
F1車両運動性能技術

Technologies for Enhancement of Dynamic Performance of Formula One Vehicle

澁 江 秀 明*
Hideaki SHIBUE

種子田 和 宏*
Kazuhiro TANEDA

木 滝 泰 隆*
Yasutaka KITAKI

要 旨

いかに優れたパワープラント性能を得たとしても、タイヤを介してその力を路面に効率的、合理的に伝えることなくして、レースカーとしての競争力は得られない。近年のF1における車両運動性能技術は、タイヤ性能を最大限に引き出すことを主眼に開発されている。特に F1 で使用されるタイヤは、タイヤ自体の性能を極限まで高めるために、タイヤ接地状態やタイヤ温度など極めて狭い条件でしか作動しない特性を有しており、これを把握しコントロールすることが、F1の運動性能技術開発における重要課題であるといえる。本稿では、タイヤ性能を引き出すサスペンション設計とセットアップコンセプト、これらの理論のベースとなるタイヤモデルの開発について紹介する。

ABSTRACT

No matter how superb the performance of the powerplant, unless that power can be transmitted efficiently and effectively through the tires to the track surface, a race vehicle will not have a competitive edge. The most recent technologies for the enhancement of the dynamic performance of Formula One vehicles are developed with a focus on maximizing tire performance. The tires used in Formula One are designed for good performance only within an extremely narrow range of conditions in terms of parameters such as tire contact state and tire temperature, in order to enhance the performance of the tires to the limit. Therefore, understanding and controlling these conditions is an important issue in the development of enhancement technologies for the dynamic performance of Formula One vehicles. This paper will discuss suspension design and vehicle setup, two factors that affect tire performance, and the development of a tire model to function as their theoretical basis.

1. まえがき

F1における車両運動性能の開発には二つのステージがある。一つは設計段階での車両性能開発であり、車両のコンセプトや種々の運動性能項目の目標値を自車および他車の性能解析結果などから設定し、それらを具現化しよう個々の車両要素を設計していくというステージである。

もう一つはサーキット現場での車両セットアップである。F1の車両運動性能は、サーキットのレイアウトや路面状況、気象条件によって変化し、常に同じ性能を発揮できるわけではない。そこでさまざまな要素部品の案別や、特性を可変にできる機構を用意し、それらを適用または調整することで、サーキットでの走行状況に応じて運動性能を最大化する。

車両設計が車両運動性能のポテンシャルを決定するのに対し、車両セットアップは、サーキットの状況やレース戦略に応じて車両運動性能をポテンシャルまで最大限に引き出せるようにする作業であり、この二つがそろって初めて高い運動性能をレースで発揮することができる。

本稿では、タイヤ性能を引き出すサスペンション設計とセットアップコンセプト、これらの理論のベースとなるタイヤモデルの開発について紹介する。

2. サスペンション設計

サスペンションはタイヤの持つ力を最大限発揮させるために重要な役割を担う。第3期 F1 においては、量産車で培ってきた開発の技術を最大限活用し、サスペンション開

*四輪R&Dセンター

発をおこなってきた。特に、スクラブ半径、キャストトレール等のキングピン廻りのジオメトリについては、量産車と同様の考え方で諸元の設定をおこない、その有効性を確認してきた。

一方、F1固有の課題として、極めて狭い条件で性能を発揮するタイヤ特性や、サスペンションによって作り出される車体姿勢が重要な役割を果たす空力特性などのニーズから、以下のような開発もおこなってきた。

- (1) タイヤ特性に合わせたイニシャルキャンバ、キャンバゲイン、転舵キャンバの最適化
- (2) タイヤ内圧安定化のための、タイヤ空気温度コントロール技術
- (3) タイヤウォームアップ性能改善のための、メカニカルバランス調整による荷重移動コントロール
- (4) 空力性能を最大限発揮させるためのジオメトリの採用

本稿では、サスペンション開発の一例として、4輪の接地荷重をコントロールして、タイヤのパフォーマンスを最大化することをねらいとしたフロントプッシュロッドオンアップライト(FPROU)を紹介する。

2.1. FPROU の概要

F1のステア特性は、高速コーナでは安定性を重視するためにアンダステア(US)方向とし、低速コーナでは回頭性を向上させるために、オーバステア(OS)方向を基本とする。サスペンションの設計においては、プッシュロッド上下動に対する、ロッカアームの回転角非線形性を利用し、フロントに大きなホイールレートの非線形性(ライジングレート)をつけることにより、ダウンフォースが大きく作用する高速コーナにおけるフロントロール剛性を大きくすることでUS方向とする手法がとられてきた。

第3期 F1 においては、通常ロワウィッシュボーンにマウントされているフロントプッシュロッドをアップライトにマウントすることにより、転舵角に依存してメカニカルバランス(旋回時の左右荷重移動量の前後配分)が変化する特性とし、低速コーナにおける旋回性をさらに向上させることに成功した(Fig. 1)。

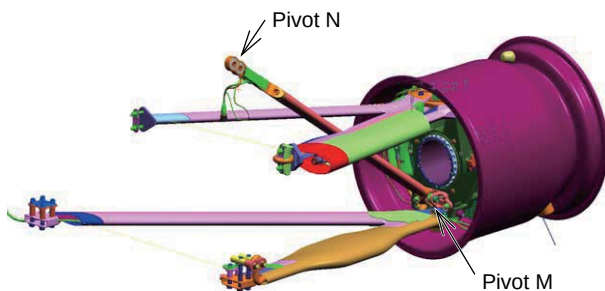


Fig. 1 Front pushrod on upright suspension

2.2. 転舵時荷重移動のメカニズム

据切りをおこなった場合、主にキャスト角の影響により、通常フロントの内輪は地面に潜り込む方向に移動する。これに起因するフロントの車体ロール方向の動きはリヤサスペンションにより規制されるため、4輪の接地荷重は対角線上に移動する。旋回中の荷重移動においても、通常考えられる前後ロール剛性配分やアンチフォースジオメトリによる荷重移動以外に、この幾何学的な動きによる荷重移動がプラスされるため、転舵時の接地点上下移動軌跡をコントロールすることにより荷重移動をコントロールできることが知られている。コンベンショナルなサスペンションにおいては、キャスト角を大きくとることにより、フロントの荷重移動を低減することができる。

プッシュロッドをアップライトにマウントした場合にどのような変化が起きるのかを旋回内輪側に注目して考察する。転舵時ダンパストローク量はほとんど変化しないため、プッシュロッドのロッカ側ピボットN(Fig. 1)は固定と考えることができる。すなわちアップライト側ピボットMはピボットNを中心とした球面上に規制される。キングピンに対しピボットMが後方に位置する場合(Fig. 2)，転舵時にピボットMはキングピン軸廻りに回転し車体中心側へと移動するが、プッシュロッドが下反角を有しているため、アップライトが下方に移動しなければならない。同様に、外輪側に着目するとアップライトは上方に移動する。

Fig. 3 に転舵量に対する接地点の上下軌跡を示す。後方のオフセットを有する場合、あたかもキャスト角が大きく

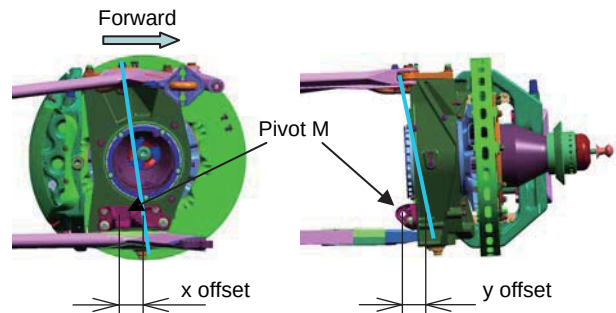


Fig. 2 Definition of pushrod offset

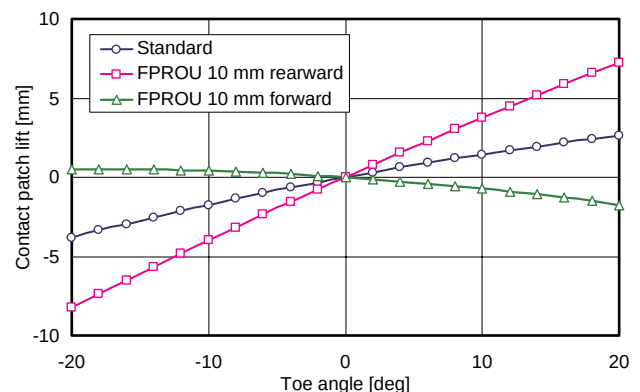


Fig. 3 Change in lift against toe angle

なったような動きをしていることがわかる。この効果により旋回時にフロント荷重移動が相対的に減る。逆に前方のオフセットを有する場合には、キャスト角が小さくなったかのような動きをする。

以上のメカニズムを活用することで、キングピン軸配置等の幾何学的な制約を受けることなく、転舵角に依存したメカニカルバランスのコントロールが可能となり、低速コーナでの US 解消に大きな役割を果たすことが可能となった。

また同様のメカニズムにより左右方向(y)にオフセットを与えた場合においては、転舵時に旋回内外輪ともにアップライトが上昇し、車高を低下させる効果が得られる(Fig. 4)。特に大舵角領域においてはその効果が増大する。

2.3. 運動性能シミュレーション

ADAMS を使用した車両運動シミュレーションにより、メカニカルバランスの変化を予測した結果をFig. 5に示す。オフセットをプラス、すなわちピボットMをキングピン軸よりも後方にオフセットした場合、メカニカルバランスはリヤ寄りにシフトし、ステア特性は OS 傾向となる。メカニカルバランスの変化量はオフセットに比例し増加する。

2.4. 実走テストおよびレース適用

シミュレーションをベースに設計、製作された本サスペ

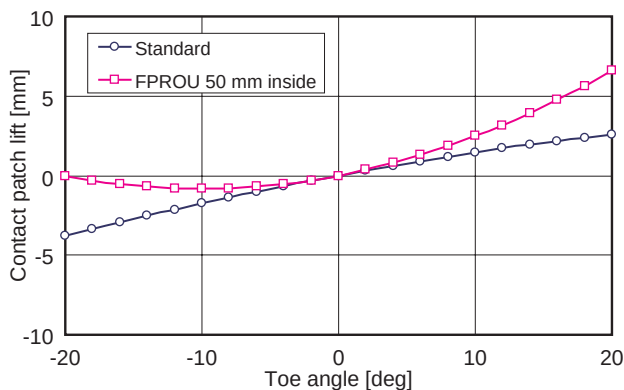


Fig. 4 Change in lift against toe angle (y-direction offset)

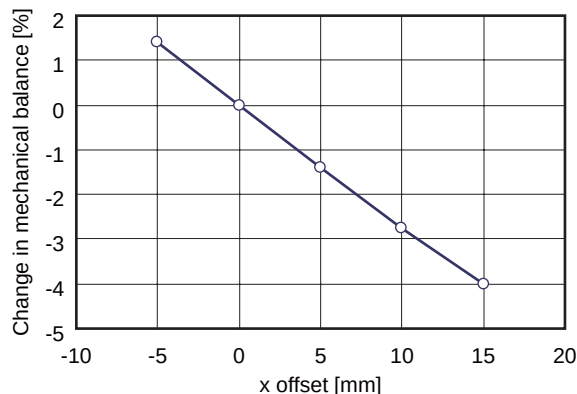


Fig. 5 Change in mechanical balance with x-direction offset

ンションシステムは、2005年9月にヘレスサーキットにて実走テストがおこなわれた。ねらい通り、低速コーナでのUSが解消され、ラップタイムもベース車両に対しコンスタントに良く、優位性が確認できた。この結果により、本サスペンションシステムは、2005年日本GPよりレース適用された。

3. 車両セットアップコンセプト

本章では車両セットアップに焦点をあて、その後の車両のセットアップの基本となった2006年の車両であるRA106の車両セットアップのコンセプトについて紹介する。

2004年のコンストラクターズ2位の成績を受け、2005年はコンストラクターズタイトル獲得を目標としてレースシーズンがスタートしたが、2005年の車両はブレーキングスタビリティの低さが顕著であった。ドライバがブレーキング中の車両安定性を求め、ディファレンシャルギヤの差動を極端に抑制する方向へ油圧制御を変更した(最終的には左右輪を機械的に結合するスプールの搭載に至った)。その結果、ターンインでのUSが増したため、回頭性を維持するためにメカニカルバランスをリヤ寄りにする方向へセットアップが推移していった。しかし、それによって旋回中のリヤ外輪の負担が大きくなり、コーナの立ち上がりでトラクションをかけると急激にリヤが滑るスナップ OS を誘発し、他車に対して旋回加速性能で劣ることになった(Fig. 6)。

また、リヤタイヤの負荷増大はタイヤコンパウンドの劣化を促進し、周回を重ねるたびにスタビリティと加速性能が低下した。さらに、コーナリング速度が低下したことでフロントタイヤの温度低下を招き、さらにUSが増すなど、セットアップの悪循環に陥り運動性能を落とすことになった。

3.1. RA106 セットアップの構築手法

2005年車両のセットアップの主要な課題は、セットアップ

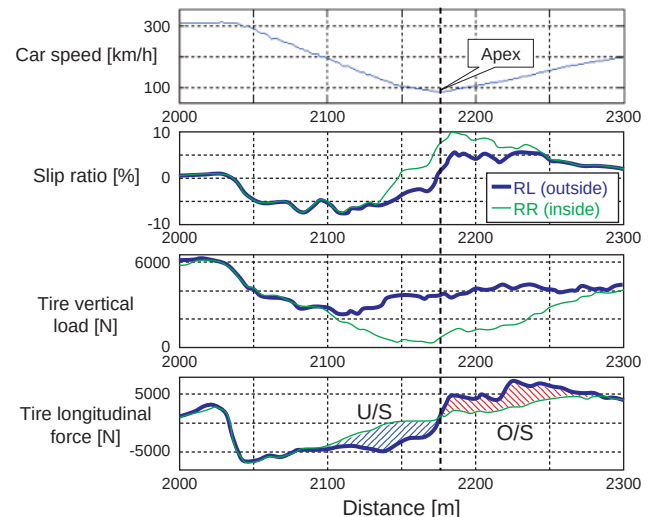


Fig. 6 Cornering conditions in 2005

プが逐次的、近視眼的になったことで局所的な最適解の探索になってしまい、本来持っていたと考えられる車両運動性能のポテンシャルを引き出せなかったことである。

そこで、RA106の車両開発にあたって、車両セットアップを戦略的におこなうためのコンセプト作りに着手した。すなわち、セットアップで向上すべき性能項目を明確化し、その達成手法を定量的に解析してその長所短所を含めて効果や感度を予測、それを実走テストで検証していくというプロセスを徹底した。机上検討でセットアップの方向性を定め、実走テストはその確認の場とすることで、個々のテスト結果でセットアップを変更して局所的な最適化に陥らないようにするねらいである。

また、セットアップを構築していく上でのマイルストーンを設定し、それに沿う実走テストのプランを策定し実行することで、検証を確実におこなえるようにした。

3.2. RA106 セットアップのコンセプト

2005年車両の運動性能を解析し、タイヤ性能を車両全体で最大化するという観点から、RA106で達成すべき性能項目を以下のように選定した。

- (1) 旋回加速性能の向上
- (2) リヤタイヤ劣化の改善
- (3) フロントのタイヤ温度上昇によるグリップ力の向上

3.3. 達成手法

運動性能を支配する以下の車両セットアップ要素によって、先述した項目をどのように達成するか、タイヤモデルを用いたシミュレーションによって解析をおこなった。

- ・ 前軸重量配分(W/D)
- ・ 前軸ダウンフォース配分(CoP)
- ・ 前軸メカニカルバランス(M/B)
- ・ リヤ制駆動力左右配分(Diff)

Fig. 7 は W/D, CoP, M/B による、各速度域のコーナでの加速性能の変化を解析した結果である。M/Bをフロント寄りにすることが、低速コーナでの加速性能向上に最も有効である。W/D は2番目に効果が高く、CoP は高速度

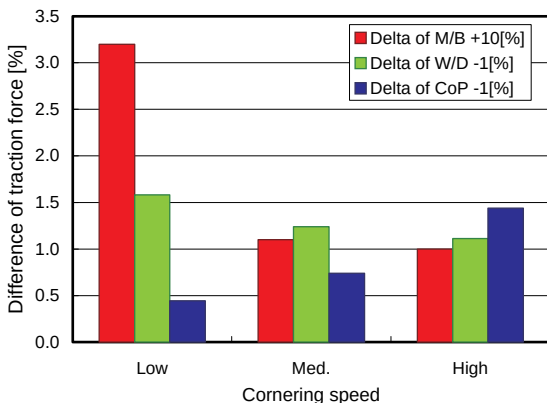


Fig. 7 Traction enhancement with setup changes

域での寄与が高い。Fig. 8は、各セットアップ要素を変化させたときの加速性能の推移を解析したもので、M/B の場合、約25%フロント寄りまでほぼ線形に加速性能が向上している。低速からの加速性能向上がラップタイムへの寄与が大きいことから、フロント寄り M/B を加速性能改善の主軸にすることにした。

M/Bをフロント寄りにすることで、ステアバランスは全体的にUSになる。そのバランスをとるためのW/D, CoPの必要調整量を推定したものをFig. 9に示す。コーナリング速度によって感度が異なるものの、M/Bの変更量に対してほぼ線形の特徴になっている。また、デフによる後輪前後力の左右配分がステアバランスへ及ぼす影響を解析した結果がFig. 10である。低速コーナでは、M/Bをフロント寄

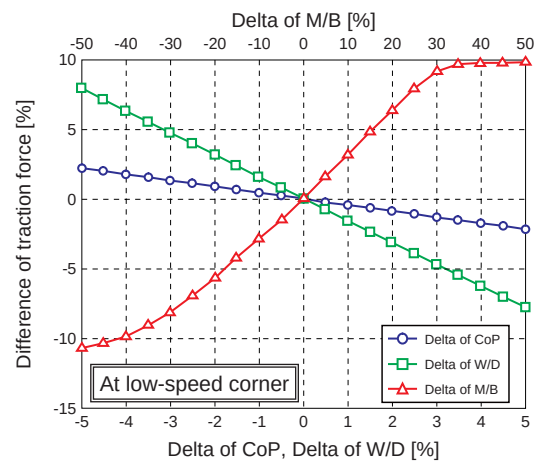


Fig. 8 Traction change with setup sweep

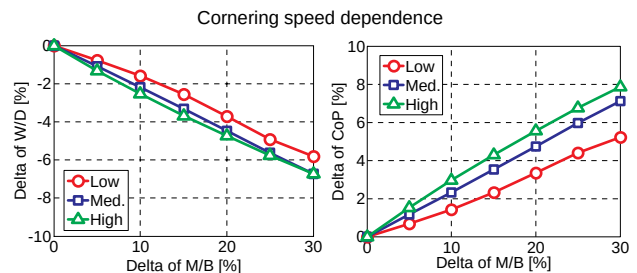


Fig. 9 Relationships in setups for achievement of equivalent steer balance

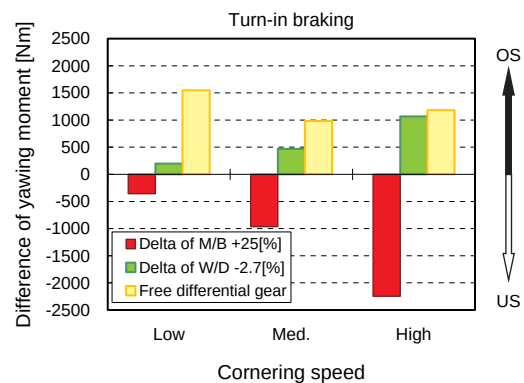


Fig. 10 Effect of differential gear on steer balance

りにすることで発生する US をデフ制御により補償することができるが、高速コーナでは十分ではなく、他のセットアップ要素と組み合わせて補償する必要がある。リヤ寄り W/D と組み合わせるのが、加速性能向上にも寄与することから最善だと判断した。

Fig. 11 は、M/B を変化させた場合のコーナでのタイヤ表面温度の変化を解析したものである。M/B をフロント寄りにしていくと、コーナリングでより支配的な外輪側のフロントタイヤの温度が上昇し、適正温度域に近づくことでグリップ力が増加すると推定される。また、リヤタイヤの外輪側は温度が低下するため、過剰な高温によるタイヤコンパウンドの劣化を抑制することが期待できる。

以上の解析結果から RA106 のセットアップ提案を次のようにまとめた。

- (1) フロント寄りメカニカルバランス
- (2) リヤ寄り重量配分
- (3) 旋回中のデフ制御

3.4. 効果検証

以上の机上検討で決定された RA106 セットアップの実走テストを、2005 年 12 月から 2006 年 2 月に複数のサーキットでおこない、その効果を検証した。

Fig. 12 はヘレスサーキットでおこなった実走テストの低速コーナでの推進力を比較した結果である。このテストで

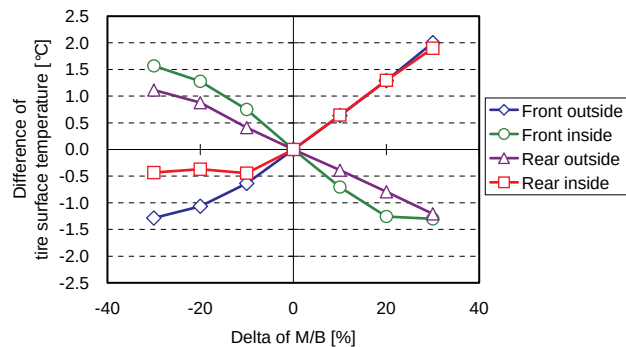


Fig. 11 Estimation of change in tire surface temperature

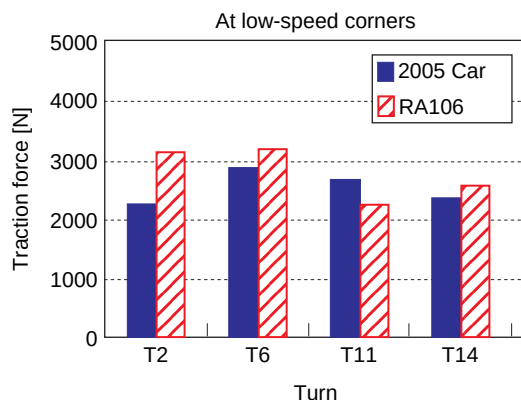


Fig. 12 Comparison of traction force

の RA106 セットアップは、2005 年車両に対し M/B 6.4% 増、W/D 1.5% 減とした。この結果は 10 ラップの平均であり、RA106 の推進力は平均約 10 % 高い。Fig. 13 は、低速コーナでの旋回加速区間のタイムを比較したもので、RA106 セットアップは 1 コーナあたり平均 0.05 s 速い。この結果、RA106 は 1 ラップ平均 0.74 s の短縮を達成した (Fig. 14)。以上の結果より、RA106 は旋回加速性能が向上していることがわかる。

Fig. 15 にタイヤ劣化の解析結果を示す。同時期におこなわれた 2005 年車両と RA106 の複数の走行テストの内、路面状況や気象条件が同等とみなせるデータを抽出し、それらのラップタイムをラップごとに平均化したものをラップタイム推移の代表値とみなして、ラップタイムの悪化度を比較した。車両重量の違いについては、ラップタイムシミュレーションを用いて重量のラップタイム感度を計算し、同

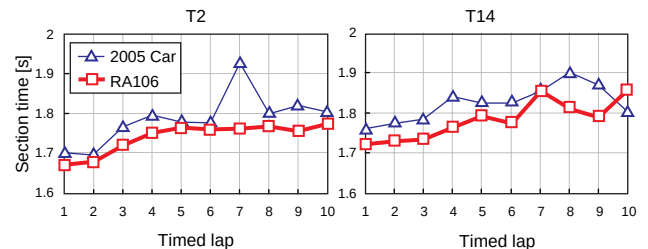


Fig. 13 Section time during corner acceleration

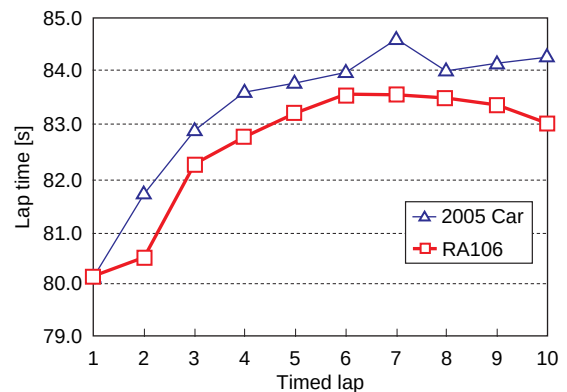


Fig. 14 Comparison of lap time

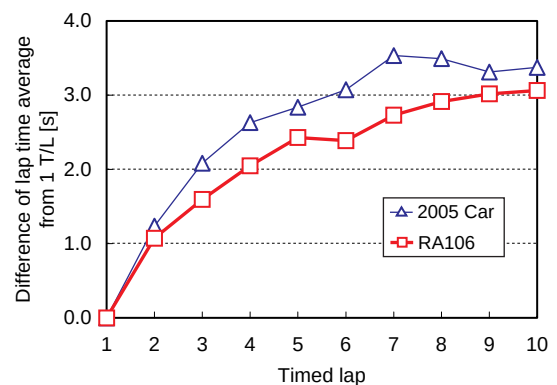


Fig. 15 Analysis of tire degradation from perspective of lap time

重量でのラップタイムに換算している。その結果、RA106はラップタイムの悪化が平均約 0.48 s 減少しており、タイヤ劣化が抑制されていることがわかる。

同様に、路面状況や気象条件が同等であった走行テストデータを用いてフロントタイヤ温度を比較したのがFig. 16である。テストをおこなったヘレスサーキットは右コーナーが多いため、外輪になることが多い左タイヤで平均約 16 °C、右タイヤで約 5 °C上昇している。

以上の解析結果により、RA106 セットアップが事前検討どおりの性能を示し、旋回加速性能の向上、タイヤ劣化の抑制、フロントタイヤ温度の上昇によるグリップ力増加を達成していることが明確になった。

3.5. 車両セットアップコンセプトのまとめ

2005 年車両の解析結果から RA106 セットアップでの性能向上項目を明確化し、タイヤモデルを用いたシミュレーションによってそれらを具現化するセットアップについて検討をおこなった。また、実走テストによってその効果を検証し、目的に合致したセットアップであることを確認した。この RA106 セットアップコンセプトはウィンターテストでその効果が確認された後、2006 年以降のすべての車両のセットアップのベースとなっており、2006年ハンガリーGPでの勝利にも貢献した。

これまで、ドライバコメントやエンジニアの経験によるところの多かったセットアップに、タイヤモデルをベースとした論理的アプローチが有効であることが確認された。この経験から、あらゆる状況下で性能を予測できるさらに高度なタイヤモデル開発へのニーズが高まった。

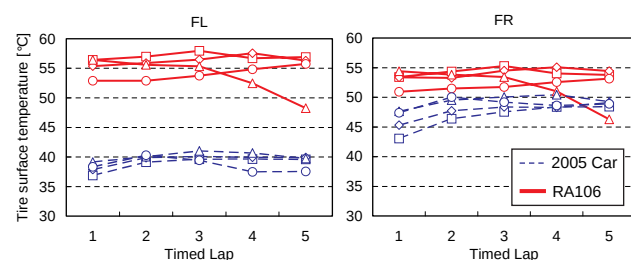


Fig. 16 Front tire surface temperature

4. 力と温度を連成計算するタイヤモデルの開発

F1車両の運動性能にはタイヤ性能が大きな影響を与えており、その運動性能を向上させるには、タイヤ性能を定量的に把握しタイヤがおかれるさまざまな状況下で最大限に引き出せるよう、車両設計やセットアップをおこなわなければならない。セットアップに関しては、レギュレーション上、レースウィークの土曜午前までしかおこなえないため、それまでに取得できたデータを用いて、土曜午後の予選や

日曜日の決勝での環境条件の変化などを考慮しながら、セットアップを決定しなければならない。そのためには、荷重、アライメント、路面温度などのさまざまな走行状況で、タイヤに発生する力を必要十分な精度で計算できるモデルが必要となる。特に、F1タイヤはタイヤ表面や内部の温度による性能の変化が著しいため、環境温度や走行状況によるタイヤへの入力の変化に応じて、力と温度を同時に連成計算し、温度の影響を考慮できるモデルが求められる。

また、車両セットアップとタイヤ性能の議論だけでなく、セーフティカー導入時のウォームアップ性能や熱による劣化などレース戦略を含んだ議論においても、タイヤの力と温度を同時に解析できることの利点は大きい。

よく知られたタイヤモデルの一つに Magic Formula モデルがあるが、このモデルには温度要素がないため、走行状況により生じる温度変化のタイヤ力への影響を計算することはできない。また、タイヤサプライヤから提供されたモデルもあったが、モデル内部がブラックボックスのため、計算精度の向上やチーム側の用途に応じた修正が事実上不可能であった。

車両運動性能で他チームに勝るためには、力と温度を連成計算するタイヤモデルを独自技術として保有し、運動性能予測や解析技術の基盤として用いることが必要だと判断し、開発に着手した。

4.1. モデル構造

4.1.1. モデルコンセプト

車両設計だけでなくサーキット現場での車両セットアップでも使用されることを想定して、計算精度と速度のバランスをとれたタイヤモデルを目標とし、タイヤ力の計算精度に大きく影響を与える要素のみを抽出しモデル化することでその両立を図る。

タイヤ力は、主に構造変形とゴム路面間の摩擦特性によって定まる。摩擦係数は、路面の粗度やダスト、表面温度やすべり速度、ゴムの磨耗や熱的劣化など、環境条件や走行状況によって大きく変化する。そこで、構造変形や熱移動など理論や台上試験結果によって特性がモデル化できる部分と、摩擦係数のように実走状態に依存する部分をモデル構造として分離しておき、後者は実走データによるパラメータ同定を前提とすることで、より現実的に精度が向上できるモデルを構築する。

4.1.2. 力学モデル

このモデルは、タイヤの接地面での変形をベルト部とトレッドゴム部に分割して取り扱う。

ベルト変形は接地面の前後方向位置に対して二次関数で表現されると近似する。得られた変形に対して、タイヤの横力、セルフアライニングトルク、内圧、前後力による補正をおこなう。

トレッドゴム部の変形は、トレッドゴムの弾性率、静止

摩擦係数、接地面圧力で定まるトレッドゴムの最大弾性変形量と、タイヤすべり角、すべり率、ベルト変形量で定まる必要変形量の関係から、接地面内の粘着域(弾性変形域)を算出し、それ以降をすべり域として取り扱う(Fig. 17)。

タイヤに発生する力は、粘着域ではゴムの弾性率と変形量、すべり域ではすべり摩擦係数と荷重によって定まる。ここで、弾性率はバルク(後述)温度の関数、静止摩擦係数は接地面圧力とそのトレッド方向に対する分布による補正、タイヤ表面温度の関数、すべり摩擦係数はさらにタイヤすべり速度の関数としてモデル化をおこなう。

以上を用いて粘着域とすべり域のタイヤ力を計算し、それらを合算して最終的なタイヤ力を計算する。

4.1.3. 熱(温度)モデル

タイヤ断面の構造を、トレッド表面層、バルクラバー層、カーカスおよびベルトラバー層の三層に分割し、それぞれが一つの温度を持つ1次元のノードモデルとして定式化する。

また、タイヤがおこなう仕事量が、すべり域では主に表面層に、粘着域ではバルク層に熱として入力されるとしてモデル化する。タイヤ転がり抵抗はバルク層で発生する熱量として取り扱う。

三層間の熱移動、空気への対流熱伝達、接地面での地面への熱伝導を計算し各層の温度を算出する。輻射による熱移動は、対流や伝導と比較し2%以下だとして省略する(Fig. 18)。

4.2. パラメータ同定

4.2.1. 達成手法

実走における接地荷重、すべり角、すべり率、キャンバ角などの時系列データを用いて計算したモデル計算結果(力

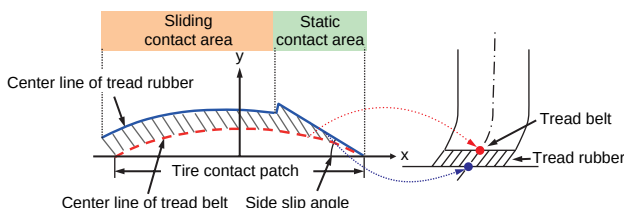


Fig. 17 Deformation model for tire contact patch

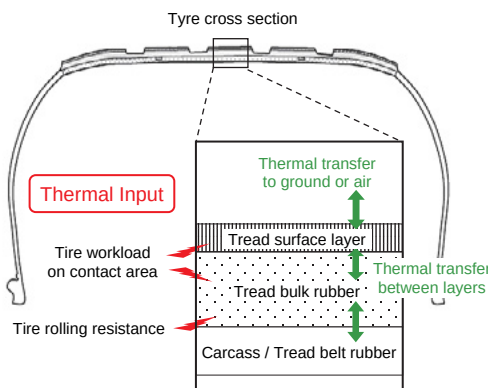


Fig. 18 Tire thermal model

とモーメント)とターゲットデータの誤差を目的関数とし、誤差が最小になるよう最適化手法を用いてパラメータを同定する。タイヤの劣化により変化するパラメータ(最大摩擦係数など)はラップごとに、変化しないもの(温度特性など)はその実走データ全体で一つの値として同定する。同定に必要なさまざまなデータには、センサ計測結果自体と、それらと台上試験結果や理論を組み合わせて算出された演算結果(接地荷重やすべり角など)を用いる。

同定手法には、ターゲットにより以下の二つがある。

- (1) タイヤ6分力計計測結果を用いる手法 ターゲットとしてタイヤ6分力計の計測結果(前後力、横力、セルフアライニングトルク)を用いる。接地荷重やアライメントなどの組み合わせが多様であるほど、同定が高精度になり、ばらつきが減少するため、左右輪の両方のデータを用いて同定する。
- (2) 車両運動を用いる手法 センシングされた車両前後加速度、横加速度、ヨーモーメントという車両運動をターゲットとして用いる。タイヤモデル計算結果、車両諸元、空気抵抗、タイヤ転がり抵抗などのデータを用いて車両運動状態を算出し、両者が一致するよう、フロントおよびリヤのパラメータを同時に同定する。

4.2.2. 最適化手法

最適化手法には、大別して、目的関数(ターゲットとの誤差)の設計変数(最適化するパラメータ)に対する勾配を利用して最適化をおこなう勾配法と、ある確率論で設計変数を変化させて最適解候補の群を発生させ、その群の中から最適解を選択する確率論的手法の二つが存在する。今回は確率論的手法の一つである進化戦略を用いた。

4.3. モデル検証結果

実走データを用いたモデル検証では、モデル計算に使用するデータや比較すべきターゲットデータのセンシング精度にも影響されるため、モデルとデータのどちらに難点があるか切り分けが難しいという課題がある。またタイヤパラメータの真値が不明のため、同定結果の定量的な検証も難しい。

そこで、ボデー、サスペンション、ステアリング、空力、および本タイヤモデルから成る車両モデルを用いて1ラップのサーキットシミュレーションをおこない、得られた車両運動データに実走相当のノイズを付加した人工的なターゲットデータを作成し、それを用いた検証をおこなった。これによって、センシング精度の課題を切り離すことが可能になり、また同定結果として得られるべきタイヤパラメータも既知となるため、タイヤモデルおよびそのパラメータ同定部分に対する検証が可能になる。

Fig. 19 は、ターゲットデータとモデルの車両運動(前後力、横力、ヨーモーメント)の1ラップの平均誤差と、ある同定計算での時系列比較である。進化戦略は確率論的手法

であるので10回の同定計算をおこない比較したが、すべての結果で誤差は約1.2%であり、時系列での比較グラフの通り、車両運動の解析として十分な精度が得られている。一方、車両運動の誤差がほぼ同一にもかかわらず、複数のパラメータが連動してばらつく現象が見られた。異なるパラメータの組み合わせでモデル出力が同じになる特性をモデル特性と呼び、多パラメータモデルではしばしば見られる現象である。解析の結果、モデル特性の抑制には、ターゲットデータの多様性を高めることが効果的であり、必要な多様性の幅について知見を得ることができた。

以上のモデル精度に関する検証結果を踏まえ、実走テストでのタイヤ力および温度の計測値との比較をおこなった。

Fig. 20は、パルセロナサーキットでの5ラップの走行をおこなった際、5ラップ目のタイヤ力計測結果とタイヤモデルによる計算結果を比較したものである。タイヤモデルのパラメータは、3ラップ目のデータを用いて同定した。横力はほぼ全域で精度よく計算できている。前後力は、制動時

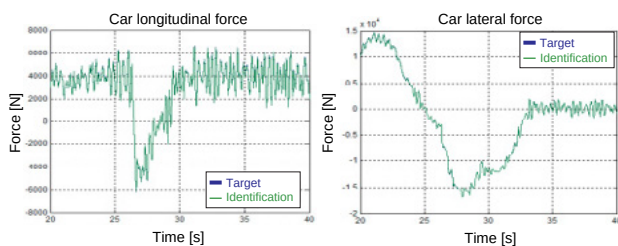


Fig. 19 Identification result (car dynamics error)

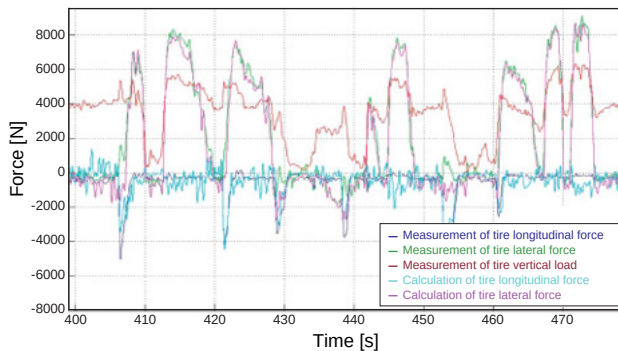


Fig. 20 Comparison of tire forces (front)

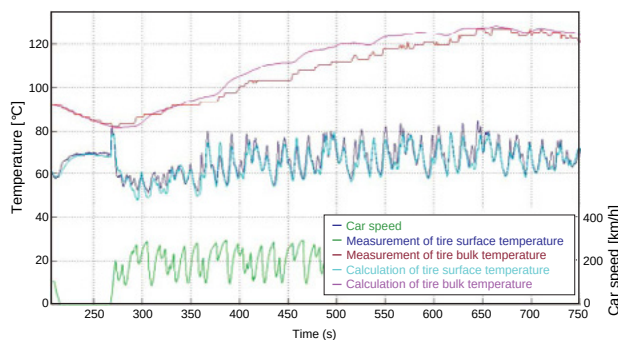


Fig. 21 Comparison of tire temperatures (rear)

のピーク値が若干低く算出されているが、ターンイン時はよく一致している。制動時は、モデル入力の一つであるすべり率が急変するためその精度の確保が難しく、モデル精度よりも入力精度による誤差の影響が大きいと考えられる。

Fig. 21は、タイヤ表面とバルクの温度計測値とモデル計算値の比較結果である。走行の途中にピットレーンで停止 ($t=220$ s) し、再度走行している ($t=280$ s)。停止後、内部発熱がなくなるので内部温度が下がる一方、空気中への放熱量が低下して表面温度は上昇する現象や、走行再開後徐々に温度が上がり熱平衡状態に達する状態が再現されている。内部温度は途中のラップで若干高く計算されているが、ウォームアップ性能を評価するのに十分な精度であるといえる。

4.4. タイヤモデル開発のまとめ

本研究では、タイヤ力とそれに影響を与えるタイヤ温度を同時に連成計算するタイヤモデルを開発した。走行状況に影響を受ける要素を実走データによるパラメータ同定を前提としたモデル構造とすることで、車両設計やセットアップといった幅広いニーズを満たす計算精度と計算速度を実現することができた。

5. むすび

本稿で紹介した技術が示すとおり、F1運動性能の開発において車両運動シミュレーション技術の果たす役割は大きい。シミュレーションによるコスト削減や開発効率の向上といった効果もさることながら、現象を観察し、メカニズムを解析してモデル化するシミュレーション技術開発のプロセスそのものが、F1の運動性能を飛躍的に向上させている。

近年の開発においては、いっそうの性能追求や開発効率向上を目指して、車両運動シミュレーション技術をさらに進めたドライビングシミュレータの開発および活用が進んでいる。サーキットでの実走テストにつきもののさまざまな外的要因が取り除かれることで、質の高いテスト結果の得られるドライビングシミュレータは、単に開発アイテムの性能評価にとどまらず、車両開発コンセプトの構築や運動性能におけるドライバフィーリングの指標化といった領域にも適用されている。これらの技術が量産車の開発にも積極的に活用されることが期待される。

■ 著 者 ■



澁江 秀明



種子田和宏



木滝 泰隆