

F-1 サーキット・シミュレーション

Circuit Simulation for Formula-1 Races

結城 一 敏*

Kazutoshi Yuki

乙部 豊*

Yutaka Otobe

小池 明彦*

Akihiko Koike

要 旨

F-1 レース用エンジンの仕様の多くは、実車テストでその性能を確認して決定される。しかし、テスト時の天候や条件の違いにより、性能差を確認することが難しい場合、その決定は経験的判断に頼らざるをえなかった。

そこで、サーキットのコースデータと種々の実験データから走行シミュレーションのできるソフトウェアを開発し、サーキット毎にエンジン仕様の事前検討を行った。

その結果、エンジン出力と車重のラップタイムへの寄与率をはじめ、従来経験的に判断されてきた項目に対して定量的な結果を示すことができるようになり、レース活動において有効な手段となった。

本稿ではシミュレーションソフトウェアの概要、計算アルゴリズム、および実際の仕様検討に適用した事例について紹介する。

ABSTRACT

A High proportion of the specifications for F-1 racing engines is determined after confirmation of performance during testing of the car. However, when it is difficult to confirm differences in performance due to variations in weather and other conditions, in the past it was necessary to make and judgements based on experience to determine required specifications.

Honda therefore developed software capable of simulating running on a circuit using course data and a variety of experiment data, and used this software to determine engine specifications for each circuit in advance.

1. ま え が き

F-1 レースは直線と曲線のコースを組み合わせたサーキットを走行し、一番早くゴールすることを競うという一見単純な競技であるが、その競い合いは100分の1秒にまでおよび、ドライバー、車体、そしてエンジンのいずれも限界状態の中で性能を争うことになる。

そのため、エンジンの各コンポーネントの性能は極限まで高められ、レースエンジンの仕様は耐久性、信頼性を十分テストした上で、そのポテンシャルを最大限に発揮できるように実車テストにおいて確認を行って決定されていく。

しかし、その決定においては、ドライバー間のフィー

リングの違いや天候、サーキットの違い、タイヤの違い、さらにはエンジンや車体性能の制約などで、比較対象するエンジン仕様の効果が明確に確認できず、過去のデータを含めた経験的判断に頼らざるをえない場合も多かった。

そこで、われわれはサーキットのコースデータと、種々の実験データを用いて走行シミュレーションを行うソフトウェアを開発し、コンピュータ上の“走る実験室”としてエンジン仕様の事前検討に用いてきた。

これにより、新技術の投入や仕様変更によって得られるエンジン性能の向上分がラップタイムにおよぼす影響、エンジンの持つポテンシャルを最大限に生かすための空

力特性を含めたパッケージ仕様、さらには、それぞれのサーキットでパワー向上や軽量化の効果が働く割合を、定量的あるいは定性的に事前に把握することが可能となった。

本稿では、このシミュレーション手法について、ソフトウェア構成、物理モデル、および計算アルゴリズムを紹介するとともに、本手法を用いて仕様を検討した事例をいくつか紹介する。

2. シミュレーションソフトウェア概要

2.1. ソフトウェア要件

このシミュレーションの検討対象は、レースに投入されるエンジンの性能が、レーシングカーというパッケージに組み入れた際に、ラップタイムへおよぼす影響について明らかにすることである。

したがって、シミュレーションソフトウェアは、サーキットという直線と曲線からなるコースで、加減速を含めた動力性能計算を行い、その複数の結果から、注目する条件が結果にどのような影響をあたえるのか、さらに、どの条件で最も良い結果を得ることができるのかなどの検討ができるものでなければならない。

そこで、われわれは、下記4項目をその要件とし、ソフトウェア構成と物理モデルの決定を行った。

- (1) サーキット別に投入するエンジン仕様の事前検討ができること。
- (2) 新技術によるエンジン性能の向上分がラップ・タイムにおよぼす影響を検討できること。
- (3) 空力特性を含めた最適パッケージの検討ができること。
- (4) 計算結果に対して定量的な説明ができること。

項目(1)は、サーキットの特徴を表す指標を設定し、

複数のエンジン仕様を検討してレースに投入する仕様を選択することである。また、はじめてレースが開催されるサーキットでは、実際に走行をする前に計算機中で走行をシミュレーションし、結果をエンジンダイナモでのシミュレーション耐久に利用する。

項目(2)では、新技術を投入したことにより向上する性能と付随する問題点の相反する条件のなかで、どの条件がラップタイムに最も寄与するのかを検討選択する。

項目(3)は、レーシングカーとしてエンジン性能を最大限に発揮させるために、空力特性、ギアレシオなどを含めたセッティングを実際に適用できる選択肢のなかから決定していくための検討である。これらの項目は共に目的関数をラップタイムとし、複数の選択肢の中から適正な点を見つけ出す最適化手法である。

一方、項目(4)は得られた結果に対する理由づけであり最適化を進める上での過程となる。

2.2. ソフトウェア構成

ソフトウェアの構成をFig. 1に示す。

このソフトウェアは、大きく分けて、サーキットマップから勾配も含めたコースデータを作成し走行ラインを設定する部分、車体、タイヤ、エンジンおよびギヤレシオ等の各データを入力する部分、これら一連のデータを物理モデルに入力し計算する部分、計算結果であるエンジン性能の各種パラメータを表示する部分の複数のアプリケーションプログラムからなり、さらに複数の計算結果から、最適条件を検討する部分へとつながる構成になっている。尚、このソフトウェアは、実走データ解析を行う為にサーキットでも使用しているエンジニアリングワークステーション上に構成されている。

次に、各データについて述べる。コースデータは、サ

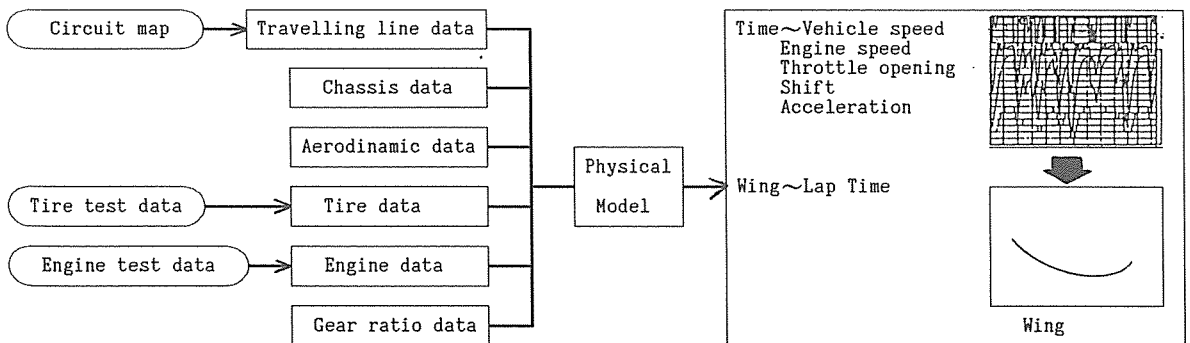


Fig. 1 Configuration of the Software

ーキットマップから作成され、コースの勾配データと共に、コンピュータの中に保存される。走行ラインデータは、Fig. 2に示すように、コンピュータディスプレイ上にコースデータと走行ラインデータを表示し、マウスを使いながら曲率が連続的に変化するようにスプライン曲線を用いて設定作成される。

走行ラインは、レーシングカーが走るラインを推定設定して決められる。ウィング、車重、および種々の曲率を組み合わせてあらかじめ計算された物理モデルの限界車速データをもとに、実走時と同一条件における基準実走データのコーナー車速をおおむね再現する曲率を設定する。

計算に必要な車体や空力関係の諸パラメータを車体データとして、また複数の垂直荷重条件下でのタイヤ横滑り角と摩擦係数の関係をタイヤデータとして入力する。

エンジンデータはレースに発送されるエンジンの性能試験データを用いる。ただし、物理モデルに入力する際には、実車搭載時相当のパワーデータとするために、燃料補正をはじめ、サーキット現地相当の気象条件補正等いくつかの補正を行う。さらに、物理モデルが走行状態に入ると、速度に応じてエアチャンバに加圧される吸気圧増加分による補正を行い駆動力が計算される。エンジン性能試験データは同じエンジンでも仕様を変えることで、パワー特性が変わってくるので、比較検討したいデータはすべて入力される。

ギアレシオは、Fig. 3に示すようなギアレシオテーブルをコンピュータディスプレイ上に表示し、シフトアップ時のエンジン回転数や最高速時のエンジン回転数、シフトアップに要する時間等の条件とともに決定することができる。

以上のようなデータを物理モデルに入力し、走行ラインに沿って加減速計算を行う。計算結果の各種パラメータは、実走データを解析する同一システムに出力され、基準実走データとの差異をを把握した上で、注目している条件がラップタイムにおよぼす影響の検討を行うことができる。

2.3. 物理モデル

物理モデルはFig. 4に示すように、設定された走行ラインを重心軌跡とし、接線方向に加速用と減速用の運動方程式、法線方向に向心力を与える運動方程式、さらに

この2方向の方程式を結びつけるためにタイヤの前後左右の摩擦係数の関係を表すタイヤ摩擦楕円の方程式を用いた。

はじめに接線方向の方程式について述べる。Fig. 4に記した式中の F および B_f 、 B_r はそれぞれ加速力、減速力を表し、 R_{total} は走行抵抗を表す。

この中で、加速力 F 、および減速力 B_f 、 B_r は無制限に与えられるのではなく、エンジン性能データおよびブレーキ性能試験データを用いて、タイヤが地面に伝える最大の力の範囲内で与えられる。すなわち、ある垂直荷重（以後、ダウンフォース）においてタイヤが地面に伝える最大の力、つまり摩擦力はダウンフォースとその荷重下で発揮できる摩擦係数により決定される。このことから、いくら大きな力をかけて加速減速しようとしても、タイヤが路面に伝える力を越えていれば、タイヤはスピンあるいはスリップしてしまう。したがって、この場合の加速力 F および減速力 B_f 、 B_r はタイヤが路面に伝える力となる。逆に速度増加に伴い、大きなダウンフォースを得ることでタイヤの摩擦力が駆動力をこえる場合には、今度はタイヤが伝える力ではなく、エンジンからの駆動力あるいはブレーキからの制動力が F および B_f 、 B_r となる。

つまり、この方程式中の加速力、および減速力は、速度に応じて発生するダウンフォース下で得られるタイヤ摩擦力を計算しながら与えられることになる。

尚、エンジンの全開出力時の駆動力に対して、タイヤから路面に伝わる力の伝達率をもって結果表示用のスロットル開度とした。

次に、法線方向の運動方程式中の $C F_f$ 、 $C F_r$ はコーナーリングフォースであり、これも接線方向と同様にダウンフォースと摩擦係数より決定される摩擦力として与えられる。

最後の摩擦楕円の方程式は、タイヤ前後左右の最大摩擦係数の一定の関係を表している。すなわち、ある荷重の時、前後左右の合力は、前後方向の最大摩擦係数と左右方向の最大摩擦係数で定められる摩擦楕円の外には出ないとするものである。

Fig. 5に摩擦楕円を示す。この図において、横方向に μ_{smax} を使っているときは、加速および減速で使用できる力はなく、仮にここで、加速あるいは減速するための力を前後方向に発生させるとすれば、この合力は楕円の外にはみでることになり、実車においては、スピン、あ

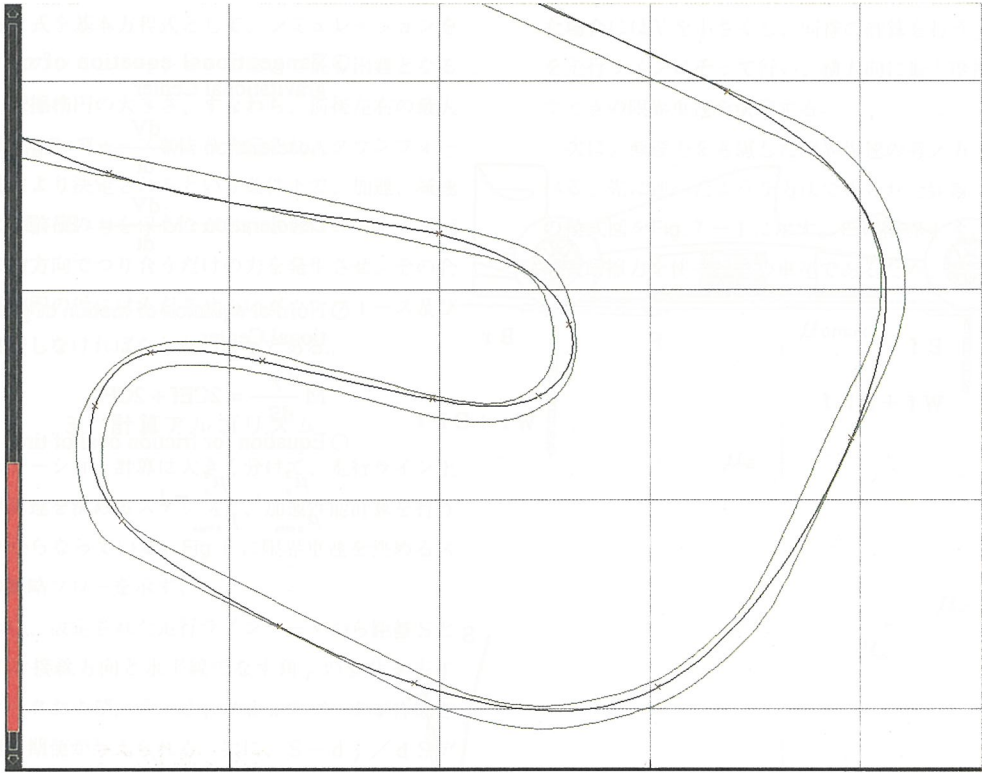


Fig. 2 Travelling Line Data and Source Data on the Display

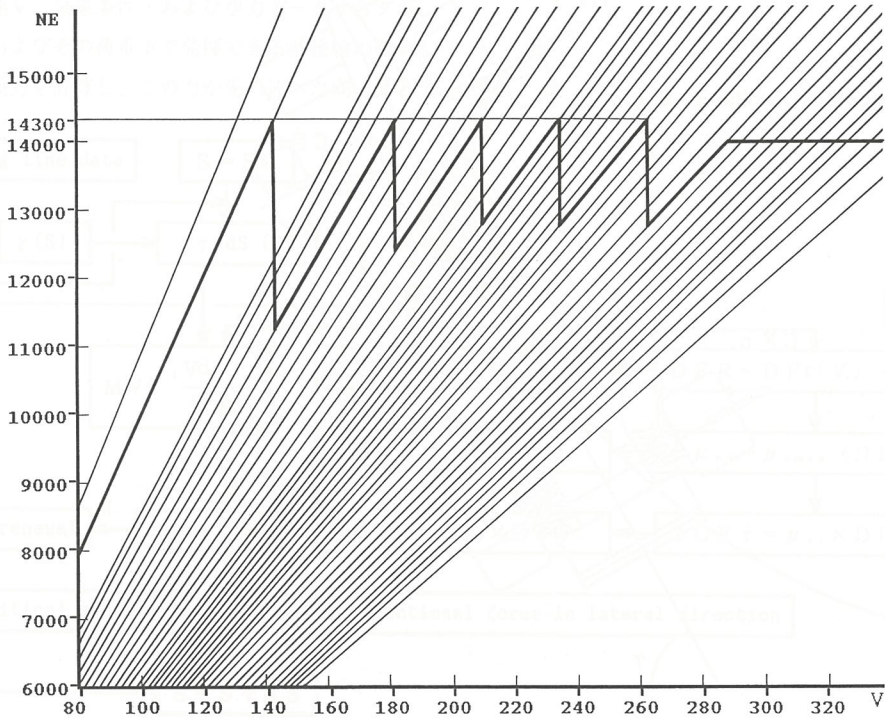
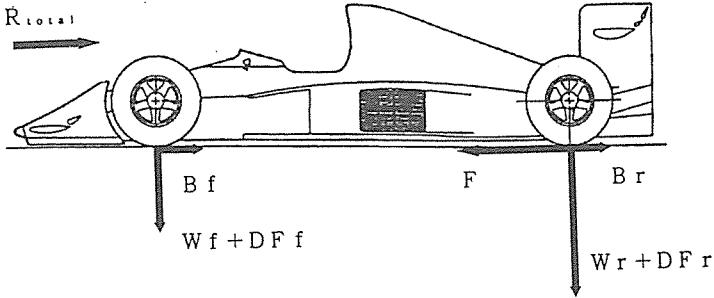


Fig. 3 Gear Ratio Table



○ Tangential equation of motion of gravitational Center

$$\text{Acceleration : } M \frac{dV}{dt} = F - R_{\text{total}}$$

$$\text{Deceleration : } M \frac{dV}{dt} = -B_f - B_r - R_{\text{total}}$$

○ Normal equation of motion of gravitational Center

$$M \frac{d\gamma}{dS} = 2CE_f + 2CF_r$$

○ Equation for friction oval of tire

$$\frac{\mu_a^2}{\mu_{a,\text{max}}^2} + \frac{\mu_s^2}{\mu_{s,\text{max}}^2} = 1$$

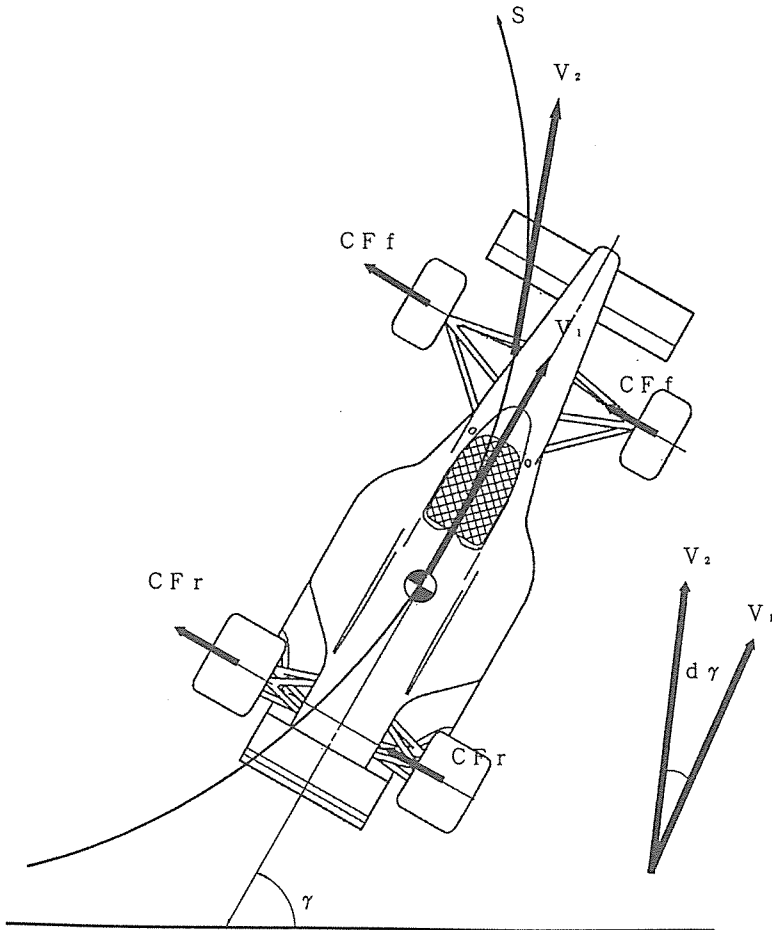


Fig. 4 Physical Model of Travelling Line

るいはコースアウトしてしまうことになる。

これら3式を基本方程式として、シミュレーションを行った。このシミュレーションにおいて最も困難となることは、摩擦楕円の大きさ、すなわち、前後左右の最大摩擦力はダウンフォースにより決定され、ダウンフォースは車速により決定されるという条件下で、加速、減速するための前後の力を保ちながら、さらにコーナーを回るために横方向でつり合うだけの力を発生させ、その合力を摩擦楕円の外にはみださせないダウンフォース及び速度を決定しなければならないことである。

3. 計算アルゴリズム

シミュレーション計算は大きく分けて、走行ライン上での限界車速を決めるステップと、加速性能計算を行うステップからなっている。Fig. 6 に限界車速を決めるステップの概略フローを示す。

はじめに、設定された走行ラインデータから距離Sと走行ライン接線方向と水平線のなす角 γ の変化を表すS- γ データおよび、 $S-d\gamma/ds$ のデータが作成され、車速初期値が与えられる。次に、 $S-d\gamma/ds$ データから求めた $d\gamma/ds$ 値、車重および車速からこの地点を速度Vで走行するのに必要な向心力を計算する。

一方、車速V、気象条件、および空力データからダウンフォースおよびその荷重下で発揮できる前後輪の横方向の最大摩擦力を計算し、この力が先に述べた向心力と

なり得るならば限界車速はこのVとなり、なり得なかった場合にはVを小さくし、同様の計算を行う。この計算を走行ラインにそって行い、横方向に最大摩擦力を使ったときの限界車速を決定する。

次に、減速力を考慮した限界車速の考え方について述べる。先に述べたような方法で得られた距離-限界車速の模式図をFig. 7-1に示す。この限界車速は横方向の最大摩擦力を使った時の車速であるため、摩擦楕円の理

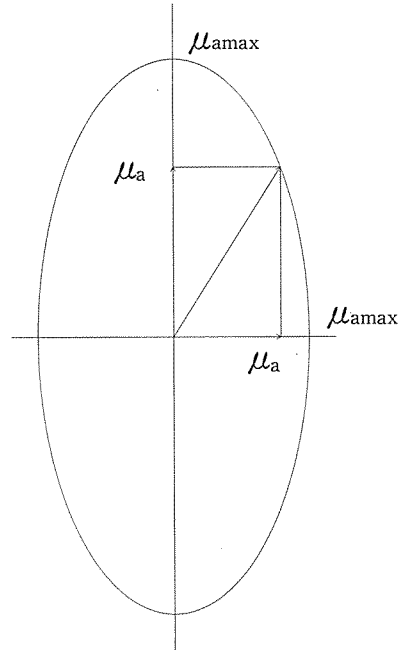


Fig. 5 Friction Oval Model

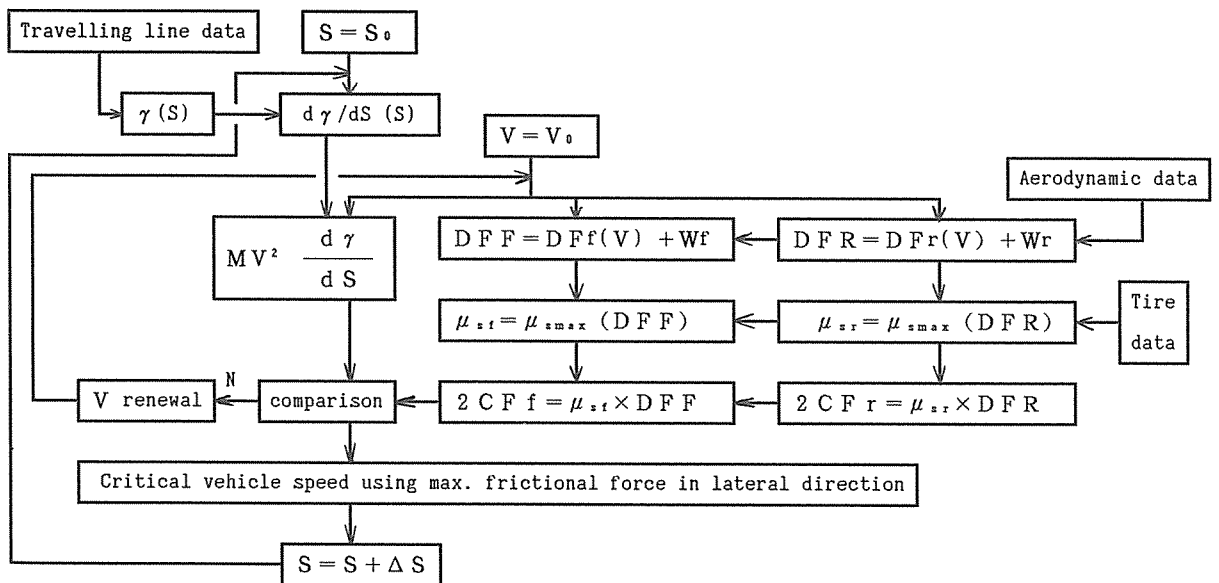


Fig. 6 Outline of the Flow to Determine the Critical Vehicle Speed

論から走行のどこの地点においても加速力および減速力を発生させることは出来ない。すなわち、図のS1において、横方向に最大摩擦力を発揮することで得られる速度V1で走行した場合には、減速力を発生させることができずS2の速度V2までは減速できないことを意味する。

そこで、先の限界車速の計算のあと、さらにS2のところから逆に計算し、速度V2までの減速力を得ると同時に、横方向摩擦力が摩擦楕円のなかでつり合うような減速力を考慮した限界車速V1'の決定を行う。このような計算を減速部分について順次行うことで図中に破線で示されている最終の限界車速を得る。

加速性能計算は、この最終の限界車速と接線方向の運動方程式を用いて行われるが、その概略をFig. 7-2を用いて説明する。加速力Fは前述したように、駆動力が、その時の最大摩擦力を越えている場合には、最大摩擦力をFとし、最大摩擦力が駆動力より大きい場合には駆動力をFとしてモデルを加速していく。このような力の与え方をして、モデルを加速をしていくと、ある時間、ある地点で限界車速に到達する。この地点から減速を開始する。

減速の部分は、先の限界車速の結果から減速力と横方向の力の関係を満足しながら、横方向に最大摩擦力がかかっているS2のところの速度V2まで減速してくる。

S2では横方向に最大の力を使っているため、加速力は発生せずS3まで等速運動し、S3における速度はV2となる。

ここで、横方向に最大摩擦力を使った場合には、速度V3で走行できるところを、それより低い速度V2で走行することになるため、今度は摩擦楕円内で加速力が発生しはじめる。さらに、速度増加にともないダウンフォースも増加することで摩擦楕円が大きくなっていくことと、曲率半径が大きくなっていくことで横方向に発生させるべき摩擦力が減少し、全開出力時の駆動力の伝達率が大きくなっていく。このようにして、再び加速性能計算に入る。

以上のような加速減速計算を連続して行い、レーシングカーの車速を決定していく。

4. シミュレーション適用事例

4.1. 実車データとの比較

Fig. 8にの実走時のデータと、実車と同一条件で計算したシミュレーション結果を示す。図中、駆動力の路面への伝達率で表したシミュレーションのスロットル開度がドライバーのスロットル開度に近い動きを示しており、ドライバーがタイヤのグリップ力限界を感知しながら操作しているというスロットル開度結果と、タイヤの摩擦楕円の関係を満足するように伝達される駆動力の結果が

- A: Critical vehicle speed where deceleration force and force in the lateral direction or balanced within total friction oval
- B: Critical vehicle speed when maximum frection force in lateral derection in use.

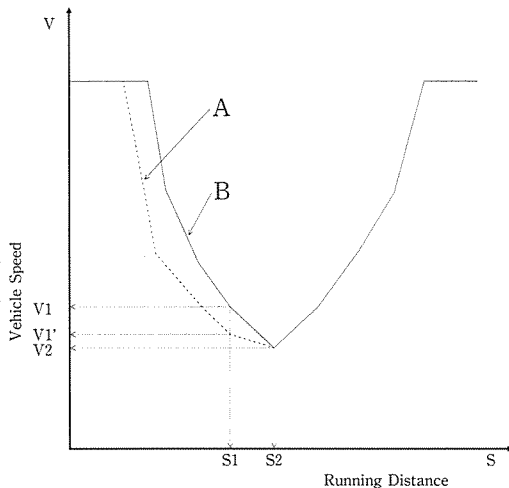


Fig. 7-1 Base Model Data

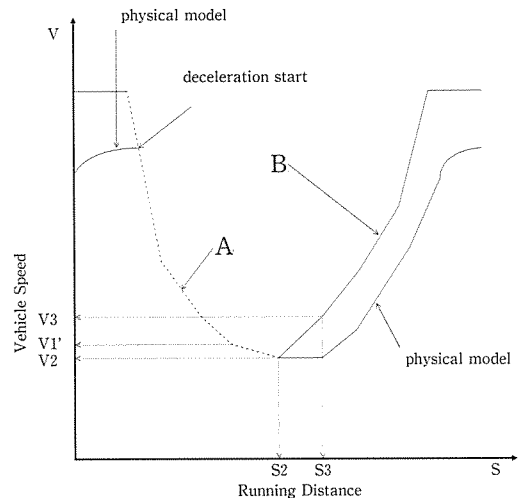


Fig. 7-2 Final Data

Fig. 7 Diagram of the Distance-Critical Vehicle Speed

近いという点で興味深い。

今回のシミュレーションにおける、実車と計算結果の比較は、同一条件下での実車との差異を把握することによって、以後注目する条件がラップ・タイム等におよぼす影響を判定する際の基準となる。

4.2. サーキット特性

従来は、レースが開催されるそれぞれのサーキットにおいて、多少重量が重くなってもパワーを増加させた方が有効なのか、逆にパワーを少々下げても車重を軽減した方が有効なのかを示す指標がなく経験的に判断されてきた。

そこでサーキットの特性を表すひとつの指標としてエンジンパワーと車重をそれぞれのサーキットについて同じ条件で変化させ、ラップタイムに対するそれぞれの寄与率を求めた。

Table 1 に低速、中速、および高速のそれぞれ代表的なサーキットのパワー 1 kW、重量 1 kg 当たりのラップタイム変化および、それから換算されるパワー 1 kW あたりの等価重量を示す。これは、各サーキットごとに、パワーをあげるのが有効か、車重を軽くするのが有効かを示す指標となり、1 kW に対する等価重量が大きいほど車重がラップタイムに影響するサーキットであることを示す。したがって、新技術を投入することでパワーア

Table 1 Influence of Power and Weight on Lap

Circuit	Influence of Power sec/kW	Influence of Weight sec/kW	Equivalent Weight kg/kW
Low Speed	- 0.012	+ 0.025	2.083
Middle Speed	- 0.022	+ 0.032	1.455
High Speed	- 0.034	+ 0.025	0.735

ップは図れるが、重量増加に伴う場合、ラップタイムの向上が見込まれるかどうかはこの指標を用いて判断することができる。

4.3. 最適ウィング

最高速にかかわる空気抵抗と、コーナー車速にかかわるダウンフォースの、それぞれのラップタイムへの影響を低速、高速の代表サーキットについて、表したものを Fig. 9、Fig.10 に示す。

これらは、ダウンフォースを決定する CL 値と空気抵抗を決定する CD 値がラップタイムにおよぼす影響と、基準とするウィングに対して他のウィングを実装した場合のラップタイム変化方向を表したものである。

すなわち、あるウィングの空力データを用いて走行シミュレーションを行い、そのウィングの CL 値、CD 値およびラップタイムを基準とする。その上で CD 値一定で CL 値を変化、また CL 値を一定にして CD 値を変化させ格子状の CL 値、CD 値の組み合わせ毎に走行シ

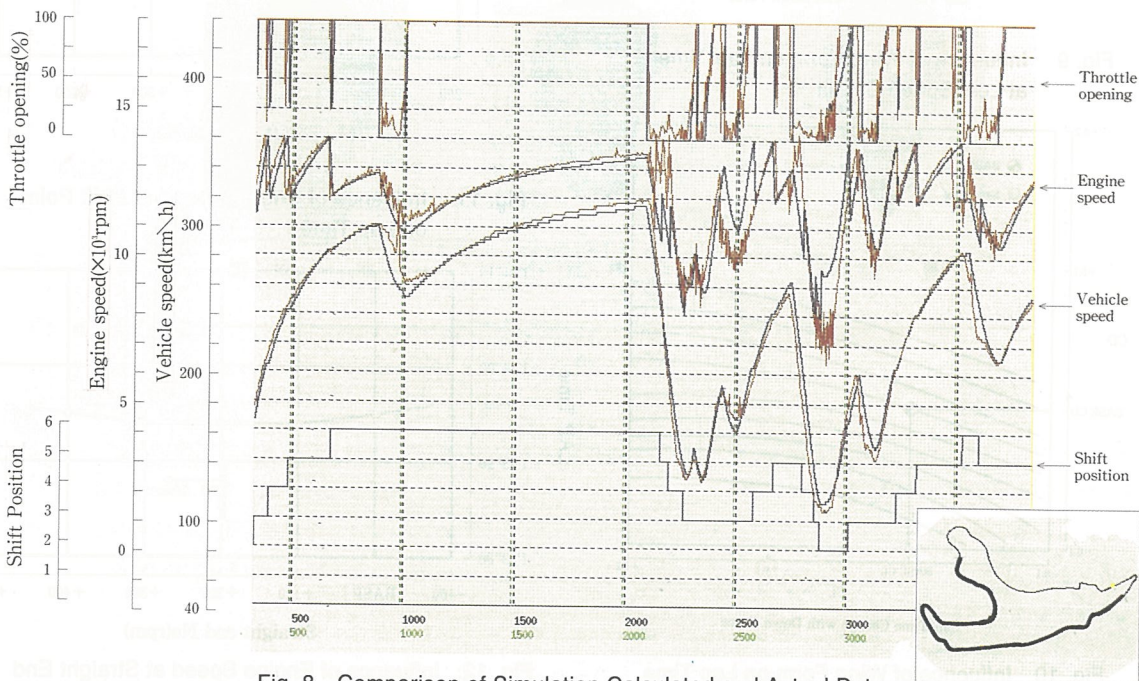


Fig. 8 Comparison of Simulation Calculated and Actual Data

シミュレーションを行ない、基準ラップタイムに対する変化を計算する。その結果に実装可能なウイングのCL値、CD値をプロットしたものである。

Fig. 9の低速サーキットの例は、ラップタイム変化線の傾きが大きく、CL値を大きくする、すなわち空気抵抗抗が大きくなってもダウンフォースを大きくしたほうがラップタイム向上に寄与することを示している。

一方、Fig.10の高速サーキットの例は、空気抵抗の大きさがラップタイムに影響し、実装可能なウイングでダウンフォースをあげると基準としているウイングよりラップタイムの向上が望めないことを示している。

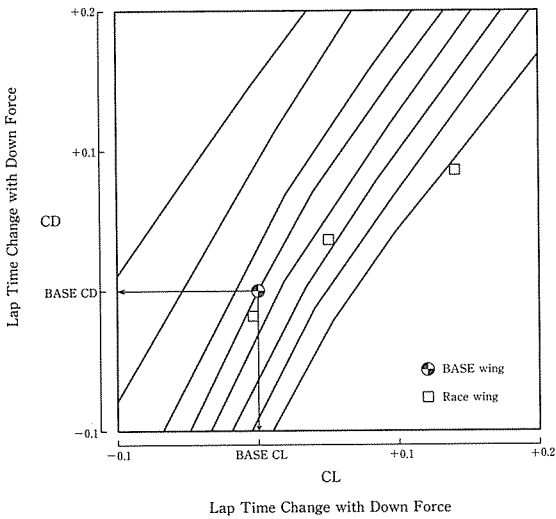


Fig. 9 Influence of Wing Form on Lap Time at Low Speed Circuit

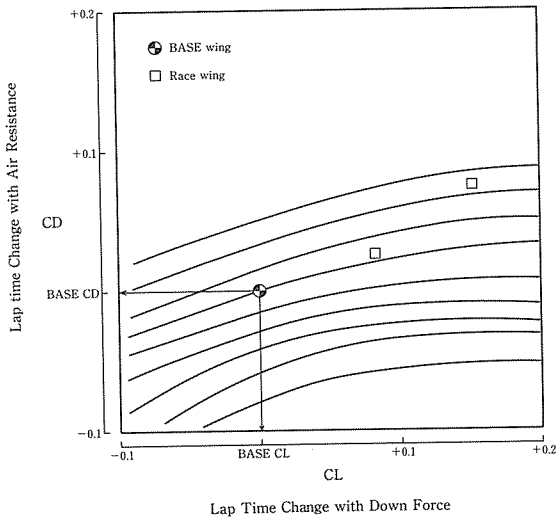


Fig. 10 Influence of Wing Form on Lap Time at High Speed Circuit

この計算により、従来経験的に判断されていた空気抵抗抗とダウンフォースの影響をサーキット別に定性的に示すことができ、レース戦略に向けて有効な情報を提供することができた。

4.4. 6速ストレートエンド回転数およびシフトアップ回転数の検討

予選時の運転条件設定検討の一例として、同一エンジン仕様で6速ストレートエンド地点でのエンジン回転数、およびシフトアップ時のエンジン回転数を变化させた時のラップタイムに対する影響をそれぞれFig.11, Fig.12に示す。Fig.11はストレートエンド地点でのエンジン回転数を一定にし、シフトアップ時のエンジン回転数を变化させた結果である。シフトアップ時のエンジン回転数がBASE +400rpm以上からラップタイムの向上は見られない。

Fig.12は先に述べたシフトアップ回転数を一定にし、

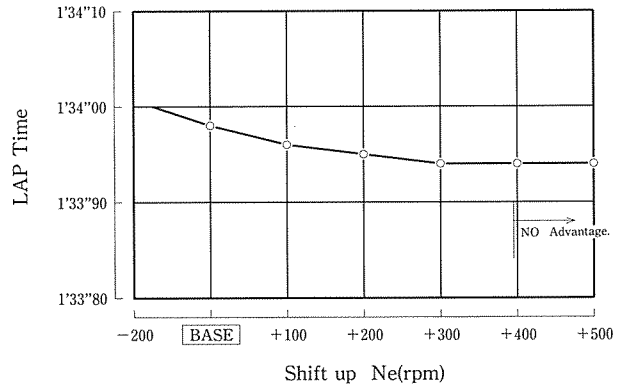


Fig. 11 Influence of Engine Speed at Shift Point on Lap Time

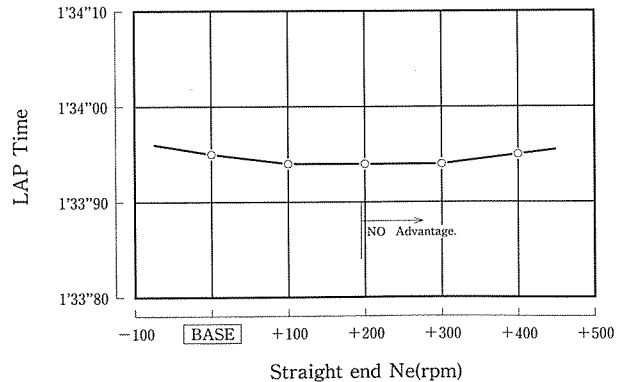


Fig. 12 Influence of Engine Speed at Straight End on Lap Time

ストレートエンドでのエンジン回転数を変化させた結果で、BASE+200rpmの時のラップタイムが最も早い。

この結果、走行シミュレーションから得られる最適シフトアップのエンジン回転数および、6速ストレートエンドでのエンジン回転数は、それぞれ、予選標準回転数+400, +200rpmとなるが、特にレース本戦においては、エンジンの耐久性、燃費等を含め総合的にエンジン回転数の設定がなされる。

5. ま と め

F-1 レース投入エンジンの仕様検討の為にコースデータと実験データを用いてサーキット別に走行シミュレーションを行えるソフトウェアを開発した。

その結果、比較的簡単な物理モデルであるにもかかわらず、実車走行に近い計算結果を得ることができ、サーキット別にパワーと重量のラップタイムに対する寄与率の計算が可能となった。

これにより、従来経験的に言われていた、パワー向のサーキット、軽量向のサーキットの分類を定量的に決定することができ、レースにむけてのエンジン仕様選定時のひとつの指標とすることができた。

また、エンジンの回転数、空力特性および種々の仕様に対して検討が可能となりそれぞれの適用方向を示すことができるようになった。

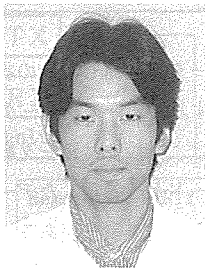
謝 辞

今回のシミュレーションソフトウェアの開発を行うにあたり、協力いただいた各諸氏に感謝します。

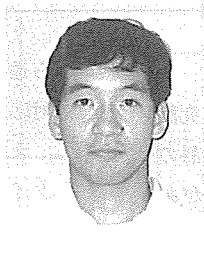
参 考 文 献

- 1) 景山克三、景山一郎；自動車力学、理工図書、(1989)
- 2) 酒井秀男；タイヤ工学、グランプリ出版、(1987)

■ 著 者 ■



結 城 一 敏



小 池 明 彦



乙 部 豊