

アンチスキッド装置評価用シミュレータ

Simulator for Antilock Brake System

松原 昭⁽¹⁾ 橋本 欣和⁽²⁾ 藤田 泰裕⁽³⁾
Akira Matsubara Yoshikazu Hashimoto Yasuhiro Fujita

要 旨

近年、自動車の基本性能である乗心地や走行性能に目を向けた装置の開発が相次いでいる。最適な制動力を得るアンチスキッドブレーキも普及が進みつつあり、当社でも数年前から制御装置の開発を手がけている。ところで、システムの評価はほとんど実車試験に依存し、多くの時間と労力を要しており、コンピュータシミュレーションによる、再現性に優れ、評価を容易にする装置の開発が要望されていた。

本シミュレータは、従来の大型コンピュータを用いたものと異なり、複数の高速マイコンを接続したリアルタイム動作で、実際に車載使用する制御装置やアクチュエータを接続できるフレキシブルな構成をしている。

本シミュレータによれば、実車試験とほぼ同等の結果が得られ、実車試験の不足点を補い、アルゴリズム検討やデバッグを効率的に行なう目的で、既に自動車メーカーでも実用に供している。

Recently, several new automobile devices that improve basic performance such as vehicle stability and maneuverability have been introduced to the market one after another. In braking technology, Antilock Brake System (ABS) that avoids wheel lockup and maintains vehicle stability and steerability has been getting more popular. We, FUJITSU TEN, also have developed ABS control units for several years.

Evaluation of ABS normally depends on actual vehicle tests with a lot of time and labor. So it has been desired to develop a special computer simulation system which can give the same test results repeatedly and make evaluation easier.

Our simulator works in real time, because it employs high performance micro-processors, which is different from what is composed of a large scale general purpose computer. That makes the system more flexible to be able to connect actual hardware such as a control unit or an actuator.

We can achieve very similar data as vehicle tests. It has already been used practically by an automobile maker in order to improve efficiency in software development, supplement vehicle tests and examine control algorithm.

1. はじめに

アンチスキッド装置（以下ABSという）は急ブレーキ時や摩擦係数（以下 μ という）の小さい路面（以下低 μ 路という）でのブレーキ時における車輪ロックを防止し、最大制動力を得ながら車両の直進安定性や、操舵性を保つものである。

ABSの構成は図-1に示すように車輪速度センサ、アクチュエータ、ABSコンピュータ（以下ECUという）から成る。ECUは車輪速度センサの信号により車輪のロック傾向を検出し、アクチュエータのソレノイドを駆動し、ホイールシリンダ圧を調節してスリップ率を10～20%付近に制御する。図-2に制御例を示す。

ABSの性能評価はテストコースで実車を用いて行なう。しかし、路面状態は刻一刻変化し、実験路も数種類しかないので正確な評価をするには何度も実験を繰返す必要がある。また実験路の制約や安全性の面から、部品故障時のシステムフェールセーフや高速時の評価は困難を伴なう。

筆者らは実車試験の不足点を補えるように、路

面や車両のコンピュータモデルをもとにコンピュータを用いて車両運動を計算して実車試験を実験室内で擬似する装置を開発した。この装置は実際のECUと接続し、実時間で処理を行なうのでリアルタイムシミュレータと呼ぶ。

本稿ではリアルタイムシミュレータ実用化のめどをつけることのできた試作機の概要、評価について述べる。

2. ねらい

従来のシミュレータはアナログコンピュータとデジタルコンピュータのハイブリッドシステムや大型コンピュータを用いたものであった。前者はアナログ部の計算精度が劣り、後者はシステム自体が大規模で高価である。近来、マイクロプロセッサはすばらしい進歩をとげ、高性能のプロセッサが低価格で入手できるようになったので、それを用いた小型のデジタルコンピュータによりシミュレータを実現する事にした。開発するに当たり次の点に留意した。

1) 試験路の設定

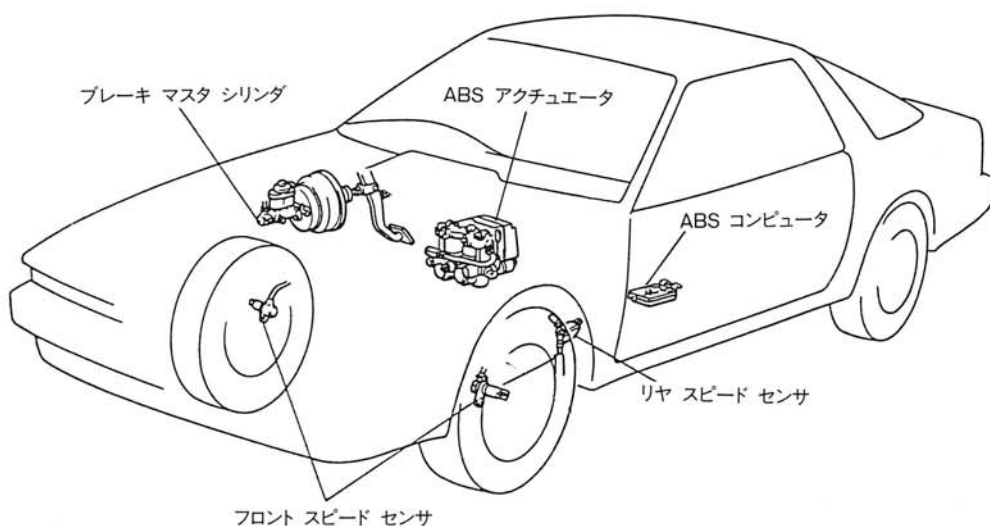


図-1 アンチスキッド装置構成

Fig. 1 Antilock brake system configuration.

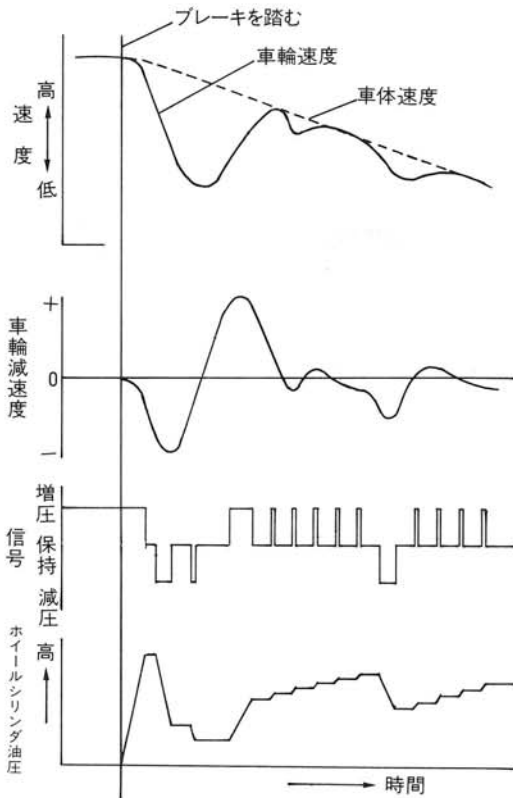


図-2 アンチスキッド制御例

Fig. 2 Example of antilock brake control.



図-3 シミュレータ外観

Fig. 3 Exterior view of simulator.

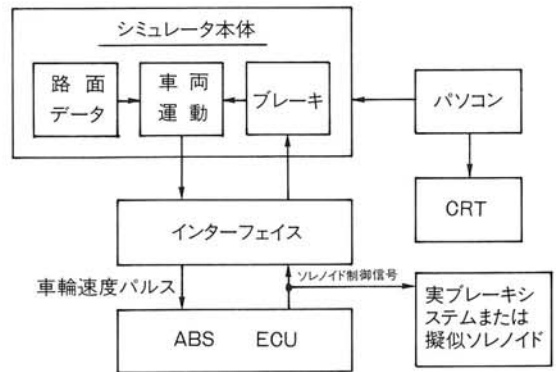


図-4 アンチスキッドシミュレータ構成図

Fig. 4 Simulator for antilock brake system.

あらゆる試験路が設定でき、種々の試験路におけるABSシステムの動作チェック、任意のABS制御アルゴリズムの動作チェックが容易にできる。

2) マンマシンインターフェイス

試験条件のパラメータをCRTを見ながら対話的に設定可能とし、容易に使用できる。

3) 高速性

マイクロプロセッサを複数用いて並列動作させる事により高速処理を行なう。(計算周期1ms以下)

3. 装置概要

3.1 構成

装置は大きく分けるとパソコン部、シミュレータ本体(以下本体という)、インターフェイス部から成る。パソコン部は本体とRS-232Cの通信回線につながり、本体はインターフェイスを介してABSのECUと接続している。図-3に外観図、図-4に構成図を示す。本体とインターフェイス部は19インチラックに組込んでいる。

操作者は、パソコンによりCRTを見ながら実験条件設定を行ない、通信回線で本体にそのデータを送る。本体は更にブレーキ、車両運動、路面を擬似する部分に分かれ、ECUのソレノイド制

表-1

項 目	設 定 範 囲
車 重	600~3000kg
ホイールベース長	1m以上
体 重 心 高 さ	0~1m
車輪慣性モーメント	0.01~10kg・m ²
油 圧 変 化 率	1~2000kg/cm ² /s
μ -S 特 性	μ : 0~1
初 速	0~300km/h

御信号を受けブレーキ力を計算し、路面との摩擦により変化する車輪速度信号をECUに出力する。

ブレーキ部は実ブレーキシステムに置換える事が可能であり、またインターフェイス部を換える事により種々のタイプのECUに対応できる。

3.2 機 能

表-1に実験条件の項目、設定範囲を示す。車両の設定は全ての乗用車が適応できる範囲になっている。

設定はユーザインターフェイスを考慮し、使い勝手を良くしている。例として路面データ設定時のCRT画面を図-5、図-6に示す。図-5の上半分

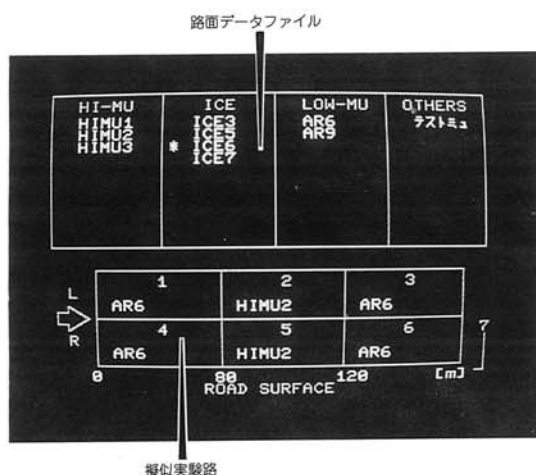
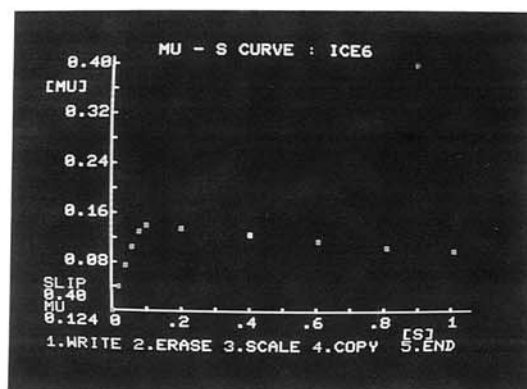
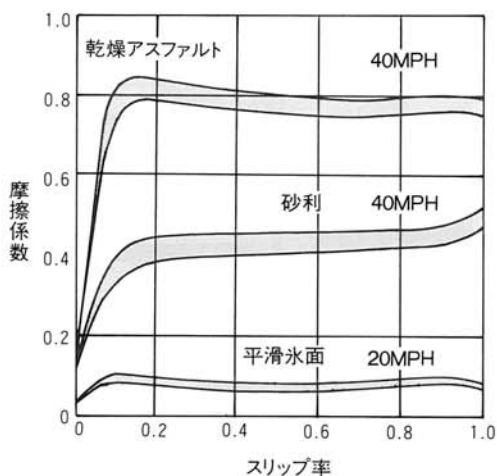


図-5 実験路設定画面

Fig. 5 Test road definition example.

図-6 μ -S特性設定画面Fig. 6 μ -S characteristics definition example.

は路面データのファイル名で、高 μ 路、低 μ 路、氷上路、その他に分けて表示し、各々最大20コマでデータを蓄える事ができる。下半分の長方形のわくは擬似実験路を表わす。車両は左から右に走り、一番左側の縦線はブレーキング地点で、その右の2本の縦線は路面の変化地点を示す。また中央の横線より上側は車両の左側車輪が、下側は右側車輪が走行する。したがって、路面は縦線と横線に囲まれた6つの領域に分かれ、それぞれ独立して状態を決める事ができる。この為左右 μ の異なる路面や、進行方向に μ が変化する路面での制

図-7 路面の μ -S特性例Fig. 7 Examples of μ -S characteristics.

御の評価ができる。

路面データを新規に設定したり、修正したりする場合は図-6の画面になる。中央のグラフは、摩擦係数 (μ) - スリップ率 (S) 特性であり、これが路面の特徴を表わす。図-7に代表的な路面の μ - S 特性を示す。

これらのグラフもCRT上でカーソルを移動させて容易に修正、追加ができる。

実験条件の設定が終了し、シミュレーションスタートキーを押すと車両が停止するまでシミュレーションを続け、停止すると制動時間、距離を表

示し、シミュレーションを終了する。シミュレーション中は本体のアナログ出力端子で車輪速度やソレノイド制御波形をモニターできる。

3.3 シミュレータの動作

シミュレーションのモデルを図-8に示し、ブレーキ、路面、車両運動の部分に分けてその動作を説明する。

3.3.1 ブレーキ部

アクチュエータ機能をシミュレーションし、ECUからの減圧、増圧の制御に従い、一定の応答遅れをもって任意の変化率（油圧勾配）で油圧を

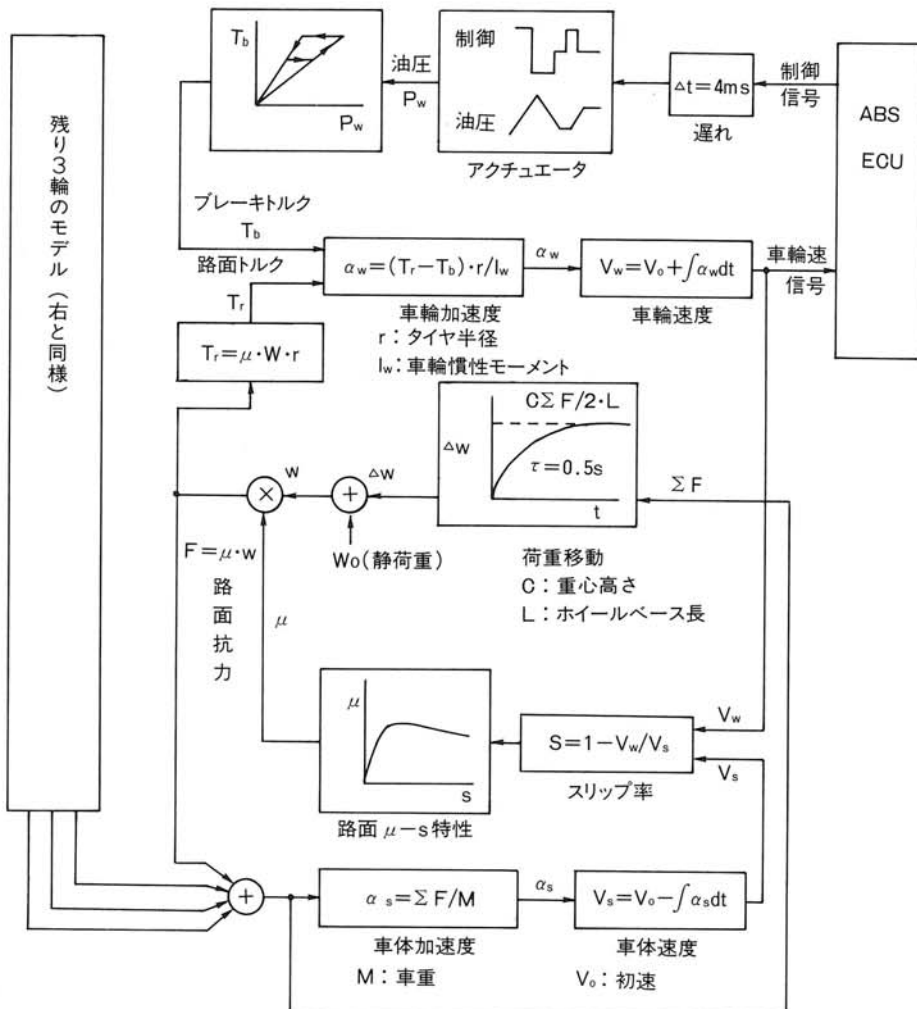
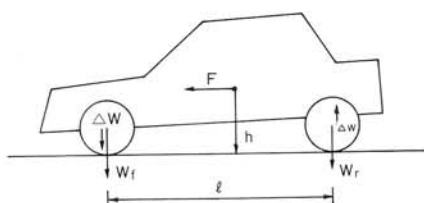


図-8 シミュレーションモデル

Fig. 8 Simulation model.



ℓ : ホイールベース長
 h : 重心高さ
 W_f : 前輪一輪当りの静荷重
 W_r : 後輪一輪当りの静荷重
 ΔW : 一輪当りの荷重移動量
 F : 車両減速による慣性力
 モーメントのつり合い
 $\Delta W \cdot \ell = F \cdot h / 2$
 $\therefore \Delta W = F \cdot h / (2 \cdot \ell)$

図-9 荷重移動

Fig. 9 Weight transfer.

変化させる。油圧はブレーキトルク (T_b) に変換され車輪を止めようと作用する。実際のブレーキ装置では油圧の変化に対して機械的構造から生じるヒステリシスをもって T_b は変化するのでこれも考慮している。

3.3.2 路面部

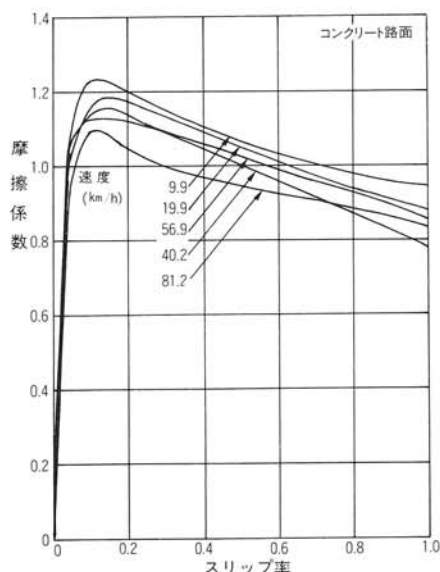
車体速度 (V_s) と車輪周速度 (以下車輪速度という) (V_w) から計算されるスリップ率 ($S = 1 - V_w/V_s$) に対してデータとして与えられている路面の μ - S 特性から μ を求める。

μ とその車輪の荷重 (W_w) の積が路面抗力 ($F = \mu \cdot W_w$) として作用し、タイヤ半径との積 $\mu \cdot W_w \cdot r$ が路面トルク (Tr) として車輪を回わそうとする。ここで図-9に示すように、荷重は車体減速時は車体が前のめりになるので静止時より前輪の荷重は重くなり、後輪の荷重は軽くなる事(荷重移動)を考慮している。

μ - S 特性は実際には同一路面であっても図-10に示すように速度により変化するが、ここでは考慮していない。

3.3.3 車両運動

車両の減速と車輪の回転運動をシミュレーションしている。車両は4輪それぞれに働く路面抗力

図-10 μ - S 特性の速度による変化Fig. 10 Transition of μ - S characteristics with vehicle velocity.

の和の力により停止し、車輪はブレーキトルク (T_b) と路面トルク (Tr) のモーメントのつり合いにより減加速を行なう。これらの運動は式(1)~(4)で表わされる。

車体減速度 α_s

$$\alpha_s = (F_{FR} + F_{FL} + F_{RR} + F_{RL}) / M \quad (\text{m/s}^2) \quad (1)$$

$$\left(\begin{array}{ll} F & : \text{路面抗力 (N)} \\ F \text{ の添字} & : FR, FL, RR, RL \text{ はそれぞれ右前輪、左前輪、右後輪、左後輪を表わす。} \\ M & : \text{車体質量 (kg)} \end{array} \right)$$

車体速度 V_s

$$V_s = V_{s0} - \int \alpha_s dt \quad (\text{m/s}) \quad (2)$$

[V_{s0} : 初速度 (m/s)]

車輪加速度 α_w

$$\alpha_w = (Tr - T_b) \cdot r / I_w \quad (\text{m/s}^2) \quad (3)$$

$$\left(\begin{array}{ll} r & : \text{車輪半径 (m)} \\ I_w & : \text{車輪慣性モーメント (kg} \cdot \text{m}^2) \end{array} \right)$$

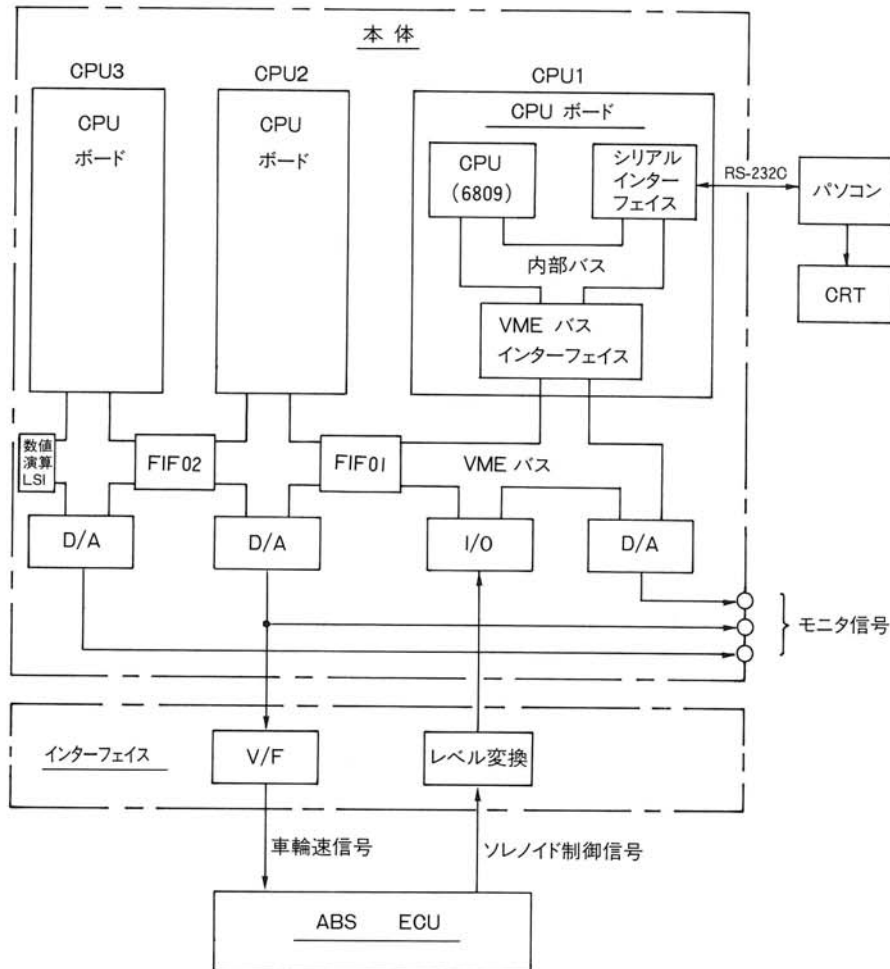


図-11 シミュレータハードウェア構成

Fig. 11 Block diagram of simulator hardware.

車輪速度 V_w

$$V_w = V_{w0} + \int \alpha_w dt \quad (4)$$

〔 V_{w0} : 初速度 (m/s)〕

F_{FR} , ..., F_{RL} の力は車両の重心まわりにモーメントを発生し、つり合いが破れると車は回転運動(ヨーイング)を起こすので、実際には運転者がハンドルを切ってこれを補正しようとするが、ここではヨーイングについては考慮していない。

4. 装置構成

4.1 ハード構成

図-11 にハード構成を示し、本体部とインターフェイス部に分けて説明する。

4.1.1 本体部

本体部はシミュレータの核になる部分で、設計のねらいは高速化と CPU の標準バスの採用による標準化である。バスには将来における、16ビット、32ビット CPU への拡張性を考慮して VME (Versa Module Europe) バスを採用した。そのため、CPU ボードやその周辺の I/O、D/A ボードは市販のボードを用いる事ができ、仕様変更、追加によるボード追加などに柔軟に対応できる。また開発期間の短縮と装置の信頼性向上にも

プログラム実行の同期は、1ms周期の外部割込信号が発生する毎にメインプログラムを1回実行し、実行後は次の割込信号を待つ事で行なう。

メインプログラムの実行時間はどれも $800\mu\text{s}$ ~ $950\mu\text{s}$ で、1msの計算周期で動作させるのにCPUの能力をフルに使用している。

車体速度、車輪速度は3. 3. 3の式(2)、(4)を次式の様に1ms間の変化分を積算する方法で計算する。ここで V_{Si} , V_{Wi} , α_{Si} , α_{Wi} は添字 i ($=0, 1, \dots, n$) により時刻 i での車体速度、車輪速度、車体減速度、車輪加速度を表わす。

$$\begin{aligned} V_{Sn} &= V_{S0} - \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_{Si} \cdot \Delta t \\ &= V_{S1} - \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_{Si} \cdot \Delta t \\ &\vdots \\ &= V_{Sn-1} - \alpha_{Sn-1} \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} V_{Wn} &= V_{W0} + \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_{Wi} \cdot \Delta t \\ &\vdots \\ &= V_{Wn-1} + \alpha_{Wn-1} \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (6)$$

4. 3 CPUの並列動作

本装置のもっとも特徴的な所であり、低価格8ビットCPUのリアルタイムシミュレータを可能としたCPUの並列動作による高速処理についても少し述べる。

3つのCPUの動きをデータの流れだけに着目すると図-13のように表わせる。これを1つのCPUに実行させると図-14のようになるが、 T_b ,

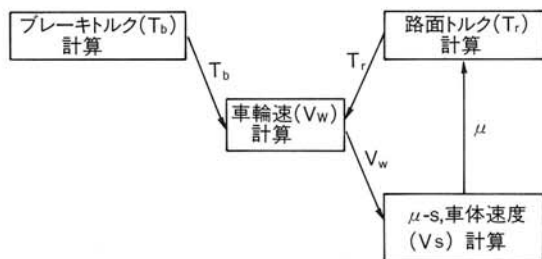


図-13 シミュレーションのデータの流れ

Fig. 13 Data flow in simulation.

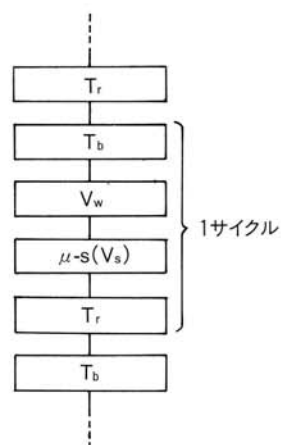


図-14 1CPUによる処理

Fig. 14 Data processing by one CPU.

V_w , $\mu-s(V_s)$: T_r の処理を図-15のように同時に行なわせると各処理の時間が全く同じであれば図-14の場合に比べて $\frac{1}{3}$ の処理時間で済む。CPUを並列動作させる事は高速化だけでなく、他の処理を追加したい場合、元のシステムはそのままに新たにCPUを追加すれば済むというようにシステムの拡張性や柔軟性を高める利点もある。

5. 評価

シミュレータを用いた実験結果を実車試験の結果と比較してみる。実験の装置構成を図-16に示す。本体のモニタ端子からホイールシリンダの油

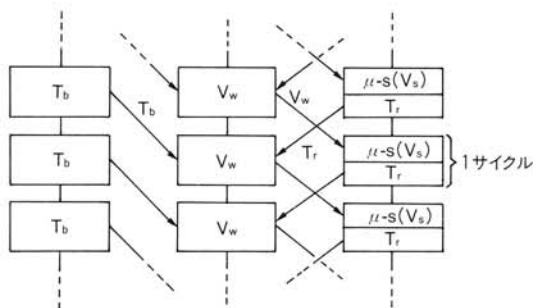


図-15 3CPUによる処理

Fig. 15 Data processing by 3 CPUs

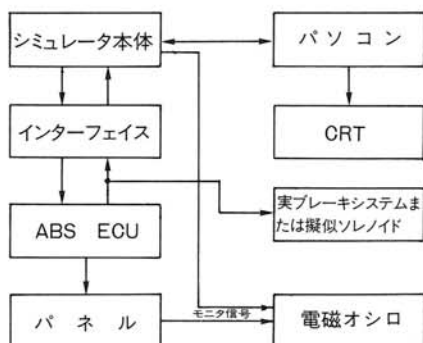
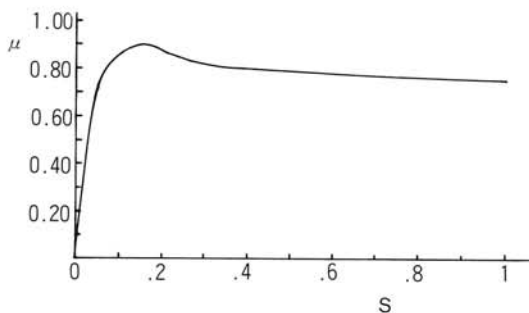
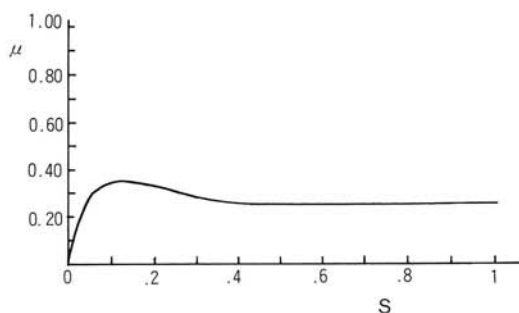


図-16 シミュレーション評価システム

Fig. 16 Evaluation system with simulation.

圧波形、ソレノイド制御信号が出力され、ECU につながれたパネル(ECUのRAMの内容をD/A変換して出力する装置)からは車輪速度が出力され、電磁オシロに記録される。実車試験においてもホイールシリンダの油圧を圧力センサを用いる事が異なるだけで、シミュレータを用いる場合と同様な記録を行なう。この様にシミュレータを用いて実車試験と全く同じ感覚で評価できる事が特徴である。

図-17, 18, 19, 図-20, 21, 22はそれぞれ高 μ 路、低 μ 路、氷上路の設定 μ -S特性と、制御波形である。5.1~5.3にそれぞれの特徴を述べるが全体的に実験試験結果とよく似ており十分実用になる。ここで油圧制御は減圧、増圧の他にそれよ

図-17 μ -S特性(高 μ 路)Fig. 17 μ -S characteristics of road with high friction.図-18 μ -S特性(低 μ 路)Fig. 18 μ -S characteristics of road with low friction.

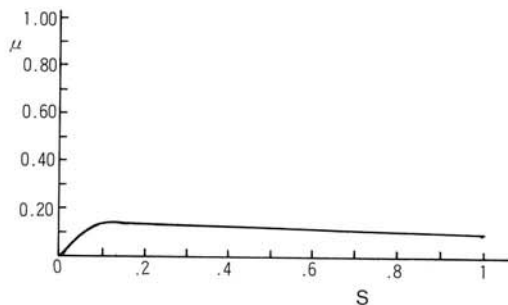
りも油圧の変化量を小さく制御する緩減圧、緩増圧を行なうタイプである。

5.1 高 μ 路

車輪ロックの頻度が少なく、特に後輪の初期ロック(ブレーキを踏んだ直後の車輪ロック)がないなどの特徴がよく出ている。ただし車輪のロック時の減速量(落ち込み)が実車時に比べ多少大きい。

5.2 低 μ 路

実験路の μ -S特性のピーク付近の μ の変化が急である事により車輪速度が急に落ち込み、油圧の減圧に従い急速に回復する変化と、車輪ロックの頻度が高 μ より少なく氷上より多い特徴がでている。ただし μ -S特性が車速にかかわらず一定である為に車体速度が低い時は実際の路面より μ が

図-19 μ -S特性(氷上路)Fig. 19 μ -S characteristics of road covered with ice.

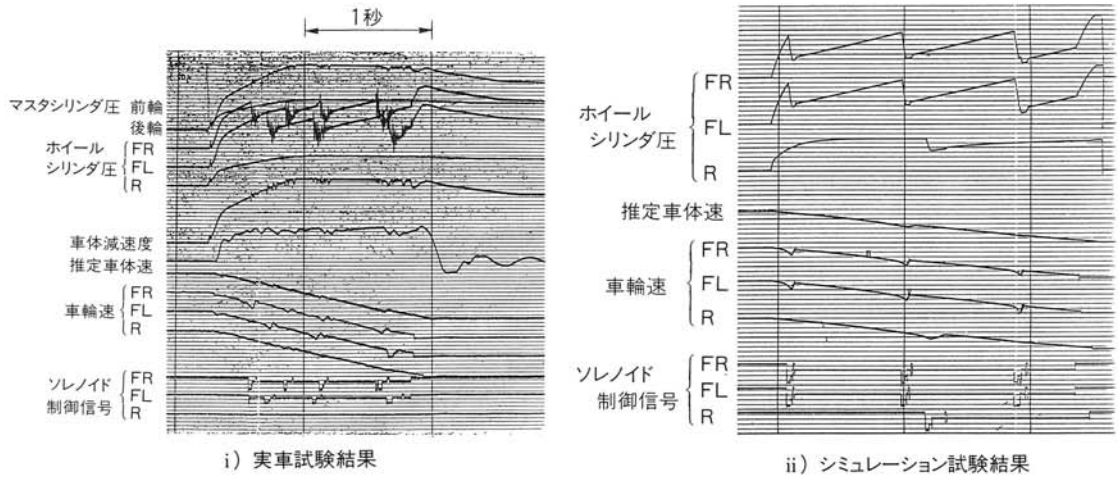
図-20 制御波形 (高 μ 路)

Fig. 20 Antilock brake control on road with high friction.

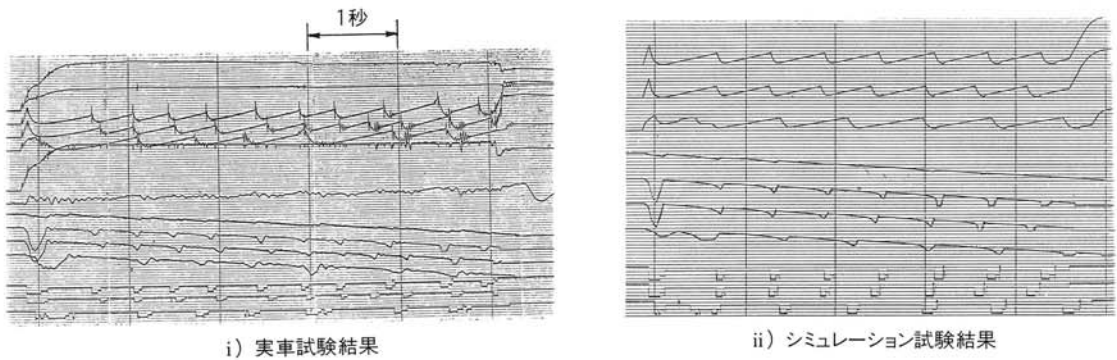
図-21 制御波形 (低 μ 路)

Fig. 21 Antilock brake control on road with low friction.

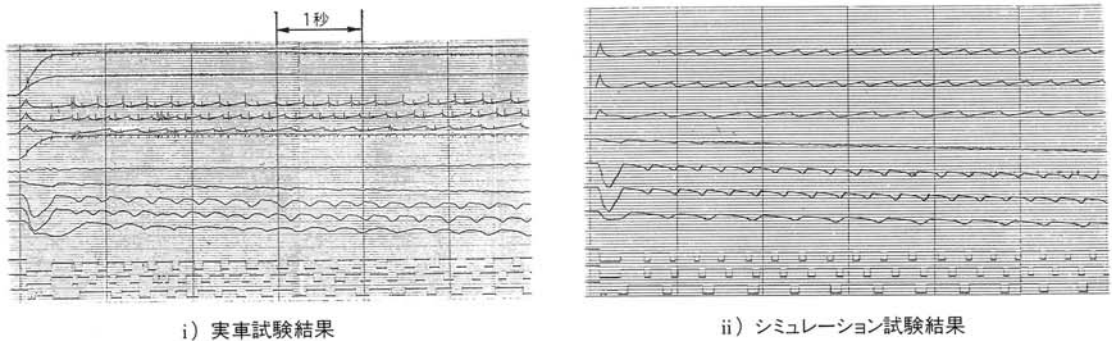


図-22 制御波形 (氷上路)

Fig. 22 Antilock brake control on road covered with ice.

小さく設定されるので車輪速度の落ち込みが大きい。

5.3 氷上路

路面の μ が小さい為に少しの油圧変化で車輪速度が減加速し、車輪ロックの頻度が多く、また車輪速度の変化が全体的にゆるやかである事、初期ロックの落ち込みが大きい特徴がわかる。

6. おわりに

以上述べたように、複数のマイクロプロセッサを用いて十分実用的なシミュレータの製作が可能なる事が確認できた。シミュレータの利点は何度でも同じ実験を繰返せる事と、任意の実験条件を自由に設定できる事であり、制御方式や、信号処理方式の改善やデバッグに大変役立っている。

現在高性能化をめざし16ビットCPU (68000)を用いたマルチプロセッサシステムを試作し、次の機能の追加を検討している。

- 1) ヨーイング、ローリング運動の追加
- 2) 旋回運動の追加
- 3) エンジン・デファレンシャルギアの影響の考慮

シミュレータの技術はアンチスキッド装置の評

価だけでなく、定速走行装置、エンジン制御装置、トラクションコントロール装置などにも応用でき、実車試験の不足点を補うきめ細かな評価を効率よく行なう事ができる。今後制御装置の複合化、高性能化が進む中でそれらの開発効率化の為に、シミュレーション技術は増々必要とされると思われ、シミュレータを更に発展させて行きたいと考えている。

参考文献

- 1) 樋口健治他：自動車の事典、朝倉書店
- 2) Measurement of Tire Brake Force Characteristics as related to Wheel Slip (Antilock) Control System Design, SAE paper 690214 (1969)
- 3) Brake Modeling Anti-Lock Simulation, Transp Res Rec 621 (1976)
- 4) 末富隆雅他：ドライビング・シミュレータの研究開発の動向、自動車技術 Vol. 40. No. 3 (1986)
- 5) 岩元貞雄：自動車のドライビング・シミュレータについて、自動車研究 Vol. 8 No. 10. 1986 ~Vol. 9, No. 1, (1987)