ウインドシミュレータ装置開発による F1エンジン吸気事象解析

Development of Wind Simulator Equipment for Analysis of Intake Phenomena in Formula One Engines

中 村　　聡*　　本 橋 康 弘*　　早 川 修 一*
Satoshi NAKAMURA　Yasuhiro MOTOHASHI　Shuichi HAYAKAWA

要　旨

F1 は，最高速 300 - 370 km/h で，最大 4.0 G におよぶ加減速を繰り返す．このような走行時の車風速（ラム圧）がエンジン出力に与える影響は大きい．しかし，サーキット走行時のラム圧による吸気事象の解析は，計測器の車載性の課題，車体のセットアップ作業の優先，などにより計測時間が取れず，おこなわれていないのが実態である．

サーキット走行状態のラム圧を再現できるウインドシミュレータ装置を開発し，台上テストにて吸気系開発を効率的におこなえるようにした．

また，車体駆動系イナーシャ同等の特性を有するダイナモ装置，車体特性とスロットルアクセルワークおよび各コース条件を模擬できる車両シミュレーションシステムを導入した．この結果，台上試験にてサーキット走行状態でのモード運転ができるようになり各サーキットに適した吸気系セッティングが可能となった．

ABSTRACT

Formula One vehicles repeatedly accelerate and decelerate, reaching maximum speeds of 300-370 km/h and facing maximum G forces of 4.0 G. Under driving conditions such as these, the vehicle's wind speed (ram pressure) has a significant effect on engine power. However, due to issues involving the fitting of measurement devices onto vehicles, the prioritization of vehicle set-up work, and other factors, time has not been available for measurements to be taken, and analyses of air intake phenomena due to ram pressure during circuit driving have not been conducted.

A wind simulator able to reproduce ram pressure during circuit driving was developed, enabling efficient development of intake systems using bench tests.

In addition, dyno equipment with identical inertia characteristics to those of a vehicle drivetrain and a vehicle simulator system able to simulate body characteristics, throttle and accelerator work, and the conditions of different courses were added to the system. This enabled circuit driving modes to be used in bench tests, making it possible to establish appropriate intake settings for each circuit.

1．まえがき

近年の F1 レギュレーションにおいては，コスト削減を目的に，実走テスト日数削減や年間走行距離が制限されている．このため図面段階の性能予測精度向上や台上テスト置換により，極力エンジン関連の実走テストを減らす施策が必要である．

この目的に対し，単純に実走テスト項目を台上テストに置き換えるのではなく，サーキット走行状態のエンジン事象が解明できる装置の開発に取り組んだ．

エンジン関連の実走テストにおいて，動力性能に影響を与えるものは，車風速（ラム圧），気象状況（温度や湿度）の変化である．吸気系部品は従来の台上テストでは高速域の車風速（ラム圧），温度，湿度がすべてのサーキット状況を再現できなかったため，台上テスト結果で決めた仕様の効果が表れず，採用されなかった例もある．

この課題を解決する装置として，ウインドシミュレータ（ラム圧発生装置）を開発した．また，サーキット走行のモード運転ができる車両シミュレーションシステムを導入し，サーキット走行時に起きているエンジン事象を再現した．

本装置，RVベンチ（Real Vehicle Dyno bench）は，ウインドシミュレータ，車体駆動系イナーシャ同等の特性を有するダイナモ装置および車両シミュレーションシステムによって構成されている．

＊四輪R&Dセンター

車両シミュレーションシステムは，AVL 社の VSM (Vehicle Simulation Module)をベースとした．

エンジン回転とスロットルを基準にダイナモがエンジントルクを制御するのではなく，車体，ドライバ，コースを置換し走行状態を再現させ，ラップタイム評価を可能としたものである．コーナ走行(加減速)，サーキットフルラップ走行，アンチストール走行(アイドル，発進)などのモード運転ができる．

適用部品の効果を出力性能のみではなく，ラップタイムとして評価することは，レースチームの理解を助け，開発効率の向上が図れる．

本稿では，装置の概要，サーキットとの相関，事象解析結果について述べる．

2．装置概要

2.1. ウインドシミュレータ装置の概要

設備概要図として，Fig. 1 にセクション図を，Fig. 2 にテスト室を示す．エンジンを搭載した台上テスト装置状態を Fig. 3 に示す．

供給風速は，F1 の加速 1.7 G と減速 4.0 G を再現できるトランジェント性能を有する．圧縮断熱による温度上昇を最小限に抑えるため，エアダクト内に CFD により形状を決定した冷却整流フィンを装備し風速分布を均一化させている．

二階機械室では，温度設定指令に応じた空気を作り出す

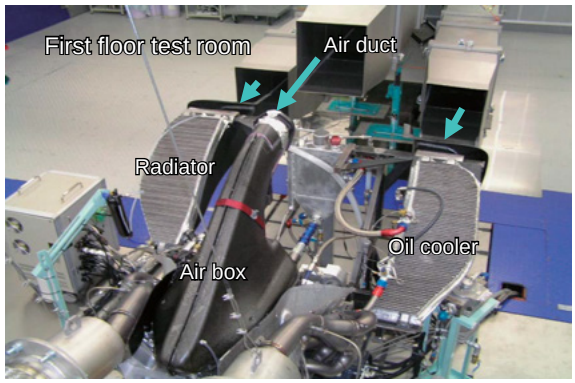


Fig. 3　Overview of test room

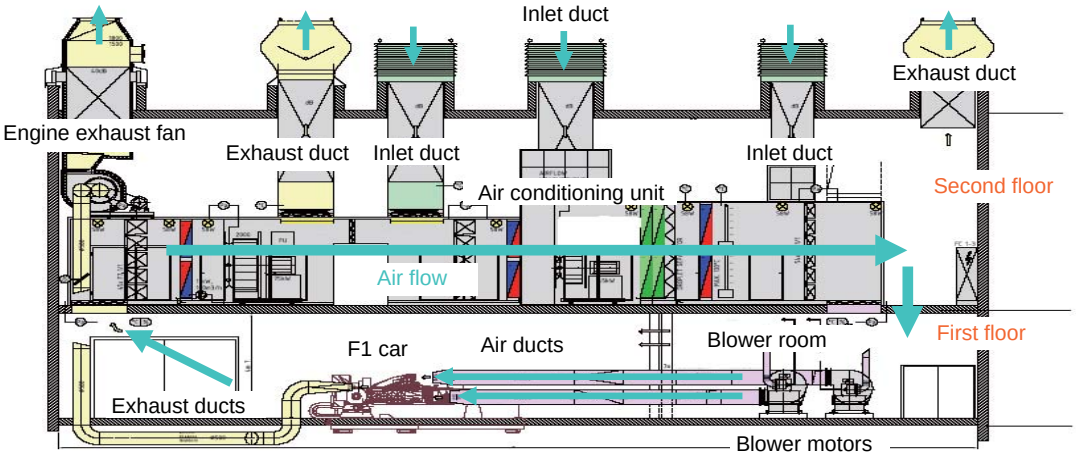


Fig. 1　Section view of RV bench

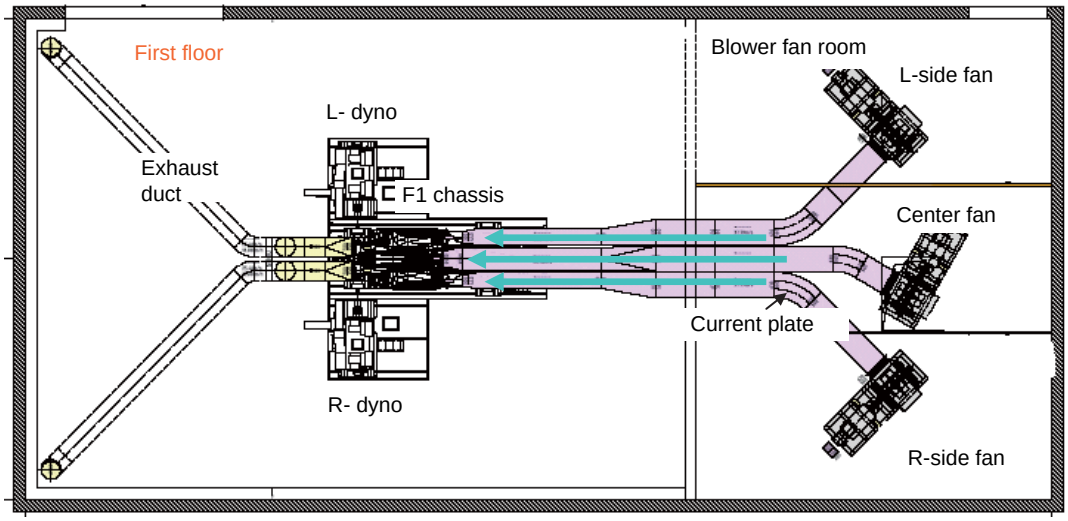


Fig. 2　Top view of 1F test room

Table 1　Control range

Windspeed	0-360 km/h (Max 380 km/h)
Acceleration and deceleration	Max 4.0 G
Temperature	10-40 °C
Humidity	30-90% (Rh)

Table 2　System specifications

<Dyno motor>

AC-motor mass Inertia	0.767 kgm^2
M dnom	2,000 rpm
P mon	400 kW
N max	3700 rpm

<Gear box>

Max input speed	22000 rpm
Transfer power	400 kW × 2 (Max 800 kW)
Gear ratio	9
Inertia	0.015 kgm^2
Acceleration	130000 rpm/sec
Control speed	9 kHz cycle

ため，ボイラおよび冷凍機が配置され，ここで作り出された空気は，一階のブロア室へと送り込まれる．

ブロア室から三機のブロア付きモータによって，供給風はターゲット風速になるようにコントロールされ，一階テスト室に送り込まれる．

一階テスト室の送風ダクトは三箇所設置され，サーキット走行中の車風速は風速分布均一の状態で，エアボックス入口およびラジエータとオイルクーラへ供給される．

気象条件(温度，湿度)をコントロールでき車速に応じた(0 - 360 km/h)，送風が可能である．装置はすべて操作盤および制御盤により集中コントロールされ，風速，温度，湿度，トランジェント速度，排気ダクト風量が一括コントロールされている．

本装置はエンジン側ダイナモコントローラおよび車両シミュレーションとも連携し，サーキット走行シミュレーション中の車速に連動した車風速が送風されるシステムとなっている．本装置は F1 が開催されているすべてのサーキットの気象条件を再現できる．Table 1に制御コントロール範囲を示す．

2.2. 超低慣性ダイナモ

サーキット走行のモード運転が実現できれば，実走テストでしかできなかった，制御システム開発が集中的におこなえる．ハード部品やデバイス部品評価，その後の制御システム開発と一貫した開発が可能となる．

モード運転を実現するために，車体駆動系イナーシャ同等の特性を有する超低慣性ダイナモを導入した．Table 2にAVL 社製装置のスペックを示す．

3．サーキットとの相関

3.1. エアボックス入口の圧力分布

ウインドシミュレータは，ダクト内の風速分布を均一化させている．しかし，実際の走行状態において，エアボックス入口の圧力分布は不均一であり，台上テストで，この状態を再現させる必要がある．無論最終的には，風速分布は均一化させることが理想である．

サーキット走行と RV ベンチとの風速分布の相関を得るために，エアボックス入口圧力分布をピトー管センサを用いて測定することにより対気速度を確認した(Fig. 4)．

RVベンチにおいては，(1)車体によるウインドスクリーンと，(2)ドライバのヘルメットによる空気流れの変化により風速分布が変化することがわかった．

それらが圧力分布とエンジン出力に与える影響を解析し，実走と RV ベンチの圧力分布の相関を図った．

RV ベンチのテスト室全容を Fig. 5 に，エアボックス入口の全圧分布を Fig. 6 に示す．

エンジン回転数 18500 rpm，車速 300 km/h の実走行時の全圧分布(a)と初期RVベンチでの全圧分布(b)を比較する

Fig. 4　Pitot sensor position

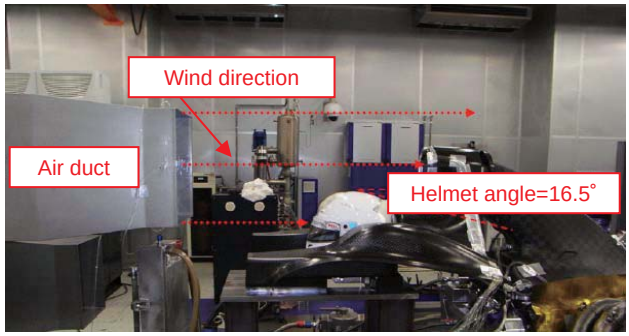


Fig. 5　View of RV bench test room

と，RVベンチでのエアボックス入口部の全圧分布は均一であるのに対し，実走時はエアボックス下部では圧力が低下している部分があることがわかる．

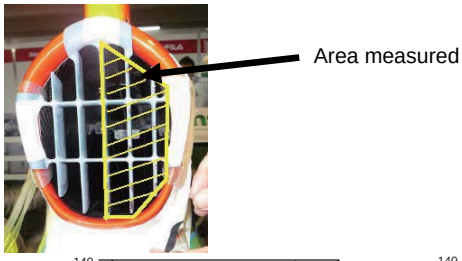
実走行と RV ベンチとの違いとして車体側のウインドスクリーンの有無が挙げられる．ウインドスクリーンを Fig. 7 に示す．ウインドスクリーンとはコックピット前方にある風除け板である．

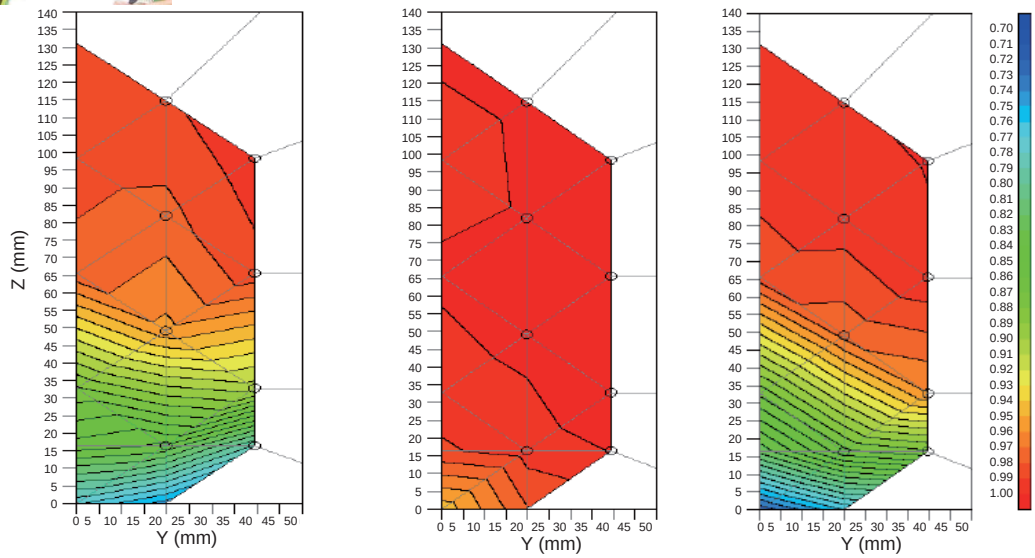
RVベンチにて噴出し口にウインドスクリーンと同影響を与えるダミーウインドスクリーンとバーティカルフィン(Fig. 8)を取り付け，圧力計測をおこなった．この状態での全圧分布(c)は，エアボックス下部の圧力低下を再現し，実走状態を模擬することができている．

次に，エアボックス入口の全圧分布がエンジン出力に与える影響を明らかにするために，(b)初期RVベンチと(c)改修後RVベンチとの比較テストを実施した．車速240 km/h 以上で 6 kW の出力差となり，サーキットでのラップタイムに換算すると 0.12 秒の差が生じた．不均一な圧力分布を改善するには，エアボックス形状と併せて，車体形状およびロールフープ位置の検討が重要である．

3.2. 車速による気筒間燃料補正量の変化

各気筒の混合気比の適正化により出力向上が見込めることはわかっていたため，従来台上テストにて燃料補正値を検討し，レースが開催される各サーキット現場でリファインを実施していたが，本装置で気象条件や最高車速が模擬できるため，サーキット現場でのリファインの必要がなくなった．そのためセッティング工数の削減と搭載燃料量などのピット戦略データをタイムリーに作成することが可能





Total Cp distribution
(18500 rpm, WOT, 300 km/h)

(a) Track

Total Cp distribution
(18500 rpm, WOT, 300 km/h)

(b) RV bench

Total Cp distribution when 225 mm windscreen is added
(18500 rpm, WOT, 300 km/h)

(c) RV bench after modification

Fig. 6　Total Cp at inlet air box

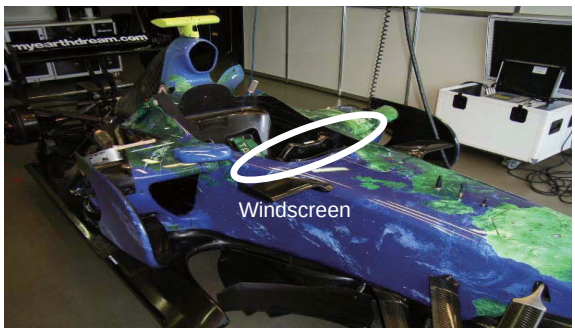


Fig. 7　Windscreen

Fig. 8　Vertical fin and dummy windscreen

となった．Fig. 9にラム圧違いによるシリンダ別燃料補正量を示す．車速120 km/hと340 km/h，エンジン回転数18500 rpm での比較である．低車速側と高車速側で，ラム圧上昇によりエアボックス内での空気の流れが変化するため，各シリンダの燃料分配(燃料補正)も変化する．その結果，車速120 km/hでは空気流入量の少なかった前方気筒(#1, 2, 5cyl)が，340 km/h では，燃料補正量が２－４%増加している．また，燃料補正をおこなうことにより，出力は 3 kW の向上が図れている．

3.3. エンジンカウル内吸気温度の影響

RVベンチにて実車モノコックを搭載し，エアボックスおよびエンジンカウル内の温度計測をおこなった．計測箇所は，以下の７箇所である．

(1)エアボックス入り口吸気温度
(2)エアボックス内温度分布
(3)バルクヘッド廻り温度分布
(4)エンジンリヤ廻り温度分布
(5)ニューマチック　エアボンベ温度分布
(6)オイルクーラ廻り温度分布
(7)ラジエータ廻り温度分布

エアボックス内観を Fig. 10 に示す．

測定結果の中で，エアボックス内温度分布(Fig. 11)に着目した．エアボックス内の温度は，フロント側が８℃高い結果となっている．フロント側のシリンダは，リヤ側のシリンダよりも，高温の空気を吸っていることになる．

実車の温度環境を再現するにはエンジン単体での台上テストでは不十分であり，モノコックおよびエンジンカウルを装着しなければ再現はできない事象である．

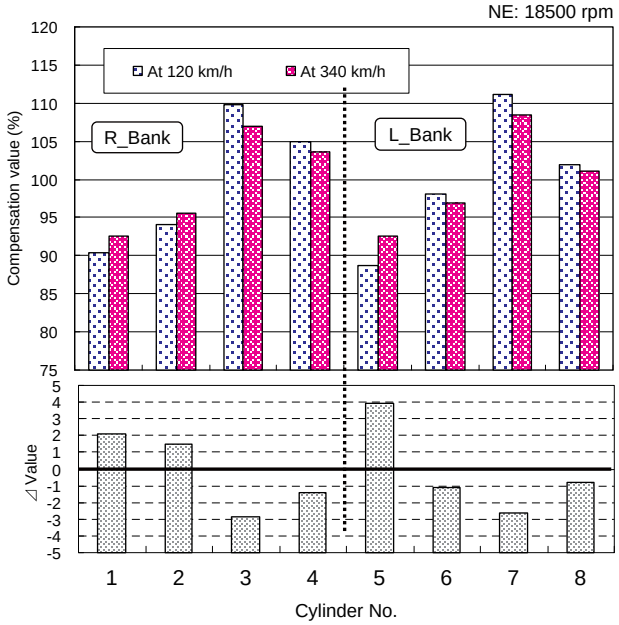


Fig. 9　Speed-fuel distribution for each cylinder

フロント側の温度上昇は解析の結果，エンジンや排気管からの輻射熱よりも，エンジンとバルクヘッド間に配置しているオイルタンクの油温の変化に同期しており，オイルタンクの熱影響を受けていることがわかった．

バルクヘッドは，冷却風の通り道がなく，閉塞された構造になっているため，エアボックス前方壁面が加熱され吸気温上昇につながっている．壁面温度は90 ℃にも達することがわかった．

対策として，バルクヘッドとエンジン間に冷却風を送り込む冷却ダクトを取り付けた．

Fig. 12に示すように，冷却風は，オイルタンク廻りとバンク間(V bank)へ流れ，その結果，エアボックス壁面温度は 45 ℃まで低下し，フロント側吸気温は６℃低下した．

このような吸気温度変化が生じる場合，2006年以降のF1エンジンは可変管長システムを持たない(レギュレーション規制)ため，出力ピークのエンジン回転数が変わり，吸気温度上昇による吸入効率低下を招き出力低下の原因となる．

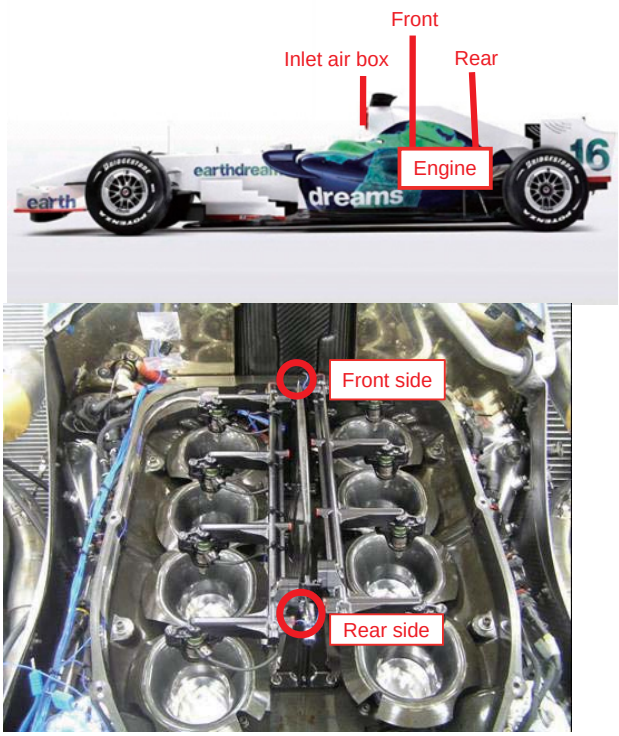


Fig. 10　View of engine cowl and air box

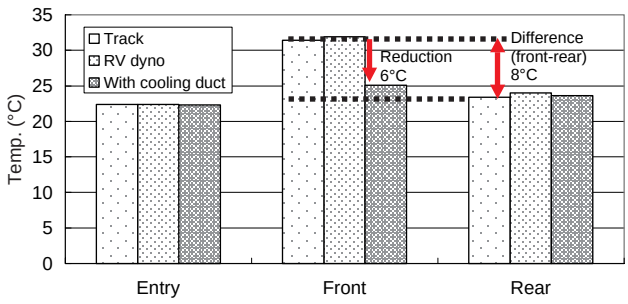


Fig. 11　Temperature distribution in air box

輻射熱対策として，断熱シートもテストしたが，時間経過に伴う温度上昇があり，10ラップのモード運転で効果がなくなった．

冷却ダクトによる掃気が対策に有効であるが，車体空力性能への影響も考慮しながら冷却ダクトの形状検討をする必要がある．

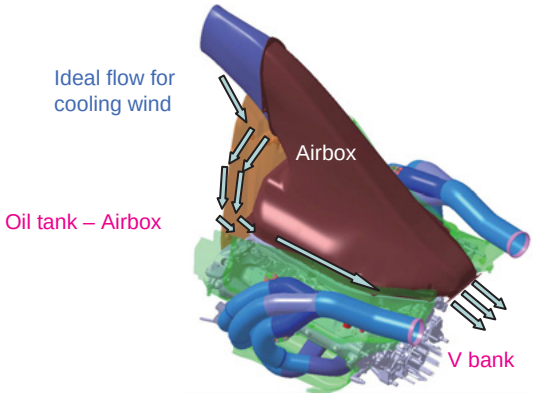


Fig. 12　Cooling duct (ideal flow)

4．台上置換紹介

RV ベンチにより，実走テストで実施していた各種セッティング用データ計測が，台上テストにて確認できるようになった．以下に，台上置換された項目を紹介する．

(1)新車シェイクダウン時の圧力，温度計測
(2)ラジエータ，オイルクーラの機能チェック
(3)振動，熱害確認(部品信頼性確認)
(4)気象条件，ラム圧による性能確認
(5)電装系，機能確認および信頼性確認
(6)車両シミュレーションによるドライバビリティー評価
(7)ラップタイム評価，燃費評価
(8)制御データのセッティング
　(レーススタート，トラクションコントロール，サーキットごとのトルクマッピング)

5．まとめ

(1)ウインドシミュレータ(ラム圧発生装置)と，サーキット走行のモード運転ができる車両シミュレーションシステムを開発し，サーキット走行時に起きているエンジンの吸気事象を台上テストで再現した．
(2)相関が取れたことで，エアボックス開発，気筒間燃料補正，吸気管長選定などの項目が短期間でおこなえるようになった．
(3)モノコックを搭載することにより熱害影響確認が可能となり，実車の出力向上に貢献した．

■著　者■

中村　聡

本橋康弘

早川修一