

第3期 Honda F1 駆動力制御システムの開発

Development of Traction Control Systems for Formula One

木 寺 和 治*
Kazuharu KIDERA

深 尾 洋一郎*
Yoichiro FUKAO

伊 藤 達 哉*
Tatsuya ITO

要 旨

ABSTRACT

F1ドライバの技量を超えるレベルでタイヤスリップ量を制御して旋回加速性能を向上させるトラクションコントロールの開発や、ブレーキング中にエンジントルクを利用してリヤタイヤのロックアップ防止を図るオーバランコントロールの開発に取り組み、現代制御による高精度エンジン回転数制御や限界走行が前提の F1 には難易度の高い車輪速フィードバック制御など多くの制御システムをレースに適用した。

またスタート時の制御であるローンチコントロールではクラッチ伝達トルクの完全直接制御化を実現した。クラッチの自動制御禁止後もレギュレーションを満足しつつ、スタートパフォーマンスを向上、安定化させるスタート補助システムの開発を継続し、ダイレクトプッシュクラッチなど新技術も積極的に採用した。

Efforts have been made toward the development of traction control that controls the amount of tire slip at a level that exceeds the abilities of Formula One drivers and enhances turning acceleration performance, and the development of overrun control that is intended to prevent rear tire lockup by using engine torque when the brakes are being applied. Numerous control systems have been applied in racing based on modern control theories, including high-precision engine speed control and wheel speed feedback control, which is extremely challenging in Formula One, where driving at the limit is the norm.

Launch control, which is control applied in the start of a race, has also realized complete direct control of clutch transfer torque. Development has proceeded on start assist systems that can enhance start performance with reliable repeatability while continuing to satisfy regulations even after prohibition of automatic clutch control. The direct push clutch and other new technologies have been actively adopted.

1. まえがき

2000年のオーストラリア GP 参戦から幕をあげた第3期 F1 活動において駆動力制御は極めて重要であった。

2001年スペイン GP より、それまでトラクションコントロールを基本禁止としていた FIA は一転して全面解禁し、駆動力制御開発はスタートした。

以後タイヤ性能に規制を加えながらも車両運動性能は進化を続けるなか、駆動力を最適に制御しタイヤの能力を最大限に使いきることは車両運動性能進化において重要な位置を占めた。

また、2008年に FIA が共通 ECU 搭載義務化により制御仕様を統一することでドライバイドとなる制御を完全

に排除したのちも、旋回区間でドライバがいかにトルクを操りやすくするかという点において駆動力制御への要求は依然高かった。

このような状況のなか第3期の活動期間のほぼ全域において駆動力制御開発は継続された。

本稿では加速領域におけるトラクションコントロール(TC)および TC 禁止後に実施したアクセルペダル入力に対する駆動力設定手法開発、減速領域におけるオーバランコントロール(OC)、発進領域においてボタン一つで完全自動発進が可能なローンチコントロール(LC)、2004以降の LC 禁止後開発されたマニュアルクラッチ操作前提のレーススタートシステム(RS)についてそれぞれの変遷と開発技術について述べる。

*四輪R&Dセンター

2. 開発のねらい

F1における駆動力制御の目的は、ドライバーが安定して車を速く運転できるよう補助することにある。しかし一般にレーシングカーにおいては、限界性能を引き出すだけでなく、その不安定な状態を維持し続けることが必要とされる。量産車においては、安全性の観点からあくまで限界域内に留まらせることが同様の制御システムの要件となる。この目指すところの違いはそのまま両者のシステムに求められる性能の違いとなる。

また F1 と量産車では制御対象としてのハードウェアの違いも大きい。F1 の 600 kg 台という軽い車重はもちろん、駆動系の回転イナーシャも可能な限り小さく作られている。一方で、エンジンパワー、ブレーキ力、およびタイヤグリップ力の絶対値は量産車の何倍も大きい。

上記二つの理由により、量産車と比べ F1 の駆動力制御は繊細なものとなり、高精度かつ高レスポンスのシステムが求められる。一般に車両の限界性能を引き出すということは、地面との唯一の接点であるタイヤの性能を使いきることに他ならない。F1のパワープラント系制御もその例外ではなく、有限のエンジンパワーを有効にタイヤへ伝達しつつも、決してタイヤの限界は超えてはならない。その制御手法は主に二つに大別される。一つはホイールトルクを直接制御する方法、もう一つはタイヤのスリップ量を制御す

る方法である。また、この二つの間接的な実現手法として、エンジントルクもしくはエンジン回転数だけを制御するという手法も存在する。駆動系には回転イナーシャ、バックラッシュ、およびねじれの各要素が存在するため、ホイール基準での制御とエンジン基準での制御は厳密には異なるが、それぞれの手法は用途や制御の難易度、有利不利に応じて使い分けられることになる。

Fig. 1に以下で紹介する三つのシステムの歴史的変遷を、Fig. 2 には制御システムの構成図を示す。

2.1. トラクションコントロール(TC)のねらい

F1におけるTCのねらいは、ドライバーの技量を越えたレベルで駆動力を制御し、タイヤのスリップ量を適切に抑え込むことで直進加速性能および旋回加速性能を引き上げることにある。このシステムはエンジン出力の制御に他ならないが、最終的に制御したいのはタイヤのスリップ量そのものとなる。

制御の難しさは、求められるスリップ量の達成精度とレスポンスに対し、アクチュエータとしてのエンジンのトルク発生遅れと、エンジンとタイヤの間に存在する駆動系構成要素のバックラッシュやねじれに起因するトルク伝達遅れが存在することにある。また、路面の荒れや縁石などからの外乱に対してロバストな性能保障も要求される。

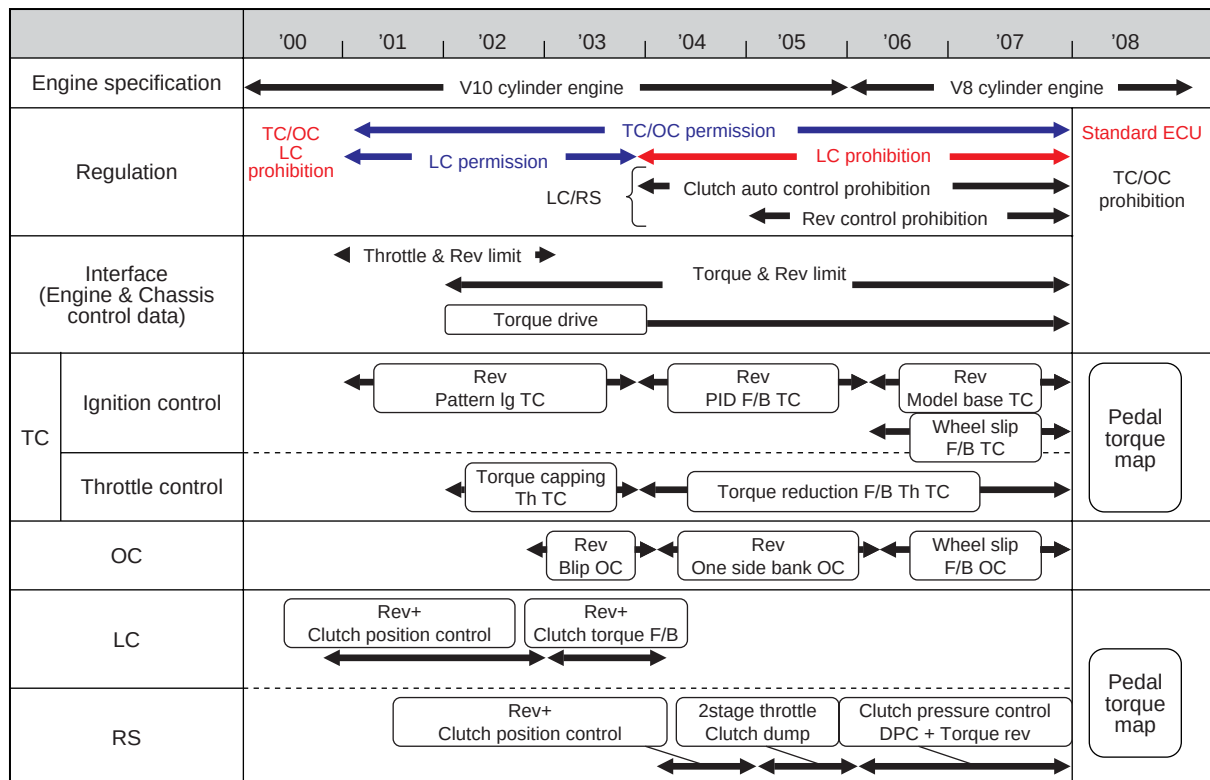


Fig. 1 History of control system development

2.2. オーバランコントロール(OC)のねらい

F1 における OC とはブレーキング中のエンジントルクを制御することで、リヤタイヤのロックアップを防止し、タイヤのスリップ量の適正化を図るシステムである。

F1 ではブレーキシステムによる前後制動力配分制御や ABS は禁止されているが、強大なタイヤのグリップ力とカーボンブレーキで実現される最大約 5G もの減速度に起因する前後荷重移動量は大きく、最適な前後のブレーキ力バランスは刻一刻と変化する。OCはエンジンブレーキ力を調整するだけでなく、制動中であっても必要な状況では駆動側までトルクを出すことで、前後の制動力配分の適正化を図りながらリヤタイヤ限定ではあるものの ABS と同様の性能を目指している。

結果として、ドライバーはバンプ等の外乱が多い状態でも安心してブレーキペダルを強く踏むことができ、またコーナへのターンインにおいてもリヤタイヤのスリップ量を抑制してオーバーステア低減効果を得ることができる。

制御面での難点は TC と共通点が多いが、一点大きく異なるのはタイヤスリップを発生させる源は主としてブレーキ力にあり、エンジントルクの占める割合がその数分の 1 程度と小さいことにある。このため OC の制御幅はおのずと制限されることとなる。

2.3. ローンチコントロール(LC)およびレーススタートシステム(RS)のねらい

LC とはエンジントルクと回転数、およびクラッチエンゲージメント量を統合的に制御し、F1 のレーススタートを自動的におこなうシステムである。ドライバーは決められた手順に従いシステムをアクティベートすれば、あとはボタン一つで 0 - 100 km/h まで LC がリヤタイヤのスリップ量を適切に制御し最大加速度を実現する(LC は 2004 年以降レギュレーションにより禁止された)。

一方 RS とは、LC 禁止後のドライバーマニュアルレーススタート補助システムといえる。LC 禁止後も、レギュレーションで許される範囲での発進制御システム開発がおこなわれ、2004 年以降は FIA とのチーム間の知恵比べ状態であった。RSのねらいは、ドライバーが決められた発進の手順(スロットルペダル操作、クラッチペダル操作)をしさえすれば、路面とタイヤ間の摩擦係数 μ や気象コンディションに応じてエンジンおよびクラッチの適切な制御セッティングをエンジニアが選択し、ベストな発進性能を安定して実現することである。

LC, RS 共通の難しさは、クラッチ伝達トルクをいかに高精度かつ高レスポンスで制御できるか、およびエンジンとクラッチの協調制御の二点に集約される。

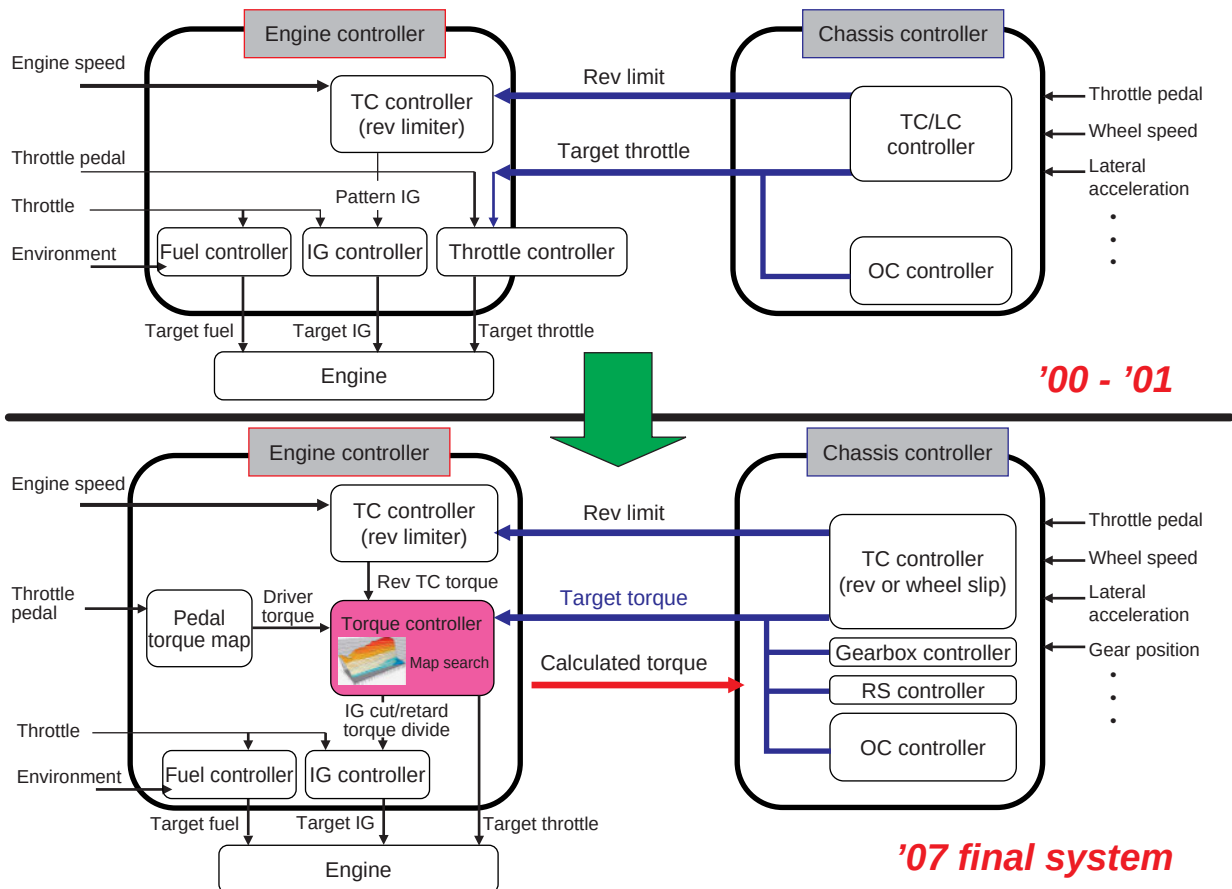


Fig. 2 Configuration of control system

3. TC の開発

TC は 2001 年にレギュレーションによりその使用が明確に許可されて以来 2007 年までレースに適用され、2008 年に FIA 共通 ECU の義務化とともに再び全面的に禁止となった。本章では TC の開発およびその禁止後におけるドライバビリティ向上に対する取り組みについても解説する。

3.1. TC 開発

第 3 期 F1 活動での TC 開発は大別すると以下の 2 項目に分類できる。

- ・目標タイヤスリップ量に対する追従性
- ・最大加速性能が得られる目標タイヤスリップ量の究明

開発当初の段階では、目標タイヤスリップ量に対する追従性が低く、車両挙動を乱す一因となる場面が見られた。この要因として、路面の荒れや縁石などに対する外乱タフネス不足やエンジン目標トルクからタイヤ駆動力までの伝達特性が十分に考慮されていないことによる制御性能不足が挙げられた。これらの事象を改善すべく第 3 期の初期、中期の TC 開発は主に目標タイヤスリップ量に対する追従性を向上させることに主眼を置きコントローラの開発を進めてきた。

3.1.1. 目標タイヤスリップ量に対する追従性向上

タイヤスリップ量を制御する方法は、目標タイヤスリップ量に対して、実スリップ量をフィードバックパラメータとする直接的な手法と、目標タイヤスリップ量と減速比から目標エンジン回転数を算出し、これに対してエンジン回転数をフィードバック (F/B) パラメータとする間接的な手法が存在する (Fig. 3)。

第 3 期当初から適用していたエンジン回転数制御 TC (Rev TC) は後者にあたり、当時のコントローラは目標エンジン回転数に対する差分を基にあらかじめ決められた点火パターン [Pattern Ignition (IG)] を指定するものであり、エンジントルクでは制御されていなかった。その後、多様な駆

動系制御を構築する過程で共通のパラメータをエンジントルクとし、トルクインターフェイスで整理することで制御系の精度向上と自由度拡大につながった (トルクドライブの適用)。

Rev TC はその後 PID F/B 制御化することで収束性とトルクのリニアリティが向上し、さらにエンジン特性を考慮した現代制御理論を適用することで収束性をより向上させると共にトルク操作量が適正化され外乱タフネスが向上した。

Fig. 4 に Rev TC の実走データを示す。エンジン回転数を制御することで目標タイヤスリップ量へ追従していることがわかる。Rev TC は系の遅れの影響を受けにくく応答が速いメリットがある反面、左右駆動輪スリップ制御、縁石などへの対応という点では不利な面も有する。

また、Rev TC の開発と併行して Wheel slip F/B TC (以下 W/S F/B TC) の開発がおこなわれた。この制御は、タイヤスリップ量を F/B パラメータとする手法である。これにより、コーナリング中の内輪、外輪に応じた駆動力制御が可能となり設定自由度が増した。路面からの外乱入力に対するロバスト性はあらかじめシミュレーションで確立させ、過度なトルク操作を抑制することも可能となった。

Fig. 5 に W/S F/B TC の実走データを示す。変動するリヤタイヤの荷重 (Rear inner/outer tyre Fz) に対してホイールトルクをきめ細かく制御し、スリップ量 (Tyre slip) を目標値 (TC slip target) にキープしている。

第 3 期では上記二つの制御手法 (Rev F/B TC と W/S F/B TC) を状況に応じて使い分けた。路面反力に対して駆動力が大きく、F/B 系に高応答性、高分解性が要求される低速ギヤ走行 (RS、低速コーナ立上り) や、WET 路面での走行時は Rev TC を主に使用し、中速および高速ギヤ走行、縁石の影響が考えられる状況ではより柔軟な制御が可能な W/S F/B TC を主に使用した。

TC F/B 系の重要なポイントとして系の遅れの考慮と外乱に対するロバスト性の他に、ドライバビリティの観点か

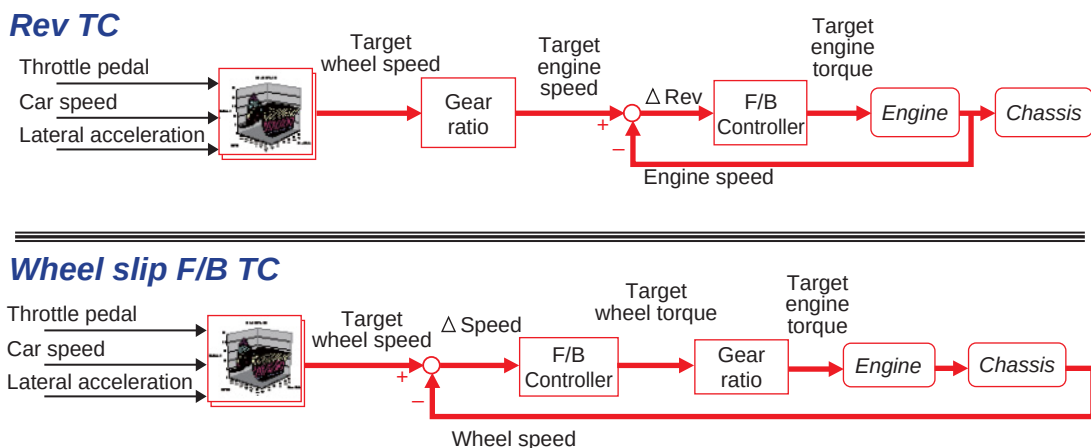


Fig. 3 Feedback control system in TC

らドライバの意思を無視した過剰な点火コントロール変動を抑制すること、燃費の観点から燃料噴射量を抑制することが挙げられる。Throttle TC(Th TC)は上記を目的としたコントローラである。開発当初に適用されていたシーケンス制御に近い制御系(Torque capping Th TC)から改善を続け、

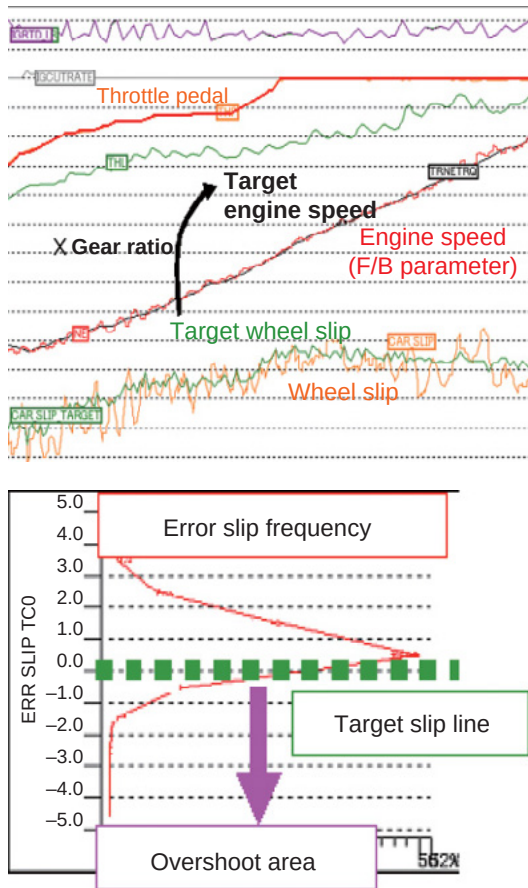


Fig. 4 Rev TC track data

最終的にはトルク減算量 F/B 系(Torque reduction F/B)の制御により約3%の燃費向上と外乱入力時も少量安定の点火コントロールが実現可能となった。

3.1.2. 目標タイヤスリップ量の算出

F/B 制御系の改善により目標スリップ量への追従性が安定して確保されるようになり、TC開発はより最適な目標スリップ量の追求へと移行した。2006年の夏からは、ECU内の車両モデルとタイヤモデル、および各種車体センサを用いて車両状態量の推定をおこない、デフ制御(電子制御リミテッドスリップディファレンシャルギヤ)も含めた統合制御によって目標スリップ量を算出する試みも実施されたが、最終的にはドライバのスロットルペダル開度と車両横Gに応じた目標スリップ量を複数のマップとして持つ手法を採用した。

第3期開始当初から採用された上記手法は、各ドライバの意思が反映されフィーリングに応じたセッティングが可能なメリットがある反面、各サーキットのコーナ、路面、タイヤコンディションごと、さらにはドライバの技量や好みに応じて最適なセッティングを見出していくことが重要であり、工数と適応性に関しては最後まで難があった。

3.2. TC 禁止後の開発

2008年のレギュレーション変更により、エンジンとギヤボックスを含む車両全体システムの制御は McLaren Electronic Systems 社製の FIA 共通 ECU となり、TC と OCが禁止された。その結果、コーナリング時の車両のトラクション不足、エンジンのドライバビリティの低さが顕在化し、ハードとソフト両面からの改善が必要となった。

パワートレイン系ではトルク精度に着目し開発を進めた。これは、TC有効時には過大なトルク誤差以外

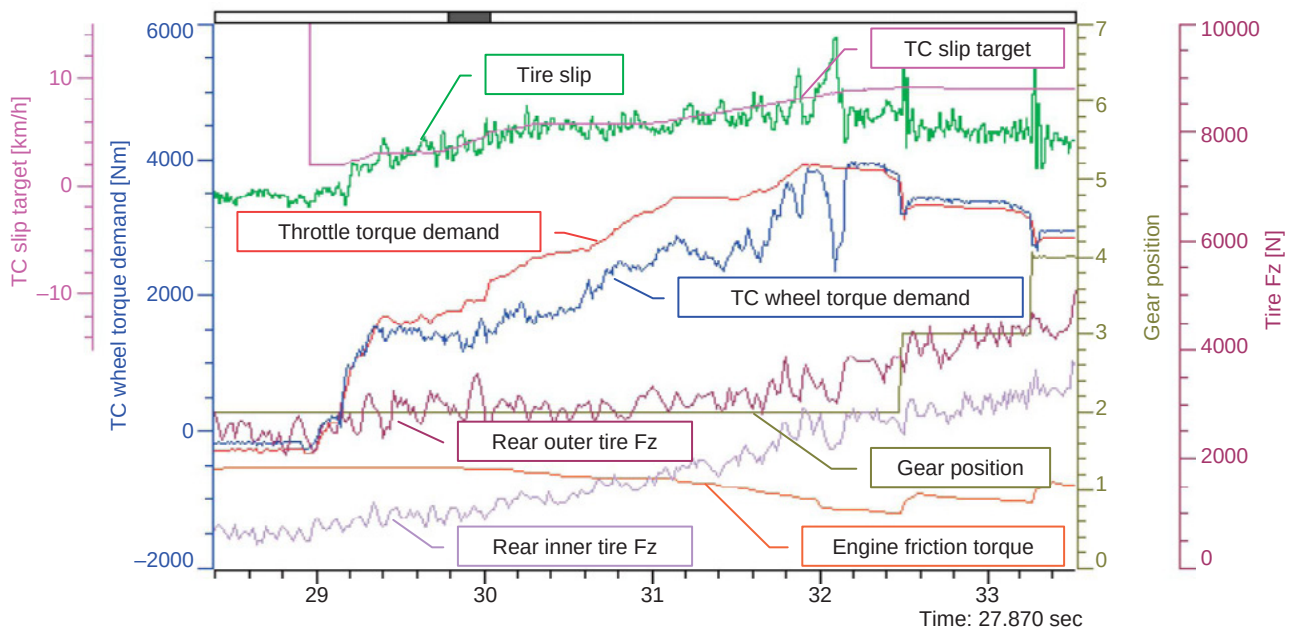


Fig. 5 Wheel slip feedback TC track data

はF/B系が吸収し、弱点が表面化し難いものであったが、TC禁止により過渡でのエンジントルク特性含めたトルク精度要求が高まったことに起因する。

また、スロットルペダルに対する目標トルクの定義の仕方はドライバフィーリングだけでなく、TCの代替として設定指針の確立が必要となった。

3.2.1. トルク精度補償

ドライバビリティの観点から、パワートレインとして重要なポイントは

- (1) ドライバがスロットルペダル操作に対する駆動トルクを予測できること
- (2) ペダル操作に対して線形なトルク特性であること
- (3) トルク応答性が高いこと

であり、いずれの要素が欠落しても旋回中の車両安定限界を維持することが困難となるが、(2)、(3)についてはドライバの特性、好みにより解は異なる可能性がある。

エンジン開発では、吸排気系、燃料系の改善により、低負荷での燃焼安定性向上(空燃比リッチ条件下)とスロットル開閉過渡時のばらつきを抑制し、トルク応答性と再現性の向上を促した。また、燃焼安定性に着目した各種マップ計測や、サーキットでの使用状態を考慮したデータ設定もトルク精度向上とドライバビリティ改善につながった。

3.2.2. 目標トルクの定義

TCのF/B制御が禁止されている状態では、スロットルペダルに対する目標トルクの設定はドライバビリティに与える影響が大きい項目の一つである。ドライバはコーナからの立ち上がり時にスロットルペダルを操作することでタイヤスリップ量をコントロールするが、この時に重要となるのは、スロットルペダルに対する駆動トルクの分解能とリニアリティ確保の他に、過度のスリップ発生時のトルクリダクション実施が挙げられる。2008年シーズンでは、上記の要素全てを成立させるために各サーキット低速コーナでの駆動力使用領域を考慮し、セッティングの最適化をおこなった。この時、最適化までの効率を高めるために事前サーキットシミュレーションも実施している。

3.3. 評価指標と台上評価手法の確立

パワープラントのトルク挙動や車両セッティングがTCの制御性やドライバビリティに与える影響を定量的に評価できることは各種開発を進める上で重要な項目であり、台上での評価手法と併せて評価指標の検討をおこなった。

車両全体での安定性の評価などは開発途中でのプロジェクト凍結から、ドライバコメントに頼る部分が残ったが、パワープラントの評価、特にトルクの応答特性と精度の評価においては定量的な指標とテスト手法が確立でき、サーキット走行前の事前確認とフロントローディング開発が可能となっている。

4. OCの開発

4.1. エンジンレブ制御 OC

OCの開発はHondaメンバーの発案によりBAR-Honda時代の2001年秋ごろからスタートし、2002年より本格化してレース投入を果たした。

当初は、車体系コントロールユニット(Pi-Sigma MCU)から、フィードフォワードスロットル開度要求とタイヤスリップ限界に応じたエンジン回転数下限リミット(レブリミットの反対)をエンジンコントロールユニット(ATHENA ECU)に受け渡し制御するシステムであった。2002年秋からは、TC同様MCUとECU間のスロットル開度要求の受け渡しはトルク要求に置き換えられた。その後、エンジンブレーキとアンチロック性能という相反するドライバ要望もあって、2003年からはスロットルトルク要求も回転数偏差に応じたオンデマンド方式(Blip OC)に変更された。

しかしながら、2006年序盤までのOCは制御の位相遅れに起因するプッシング感などがドライバにとって課題になり、その使用は限定的なものにとどまった。その間、目標値設定方法の変更や細かなチューニングは続けられたが、本来のOCの目的であるリヤタイヤのアンチロック性能はまだ不十分なものであった。

4.2. ホイールスリップフィードバック OC

2006年序盤にホイールスリップフィードバックTCがレース投入され、数レース後には全く共通の制御アルゴリズムをOCにも適用した。従来のエンジン回転数制御ではなく、リヤ車輪速をダイレクトにフィードバックソースとして使えるようになったため、路面からの外乱やブレーキトルクの変動に対しエンジントルク出力をすばやくきめ細やかに制御することが可能となった。

Fig. 6にOCの制御の様子を示す。タイヤスリップ量(Tyre slip)が限界スリップ量(OC slip target)に到達するはるか手前からエンジントルク指令値(OC wheel torque demand)が上昇してリヤタイヤのロックアップを防止し、スリップが収まるとすばやくトルクは下降する(各トルク値はホイールトルク基準)。スロットルはOCトルク要求にトルクマージンを持たせて開いている。アンチロック性能は改善され、ドライバにも好評を得た。

この新しいOCはホイールトルク制御に基づいていたため、エンジンブレーキ量についてもフィードフォワード制御で簡単に調整することができた。必要なエンジンブレーキ量はドライビングスタイルによって異なるためドライバの好みの量にするのが基本であるが、ギヤレシオの変更に影響を受けないことやギヤシフトの際にできるトルクの段差をなくすなどの用途を考え、車速に対するホイールトルク要求マップとした。チューニングの簡便さもF1では重要視されるからである。Fig. 6の41秒から41.4秒付近の

データは、このフィードフォワードトルク要求(OC feed forward torque demand)が働いている様子を示している。

制動中にエンジンの点火頻度が高まったことで開発当初はエキゾーストパイプ中の排気温度上昇が課題となったが、必要トルク量に応じてトルクが十分な場合は片バンクのみの点火とし、ブレーキングごとに左右のバンクを交互に使用することで対応した。

2008 年からはレギュレーションで FIA 共通 ECU が義務化されて TC と OC は禁止となったが、ドライバコンプレインは TC よりも OC が使えなくなったことに集中した。これは F1 ドライバの技量を持ってしても、OC のようなブレーキング中のエンジントルクコントロールは困難だからである。

5. LC および RS の開発

2008 年終了時点での FIA 共通 ECU による RS 制御方式は、2009 年以降も Brawn GP で継続使用されると考えられるため、ここでは 2003 年以前の LC およびそれ以降 2007 年までの RS についてのみを記述する。

5.1. クラッチ位置制御 LC

LC の開発は TC の解禁と同じく 2001 年にスタートした。2002 年以前の LC は発進直後からクラッチフルエンゲージメントまでの初期タイヤスリップの制御性に課題を抱えていた。これは当時のプル式クラッチを位置制御する方式では、たとえ半クラッチ状態で同じ位置に保持していてもディスクの摩耗量や熱膨張によってクランプロードが大きく変化するため伝達トルクが不安定となることに起因していた。また、本来そのような変動要素を吸収すべきであるタイヤスリップフィードバック制御部分についても当時のシ

ステムは処理周期が遅すぎたため十分な補償能力を確保できなかった。

5.2. クラッチトルク制御 LC

上記の課題解決のため、2003 年よりクラッチとギヤボックスの間にあるインプットシャフトに非接触の磁歪式トルクセンサを装着し、クラッチ伝達トルクをダイレクトにフィードバック制御する方式を開発した。10 msec 以上のトルク発生遅れを伴うエンジンで制御する TC と比較すると、このクラッチトルク制御にはほとんど遅れがなかったため、タイヤスリップ制御には有利であった。

伝達トルクの直接制御が実現したことで、スタートの瞬間から路面とタイヤ間の摩擦係数 μ に応じたフィードフォワードトルクを出せるようになり、いったん車が動き始めればリヤタイヤのスリップフィードバック制御に切り替えてタイヤスリップ量を加速度が最大になるよう制御することが可能となった。この切り替えをできるだけ早くおこなうため、極低速の車輪速検出に専用の演算処理装置を搭載した。タイヤの転がり始めのタイヤスリップ制御がスタートの勝敗を大きく左右していたからである。

LC ではドライバの反応速度も寄与が大きく、ブレーキリリース方式や、ボタン操作、パドル操作などドライバごとに実測して遅れの少ない方式を採用した。優秀な場合、ドライバがスタートシグナルを見てから操作までの反応時間は 0.2 秒に満たないが、ミスがあると 0 - 100 km/h 加速性能が 3 秒弱の F1 では優秀な制御システムでもリカバーすることは事実上不可能であった。

他にも、F1 のレーススタートではタイヤの温度管理が結果を左右する要因として存在する。タイヤのトラクション性能が最適になるのは 80 から 90 °C 前後と各チームとも認識していたと思われるが、実際のレーススタート時にそれ

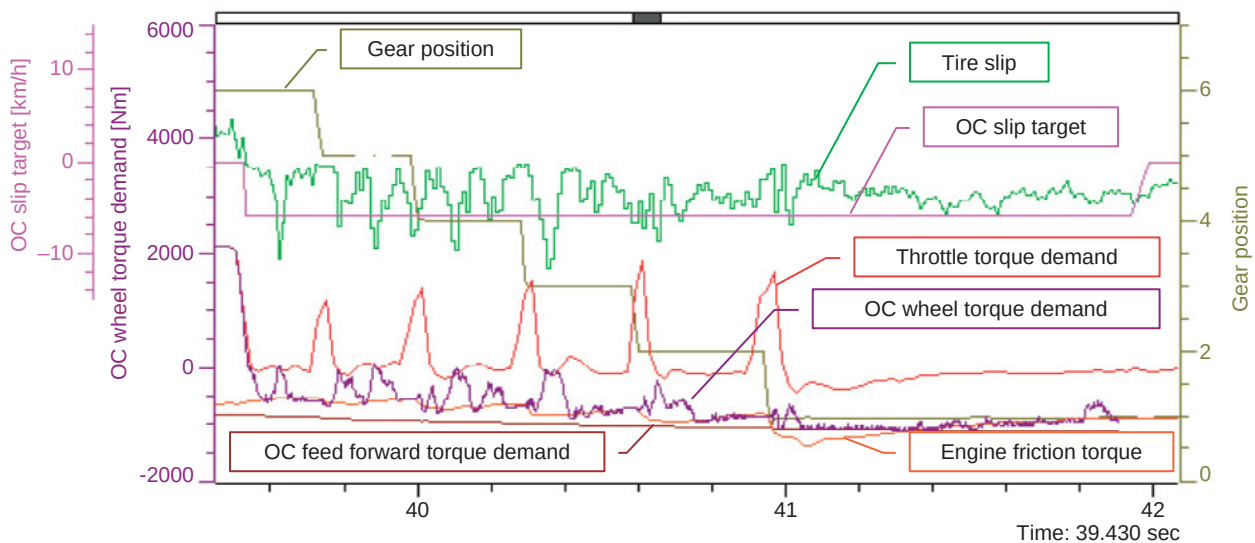


Fig. 6 Wheel slip feedback OC track data

をマネジメントができていたチームは当時まだ少なかった。BAR-Honda ではようやく 2003 年イギリス GP からタイヤ表面温度センサをレース適用し、スタートグリッド上でのタイヤ温度の異常な低さを初めて認識するなど運営面では後手に回っていた。路面コンディションがよく、タイヤ温度も適切な状況では 0-100 km/h 加速で 2.6 秒を切る実力もあり LC 制御では他をリードしていたと思われるが、スタートに有利なりや寄り重量配分パッケージやタイヤの使い方などで先行する他チームもあり、総合力としてのチームのスタート性能がトップレベルに到達しなかったのは残念である。

5.3. 半クラッチ RS - プル式クラッチ位置制御

2004 年になると FIA はドライバイドシステム排除の手始めとしてまず LC を即時禁止とした。クラッチ制御はドライバのマニュアル操作による目標ポジションもしくは目標圧力に従わなければならないという規制で、TC については規制の明文化が困難であったため、クラッチフルエンゲージメント後の TC 制御は許可されたままであった。BAR-Honda ではドライバのクラッチ操作を簡単にするため、Fig. 7 のような特殊なクラッチパドルマップと、ステアリングホイール背面に取り付けられた左右のクラッチパドルを Fig. 8 に示すように異なる位置で待機しておき、時間差をつけてリリースするダブルパドル方式の組み合わせを考案した。

二つのパドルのうちディスエンゲージメント側が実際のパドル要求値となるため、Fig. 8 の太線部分が実際のクラッチポジション要求となる。この手順により、ドライバはフル

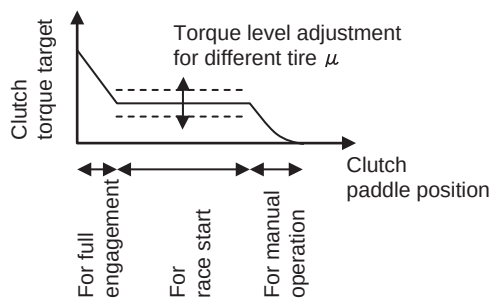


Fig. 7 Clutch paddle map

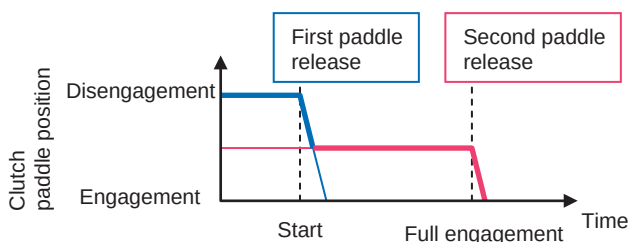


Fig. 8 Double paddle procedure

ディスエンゲージ状態から半クラッチ状態に、そしてフルエンゲージにという一連の操作をすばやく正確におこなうことができる。半クラッチ状態ではパドルマップの平らな部分に応じた一定目標トルクとなるが、これは加速初期の極低速では F1 の最大駆動トルクがほぼ一定値に近いという事実を利用している (Fig. 10)。

ECU 内にはこの平らな部分のトルク目標値が異なる数種類のパドルマップを準備しておき、実際に本番レーススタートで使用するマップは、ピットに待機している制御エンジニアがスタート数十秒前に最終決定してドライバに無線指示した。これはフォーメーションラップの始めに実際のグリッド上でスタート練習し、テレメトリデータから路面とタイヤ間の摩擦係数 μ を推定していたからである。

このような創意工夫にも関わらず、当時のプル式クラッチを位置制御する方式では 2002 年以前の LC で抱えた課題と同様、伝達トルクがディスクの摩耗状態や温度で変化するため意図通りの発進が実現できない状況が続いた。

5.4. クラッチダンブ RS

プル式クラッチ位置制御の弱点解決のため、2004 年終盤の日本 GP からスーパーショート 1st ギヤを投入し、RS はクラッチダンブ方式に切り替えられた。これは、待機状態でのエンジン回転数を 11000 rpm 以上という高めの回転に維持しておき、スタート直後にクラッチパドルを完全にリリースして一気にフルエンゲージさせ、生じるホイールスピンを 5000 rpm 以下という極低回転のエンジンレブリミットで無理矢理抑え込むという手法である。Fig. 9 に 2005 年当時のクラッチダンブ RS の実走データを示す。

ホイールスピンにより初期の加速はホイールスピンのない成功した半クラッチスタートには及ばないものの、毎回同じ量のホイールスピンが発生するため安定度の高いスタートが実現できた。クラッチパドルのリリースタイミングとタイヤ温度のみがスタートの不確定要素であった。制御的な難しさは主に二つで、一つはエンジン回転数を 1 秒以下という単時間ではあるもののアイドリング回転数よりも低い回転にキープしなければならず、その間良好な燃焼状態や油圧を保障しなければならないこと。もう一つはレギュレーション上、クラッチパドルで決まる目標クラッチポジション(もしくは油圧)と実クラッチポジション(もしくは油圧)が 50 msec 以内の遅れしか許容されないという規定であった。パドル要求通りの瞬時のフルエンゲージメントとすると、駆動系に生じるショックトルクが当時のギヤボックスの最大許容トルクを簡単にオーバーしてしまうため、許される 50 msec の時間の中で最大伝達トルクが最も小さくなるよう数 msec オーダで細心のクラッチ制御チューニングをおこなった。

2004 年当時はエンジンレブリミット制御に関する規制がなく、ドライバはスタート前からスロットル全開のままで

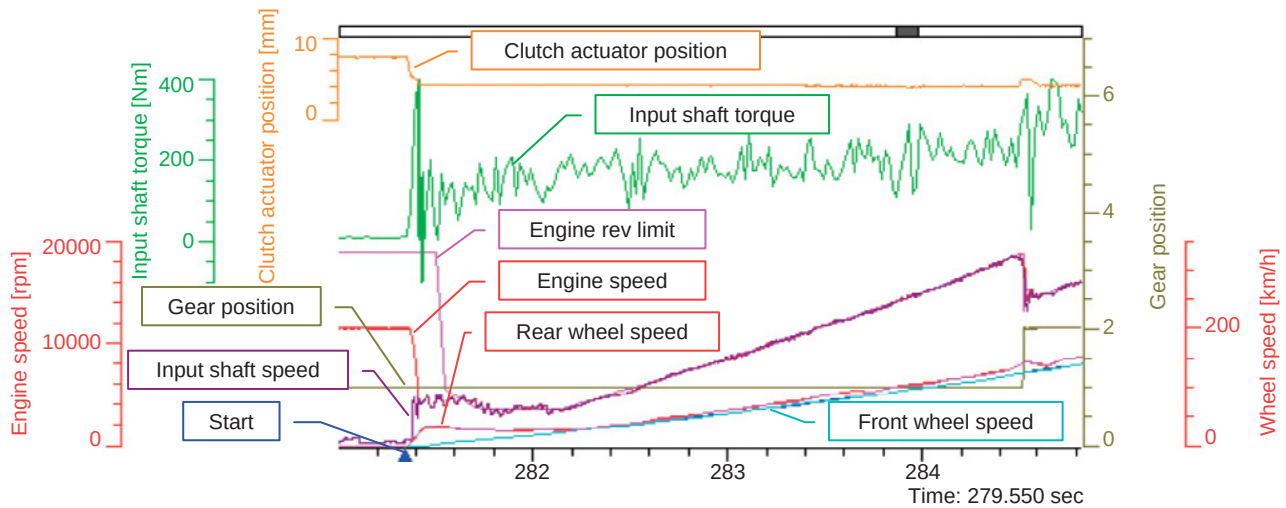


Fig. 9 Clutch dump RS track data (2005)

よかったが、2005年には待機状態でのレブリミット使用が禁止された。BAR-Hondaではスタート専用エンジントルクトリミングマップとスロットルペダルの2段階みという手法を提案し、ドライバオペレーションの簡易化を図りながら待機状態から発進に至るまで実質レブリミット同等の制御性を実現しダンブRSを継続使用した(Fig. 9)。

5.5. 半クラッチ RS-DPC 圧力制御

2006年になるとそれまでの3L V10エンジンが禁止され、2.4L V8エンジンの使用が義務づけられた。これはエンジントルクが20%以上低下することを意味し、クラッチダンブ方式が実質不可能となった。Fig. 10にV8エンジンのトルクと路面・タイヤ間の摩擦係数 μ から計算される必要トルクの関係を示す。ドライ路面での μ は1.6から1.9程度なので、「エンジントルク>RS必要トルク」の関係を満たすためには8000から9000rpm以上のエンジン回転数が必要となる。V10エンジンでは必要トルクとエンジントルクがFig. 10の $\mu=1.0$ のような相対関係にあったため5000rpm以下でダンブ方式が可能であったが、高めの回転数で

トルクを確保する必要があるV8エンジンでは、再びダブルパドル方式の半クラッチ使用を前提にRS戦略も変更が必要となった。

クラッチトルク制御性向上の手段としては、Honda独自の開発ダイレクトプッシュクラッチ(DPC)⁽¹⁾が採用された。これはプル式クラッチの弱点である、ディスクの摩耗状態や熱膨張によってクランプロードが変化することを解決したものである。DPCではクラッチ接続は油圧アクチュエータにより直接ディスクを押し付ける方式で、クランプロードが油圧に対してほぼリニアな特性を持たせることに成功し伝達トルクが安定した。クランプロードが既知となったため、レース運営面でも前述のタイヤ μ 推定に加えてクラッチディスク μ の推定もおこない、レーススタート時のパドルマップ選択精度はより高まった。

また、エンジン制御としては従来の回転数制御に加えトルク制御も組み合わせたトルク・レブ制御を導入した。これはエンジンでトルクの絶対値制御をメインとして考え、エンジン回転数が所定の上限值もしくは下限値に到達したときのみ回転数制御に切り替えるというものであった。目的はエンジントルク出力の適正化によるクラッチ伝達トルクの安定化と、ホイールスピンが起きた際にもトルクを最小限にキープしてホイールスピンが収まりやすい状態を作り出すことであった。

Fig. 11にDPC圧力制御による半クラッチRSの実走データを示す。DPCの圧力(Clutch actuator pressure)をダブルパドル方式で一定要求とすることで、半クラッチ状態での伝達トルク(Input shaft torque)を理想値に可能な限り近い一定値として、ホイールスピンを起こすことなく理想的な発進を実現している。

これら2007年までに開発されたシステムは、2008年に義務化されたFIA共通ECUにおいてもチューニング領域で可能な限りそのノウハウが注ぎ込まれている。

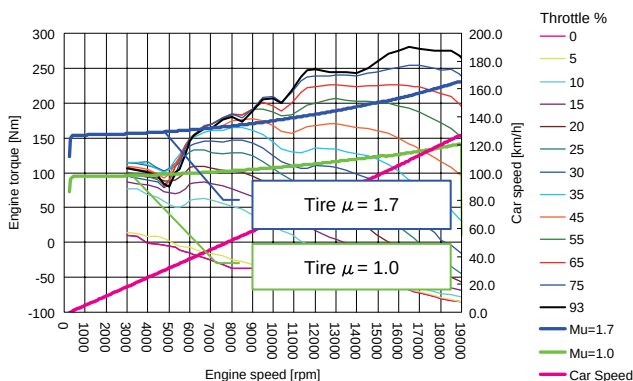


Fig. 10 V8 engine torque and required torque for RS

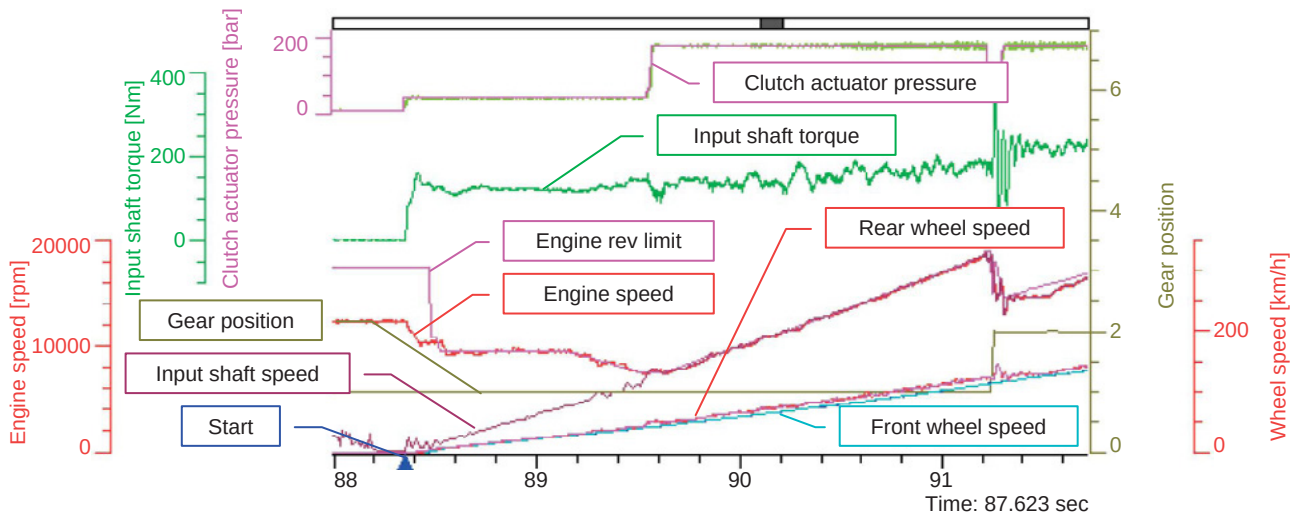


Fig. 11 Clutch partial engagement RS with DPC track data (2006)

6. F1 制御システムの開発環境

第3期 F1 が始まった当初は実車テスト中心で、制御システムのソフトウェア開発もフローチャートによる仕様書をベースとしたハンドコーディングであった。しかし、開発効率を向上すべく 2002 年の Honda 製車体制御システム開発プロジェクトを皮きりに、次第に MATLAB Simulink および Stateflow ベースの開発へシフトしていき、以後オートコーディングの技術も積極的に取り入れられていった。2003 年の LC から車体制御ソフトは徐々にオートコード化が進み、2006 年車体制御ユニットがそれまでの Pi-Sigma MCU からエンジン制御に使われてきた Honda 製 ATHENA システムに切り替えられた際に、車体制御の開発は 100% オートコード化された。エンジン側でもオートコード技術は取り入れられたが、2000 年から ATHENA が継続的に使用されていたこともあり比較的新しいシステムへの部分導入に止まった。

また Simulink や Stateflow 採用のメリットとして、車体制御側、エンジン側双方でデバッグレベルから新規制御アルゴリズム開発までの広い範囲でオフラインシミュレーションがおこなわれ、ECU を使った HILS (Hardware In the Loop Simulation) 環境も積極的に利用された。実際に 2003 年以降の LC, RS, 2006 年度に導入された W/S F/B TC および OC は、駆動系を含む車体モデルを利用したシミュレーションで開発され実機投入されたシステムである。

限られた実車テストの機会ですべてシステム開発を成功させ早期のレース投入を果たすべく、第3期 F1 の制御システム開発ではシミュレーション技術が中心的役割を果たしていたといえる。

7. まとめ

第3期の F1 活動を通じて単に加速領域の駆動力制御にとどまらず減速領域および発進領域などさまざまな状況において極限領域における駆動力制御に取り組み、(1) アクセルペダル入力をエンジントルク要求に変換したトルクドライブ採用、(2) 車体制御器とのトルクインターフェースの採用、(3) ホイールスリップ量をダイレクトに制御したホイールスリップコントロール制御、(4) クラッチ制御との協調、などその成果をあげると同時にあらためて多くの気づきを得た。

そのなかでも痛感したのは、当然のことながらパワープラント領域のみならず、車体領域およびドライバーとの協調がとりわけ駆動力制御には重要であるということ、そして実機での再現が難しい極限領域制御システム開発におけるバーチャルを含めた代替試験の重要性である。この二点に関しては今後の量産開発においてもぜひ活かしていきたい経験である。

参考文献

- (1) 岸隆行, 永利嘉記, 中村博政, 深尾洋一郎: 第3期 Honda F1 ダイレクトプッシュクラッチ制御の開発, Honda R&D Technical Review, F1 Special (The Third Era Activities), p.196-199

■ 著 者 ■



木 寺 和 治



深 尾 洋 一 郎



伊 藤 達 哉