F1 特有の風洞実験技術について* —精度と効率を極める技術—

中川 雅樹**, 原本 誉剛***, 南方 利城****

On Unique Wind-tunnel Technologies in F1 — Technologies for high accuracy and efficiency —

Masaki NAKAGAWA, Yasutake HARAMOTO and Toshiki MINAKATA

1. はじめに

Formula One (以下 F1) 車両の構成要素は、車体・空力・エンジン・タイヤに大きく分類できる。Table 1 に、これら各要素の変化が、平均的なサーキットにおけるラップタイムに与える影響をまとめる¹⁾。この中でも空力効率 (ダウンフォース値/空気抵抗値) の感度は高く、しかも、車重や重心高など、シーズン当初に車両コンセプトが固まると容易に変更が効かない要素と比べ、空力で得られる性能向上技術は、シーズン中の実戦投入が比較的容易であるため、絶え間ない開発が続けられ、F1 車両の空力性能は常に進化している。

空力開発の基本的な進め方は、CFD で提案されたコンセプトを、風洞実験において微修正し、再現性よく確認されたゲインを積み重ね、実走行での裏付けを経て、実戦投入を図る、ごく一般的な手法である。ただし、これをほぼ2週間おきに開催されるレースカレンダーに合わせて、めまぐるしいサイクルで実施していることが、F1 空力開発の特徴である。最低地上高が極端に低く、床下で積極的に空力性能を稼ぐ F1 では、高価な精密模型を用い、高性能のスチール製移動地面板 (Rolling Road) や、高機能の計測装置を駆使して、1000 分の 1 の空力係数の精度・再現性の下での開発が必須であることは言うまでもない^{2),3)}。また、同時にこれらをいかに効率良く使いこなし、次のレースの空力性能向上につなげるかが、競合車との熾烈な競争を勝ち抜く鍵となる。

そこで本稿では、ドイツ・ケルン市郊外にある Toyota Motorsport GmbH (TMG) の風洞 (Fig.1) において、F1 車両開発に用いられてきた技術 (その多くは現在でも多岐に亘るモータースポーツ車両に活用され

ている) の変遷を例に、現在の F1 車両の風洞開発における最新の技術動向について紹介する。

2. 風洞関連設備

2.1 風洞設備

TMG 風洞の主な仕様は、縮流比 6.7:1, 気流乱れ度 0.2% 以下, 送風機最大出力 2.3 MW, テストセクションはクローズドであり、その規模は Fig. 2 のレイアウト図に示すとおりである。TMG では、この同一諸元の風洞を 2 基所有しており、それらの相関を Fig. 3 に示す。本図は、同一車両模型を各々の風洞に設置し、フロントウィングのフラップと、リアウィングの角度を変化させたときの計測結果を、エアロバランス (横軸) と、ダウンフォース値 (縦軸) で表示した、ポーラと呼ばれるグラフである。両風洞の性能と、模型を含めた計測系の精度・再現性のレベルの高さを示す結果である。また、図中右下部には、模型先端位置における、地面板

Table 1 Lap-time sensitivity of performance factors.

Fig. 1 A bird's-eye view of TMG facility including wind tunnels (left) and inside the test section (right).

* 原稿受付 2011 年 10 月 15 日

** 正会員 (株) 豊田中央研究所
(〒480-1192 愛知県愛知郡長久手町長湫横道 41-1,
E-mail:masakin@mosk.tytlabs.co.jp)

*** 正会員 トヨタ自動車 (株)
(〒410-1193 静岡県裾野市御宿 1200)

**** 非会員 トヨタ自動車 (株)

Fig. 2 The layout of the test section.

Fig. 3 A comparison of front and rear wing polar curves for the same F1 model between two wind tunnels, and velocity profiles on the floor just in front of the model at several spanwise positions.

上の上下方向の風速分布を示し、境界層厚さをほぼゼロにする性能を有することを示している。2009年にFOTA (Formula One Teams' Association) 合意により、風洞試験時間 (Wind-on hours) に制限が設けられる直前まで、これら2基の風洞を24時間体制でフル稼働させていた。多くのF1チームが複数の風洞で開発を実施しているが、このような双子風洞での開発は他に類を見ない。なお、通常の開発ではスケール模型を用いるが、片方の風洞では実車試験を実施可能な仕様となっている。

2.2 風洞模型と関連装置

現在のF1風洞模型の多くは60%スケールの模型を利用している。ホイールの扱いには、後述のように様々な手法が存在するが、TMGではホイールがサスペンションを介して模型に取り付けられる (Wheels-ON) システム (Fig. 4) を採用している。これは、タイヤメーカーより供給される風洞実験専用のチューブレスのゴム製タイヤに、プッシュロッドを通じて予荷重 (Preload) をかける仕組みで、タイヤの接地面 (Contact patch) 形状と、回転中のタイヤ径 (Rolling radius) を実車相当となるよう調整できる装置を搭載したものである。

Fig. 5に示すように、模型は剛性を確保したスチール製のスパイン (背骨) の周囲に、部品を組み付ける形で構成される。模型表面形状は、主にセラミックスや樹脂を用いた光造形部品 (Rapid prototype) で構成されてお

Fig. 4 60%-scale F1 wind-tunnel model.

Fig. 5 CAD images of above model: the spine (left) and surrounding parts (right).

Drag	1,500N
Side Force	±750N
Lift	3,200N
Roll Moment	±200Nm
Pitch Moment	±26,000Nm
Yaw Moment	±250Nm

Fig. 6 The model motion system (left) and the summary of its specifications (right).

り、局所的な形状を切り出してパラメータスタディができるよう、様々な部位で分割されている。また、前後ウィングや床など、空気力に対する剛性が必要な部品には、アルミやCFRPが用いられる。サスペンション系の機械部品を含めると、合計約700点の部品で構成される。

一方、スパイン内部にはFig. 6に示すようなModel motion system (以下MMS) が備わっており、車両姿勢を3軸まわりの任意の姿勢に制御することで、走行中の車両姿勢を模擬できるシステムとなっている。このほか、タイヤ予荷重とステアリング機構用のモータ、それらの制御ボックス、前後ウィング用2軸荷重計や、圧力センサ、模型車高を制御するための近接レーザセンサ等が搭載されている。

2.3 風洞計測システム

模型内部のMMSに取り付けられた支持棒は、模型昇降用アクチュエータを介して天井に設置された6分力天秤と接続されている。この天秤の精度は $\pm 0.04\%$ 、またその再現性は $\pm 0.02\%$ となっている。さらに、4輪の移動地面板下に設置された単軸ロードセルで計測した荷重を差し引いて、最終的な空気力荷重を求めることになる。Table 2にこれら計測装置の仕様詳細を示す。

2.4 徹底した効率化

F1空力開発においては、開発装置の精度だけでなく、

Table 2 Specifications of the overhead balance (*left*) and the under-belt load cell (*right*).

Drag	1,800N	Model	30-300N
Side Force	1,400N	(Each wheel)	
Lift	5,200N	Full-scale car	50-500kg
Roll Moment	1,100Nm	Front wheel	
Pitch Moment	2,600Nm	Full-scale car	70-700kg
Yaw Moment	1,100Nm	Rear wheel

Fig. 7 The automatic flap adjuster embedded in the front wing endplate of the model.

開発プロセスの効率化も重要である。本項では、模型・計測システム・組織構成の各々における、効率化に向けた取り組み事例について述べる。

(1) 模型

模型に対する実験時間短縮の取り組みの一例として、フロントウィングのフラップ角度を自動調整できる機能 (Automatic flap adjuster) について紹介する。Fig. 3 に示したようなポーラを取得する際に、従来のシステムでは、テストセクションの中に入ってフラップ角度を調整する必要があったため、1 計測につき、1 角度しか計測できなかった。これに対し、フロンウィングの翼端板に、Fig. 7 に示す小型モータを組み込むことで、風洞を止めずにフラップの角度を変更することが可能となり、実験時間をほぼ半減することが可能となった。

(2) 計測システム

計測システムについても High speed data acquisition (以下 HSDA) system と Continuous Motion (以下 CM) System の組み合わせにより、精度と再現性の質を保ちながら、実験時間の短縮を図った。

Fig. 8 に 1 回の計測で利用する、典型的な車高分布図 (Ride height map) を示す。従来のシステムでは、1 車高ごとに模型を一定時間静止させて計測する方法であり、得られるデータは離散的であった。そこで、まずサンプリング周期が従来の 1/20 となる HSDA システムを導入することで、同じ再現性を確保するために必要な計測時間を大幅に削減した。さらに、CM システムを導入し、模型を図中の軌跡のように連続的に動かすことにより、従来の測定車高範囲を網羅できるようになった。このようにして、従来の実験時間が大幅に短縮できたことに加え、連続的なデータが得られるようになり、1 回の計測から得られる情報量が格段に増えた。例えば、ディ

Fig. 8 A typical ride-height map for quasi-static (open dot) and continuous motion (trajectory) tests.

Fig. 9 Role sharing during a wind tunnel shift: operators (*left*) and model makers (*right*).

フューザのストール特性など、これまでの静的計測では離散的にしか得られなかった空力現象も、より詳細に把握できるようになった。

(3) 組織構成など

F1 レースのテレビ中継で、ピットでのタイヤ交換の際に大勢のクルーが車両に群がり、ほんの 3 秒足らずでタイヤ交換を済ませるという場面を幾度となく見かける。実際にタイヤ 1 本に 3 人のクルーが専属で配置されており、レース現場におけるピット作業の効率化を徹底しているのである。

風洞開発現場においても同様の考え方で、役割分担が明確化されている。風洞の保守・運転はオペレータが担当し、模型の準備やパーツ交換はモデルメーカ 2 人が左右に専属で配置され (Fig. 9)、テストエンジニアが現場の指揮をとって実験が進められる。風洞開発現場においても、このようなチーム体制により、24 時間 3 交代制で開発が進められていた。前述の FOTA 規制以前は、総勢 100 名を超える人員が空力開発に携わっていた。

その他、模型はほぼ毎月オーバーホールのために、模型の入れ替えが実施されていた。その際に模型をテストセクションに精度よく設置することは、前後の試験結果との整合性の意味でも重要であるが、総重量約 180 kg の模型を操るのは大掛かりで時間を費やす作業となる。このため、ポータブル式のアーム型三次元測定器を導入し、模型を 0.1 mm の位置決め精度で素早く設置することを可能にしたのも、F1 ならではの手法と言える。

3. 実験手法

3.1 従来の計測手法

従来の計測手法のうち、圧力計測は F1 車両開発においても重要な役割を担っている。模型内部には 512 チャ

Fig.10 Typical examples of the pressure distributions on the floor (left) and a velocity distribution on the radiator, based on pressure measurements (right).

ネルの圧力計測装置が搭載され、主に Fig.10 に示すような、床下圧力とラジエーター通過風速計測の他、ブレーキダクト冷却風速計測などにも用いられている。特に模型表面圧力は、実際のデータだけでなく、模型に何らかの不具合が生じた際においても、その原因を特定するツールとして重要な役割を果たしている。その他、蛍光パウダーを配合したオイルフローや、タフトによる表面流れの可視化手法も利用される。

3.2 PIV による流れ場の可視化

(1) 独自の PIV システムの導入

従来の風洞実験においては、何百にも分割された空力パーツ 1 つ 1 つに対し、何種類もの形状オプションを用意し、数をこなす中で最適解を得る、ある意味力ずくの手法をとっており、結果に対する理屈付けをする間もなく開発が続けられてきた。また、CFD によって発案されたコンセプトを検証する際にも、ダウンフォース値の傾向を比較する方法が主流であり、実際に車両周囲の流れ場が、風洞実験結果と一致しているかどうかは、圧力計測やオイルフローの結果から間接的に得るのみであった。こうした、必ずしも効率的であるとは言えない開発手法そのものを改善するため、実現現象を把握できる PIV を導入し、開発プロセスの効率化を目的として、結果の理屈付けをしながら開発できる環境づくりが始まった。

PIV 導入検討を始めた当初は、この規模のクローズド測定部をもつ風洞への恒久的な PIV 導入は、飛行機分野では既に事例⁴⁾があったものの、自動車用風洞においては前例がほとんどなく、手探りでの検討であった。周囲が支柱に囲まれているため、汎用的な 2D-3C システムを組むことが困難であること、また準備作業やキャリブレーションの作業効率と、迅速なポスト処理による結果解釈の即効性を重視する目的から、様々な試行錯誤の結果 2D-2C 計測⁵⁾に焦点を絞り開発を進め、2007 年に両風洞に導入を果たした (Fig.11 参照)。Table 3 に TMG の PIV システムの仕様を示す。

(2) フロントホイール後流計測用システム

むき出しのフロントホイールの後流構造を把握することは、F1 で最も重要な空力開発要素の 1 つである。そのため、PIV 導入時にまず実現したのが、Fig.12 に示すフロントホイール後流の、水平断面における可視化シ

Fig.11 PIV system (left) and a typical scene during the measurement (right).

Table 3 Nominal specifications of PIV system at TMG.

Recording method	Double frame/single exposure
Recording medium	14 bit CCD camera with 4GB onboard RAM
Camera resolution	2048×2048 pixels (pixel spacing 7.4×7.4 μm)
Data interface	GigE
Lens	C-mount, f=100-200mm, depending on application
Typ. #	2, 8-4
Lens accessory	Remote focusing ring with 532nm band-pass filter
Laser	Double-pulsed Nd:YAG
Pulse energy	200mJ/pulse & 400mJ/pulse
Laser sheet optics	Divergent and parallel
Laser related accessory	Laser guide arm
Synchronizer	Network based
Seeding particle	DEHS, global seeding method
Seeder	Laskin-type with electro-magnetic valve
Typ. region of interest	400mm×400mm
Magnification factor	0.038
Typ. pulse delay	10-20 μsec
Typ. frame rate	3.3Hz/10Hz with pixel mask
Post-processing method	FFT-based adaptive cross-correlation with window deformation
Typ. interrogation window size	32 x 32 pixels
Typ. valid vectors	> 95%
Typ. net resolution	3.3mm
Typ. dynamic range	DSR 143 / DVR 143 ⁶⁾

Fig.12 Typical measurement planes of PIV system in the front wheel wake (left) and the camera and mirror assembly on the roof (right).

Fig.13 A typical particle image (left) and resulting flow fields shown in the absolute velocity (right).

ステムである。テストセクション天井部裏に、十分な空間が確保できないため、光学ミラーを利用し、測定部内にカメラ一式を横置きに設置することで、模型への空力

的影響を最小限に抑えた。また、遠隔操作によるレンズ自動絞り機能を搭載することで異なる高さでの計測に対応、さらに光学ミラーは3自由度に制御可能で、偏揺角試験時に模型位置が移動する際や、異なるサイズの車両模型を入れた際の、画角調整にも対応できる。

Fig.13に、本システムを用いて計測した、 z 断面における左フロントホイール後流の瞬時粒子画像と、平均(面内)速度場における後流構造を3次元的に示した例を示す。このように、異なる空力パーツや実験条件の違いによる後流構造変化を捉えることが可能である。

また、キャリブレーション作業においても独自の工夫を施し、結果処理・解析プロセスの効率向上を図り、結果の素早いフィードバックが可能となった。同様のシステムを、車両周辺の他の断面計測にも順次拡張してゆき、流れ場の実現象を把握しながら開発を進めることが可能になった。同時に、CFDとの相関検証データも取得でき、開発の効率化をさらに進めることができた⁷⁾。

4. リアリティを求めて

4.1 模型の大型化

Fig.14に実車と50%模型の比較を示す。TMGでは2003年の風洞稼働当初からこの50%模型を利用し、Fig.15左に示すように車輪がホイールアームによって支えられた実験条件(Wheels OFF)で開発を進めていた。このシステムは文字通り、ホイールが車体(ボディ)側に接しておらず、常に近接センサの制御により浮いている状態である。また偏揺角をつけるために模型が回転する際には、ホイールアームの根元を支えるホイールタワーと呼ばれる部分が連動する大掛かりなシステムであるため、度々不具合も発生し、その解決に費やす時間も少なからずあった。

2008年以降、現在の60%スケールWheels ON模型に移行することで、より効率の良い計測が可能となった。まず、模型を大型化した主なきっかけは、車両寸法形状の大幅な変更が盛り込まれた、2009年の新レギュレーションの発効によるものであった。この規制により、ダウンフォース値がほぼ半減する見込みとなり、模型の大型化することで、空気力計測の分解能を上げ、より精度の高い実験を目指した。同様の理由で、試験風速も50 m/sから60 m/sに変更された。(前述のFOTA合意以降は50 m/sに戻している。)さらに、模型の大型化は、タイヤに予荷重を与えるための装置の組み込みや、圧力センサのチャンネル数の増加、また実車詳細形状の再現など、相乗効果をもたらした。

次に、Wheels ON技術を取り入れたきっかけは、フロントホイール外側に装着するリムカバー(2010年以降はレギュレーションで禁止)の影響が、風洞と実車で異なるという問題が生じたことである。Fig.16にWheels ON/OFFの条件においてPIVで計測した、センター断面におけるホイール後流構造の比較を示す。ホ

Fig.14 A full-scale car and 50%-scale model.

Fig.15 Comparison between 50% (left) and 60% (right) wheels-OFF models with wheel arms and towers.

Fig.16 Results of the velocity field on the center plane of the front wheel wake on wheels-ON (left) and wheels-OFF (right) model configurations.

イールアームと外側のタワーの影響が、流れ場へ影響を与えていることが分かる。このWheels ON技術の導入により、ホイール周辺の流れ場を現実に近い条件にできただけでなく、ホイール内部の構造も実車に忠実に再現することが可能となり、より精度の高い実験が可能となった。

4.2 タイヤ形状の再現

風洞模型のタイヤが、実車走行時のタイヤ形状を忠実に再現していることが大前提となるのは、これまで述べてきたことから明らかである。このため、タイヤ競争が熾烈であった2004年頃になると、より現実に近い実験条件を求め、各チームは長年利用してきたアルミ製のタイヤから、タイヤメーカーが供給するゴム製タイヤへと移行するようになった。形状の再現性は言うまでもなく、耐久性の向上など、メーカーによる実車用タイヤさながらの改良が重ねられ、現在に至っている。

風洞模型タイヤの基本的な使用方法は、メーカー奨励の空気圧と予荷重をかける方法であるが、風洞タイヤ形状を実際に計測することで、さらに詳細な計測条件を把握する取り組みも行われてきた。Fig.17にタイヤ形状計測の様子と、その結果を示す。模型に取り付けたタイヤにパターンを吹き付け、それを地面板上で回転させ、2

Fig.17 A scene of the dynamic tyre shape measurements (top) and resulting tyre shapes (bottom).

Fig.18 A comparison of side wall shapes on two different tyres. Note dimensions are in full-scale.

Fig.19 Results of the front wheel wake measurements between two different tyres that correspond to above tyre shapes.

台の CCD カメラで撮影した画像から、3次元表面形状を再構築する手法である。これにより、風洞タイヤ形状の特性を把握できるだけでなく、得られた結果を CAD データとして再構築し、その形状を CFD にも適用することで、境界条件の合わせこみも可能となった。

最後に、タイヤ形状がいかに敏感であるかを示す一例を示す。Fig.18 に 2 つの異なる形状を持つフロントタイヤを示す（図中寸法は実車スケール）。この 2 つのタイヤでは、ほぼ年間開発分に匹敵するほどのダウン

フォースが変化することが分かっている。PIV を用いて、各々のタイヤ後流を可視化した結果を Fig.19 に示す。これらの結果より、流れ場に与える影響の大きさが判る。このように、実際とは異なるタイヤ形状で開発を行うと、風洞実験結果が実車性能に反映されないことになり、取り返しのつかない結果を招くことを示している。また、リアタイヤ形状に関しても同様のことが言える。

5. まとめ

以上、F1 車両の空力開発で利用される、特徴的な風洞実験技術について、TMG における開発技術の変遷をたどりながら紹介した。サイクルの早い開発体制の中で、高精度化・高効率化を目指して実施してきた、これだけのボリュームの技術更新を、7 年間弛まなく実施してきた事実が、まさに F1 特有の時間の流れを示していると言えよう。また、これらの技術は決して F1 車両開発のみで通用する技術ではなく、一般の風洞設備として有用な技術であることは、現在この風洞が商用風洞として多くの顧客に利用されている事実により明らかである。そして、本稿で紹介した PIV システムも、現在では多くのチームがこぞって導入を始めており、もはや F1 開発には欠かせない技術となりつつある。今後も F1 車両開発では、さらなる新しい技術を導入しながら、よりリアリティを求めた開発が続けられていくことであろう。

6. 謝辞

本稿で紹介した技術内容は、全て Toyota Motorsport GmbH に帰属する。投稿に関して資料提供を快諾いただいた TMG、ならびに F1 車両開発に共に携わった多くの関係者の方々に感謝する。

参考文献

- 1) 新居章年：トヨタ TF109 の開発，自動車技術会シンポジウム，No.11-10 (2011) pp.5-11.
- 2) 南方利城：F1 の空力開発，自動車技術会シンポジウム，No. 11-10 (2011) pp.12-18.
- 3) Honda R&D Technical Review 2009, F1 Special (The Third Era Activities) (2009) pp.134-154.
- 4) 加藤裕之，渡辺重哉：粒子画像流速測定法 (PIV) の大型風洞への適用，ながれ 22 (2003) pp.289-298.
- 5) 速水洋：PIV の活用－期待と不安，自動車技術会シンポジウム，No.22-09 (2010) pp.1-6.
- 6) Adrian, R. J. & Westerweel, J.: Particle Image Velocimetry, Cambridge Univ. Press (2010) pp.34-35.
- 7) 中川雅樹，原本誉剛，南方利城：F1 車両開発における PIV の実用化，可視化情報学会誌 No.31 Suppl. No. 1 (2011) pp. 247-250.