

F1 電子制御システムの開発

Development of Electronic Control System for Formula One

石井 健一郎*
Kenichiro ISHII
根来 昌樹*
Masaki NEGORO

西田 俊之*
Toshiyuki NISHIDA
吉田 将隆*
Masataka YOSHIDA

遠島 康平*
Kohei TOSHIMA
丸山 豊*
Yutaka MARUYAMA

要 旨

F1車両においても電子制御化が加速し、車両を緻密に制御、計測するためにシステム性能は重要な要素である。

2006 年シーズンからは Honda ワークスとして、これまでのエンジン制御システムだけでなく、車両電子制御システムのすべてに Honda オリジナルのシステムを適用した。

F1電子制御システムは、高性能化の追及と同時に車載性を向上させるためにシステムの最適化と徹底的な小型化をおこなうことが必要である。車載システムは、機能統合化された ECU と車両各部に配置されたユニットを高速ネットワークで結び、高速テレメトリーを用いてガレージシステムと協調することによりシステムの最適化を図った。

高速化および高精度化によるユニット性能の向上は、制御性の向上とともに駆動力制御およびギヤボックス制御の高精度化に寄与し、また高速通信によりピットでの計測性能の向上に寄与した。

ABSTRACT

The application of electronic control systems has been rapidly increasing in Formula One cars as well as in other vehicles. System performance is a crucial element in conducting precision control and measurement of cars.

Starting with the 2006 season, the Honda works has been working to apply original Honda systems not only in the engine control system, as before, but in all vehicle electronic control systems.

In order to pursue higher performance at the same time as enhanced in-vehicle mountability in Formula One electronic control systems, it is necessary to carry out optimization of these systems together with thoroughgoing miniaturization. On-board systems have an electronic control unit (ECU) with integrated functionality linked by a high-speed network with units located in every part of the vehicle. High-speed telemetry is used to coordinate these with the garage system in order to optimize systems.

The enhancement of unit performance by means of higher speed and greater precision contributes to heightened controllability, and particularly to enhanced precision of driving force control and gearbox control. High-speed communication also contributes to greater measurement performance in the pit.

1. まえがき

近年の F1 においては、従来までのエンジン制御、ギヤボックス制御だけでなく、2001 年途中から 2007 年まで、トラクション制御およびエンジンブレーキ制御がレギュレーションで許可されることとなった。また 2007 年まではクラッチ制御もレギュレーションで許可されていた。特にトラクション制御、ギヤボックス制御においては、エンジン - 車体協調制御をリアルタイムに精度良くおこなうことが必要であり、高い演算能力、計測性能を必要とした。ま

た、エアロダイナミクス性能を追求した F1 車両におけるシステムは、電子制御ユニットの搭載位置が限られているため、小型でかつ軽量であることが必要である。

F1電子制御システム機能は、走るための機能と解析するための機能の大きく二つに分けられる。小型・軽量化を達成するためには、後者をできるだけピットシステム側に持たせることで前者の最適化を図ることが可能であり、これを基本的な考え方としてシステム構築をおこなった。

本稿では、Honda F1 電子制御システムを概説し、システム開発における課題と開発内容について紹介する。

*四輪R&Dセンター

2. システム変遷

Fig. 1 に第3期 Honda F1 電子制御システムの変遷を示す。第3期の F1 システム開発は、エンジン、車体統合システムのレース適用を視野にいれ 1998 年にスタートした。

2000 年から 2005 年までの BAR-Honda 体制下では、エンジン制御システムを供給し、2006 年 Honda ワークス参戦時からは車体統合制御システムとして Honda フルシステムを投入した。システムの呼称は、ギリシャ神話の知恵と勝利の女神の名をとって、“Athena(アシーナ)”とした。

2008 年からはエンジンと車体制御の標準化とコスト削減を目的に FIA(国際自動車連盟)標準システムの適用が義務付けられ、Honda システムとしては、エンジン用デバイス、センサとデータロギングシステムのみがレース適用となった。

Year	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Team	British American Racing - Honda					Honda Racing F1 Team			
System	BAR System					FIA system			
Chassis Control Data Acquisition Telemetry									
Engine Control (PGM-FI) Data Acquisition Telemetry Power Supply	Honda System "Athena"					Data acquisition			

Fig. 1 History of Honda Formula One system

3. 電子制御システム構成(Athena)

3.1. システム構成の最適化(機能統合・分散)

車体デザインを決める空力性能は、ラップタイムに大きく寄与する部分であり、デザインの自由度が制限されることがないように、小型で搭載性に優れたシステム構成が必要である。

電装部品は、Fig. 2 に示す車体両脇のラジエータダクト下部が基本搭載位置となり、その他では車両前方のドライバペダル付近とコクピット内のみとなる。そのため、システムを分散させて搭載し、高速ネットワークで結ぶことにより搭載性と機能の両立を図った。

Fig. 3 にシステム構成を示す。車体上のネットワークは、

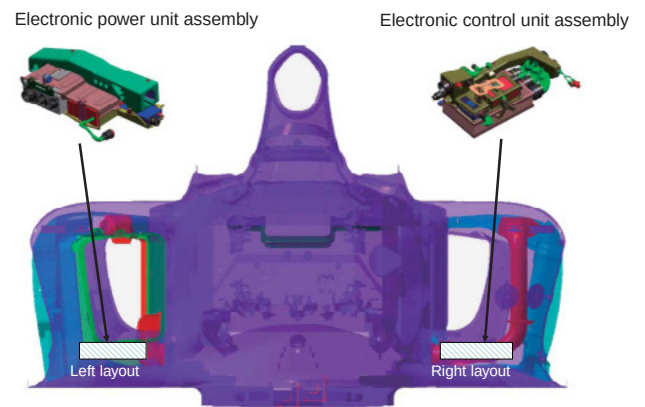


Fig. 2 Electronic unit layout (front view)

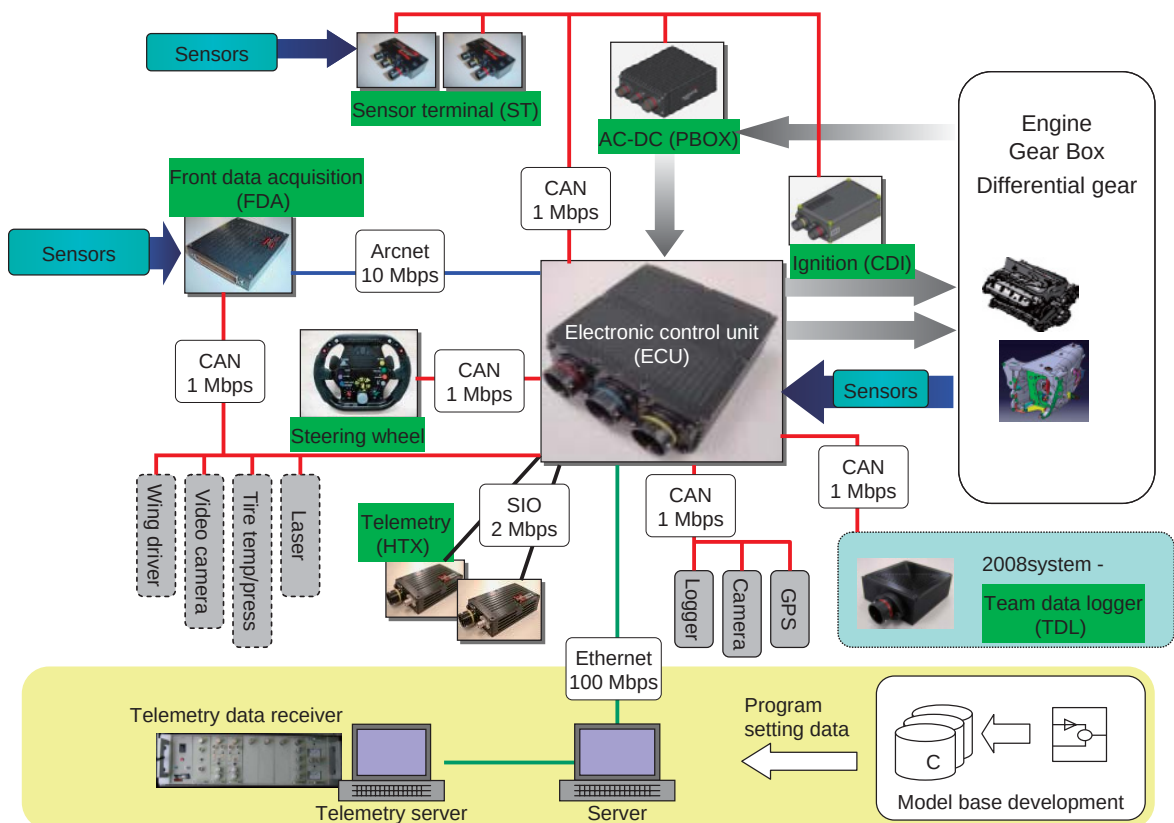


Fig. 3 Athena system

ECU(Electric Control Unit)を中心に各ユニットが結ばれ、センサ情報やフェイル情報を共有しシステムを動作させている。ECUは、エンジン、車体、計測制御を統合制御できる機能を持ち、車体の情報すべてを取り込み、各デバイス操作と計測処理をおこなう。分散された各ユニットは、用途別の計測機能と制御機能を持ち、必要に応じてネットワークに接続される。なかでも、車体前方の多数のセンサを取り込むFDA(Front Data Acquisition)は、リアルタイムな制御演算に使用される信号を処理しているため、10 Mbps の高速通信で ECU と接続した。

ピットでは、クライアント PC と ECU をイーサネット通信(100 Mbps)で接続し、ロギングデータなどの大容量データを短時間で受信可能とした。また、大容量データをあつかう車両確認用のアプリケーションをすべてクライアント PC 側に持たせ、車載システムの簡素化を図った。

3.2. 各部品説明

(1) ECU

ECUは、エンジン制御、車体制御、計測制御の三つの役割をもっている。エンジン制御では、点火時期、燃料噴射量、スロットル開度を制御し要求トルクを実現する。車体制御では、車体挙動情報をもとに、駆動トルク配分制御、ギヤ変速のシームレスシフト制御演算をおこなう。計測制御では、テレメトリーとデータロギングの二つの計測用演算をおこなう。

(2) CDI(Capacitive Discharge Ignition)

CDI は、エンジンの点火コイルに点火エネルギーを供給するユニットである。CDI 方式は、フルトランジスタ方式に比べてリアルタイム性が高く、駆動トルク制御(トラクション制御、エンジンブレーキ制御)、エンジン回転数制御時の精度を高くすることができる。また、イオン電流検出による失火検知機能もあわせもつ。

(3) PBOX(Power Box)

PBOX は、電圧レギュレータと電源分配(シーケンサ機能)をおこなうユニットである。電圧レギュレータ部は、高効率なコンバータ方式を採用、また、2 電源(14 V, 7 V)出力とし、各供給先の電源部の小型化を可能とする

(4) バッテリー

バッテリーは、ニッケル水素バッテリーを採用した小型、軽量バッテリーである。バッテリー温度監視、充電制御は、PBOX にておこなう。

(5) HTX, HRX(テレメトリー送受信機)

HTX は、ECU で処理された情報を無線でピットに送信するデータトランスミッタユニットであり、HRXは、無線データを受信するデータレシーバユニットである。

(6) FDA

FDAは、車体前方周辺のセンサを取り込むユニットである。多チャンネルアナログ入力可能なI/O(Input/Output)

を備え、取り込んだアナログ信号をフィルタ演算処理した後に、ECU へ高速通信(10 Mbps)で送信する機能をもつ。

(7) ST(Sensor Terminal)

STは、テンポラリの車体、エンジンの環境計測用途として、ECU と CAN 通信ライン上に、最大8ユニット接続できる小型センサ計測ユニットである。

(8) FIA/FOM ユニット

FIA/FOM ユニットは、統括団体である FIA(国際自動車連盟)およびレース運営団体である FOM(Formula One Management)から搭載が義務づけられているユニットで、データロガー、カメラ、GPSがある。これらのユニットに対して、ECU から車の情報を CAN 通信で送り、各チームの走行データを FIA, FOM が管理、利用する。

(9) TDL(Team Data Logger)

TDLは、ロギング機能と各種センサ読み込みをおこなうユニットである。2008 年以降、FIA 標準システム使用が義務付けられたため、2007 年まで使用していた実走支援ツールを継続使用可能とし、FIA 標準システムとは、CAN 通信で接続される。

(10) ガレージシステム

ガレージシステムはピット内に設置されたサーバと各エンジニアが使用するクライアント PC から成り立つ F1 専用に設計されたシステムインフラストラクチャである。車両とのデータの送受信は、イーサネットを介しておこなう。

3.3. 高速高精度制御(エンジン、車体、計測制御)

ECUには、制御性能と計測性能を満足するために高い演算性能が要求された。第3期 F1 では、主要な制御開発項目は、駆動トルク制御とシームレスシフト制御であり、これらの制御開発には、浮動小数点を使用したモデルベース開発を導入し開発効率を高めた。Fig. 4に適用した制御と演算能力の推移を示す。レギュレーションにて、2001年途中に

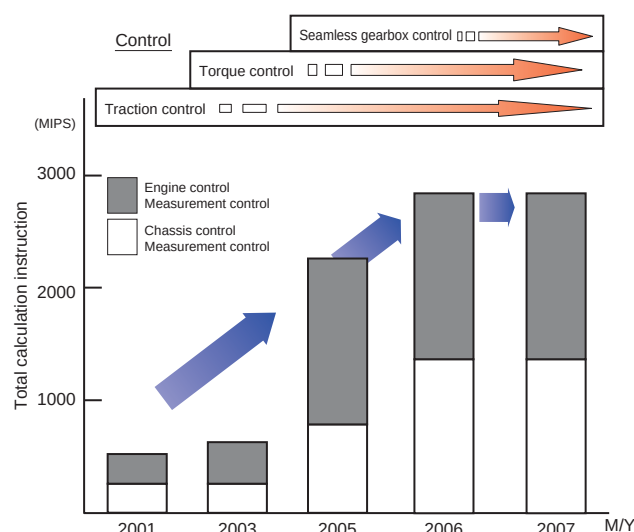


Fig. 4 Processing speed increase

ドライバーズエイド制御(トラクション制御に代表されるスリップ制御)が許可されてから、禁止される 2007 年までがもっとも演算能力が要求された。それに伴い、制御解析のためのデータ量が増加し、計測機能においても多チャンネル、高速サンプリングロギングの要求に応えるために CPU の高速化とデータ転送の高速化をおこなった。

3.4. 搭載レイアウト

主な電子制御ユニットは、ラジエータダクト下部に配置された。この位置は、車体全体の中央でかつ低位置であり車体運動性に影響を与えずに搭載ができる最も広いエリアで

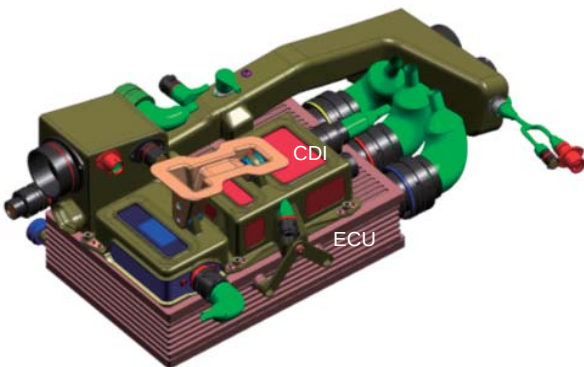


Fig. 5 Left side electronic units

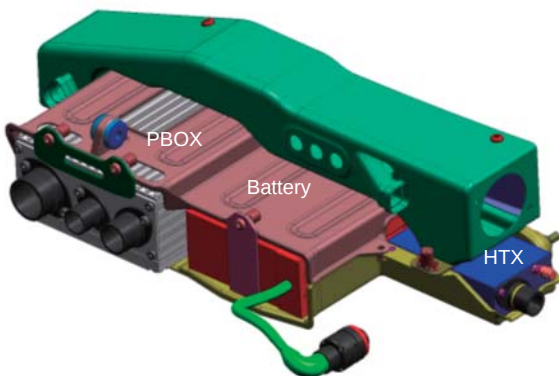


Fig. 6 Right side electronic units

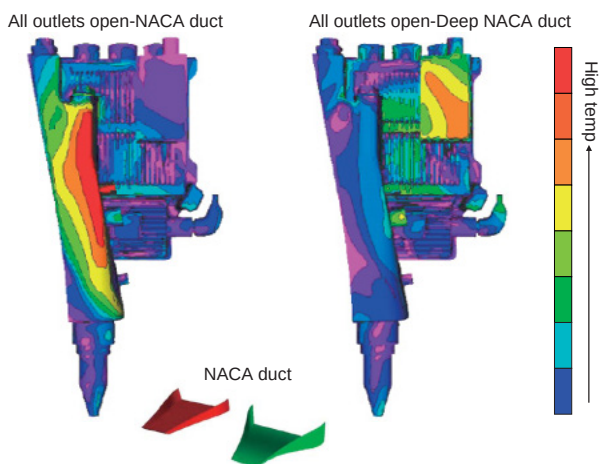


Fig. 7 Cooling duct simulation

ある。ECU と CDI は、Fig. 5 で示すように車体左側部分のラジエータダクトとアンダーフロアの間に、防振マウントされたカーボンブラケットに取り付けられた。PBOX、バッテリーと HTX は、Fig. 6 で示すように車体右側に左側と同様にラジエータダクトとアンダーフロアの間に取り付けられた。ユニットの放熱は、必要なクーリング風を導入できるダクト形状をシミュレーション評価(Fig. 7)をもとに導き出し、空力への影響が最小限となる形状とした。このため、電子制御ユニットの放熱構造が重要となった。

4. ECU アーキテクチャと機能

4.1. ECU ハードウェアアーキテクチャ

冒頭に述べた電子制御システムに対する、性能要求を実現するためには、特に ECU のハードウェア性能が重要である。ECU がおこなうそれぞれの機能に最適な複数 CPU 構成とし、それらを協調させるメモリ構成および通信接続について以下に述べる。

ECU は、Fig. 8 に示す三つの CPU [Application CPU (ACPU), Device CPU(DCPU), Gateway CPU(GCPU)] からなる基本アーキテクチャでエンジン用と車体用の 2 ブロック構成とし、I/O に関しては、それぞれの入出力デバイスごとに設定した。

デバイス操作のリアルタイム性とアプリケーションの高速演算処理の両立を図るために、一つの CPU に処理が集中しないよう機能分散をおこなった。デバイス操作の部分においては、エンジン高回転時に 150 μ 秒ごとの処理でインジェクタ、点火デバイスを操作するため、高処理演算が必要なアプリケーション処理とは分離し、デバイス I/O 操作のみをおこなう機能とした。このため CPU としては、優れた I/O 機能をもつ自動車用 CPU(DCPU)を選定することにより機能要求を満足させた。またエンジン、車体などの制御アプリケーション用には、高速処理 CPU(ACPU)を選定し、それまで、3つの自動車用マイコンで制御していたものを 1 つに集約することにより CPU 間でのデータアクセスを無くし高速化と無駄な処理を省くことができた。計測制御用の CPU は、PC との大容量データ通信、テレメトリーとの通信をおこなうことから、高速かつ通信デバイスが豊富な通信機器などで使用される CPU(GCPU)を選定し、高速シリアル通信とイーサネット通信によるデータ操作を可能にした。

機能分散した複数の CPU は、相互にデータを参照する必要がある。例えばテレメトリーとロギングに必要な情報は、GCPU へ送られ、制御演算で算出されたデバイス指示値は、DCPU へ送られる。また、ガレージシステムのクライアント PC から送られてくるセッティングデータやコマンドは、各 CPU で共有される。これらを実現するために、DPRAM を各 CPU 間に配置し、かつトリガ信号を接続す

ることより高速同期アクセスを可能とした。

各 CPU のローカルメモリは、必要な機能に応じて割り当てられた。メモリ機能としては、プログラム保持用の Flashメモリ、プログラム実行用の SDRAM、データバックアップ用の NVRAM、大容量ロギング用として CF メモリ (Compact Flash) を接続した。CF メモリの接続は、2 枚並列としデータバス幅を 16 bit から 32 bit に拡大することで、ロギング時のデータ加工とアクセス処理の高速化を図った。

エンジンと車体の 2 ブロック間は、協調制御で相互に必要なパラメータを制御処理周期である 1 kHz 以上で伝送するために、10 Mbps の ARCNET 通信で接続した。

2008 年以降にはロギング容量増加とデータダウンロード時間短縮を両立させるため、それまで GCPU が、ロギングデータの読み出し処理とデータダウンロード処理を交互におこなっていた。これらの処理を同時におこなうことが技術課題となった。

そこで、Fig. 9 に示す高速メモリコントローラを開発した。ロギングデータの読み出し処理とダウンロード処理の並列化は、CPU のローカルバスと独立した PCI バスを使用することにより可能とした。また、ロギングデータの読み書きの速度向上と大容量化は、複数の SD メモリを並列接続する回路構成とすることにより可能とした。このメモリコントローラは、2009 年モデル向けに開発した TDL に搭

載し、データダウンロード速度の 30% 向上と大容量化 (Max 8 GB) を実現した。

4.2. ECU ソフトウェアアーキテクチャ

ECU ソフトウェアは、エンジンの点火やスロットルの制御をおこなうエンジン制御部分、ギヤボックスおよび車両挙動の制御をおこなう部分、走行データの記録およびガレージシステムに送信するデータ計測部分に大別できる。

個々の CPU にはリアルタイム OS を実装し、高速での制御演算、センシング、通信を実現する上での高いリアルタイム性の要求に応えた。また、Fig. 10 に示すように OS 層、通信および I/O 制御をおこなうミドルウェア層、制御演算をおこなうアプリケーション層の 3 層を明確に分離独立し、モデルベース開発によるアプリケーションユーザが、単独で制御開発を可能とするために、実行ファイルを

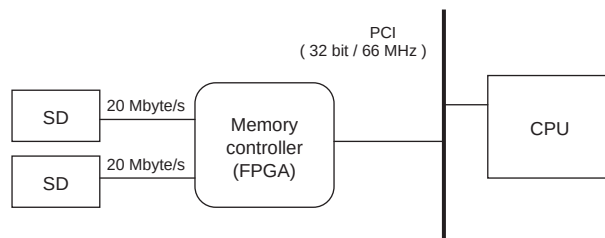


Fig. 9 SD memory controller

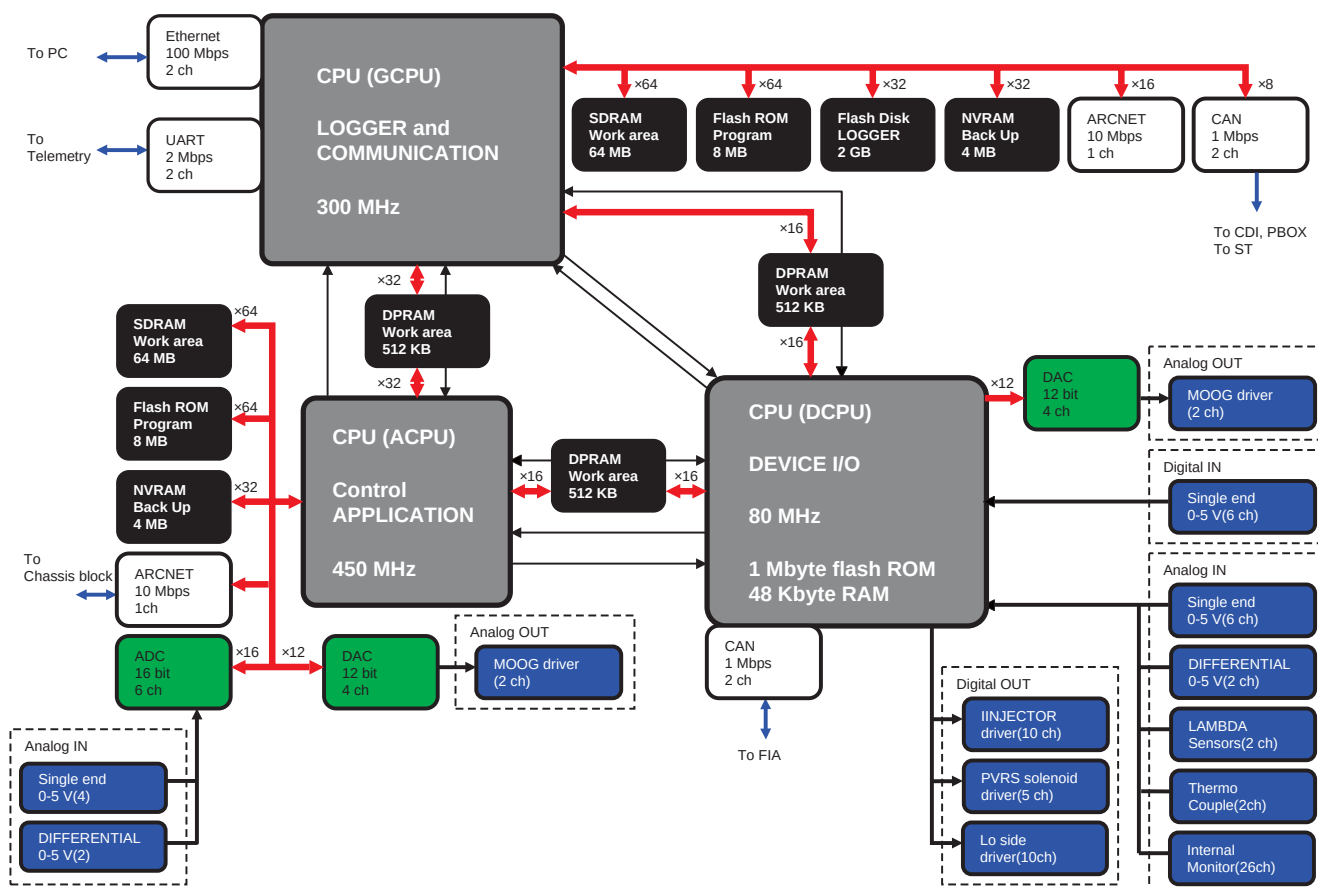


Fig. 8 Hardware architecture

自動生成できる開発環境を整え、制御開発効率を高めた (Fig .10).

4.3. 走行データ計測機能(ロギング)

ロギング機能は、車体とパワートレインのセッティング、状態把握、シミュレーション目的で利用されるためデータの精度とデータ量が必要となり、チャンネル数で 2000 ch、サンプリングレートで 10 kHz - 1 Hz のスペックが必要とされた。

また、実走テストの効率を考えると、走行後にエンジニアが、車両状況をすぐに把握して次の走行に対応することが重要であり、データダウンロードからデータ表示までの時間の短縮と容易に解析できる手法が必要であった。

走行ごとに蓄積されるロギングデータは、サーキットだけではなく、各開発拠点で解析とシミュレーションに使用されるため、走行データとテスト項目を関連させる必要があった。

4.3.1. 計測データフォーマット

ロギングシステムでのデータ計測は、走行後のデータ管理を容易にするため、1回の走行ごとにデータを分割してロギングメモリに記録した(Fig. 11)。1回の走行データは、Run Header と Run Data から構成される。

Run Header 領域には、 周回ごとに更新される Lap Data, 直線終端の最高速点での Straight End Data, 不具合情報を示す Fail/Warning Data が記録され、 エンジニアが容易に周回ごとの特徴点を確認可能とした。 また、 ロギング関連情

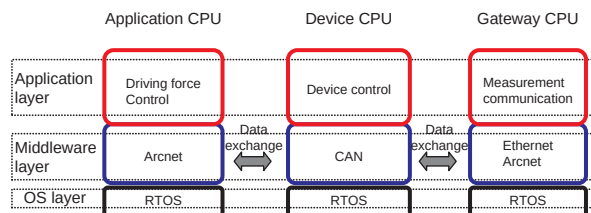


Fig. 10 Software architecture

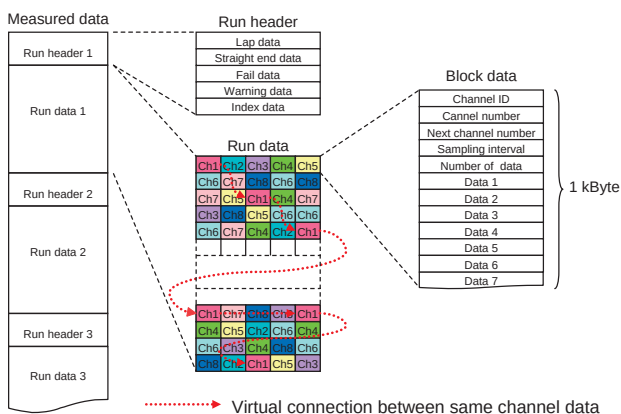


Fig. 11 Logging data format

報のインデックス情報を記録することにより、走行後の解析の際に走行データとセッティングデータ等のひも付けをおこない、正確なデータ管理を可能とした。

Run Data領域には、ロギングされた各チャンネルのデータが記録される。

4.3.2. データ記録手法

データロギングは、前述したように高サンプリングレートで計測されたデータを記録する必要がある。高サンプリングレートによるデータロギングは、データ量の増大から、データダウンロード時間の増加に繋がり、実走テストの効率を低下させてしまう。その対応としてトリガロギング機能を開発した。これは、特定の状況下、例えばギヤチェンジや、故障発生時などの特定のタイミングで詳細な情報を必要とする場合に、トリガポイントから過去最大1秒間を高サンプリングレート、それ以外は、レートを低くデータ記録をおこない、ロギングデータ量の削減を達成した。

トリガ条件は、クライアント PC 上で、C 言語で記述をおこない、逆ポーランド記法でロギング設定ファイルに書きこまれる。ECU は、トリガ条件を解釈後、条件を満たす場合にはトリガ処理を実行し、テスト状況に応じた設定変更を可能とした。

また、開発当初は ECU の処理負荷低減の観点よりサンプリングしたデータを単純に時系列で並べ、各チャンネルデータはロギングメモリ上、非連続になる記録方式としていた。このため、データを表示する際には同一チャンネルごとにデータを改めて並び替える処理が必要であり、高速 CPU 適用によるロギングデータ量増加から、グラフ表示に時間を要するという課題が浮き彫りになった。

高速 CPU(GCPU)を使用することにより処理負荷低減したため、データ記録方式を各チャンネルデータが連続して並ぶように変更し、描画速度を改善した。データの記録フォーマットを、サンプリングごとに同一チャンネルの1kByteの固定長のブロックごとにまとめ、ブロックの集合体として計測データを記録するように変更した(Fig. 11 中段 同色のブロックは同一のチャンネルのデータを示す)。

このフォーマットの変更により、同一チャンネルのブロックをじゅずつなぎに読み出し、仮想的に結合することで同一チャンネルごとに再度並び替える処理が不要となり、グラフ表示の高速化が実現した。

また、このロギングされたデータは、解析 TOOL への表示のみではなく、HILS(Hardware In the Loop Simulation)に入力することで、走行状況を PC 上で再生することを可能とし、実走課題の対策を次のレースあるいはテストへフィードバックするためにも使用された。

4.4. ガレージシステム機能

ガレージシステムは、走行データの管理および、レース戦略支援、実車確認支援を目的とした、走行に必須となる機

能は ECU に組み込み、それ以外の支援のための付加機能はガレージシステムで担うという考え方で開発をおこない ECU の小型化につなげた (Fig. 12)。

ピットでは、車両は、ガレージネットワーク上に接続されクライアント PC からロギングデータの吸い上げやセッティングデータ転送などがおこなえる。ロギングデータは、ガレージシステムのサーバに格納し、複数のクライアント PC 上でデータ参照が可能である。その他に、レース戦略やテスト走行を支援する多数の機能をもたせ、ネットワークで繋がった ECU に対してコマンド操作を可能とした。次に代表的な支援機能と ECU との関連を紹介する。

(1) データセッティング支援機能

レース現場において、エンジニアは走行データを基に、エンジンおよび車体のセッティングを変更する。セッティング変更の頻度は高く、レース走行開始直前までおこなう必要がある。このため、クライアント PC からエンジニアが変更をかけたデータのみが ECU に送信され、瞬時にセッティング変更を可能とした。

(2) オートウォームアップ

エンジン、ギヤボックスの高性能化に伴い、エンジン始動、暖気、エンジンチェックモードが複雑化した。オートウォームアップとは、これらを自動化する支援機能である。このチェックモードは、エンジンの状態を把握するための複数のチェックモードをもち PC から送信される制御指示値でエンジンが制御される。これらのチェックモードのプロファイルを ECU 内にあらかじめ準備するのではなく、ガレージシステムのクライアント PC にファイルとして保存しておく仕様とした。ECU のソフト変更無しに、さまざまなチェックモードをエンジン仕様や使用環境に合わせて作成可能とした。

(3) ステアリングホイール機能設定

ステアリングホイールは、運転操作以外に、レース戦略やサーキット環境変化に応じて、走行中にセッティングや車の情報をドライバーが確認や変更ができる機能をもっている。Fig. 13 に示すようにステアリング上には、複数のスイッチ、ボタンと液晶ディスプレイ (Fig. 14) が備えられている。これらへの機能割り付け、ディスプレイ表示内容は、各ドラ

イバの要求にこたえるため、PC 上のアプリケーションから自由に配置設定ができる。ガレージシステムを介して ECU に情報を送信することで、ステアリングと ECU の機能をリンクすることを可能とした。また、操作頻度が高く重要な機能は、プッシュスイッチかロータリスイッチにて、ワンアクションで操作可能とし、その他に関しては、Mode Function スイッチと「+/-」スイッチを使用した階層コマンドで操作し、操作性と多機能切り替えを両立させた。

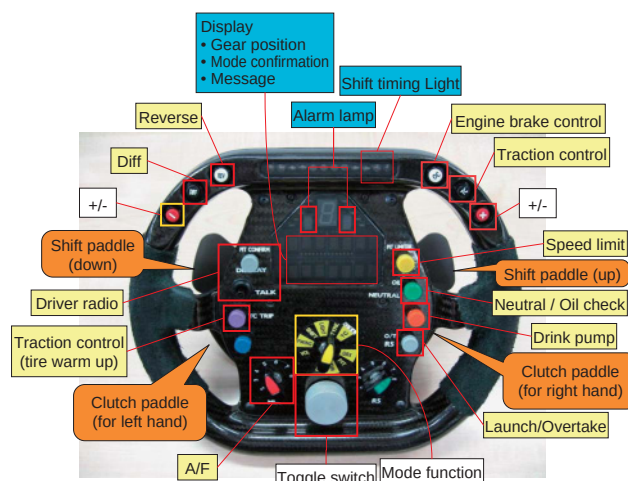


Fig. 13 Steering wheel functions

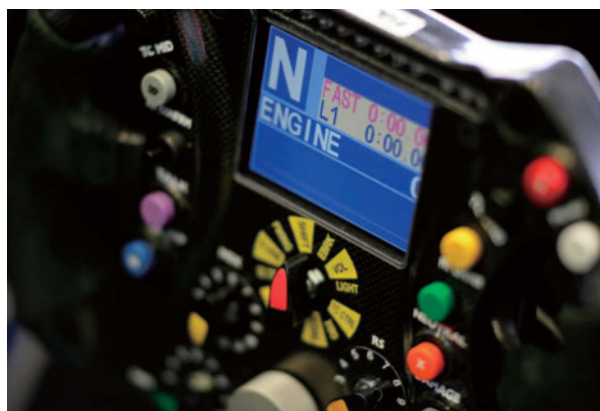


Fig. 14 Steering wheel display

5. ハードウェア開発

電子制御ユニットはパッケージ密度を向上させるために、複数枚の基板を用いた 3 次元の構造とした。電子部品が高密度に実装された基板は配線数が多く、基板間の接続手法を考慮する必要があった。また、高性能化に伴い高速で動作する CPU の発熱が顕著となり、小型パッケージにおける放熱手法が課題であった。

5.1. 高密度実装

高密度実装を実現させるために、自動車用電子部品とし

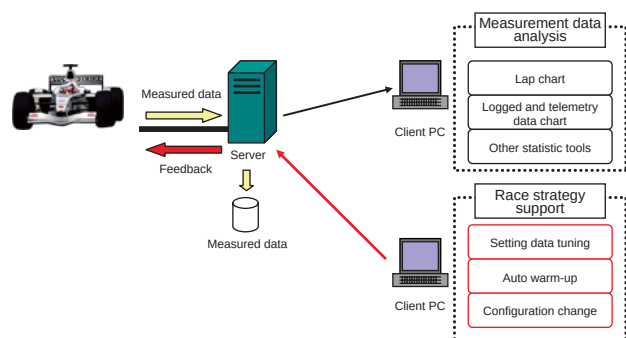


Fig. 12 Garage system

ては2003年当時採用実績の無い電子部品パッケージであるFBGA(Fine-pitch Ball Grid Array)とビルドアップ基板を採用し小型化を実現した。Fig. 15 にビルドアップ基板を採用したCPU搭載基板を示す。2009年モデルTDLには部品内蔵基板を適用したプロトタイプユニットを製作し、ビルドアップ基板品と比較し20%の実装密度の向上を確認した。

CPUの高速化に伴い、バスクロックの高速化およびCPU電源電圧の低電圧化(1.8V)が施されたため、外乱ノイズあるいはクロストークによる影響を受けやすくなった。このため、パターン設計時にはパターンシールド、グランド電位の安定化がいままで以上に求められ、高速伝送路シミュレーションをベースにした基板配線設計手法を取り入れた。

5.2. 基板間接続方法

ユニットを複数基板で構成する場合、基板間の信号線の接続方法が課題となる。

大規模なユニットになると基板間の信号接続数が膨大となり接続用コネクタがデッドスペースになるばかりでなく、配線の引き回しを考慮するとそれ以上のスペースを確保する必要がある。

これを解決するために、2008年モデルのTDLに対してはいままでの基板間接続用のコネクタをなくすために、Rigid-Flexible基板を適用し、基板間配線の最適化を図った。

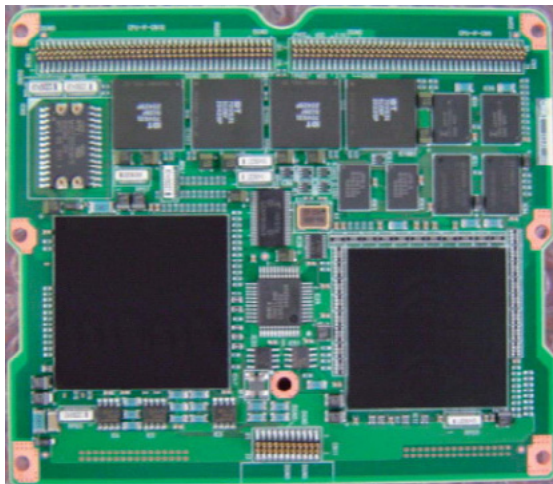


Fig. 15 High density PCB surface

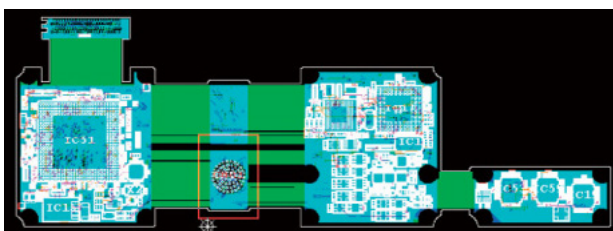


Fig. 16 Rigid-Flexible PCB of TDL

同時に通信系、小信号系の信号線接続においてはパターンによるシールドを施すことが可能であり、電気的にも安定した接続が可能となった(Fig. 16)。

5.3. 放熱構造

一般に ECU に用いる自動車用 CPU は、多くの場合放熱対策を必要としないが、F1 用 ECU に採用した高速 CPU の消費電力は約 4 W に達し、常温(25°C)においても動作保証温度である 105°Cを超える状況であった。

F1 用 ECU において、高い処理性能と小型化を両立させるためには、熱対策が実車環境適合性において最大の課題であった。

高速 CPU などの発熱デバイスの放熱は、ヒートシンクを用いた強制空冷で成立させるのが一般的である。小型化を追求した F1 用 ECU では、筐体と基板を最大限利用することで、雰囲気温度が60°Cを上回る実車環境においても動作保証を可能にした。

ここで、放熱対策についてECUを例にして紹介する。Fig. 17に電子部品の主な発熱部品と放熱構造および放熱経路を示す。発生する熱を放熱することと熱容量を増やすことが重要である。

前者については、ケース材であるアルミをベースとした基板とデバイスからの熱伝導を向上させるパターンを形成し、ケース構造を利用した放熱をおこなった。後者については、CPUを搭載した基板に平面方向への熱伝導性の高いメタルコア基板を採用し、基板の熱容量を向上させた。

これらの手法により、実車搭載環境に適合させることが可能となった。

5.4. 小型化の変遷

ECU のパッケージサイズと適用技術の変遷を Fig. 18 に示す。2004年仕様以降は、高い処理性能向上の要求を達成するために、これまで紹介してきた技術を適用することにより、2004年モデルのサイズを維持しながら高性能化を実現した。

量産車においても、ECUの高性能化と小型化の要求が高まるにつれ、電子部品の放熱対策のみならず、デバイスの発熱を抑制する技術も重要となるであろうと考える。

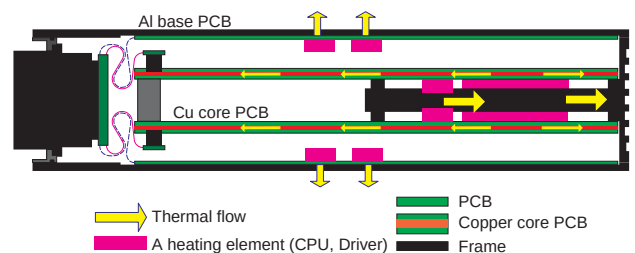


Fig. 17 High heat conditioning structure of ECU

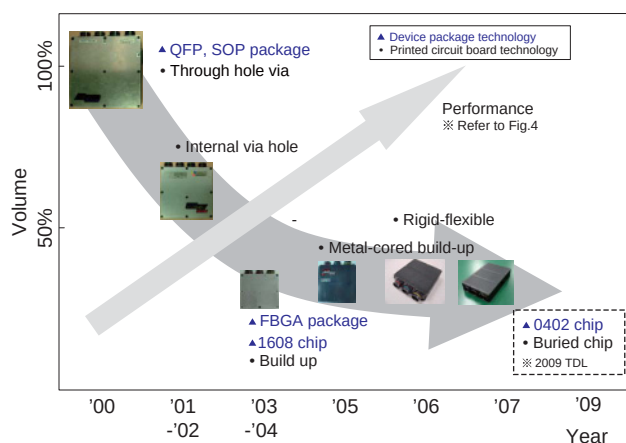


Fig. 18 ECU package

6. テレメトリー

6.1. テレメトリーの開発変遷

テレメトリーとは、マシン走行時の各種センサデータなどの情報を、無線を使用してピットへ送信するシステムである。テレメトリーは第2期参戦時の80年代半ば、Hondaが初めて開発しレースに導入した。第2期でのテレメトリーの使用法は、エンジン回転数、油圧、油温、燃料使用量などの重要データをピット前通過時に取得しマシンの状態管理をおこなうものであった。これに対し第3期ではエンジンと車体にまつわるすべてのデータをリアルタイムに取得、解析することを目的として進化させた。Fig. 19にテレメトリーの通信方式と通信速度の変遷を示す。

2000年と2001年は第2期に開発されたテレメトリーシステムを流用しており、搬送波周波数は400 MHz帯、変調方式はFrequency Shift Keying (FSK)、通信速度は19.2 kbpsであった。

2002年にはレギュレーションの変更によりピットからマシンへのデータ送信が可能となったため、双方向テレメ

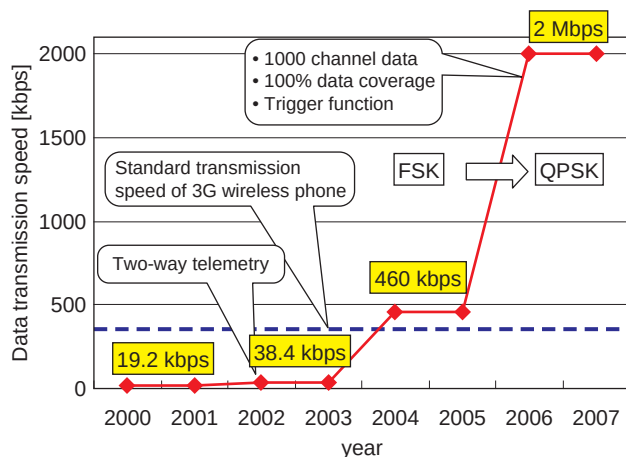


Fig. 19 Progression in telemetry transmission speed

リーシステムを開発した。片方向の通信速度自体を向上させ、38.4 kbpsとした。しかしながら、2003年には再びレギュレーションの変更があり双方向テレメトリーは禁止となった。

2004年は搬送波周波数を1.7 GHz帯に変更し、通信速度を460 kbpsにまで向上させた。

さらに、2006年には通信速度を大幅に向上させた。走行時の全データ中、リアルタイム解析に必要なデータは約1000 chであり、これをテレメトリーで送信するには約1 Mbpsの通信速度が必要である。また、4.3節にて紹介した高精度計測の要求より、最大で1 kHzのデータレートが必要となる。これらの要件を実現するため、電力効率と周波数利用効率が高く、低受信レベルでの誤り率の低いPhase Shift Keying (PSK)を変調方式として採用し、通信速度は2 Mbpsまで向上させた。また、ある指定したタイミングにおいて特定のデータの取得レートを上げる、トリガ機能も実装した。

以上に示した技術進化により2006年には走行中のマシンのデータは、ほぼ全てリアルタイムにピットにて取得可能となった。これにより、フォーメーションラップの発進時のデータをもとにレーススタート時のクラッチ制御モードを変更するなど、レース運営上で不可欠な存在となった。

6.2. 高速化に伴う課題

テレメトリーシステムは、机上のシミュレーション環境にてデータ取得性能を確認した後、実走テストを実施していた。しかし、実際のサーキット上と机上シミュレーションとは異なる特性を示す箇所が多く、特に変調方式にQuadrature Phase Shift Keying (QPSK)を採用し高速化をした場合では、机上シミュレーションでパケット取得率(正常に受信できたデータパケットの割合)が90%以上であったのに対し、実走テストでは、大きくそれが低下した。ただし、データの再送信をおこなっていたためカバレッジ(必要なデータが得られる割合)はほぼ100%を維持していた。(Fig. 20)。

Fig. 20を見ると、サーキット上の比較的ピットに近いセクターでも、パケット取得率の著しい低下が見られる。距離が近い、すなわち受信レベルが十分な状態でデータ取得性能が落ちる原因としては、サーキットの路面、スタンドなどで発生した反射波(遅延波)が受信側で干渉し合う、フェージングの影響が考えられる。フェージングの影響度合いは、通信速度に依存する。Fig. 21に示すように、通信速度が速くなると1つのフレーム長が短くなり、1フレーム長に対する干渉の割合が大きくなるため、フェージングの影響は顕著に現れ通信品質は低下する。

上記のようなパケット取得率の低下を改善するため、

- (1) 送信電力を増加させノイズの影響を緩和
- (2) 送信速度を下げ遅延波の影響を緩和
- (3) 受信側に指向性アンテナを使用し遅延波を除去
- (4) 誤り訂正(FEC)を導入し誤り率を改善

といったさまざまな対策を試行したが、結果的には大きな改善効果は得られなかった。

6.3. サーキットの電波伝搬モデルの検討

テレメトリーの開発は、机上のシミュレーションに依存している。このため、サーキットの電波伝搬環境の正確な把握がシミュレーションを実施するために非常に重要となる。そこで、2007年以降のテレメトリー開発においては、実サーキット上でのパケット取得率の改善をおこなうために、より実環境に近い電波伝搬環境の調査考察をおこなった。

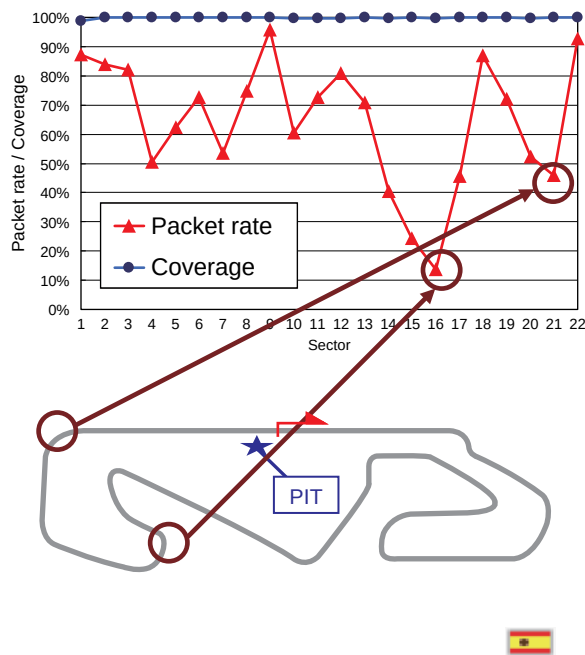


Fig. 20 Packet rate and coverage for circuit one round (2007 Catalonia)

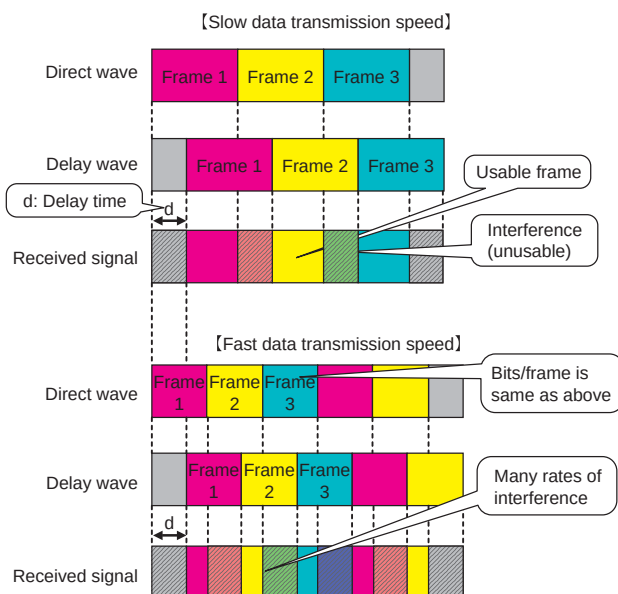


Fig. 21 Difference in influence of fading by data transmission speed

そもそも、F1の使用環境は通常の移動体通信(携帯電話など)のものとは大きく異なり、移動速度は最高で 300 km/h を超え、かつピットから遠い地点では見通しが悪く、またマシンからピットへの片方向通信であるため適応伝送が不可能である。

2007年までのシミュレーションにて使用していた電波モデル(フェージングモデル)を Fig. 22 に示す。このモデルでは電波の通り道(パス)は二つとしており、パス間の遅延時間差は多くとも0.2 μ 秒であるとしていた。一般に、見通しの良い大地で反射: 0.01 μ 秒、建物などで反射: 0.1 μ 秒(最大0.2 μ 秒)の遅延時間差と言われている。このモデルにおいて現実との差異を生じさせている点は以下の二点であると考えられる。

(1) パスの遅延時間差が短い

遅延時間差 0.2 μ 秒は光路長にするとわずか 60 m であり、実環境における遠方のスタンド、周囲の山などによる反射を考えると、パスの遅延時間はもっと長いことが推測できる。

(2) パス数が少ない

テレメトリーの送信アンテナは無指向性であり、マシンから全方位に対して電波を送信している。そのため、ピットの受信アンテナへはコース上のあらゆる建造物からの反射波が到来すると予想されるため、パスの数は2よりも多くなることが推測できる。

ここで、電波伝搬環境を把握するには現場での計測が最適と考えられるが、先述した通りサーキットでの計測は困難である。そこで、フェージングモデルのパラメータを振り、実測のパケット取得率、誤受信時のデータのエラーパターンを実走テストと机上テストとで比較した。その結果、

- ・パス数は最大で6
- ・遅延時間は支配的な強度のものが0.1 μ 秒程度、強度の低いものは最大で 5 μ 秒

上記フェージングモデルが実環境に近いモデルであることがわかった(Fig. 23)。

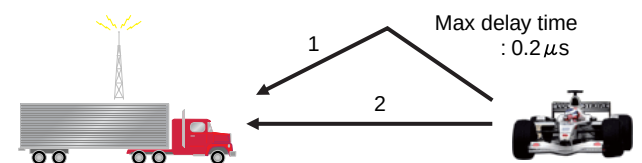


Fig. 22 Fading model used for development to 2007

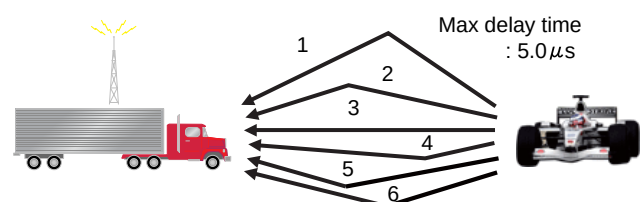


Fig. 23 Fading model used for development from 2008

上記のフェージングモデルはレイリーフェージングモデルと呼ばれ、多数の遅延波が重なり合う影響でデータに連続的な誤りが生じるため、送信電力の増加や誤り訂正の効果は一般的に低い。また、パスの数が多数のため指向性アンテナを使用しても遅延波は除去し切れず、遅延時間が長い場合送信速度を 2 Mbps の 1/2、1/4 にした程度では通信品質の改善は望めない。このように Fig. 23 のモデルで考えると、6.2 節で試行したパケット取得率低下対策では大きな改善効果が得られなかったことが理解できる。

2008 年以降の開発では Fig. 23 のモデルを使用し、このモデル上でも十分なパケット取得率を保持しつつ高速通信を実現する新たな通信方式の評価を実施した。

6.4. 次世代テレメトリーの技術

2009 年以降に関しては、これまで ECU とロガーにロギングしていたデータを、すべてテレメトリーでリアルタイムに送信するダウンロードレス化を目指し、さらなる高速化を目標とし検討していた。現状からさらなる高速化を目指すには、耐フェージング性向上策として、キャリアあたりの送信レートを下げることができるマルチキャリア化が必須である。具体的な実現手法としては Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) を用いた周波数利用効率と耐フェージング性の向上による高速化が考えられる。

OFDM に関しては机上テスト用のプロトタイプを作成し、Fig. 23 に示すフェージングモデルを使用した特性評価をおこなった。2007 年のテレメトリー送信機と OFDM プロトタイプの特性比較を Fig. 24 に示す。Fig. 24 は縦軸に Bit Error Rate (BER, ビットエラー数 / 送信ビット数)、横軸にフェージングのパス数を取っており、OFDM の導入により、高速・高信頼化が実現されていることが確認できる。

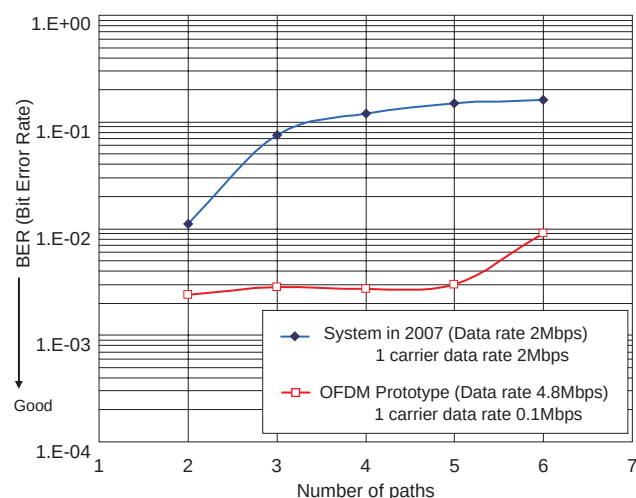


Fig. 24 Comparison of conventional system and OFDM

7. コンポーネント開発

F1 エンジンや車体には 100 以上のセンサデバイスが搭載されている。これらは、搭載性の観点から小型化が要求された。特にエンジン上に配置された圧力、温度、タイミング、スロットル開度センサやイグニッションコイル、オルターネータは、徹底的な小型高効率化を行った。本論文では、特にエンジンの振動に耐えうる機能保証をおこなうことが最大の課題であった

(1) スロットル開度センサ

(2) エンジンハーネス

についてそれぞれの開発内容を述べる。

7.1. スロットル開度センサ

一般的な自動車のエンジンにおいては、吸気流量をインテークマニホールド圧力、またはエアフローメータで計測して燃料噴射量を制御するが、レースなどの高応答性エンジンではスロットル開度をもとにして燃料噴射量の設定をおこなう。したがって、このスロットル開度センサはF1エンジンの重要なセンサの一つであり高い精度(1% Full Scale 以内)と信頼性が求められた。

2000 年復帰当初はブラシタイプの接触型センサ(ポテンショメータ)を用いていたが振動や異物(オイルや埃)によるブラシ接触面の摩耗などの課題を抱えていた。エンジンから受ける振動は約 500 G に達し、精度や信頼性の観点で非接触化を急ぐ必要があった。そこで、2003 年後半から磁気ベクトルを検出する磁気抵抗(MR)素子を用いた非接触タイプセンサへの変更をおこなった。燃料噴射制御の基本センサであるため、全温度範囲での高精度化が必要であり、MR 素子を 2 個用いた IC を採用し、それぞれの温度特性をキャンセルする手法で精度を保証した。

このセンサは所望の磁界が発生する様に着磁したマグネットを回転体であるスロットルバルブバタフライ軸に固定し、センシング素子をスロットルボディに搭載した分割タイプを採用した(Fig. 25)。

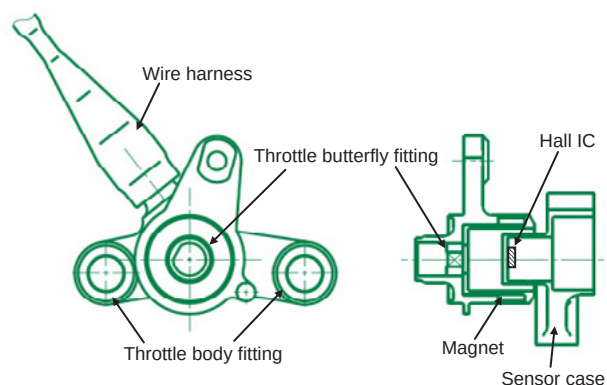


Fig. 25 Throttle sensor

このセンサはエンジンの後方に搭載され、熱害が頻発した。

熱害はエキゾーストパイプの排熱が主原因で、車体空力性能要求からエンジンカウルが年を追うごとに小さく絞られたためエンジンカウル内部の空気の流れが悪くなり、かつエキゾーストパイプのレイアウトもそれに伴いセンサを搭載しているエンジンに近づき温度環境が厳しくなっていた。MR 素子を始めとする IC 部品は高温保証品でも 130℃保証が一般的だが、レースでは 150℃を保証するため高温半田などの材料での対応や精度保証範囲を限定しソフトウェアでの補正をおこなうなどして、センサ精度が 1%FS 以内という条件を満たすことができた。

7.2. ワイヤハーネス

F1用ワイヤハーネスは軽量化と耐久性、また現場でのメンテナンス性を重要視して設計された。2007年のエンジンホモロゲーションが規定されるまではエンジンの重量規制がなかったため軽量化に特化し主にエアボックスやシリンダヘッド周りに簡易的な取り付けステイを設け固定した。エンジン重量に規制が設けられると軽量化よりもメンテナンス性や信頼性に方向性をシフトしシリンダヘッド上にジャンクション BOX を設置して各センサ類の回路はすべてその BOX に結合した(Fig. 26)。

また信頼性においては断線との戦いであった。F1エンジンの最高回転数は量産車に対し倍以上であり、常用回転数が全帯域に渡っているため常に高周波振動がエンジン周辺に加わっている。量産車の場合ワイヤハーネスは振動による接触部の断線や摩耗対応として線材をテープなどで束ねたのち外装保護材(樹脂チューブ類)を使用する。F1 ではハーネスの細線化や軽量化も重要な目的であるためポリエステル系樹脂を繊維状に編み込んだ熱収縮チューブを使用し外部接触からの保護と細線化および軽量化を実現した。

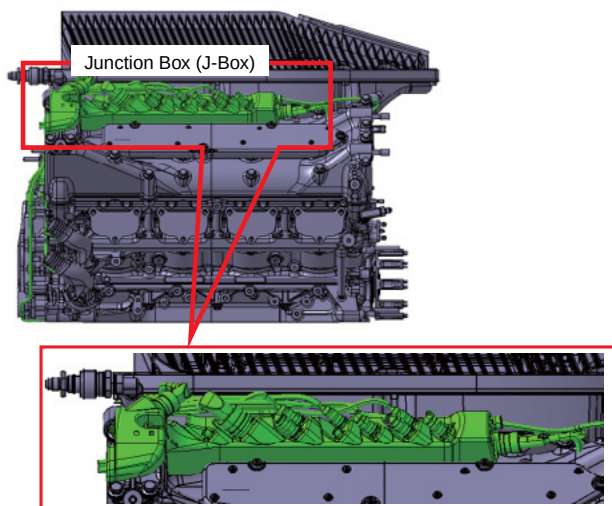


Fig. 26 Junction box on engine

さらに振動や加速度で発生するハーネスへの引張り荷重に対する断線対応としてレース用銀メッキ高強度銅線を使用したうえ、ハーネス線材同士を収縮チューブ内部で束ねる構造を採用し、ハーネスの対断線強度を向上させた(Fig. 27)。この撚り構造は断線強度を向上させるだけではなく、ハーネス自体の屈曲性が良好になりエンジン搭載性が向上した。

しかしながら、これらの手法を用いても、数百 G レベルの振動が発生する場所がエンジン上には存在するため、外觀上の損傷は認められなかったにもかかわらず、収縮チューブ内部や電線被覆内部で銅線のみが断線するケースがあった。これは高周波振動を原因としてハーネス自体や銅線部が共振していると考えられ、振動による変位や引張り荷重を吸収できない状況と推定し、揺動部を含めた固定点間を全て動かないようにカーボン材で製作したホルダー状の剛体で固定する手法をとった。これにより断線を防止することができた。

F1の開発において振動は避けて通れない障壁であり、開発初期に振動レベルと形態を事前に把握することと、それらに応じた対策手法をうまく組み合わせることが重要であった。また、F1という短期開発においては、信頼性保証をおこなうために必要なエンジン運転状態での耐久確認をする機会が限られているため、不具合の兆候や対策の効果を早期に得ることが必要である。ハーネスの開発においては耐久途中の段階でレントゲンなどの非破壊検査装置を用いた解析手法を導入し開発を進めた。

耐振動設計においては、実車で必要とされる以上の対応をして、軽量化を妨げることがないように、設計する必要があった。



Fig. 27 Harness

8. おわりに

振り返ると、システム開発スタートの 1 年後にあたる 1999 年 イギリスのペンブレイサーキットでテスト走行をおこなってから、2007 年ブラジル GP まで常に進化をさせ続け、新技術に対して多くの知見を得ることができた。F1で開発した電子制御システムは、特異なクルマのシステムで

あり、またレース機能に特化したシステムではあるが、システム構築の考え方や適用した電装基盤技術は、今後の自動車技術の進化においても共通する技術であると考える。

FIA 標準システム導入以降の F1 における電気電子技術の進化は、2009 年から適用される KERS システムの進化にゆだねられることになった。今後も F1 は、自動車レースの最高峰であるとともに自動車技術の最高峰であり続けることを願ってやまない。

■ 著 者 ■



石井健一郎



西田俊之



遠島康平



根来昌樹



吉田将隆



丸山 豊