバック装置

データ内容 走行軌跡、位置、速度

計測方法 MTへ連続、自動記録

計測タイミング 連続計測、トンネルに入る毎にデータの対応ができるようにしておくこと。

評価方法2 人間生理状況の変化

計測機器	心拍計、皮膚電位計、眼移計、脳波計
データ内容	心拍数、発汗、眼の収縮、脳波
計測方法	データレコーダへ連続、自動記録
計測タイミング	連続計測、トンネル坑口とトンネル中心部とのデータの対応ができるようにしておくこと。

評価方法3 車両機械特性の変化

計測機器	舵角計、アクセル踏量計、ブレーキ踏量計
データ内容	ハンドル角、ハンドル角速度、アクセル踏量、ブレーキ踏量
計測方法	データレコーダへ連続、自動記録
計測タイミング	連続計測、トンネル坑口とトンネル中心部とのデータの対応ができるようにしておくこと。

(2) トンネルポータル形状が走行性に与える影響に関する実験

実験内容：我が国は地形上の問題からトンネルが多く、それらトンネルの坑口形状にはいろいろな理由から形状数も多い。そこで、坑口の形状が道路利用者にどのような影響を与えているのか、基本的なものを中心とし、形状（基本的なトンネル坑口形状については別途資料収集が必要である）を作成し、指定速度で走行したときの走行挙動と運転者の特性を計測する。なお、明り部、トンネル部は、通常の横断面構成を持った道路とする。被験者は、性別、年齢を考慮して50人以上とする。また、シミュレータに慣れるため、実験前に一般的な道路を模擬し、10km程度運転させる。

評価方法1 走行状況の変化

計測機器	データプレイバック装置
データ内容	走行軌跡、位置、速度、時間
計測方法	MTへ連続記録
計測タイミング	連続計測し、トンネル坑口の形状が把握できる距離よりトンネル内に入る間のデータの対応が可能であること。

評価方法2 人間生理状況の変化

計測機器	心拍計、皮膚電位計、眼移計、脳波計
データ内容	心拍数、発汗、眼の動き、脳波
計測方法	データレコーダへ連続記録
計測タイミング	連続計測し、トンネル坑口の形状が確認できる距離からトンネル内に入る間のデータの対応が可能であること。

評価方法3 車両機械特性の変化

計測機器	舵角計、アクセル踏量計、ブレーキ踏量計
データ内容	ハンドル角、ハンドル角速度、アクセル踏量、ブレーキ踏量
計測方法	データレコーダへ連続記録
計測タイミング	連続計測し、トンネル坑口の形状が確認できる距離からトンネル内に入る間のデータの対応が可能であること。

(3) トンネル長と走行速度に関する実験

実験内容：2車線のトンネルにおける走行車線（左側）の路肩幅員の最適幅を把握するため、路肩幅員を変化させた区間（長いトンネル）を作成し、指定速度でその区間を走行させたときのデータを計測する。一つのトンネルを1ケースとして実験を行う。なお、ドライバーがトンネルに入るとき、路肩幅員の違いが認知されないよう設定する。

被験者は、性別、年齢を考慮して50人以上とする。また、シミュレータに慣れるため、実験前に一般的な道路を模擬し、10km程度運転させる。

評価方法1 走行状況の変化

計測機器	データブレーバック装置
データ内容	走行軌跡、位置、速度
計測方法	MTへ連続、自動記録
計測タイミング	連続計測、トンネルに入る毎にデータの対応ができるようにしておくこと。

評価方法2 人間生理状況の変化

計測機器	心拍計、皮膚電位計、眼移計、脳波計
データ内容	心拍数、発汗、眼の収縮、脳波
計測方法	データレコーダへ連続、自動記録
計測タイミング	連続計測、トンネル坑口とトンネル中心部とのデータの対応ができるようにしておくこと。

評価方法3 車両機械特性の変化

計測機器	舵角計、アクセル踏量計、ブレーキ踏量計
データ内容	ハンドル角、ハンドル角速度、アクセル踏量、ブレーキ踏量
計測方法	データレコーダへ連続、自動記録
計測タイミング	連続計測、トンネル坑口とトンネル中心部とのデータの対応ができるようにしておくこと。

2. 4 走行性に関する実験

(1) 下り勾配部の下り勾配長と走行速度に関する実験

実験内容：現在、縦断勾配は車両の登坂勾配によって定められている（坂路の終端において、乗用車に対してはほぼ平均走行速度、普通トラックに対してはほぼ設計速度の $1/2$ の速度が確保できるように縦断勾配の値と長さを定める。この場合の坂路始端速度は80km/hの速度を有するもの）。そこで、縦断勾配はできるだけ小さくする必要があるが、我が国のよう

な地形の場合、必ずしも満足するような状態を確保することは困難である。また、下り勾配を長く設けて車両が速度の出し過ぎを招き、危険とならないように注意する必要があるが、視覚的に滑らかな線形を得るよう努めなければならない。

従って、ここでは、表2-9に示す現状の基準に対して、下り方向に進む車両の安全を確保できる勾配の値と長さを把握するため、各種条件（勾配と長さ）を組合せた道路を作成し、自由速度で走行してもらったときの車両の運動に関するデータを計測する。

被験者は、性別、年齢を考慮して50人以上とする。また、シミュレータに慣れるため、実験前に一般的な道路を模擬し、10km程度運転させる。

表 2-9 縦断勾配

設 計 速 度 (単位 1 時間につきキロメートル)	縦 断 勾 配 (単位 パーセント)
120	2
100	3
80	4
60	5
50	6
40	7
30	8
20	9

評価方法 1 走行状況の変化

計 測 機 器	データプレイバック装置
デ ー タ 内 容	走行軌跡、位置、速度、時間
計 測 方 法	MTへの連続、自動記録
計測タイミング	連続計測、一定距離毎（地点）における速度を確認することが可能とする。一方、下り勾配毎の速度が確認可能とする。

評価方法 2 人間生理状況の変化

計 測 機 器	心拍計、皮膚電位計、眼移計、フリッカー
デ ー タ 内 容	心拍数、発汗、眼移、目の疲労
計 測 方 法	データレコーダへ連続、自動記録
計測タイミング	連続計測、一定距離毎（地点）における速度を確認することが可能とする。一方、下り勾配毎の速度が確認可能とする。

評価方法 3 車両機械特性の変化

計 測 機 器	舵角計、アクセル踏量計、ブレーキ踏量計
デ ー タ 内 容	ハンドル角、ハンドル角速度、アクセル踏量、ブレーキ踏量
計 測 方 法	データレコーダへ連続、自動記録
計測タイミング	連続計測、一定距離毎（地点）における速度を確認することが可能とする。一方、下り勾配毎の速度が確認可能とする。

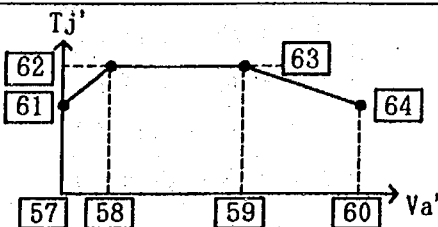
土木研究所の道路走行シュミレーターは、各種の道路条件によって左右されるドライバーの運転挙動を究明し、道路構造基準の策定を目的に開発されたものである。ドライバーは忠実に再現された道路構造等の情報をドライバー前面に設置されたCGI画像により入手し、状況把握、判断を経て、操縦機器（ハンドル、アクセル、ブレーキ）の操作を行う。現段階において本シュミレーターは座席固定式のため、車両操作判断に必要な情報はCGI画像（操作事前情報）のみから得られ、車両挙動を模擬する自由度の運動からくる体感反応とそれに伴う操作判断は行われない。したがって車両挙動の再現にあたっては、当実験装置及び目的にあった適当な運動モデルの構築が利用価値を高めるといえる。

以下に土木研究所の道路走行シュミレーターにおける基本的な車両運動方程式プログラムの設定定数をするし、所内の実験に先立ち実施した車両の操作性、応答性を向上させるためのパラメーター変更について記述する。

車両運動方程式の定数ファイルデータ一覧表

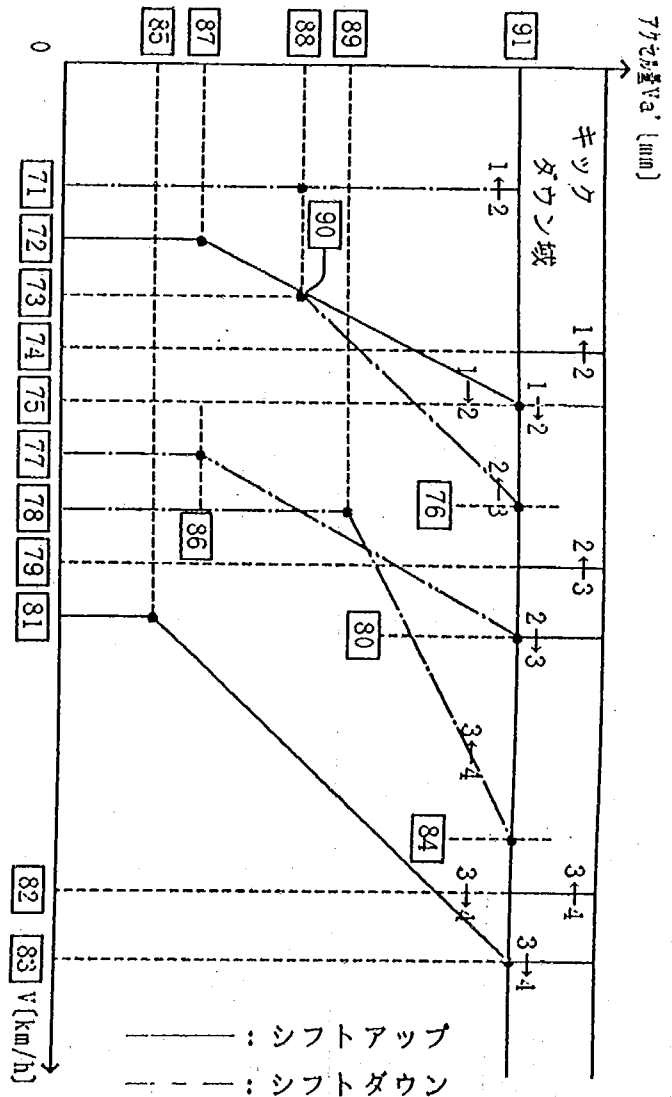
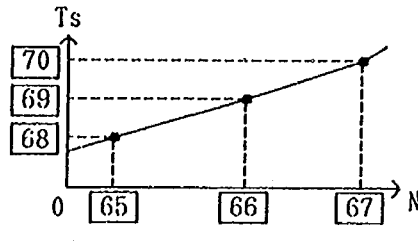
アドレス	データ	単位	用途	備考
1	100.0	kgf・m/s ²	X軸まわりの慣性モーメント I _x	
2	200.0	kgf・m/s ²	Y軸まわりの慣性モーメント I _y	
3	200.0	kgf・m/s ²	Z軸まわりの慣性モーメント I _z	
4	1.27	m	車重心位置-前輪中心までの距離 ℓ ₁	
5	1.49	m	車重心位置-後輪中心までの距離 ℓ ₂	
6	1.42	m	トレッド t _r	
7	-0.357	m	車体重心と横力作用点との距離 ℓ _y	
8	0.300	m	距面から重心までの高さ ℓ _h	※1
9	9.8	m/s ²	重力加速度 g	
10	1360.0	kgf	空車重量 W ₁	
11	60.0	kgf	乗員及び積荷重量 W ₂	
12	0.1	s	時定数 T ₁	※2
13	0.9		動力伝達効率 η _t	
14	0.3	m	タイヤの有効半径 R _t	
15	0.8		ロータとパットの摩擦係数 μ _{rp}	
16	28.8	cm ²	ホイールシリンダ(前輪)の断面積 A _{W1}	
17	14.4	cm ²	ホイールシリンダ(後輪)の断面積 A _{W2}	
18	2.0		ブレーキペダル比 K _B	
19	0.26	m	ロータの有効半径 R _r	
20	4.45	cm ²	マスタシリンダの断面積 A _M	
21	0.6		ブレーキ力の前輪に対する配分係数 K _{B1}	
22	0.4		ブレーキ力の後輪に対する配分係数 K _{B2}	
23	0.125	kgf・s ² /m ³	空気密度 ρ	
24	2.16	m ²	自動車正面投影面積 S	
25	5.27	m ²	自動車側面投影面積 S _y	
26	2.70		1速時加速抵抗 φ ₁	
27	1.54		2速時加速抵抗 φ ₁	
28	1.20		3速時加速抵抗 φ ₁	
29	1.10		4速時加速抵抗 φ ₁	
30	2.20		後退時加速抵抗 φ ₁	
31	0.3		抗力係数 C _x	

車両運動方程式の定数ファイルデータ一覧表

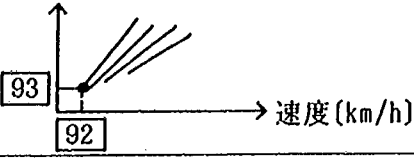
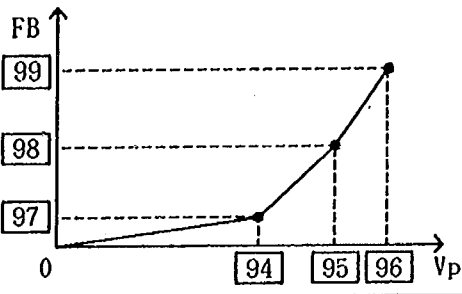
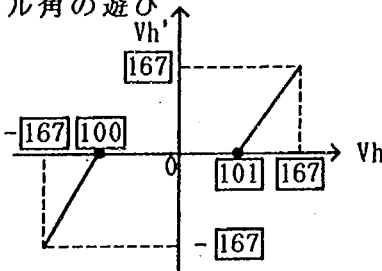
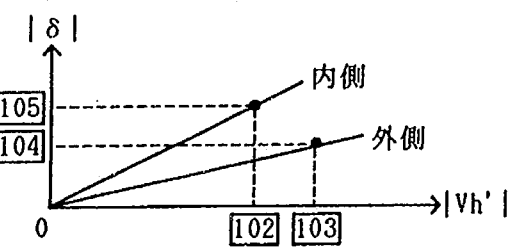
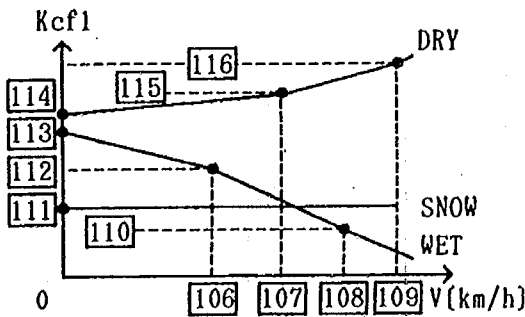
7D15	データ	単位	用途	備考
3 2	0.3		横力係数 C_y	
3 3	0.001	m/s	VXSTOP	
3 4	0.01	m/s	VySTOP	
3 5	6800.0	kgf/m	左側前輪バネ定数 K_{s1}	
3 6	6800.0	kgf/m	右側前輪バネ定数 K_{s2}	
3 7	6800.0	kgf/m	左側後輪バネ定数 K_{s3}	
3 8	6800.0	kgf/m	右側後輪バネ定数 K_{s4}	
3 9	400.0	kgf・s/m	左側前輪ダンパ係数 C_1	
4 0	400.0	kgf・s/m	右側前輪ダンパ係数 C_2	
4 1	400.0	kgf・s/m	左側後輪ダンパ係数 C_3	
4 2	400.0	kgf・s/m	右側後輪ダンパ係数 C_4	
4 3	2.785		変速機の 1 速時の変速比	
4 4	1.545		変速機の 2 速時の変速比	
4 5	1.000		変速機の 3 速時の変速比	
4 6	0.694		変速機の 4 速時の変速比	
4 7	0.000		変速機の P 速時の変速比	
4 8	0.000		変速機の N 速時の変速比	
4 9	-2.272		変速機の R 速時の変速比	
5 0	4.636		減速機の減速比	
5 1	3.1415		円周率 π	
5 2	35.0	kgf	サイドブレーキ力の最大値 B_{smax}	
5 3	64.0	mm	サイドブレーキ引き量のしきい値	
5 4	60.0	km/h	ブレーキ音フラグに関する速度のしきい値	
5 5	60.0	kgf	ブレーキ音フラグに関するブレーキ力のしきい値	
5 6	0.017453		[deg]→[rad]への単位変換用定数	
5 7	0.0	mm		未使用 [200] ~ [227] を使用する事。
5 8	20.0	mm		
5 9	40.0	mm		
6 0	80.0	mm		
6 1	2.36	kgf・m		

車両運動方程式の定数ファイルデータ一覧表

アドレス	データ	単位	用途	備考
6 2	6.8	kgf・m	エンジンの軸トルク	未使用 [200] ~ [227] を使用する事。
6 3	11.3	kgf・m		
6 4	20.3	kgf・m		
6 5	1000.0	rpm	エンジンの機械損失特性	□の中の番号は アドレスである。
6 6	3000.0	rpm		
6 7	5000.0	rpm		
6 8	1.6	kgf・m		
6 9	2.6	kgf・m		
7 0	4.3	kgf・m		
7 1	15.0	km/h	ドライブのギア特性	
7 2	17.0	km/h		
7 3	20.0	km/h		
7 4	42.0	km/h		
7 5	50.0	km/h		
7 6	58.5	km/h		
7 7	25.0	km/h		
7 8	32.0	km/h		
7 9	87.0	km/h		
8 0	95.0	km/h		
8 1	37.0	km/h		
8 2	143.0	km/h		
8 3	150.0	km/h		
8 4	108.0	km/h		
8 5	8.0	m m		
8 6	10.0	m m		
8 7	15.0	m m		
8 8	20.0	m m		
8 9	20.0	m m		
9 0	20.0	m m		
9 1	70.0	m m		



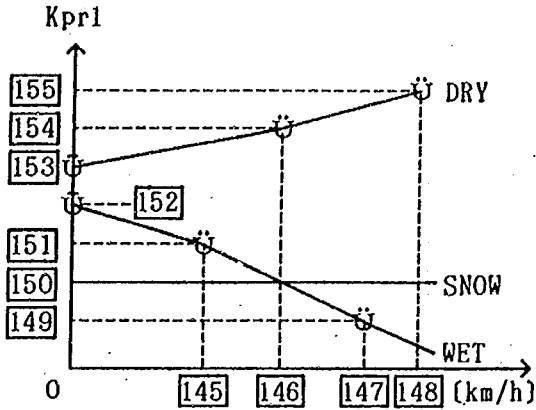
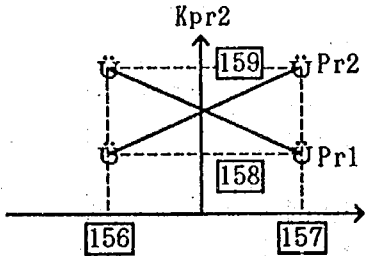
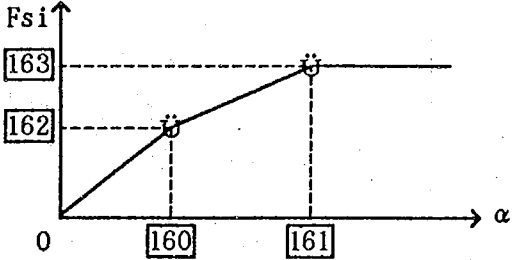
車両運動方程式の定数ファイルデータ一覧表

アドレス	データ	単位	用途	備考
92	5.0	km/h	エンジン回転数N 	□の中の番号はアドレスである。
93	650.0	rpm		
94	19.2	mm	フットブレーキ特性 	□の中の番号はアドレスである。
95	70.0	mm		
96	80.0	mm		
97	0.0	kgf		
98	25.0	kgf		
99	50.0	kgf		
100	0.0	deg	ハンドル角の遊び 	□の中の番号はアドレスである。
101	0.0	deg		
102	600.0	deg	ハンドル角-実舵角特性 	未使用 182 ~ 199 を使用する事
103	600.0	deg		
104	30.0	deg		
105	40.0	deg		
106	60.0	km/h	コーナリングフォースに対する 各係数Kcf1, Kcf2, Kcf3 	□の中の番号はアドレスである。
107	100.0	km/h		
108	140.0	km/h		
109	200.0	km/h		
110	0.15			
111	0.15			
112	0.42			
113	0.725			
114	0.8			
115	0.86			

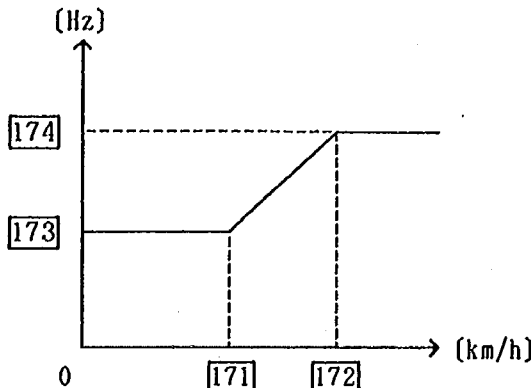
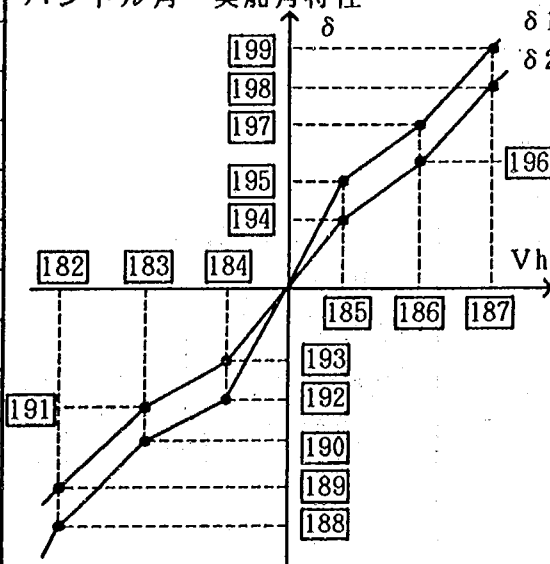
車両運動方程式の定数ファイルデータ一覧表

アドレス	データ	単位	用途	備考
116	1.1			□の中の番号はアドレスである。
117	-100.0	kgf		
118	100.0	kgf		
119	0.9			
120	1.1			
121	-100.0	kgf		
122	100.0	kgf		
123	0.9			
124	1.1			
125	60.0	km/h	フットブレーキ力に対する各係数 KBf1, KBf2, KBf3 	□の中の番号はアドレスである。
126	100.0	km/h		
127	140.0	km/h		
128	200.0	km/h		
129	0.15			
130	0.15			
131	0.42			
132	0.725			
133	0.8			
134	0.86			
135	1.1			
136	-100.0	kgf		
137	100.0	kgf		
138	1.0			
139	1.0			
140	-100.0	kgf		
141	100.0	kgf		
142	1.0			
143	1.0			
144	80.0	km/h		
				□の中の番号はアドレスである。

車両運動方程式の定数ファイルデータ一覧表

アドレス	データ	単位	用途	備考
145	60.0	km/h	エンジン駆動力に対する 各係数 K_{pr1} , K_{pr2}  	□の中の番号は アドレスである。 ※7 ※8
146	100.0	km/h		
147	140.0	km/h		
148	200.0	km/h		
149	0.375			
150	0.375			
151	0.42			
152	0.725			
153	0.8			
154	0.86			
155	1.1			
156	-100.0	kgf		
157	100.0	kgf		
158	1.0			
159	1.0			
160	4.0	deg	スリップ角に対するタイヤ横力特性	□の中の番号は アドレスである。 ※9 ※10
161	6.0	deg		
162	1280.0	kgf		
163	1600.0	kgf		
				
164	0.018		ころがり抵抗係数 μ_{r1} (DRY時)	
165	0.018		ころがり抵抗係数 μ_{r2} (WET時)	
166	0.050		ころがり抵抗係数 μ_{r3} (SNOW時)	
167	540.0	deg	ハンドル角の最大値	
168	0.033	s	積分時間 ΔT	
169	0.000872	rad	スムージング処理用 $\Delta \theta$	
170	0.000872	rad	スムージング処理用 $\Delta \phi$	

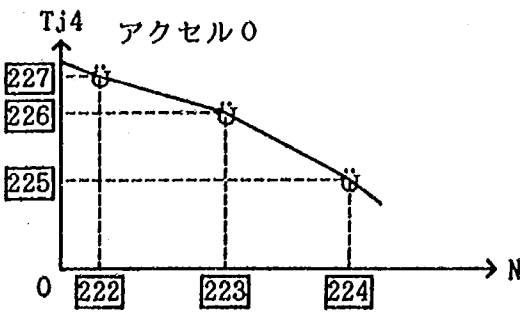
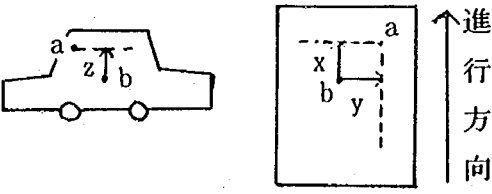
車両運動方程式の定数ファイルデータ一覧表

アドレス	データ	単位	用途	備考
171	0.1	km/h	振動特性 	□の中の番号はアドレスである。
172	150.0	km/h		
173	6.25	Hz		
174	17.5	Hz		
175	10.0	Hz	スムージング処理用振動量	
176	0.00	m/s ²	加速度 $\dot{V}_x$ の最小値	
177	4095.0	—	ハードウェア I/F エンジン回転数の最大値	
178	180.0	km/h	自車の最高速度	
179	8000.0	rpm	自車の最大エンジン回転数	
180	10.0	m/s ²	$ \dot{V}_x $ の最大値	
181	12.4	m/s ²	$ \dot{V}_y $ の最大値	
182	-635.0	deg	ハンドル角-実舵角特性 	□の中の番号はアドレスである。
183	-35.0	deg		
184	-20.0	deg		
185	20.0	deg		
186	35.0	deg		
187	635.0	deg		
188	-41.55	deg		
189	-31.27	deg		
190	-1.16	deg		
191	-0.95	deg		
192	-0.60	deg		
193	-0.50	deg		
194	0.50	deg		
※11				
※12				
※13				
※14				
※15				
※16				
※17				

車両運動方程式の定数ファイルデータ一覧表

アドレス	データ	単位	用途	備考
195	0.6	deg	※18 ※19 ※20 ※21 ※22	□の中の番号はアドレスである。
196	0.95	deg		
197	1.16	deg		
198	31.27	deg		
199	41.55	deg		
200	800.0	rpm	エンジンの軸トルク 	□の中の番号はアドレスである。
201	3200.0	rpm		
202	5600.0	rpm		
203	8200.0	rpm		
204	15.0	kgf・m		
205	19.2	kgf・m		
206	20.0	kgf・m		
207	8.0	kgf・m		
208	1100.0	rpm		
209	2000.0	rpm		
210	5000.0	rpm		
211	6600.0	rpm		
212	15.0	kgf・m		
213	16.3	kgf・m		
214	17.2	kgf・m		
215	7.0	kgf・m		
216	1100.0	rpm		
217	2800.0	rpm		
218	4000.0	rpm		
219	6.0	kgf・m		
220	13.3	kgf・m		
221	13.3	kgf・m		
222	650.0	rpm		
223	1000.0	rpm		
224	2000.0	rpm		

車両運動方程式の定数ファイルデータ一覧表

アドレス	データ	単位	用途	備考
225	0.0	kgf・m		□の中の番号はアドレスである。
226	4.0	kgf・m		
227	5.1	kgf・m		
228	0.02	deg	$\dot{\epsilon}$	
229	0.3	deg	$ \epsilon $ の最大値	
230	0.0034	rad	他車方位角スムージング用 ΔH	
231	3358		ハドウェア I/F 速度の最大値	
232	0.3			未使用
233	0.01			未使用
234	0.975	s	Zスムージング用定数C	
235	0.0		$\mu\alpha$ の最小値	
236	0.2	m	 $x : 236$ $y : 237$ $z : 238$ a : 視点位置 b : 重心位置	□の中の番号はアドレスである
237	0.7	m		
238	0.825	m		
239	1.0	—	μ	コーナリングフォース最大値CFmaxi計算用 係数 $CF_{maxi} = b \sqrt{(\mu w_i)^2 - \left(\frac{T_i}{a}\right)^2}$
240	1.0	—	a	
241	1.0	—	b	

本研究所の道路走行シュミレーターは簡易的な車両運動方程式により挙動再現されている。そのため実車定数をそのまま用いると、実車操向系統パラメーターを模擬してないため車両運動の増幅或いは不足を生じる。よってそれらの車両挙動が視覚、聴覚、操縦感覚に対し、より実車感覚に近い自然なものとなるように現在入力されている車両運動方程式のパラメーターでその代行を試みた（*のついたパラメーター）。以下にその変更定数について記す。

1) 車両挙動の安定性をはかるための修正

*1. 路面から車体重心までの高さ l_h を下げる。

ハンドル操舵時におこるローリングを適度に抑制するために車体重心を下げ、操舵時安定感を向上させる。

*3~*6. フットブレーキ力（前輪左右、後輪左右）を一定値とする。

車体の剛性や足まわりのなどの詳細な運動方程式を付加してないため、左右の加重移動による各輪のブレーキ力の可変はおこなわず、一定値とする。

*7~*8. タイヤの駆動力（後輪左右）を一定値とする。

車体の剛性や足まわりのなどの詳細な運動方程式を付加してないため、左右の加重移動による各タイヤの駆動力の可変はおこなわず、一定値とする。

*9~*10. コーナーリング・フォースを高める。

タイヤに働く力とモーメントは簡略化し模擬されているため、過小操舵によって直進安定性が乱される。よってコーナーリング・フォースを高めて、高速走行実験に対応した走行安定性を確保する。

2) 操作応答性の実車とのズレによる不快感を減らすための修正

*2. エンジンの時定数 T_1 を小さくする。

アクセル踏み量に対するエンジン回転数の1次遅れを少なくし、滑らかなエンジンレスポンス感覚を発生させる。

*11~*22. ハンドル実蛇角の修正

運転操作から画像発生までのプロセス周期による、ハンドル操作時の車両挙動の遅延感を解消するため、ハンドルのあそびをなくし、その代わりにハンドル角発生時の実蛇角の値を低めに設定する。