

F1 エンジンにおける CFD 技術の構築

CFD Technology for Formula One Engine

花 田 尚 喜*
Naoki HANADA

平 出 篤 志*
Atsushi HIRAIDE

高 橋 真 嘉*
Masayoshi TAKAHASHI

要 旨

近年のシミュレーション技術の発展は著しく、F1エンジン開発においても各種 CFD が活用されている。

しかしながら、シミュレーションの適用に際しては、その高回転を始めとする F1 エンジン特有の条件に適合したシミュレーション技術の確立が必要とされた。

エンジンの各部圧力計測や単気筒可視化エンジンを用いた筒内のガス流動ならびに燃料噴霧挙動の計測をおこない F1 エンジンに適用できる CFD 技術を構築した。

ABSTRACT

Simulation technology has advanced markedly in recent years, and various types of CFD models have come into use for Formula One engine development.

However, to use such simulation modeling it is necessary to establish simulation technology for the unique conditions for Formula One engines, such as that for high engine speed.

The pressure of each engine part was measured and in-cylinder gas motion and fuel spraying behavior were also measured using a single-cylinder optical engine, enabling CFD technology that can be applied to Formula One engines to be created.

1. まえがき

近年のシミュレーション技術の発展は著しく、F1においても多くの分野でシミュレーション技術が確立され、かつ開発に適用されてきた。CFDは、大規模なコンピュータリソースを必要とし、ハードウェアと計算技術の両者の進歩が相まって実用化されてきた。

CFDでは乱流モデルを始めとする種々のサブモデルが使用されており、計算対象の現象を表現できるかどうかを検証することが重要である。例えば、使用回転範囲が広い自動車用レシプロエンジンの場合、低回転時と高回転時では吸排気管内の圧力変動は異なり、低回転時と高回転時のどちらか一方でのみ検証された計算手法が他方にも適合するとは限らない。シミュレーション検証を確実に実施することが開発に有効な CFD 技術を構築することに繋がる。

量産エンジンを対象とした CFD 技術^{(1)・(5)}は、専門メンバによって開発構築されてきた。当初は、同じレシプロエンジンであることから、その技術が F1 エンジンへもそのまま適合できるものと考え、F1エンジン開発への導入を図った。しかしながら、実際にシミュレーションをおこなうと、F1エンジンの現象を表現できないことが明確となった。量産エンジンでは常用回転域が低いため、シミュレーション

も 2000 rpm 近傍の低回転域が重要な解析条件となる。F1 エンジンでは、出力が最優先課題であることから、最高 20000 rpm におよぶ高回転時の評価が必要とされる。高回転時はピストン速度やガス流速の増加に加え、吸排気管内の圧力変動に起因する吸排気系における気筒干渉や燃料噴霧挙動、筒内へ流入するガス流動などが、出力へ影響をおよぼしている。これらの影響を表現できるシミュレーション開発へ着手した。

各部の圧力計測や可視化エンジンを用いた筒内計測のデータを用いて F1 エンジン開発に適用できるシミュレーションモデルの検証を実施した。

本稿では、吸排気の流れ、筒内ガス流動、筒内燃料挙動、燃焼の CFD 技術について解説する。

2. 吸排気系

レシプロエンジンの吸排気系は体積効率に影響をおよぼし、出力性能を決定する重要な部品である。

吸排気系の圧力やガス流れを解析し、事前に性能を予測することは、日々改良が求められる F1 エンジン開発において短時間で仕様が決められるため有効である。この性能予測を実現するためには、シミュレーションによる事前検

*四輪R&Dセンター

討や計測データとのクロスチェック作業が必要となる。

吸排気系シミュレーションには、当初、Ricardo software 社製の 1 次元流れのエンジン性能予測シミュレーション (WAVE) を用いた。その後、精度向上を目的に吸気系に対しては、3 次元圧縮性流動解析が可能な内製ソフトを用いた。排気系は適用可能な 3 次元解析ソフトが見当たらず WAVE を継続使用とした。

2.1. 吸気系

現在の F1 エンジンの吸気系はエアボックスが装着され、各気筒の吸気管内で発生した圧力変動(脈動)が、エアボックス内を伝播反射し、別の気筒へ伝達する。この結果、エアボックスの形状はエンジン出力に影響を与える一因子となる。

一方、車体の空力性能は、ラップタイムを大きく左右し、ボデーカウルの形状は空力特性により決定される。エアボックス形状は、ボデーカウルの形状によって、その自由度が制限される。

当初、WAVE を用いた吸気管形状のみで性能評価をおこなっていたが、車体空力性能とエンジン出力を両立させるために、エアボックス形状選定に多大な時間を費やす開発状況にあった。この解決策として、エアボックス形状の影響も含めた性能評価や現象解析にシミュレーションを活用できるように取り組んだ。

シミュレーションソフトは、Honda 内製の 3 次元圧縮性流動解析ソフト⁽¹⁾と 1 次元の混成モデルである。

計算モデルを Fig. 1 に示す。エアボックス部分を 3 次元形状で表現、吸気管のスロットル下流からシリンダと排気管までを 1 次元モデルとスカラーモデルで表現した。

この内製ソフトは、3 次元だけでなく 1 次元計算においても圧縮性流体として解析していることが最大の特徴である。

Ricardo software 社の 3 次元流動解析ソフト (VECTIS) と 1 次元流れ解析ソフト (WAVE) の組合せでも同様の計算が可

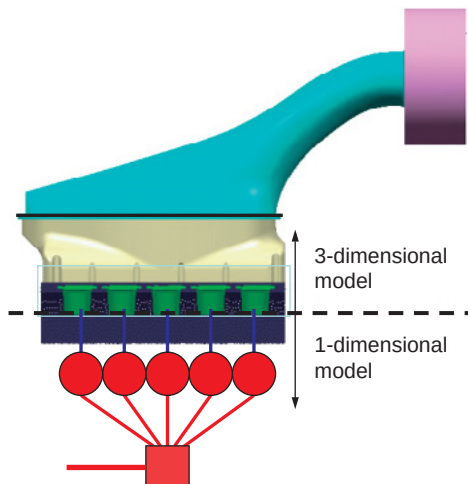


Fig. 1 Simulation model

能であるが、これらのソフトは 3 次元解析の圧縮性流体計算の精度において我々の目標基準を満たさなかった。

計測された吸気管圧力を基に、境界条件、メッシュサイズ、流量係数およびフィルタモデル等の検討と改良を重ね、F1 エンジンのエアボックス内吸気干渉の解析に適用できるシミュレーションを構築した。

Fig. 2 に、V10 エンジンの片バンク分の吸気管内圧力の計測結果と計算結果を気筒別に示す。回転数は 17000 rpm であり、クランク角度 360 deg が吸入上死点を示す。各気筒の吸気圧力は、エアボックス内の吸気干渉により、気筒ごとに異なる。圧力振幅や位相が気筒ごとに異なっているが、

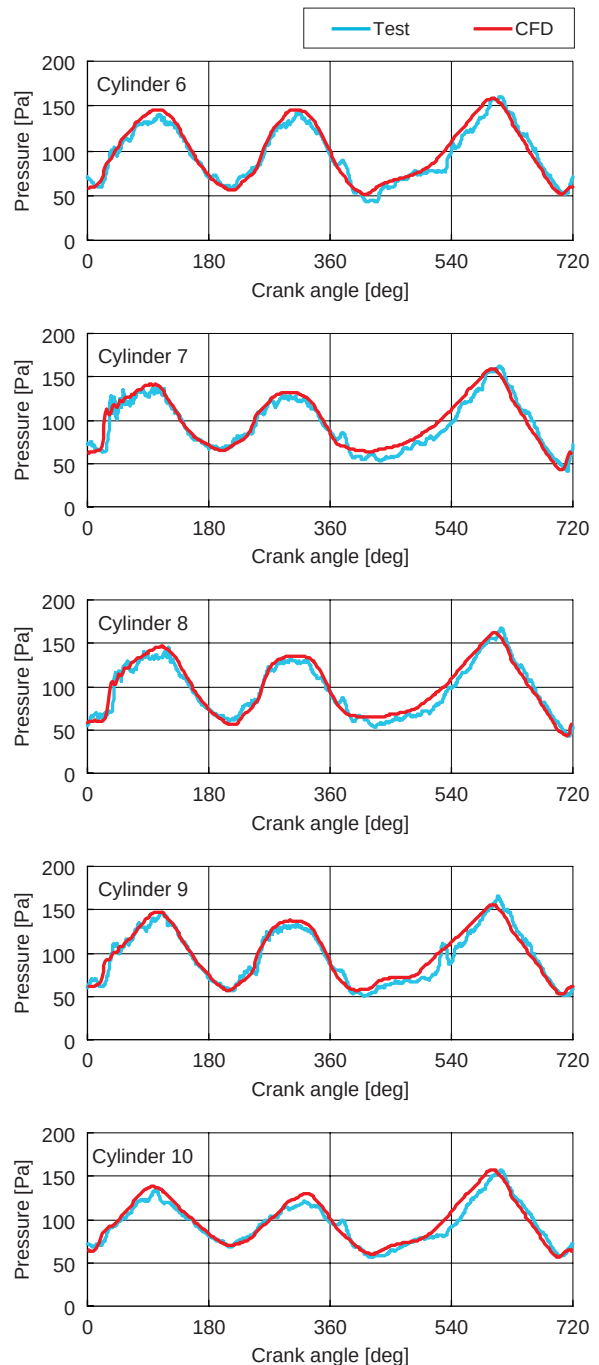


Fig. 2 Intake pressure of V10 engine at 17000 rpm

Table 1 Parameters for WAVE simulation

Parameter	Old value	New value
Flow coefficient at pipe end (inflow)	Auto	0.8
Flow coefficient at pipe end (outflow)	Auto	0.5
Ambient temperature of exhaust side	Atmospheric temperature	400 K
Multiplier of heat transfer of cylinder wall when intake valves are closed	1.0	2.0

特にNo.10シリンダが他の気筒に比べ、違いを生じている。吸気干渉によって、各気筒の体積効率が変化しエンジン出力に直接影響を与えていることが解る。

計算結果はこれらの特徴を精度良く再現しており、内製ソフトが F1 エンジンのエアボックス内吸気干渉を解析可能であることが示された。

車体の空力性能面から要求されるスリムで曲線的なエアボックス形状は、容積減少に起因し、圧力変動の減衰が弱く、体積効率の低下をもたらす特性を有する。しかしながらシミュレーションが実用化されたことにより、車体空力に貢献できるスリムなエアボックス形状を満足しつつ、空気流れを最適化し出力性能を向上が可能となった。

2.2. 排気系

排気系の解析および形状検討には、WAVE を用いた。

V10 エンジンでの例で解説する。排気系は Fig. 3 に示すように、5-1 集合タイプを採用している。WAVE のモデルを Fig. 4 に示す。エアボックス内の吸気干渉の影響を1次元のWAVEでは表現できないため、吸気側は各気筒独立で

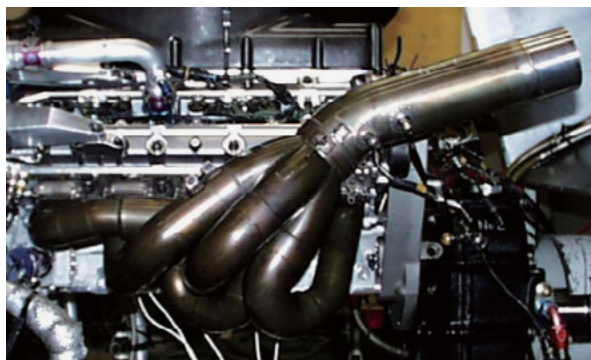


Fig. 3 Exhaust pipe of V10 engine

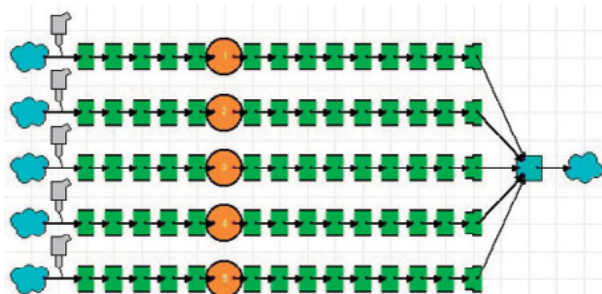


Fig. 4 WAVE model of 5 cylinders for V10 engine

吸気管が大気開放しているモデルとした。排気側は左右バンクで独立しており、WAVE モデルは片バンク 5 気筒のモデルとした。

V10 エンジンの検証結果を Fig. 5 に示す。

排気圧力は、No.10 シリンダの排気バルブシートから約 40 mm 後流の位置で計測した。計算モデルは 5 気筒モデルであるため、No.5 シリンダのデータを採用した。初期の計算結果 (b) は、計測結果 (a) とは異なるものであった。

Table 1 に示すようなシミュレーションで使われる変数を

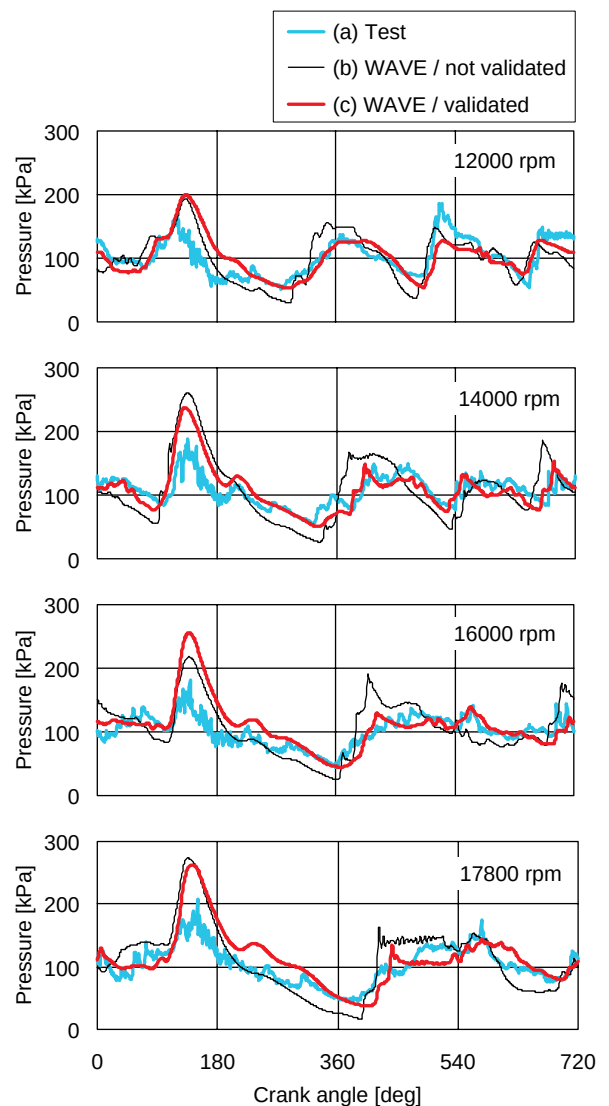


Fig. 5 Exhaust pressure of V10 engine (#10 cylinder)

パラメータスタディーにより修正することにより、Fig. 5の(c)で示す結果となり、計算精度は向上した。重要な修正パラメータは、排気管端部の流量係数である。WAVE の計算では、流量係数の値により排気圧力は大きく変化し、最終的に体積効率や出力の値も変化する。流量係数を正確に見積もることが1次元シミュレーションではもっとも重要であることが明確となった。

また、この結果は、1次元シミュレーションで排気系の解析をおこなうには限界があることも示している。1次元解析では当然ながら各部の圧力損失は見積もれない。また、排気管の形状変更や流速変化等に対する汎用性も低い、などの課題が多くある。1次元シミュレーションで排気管内流れの解析や検討はある程度可能であり、排気系開発へ応用はできる。しかしながら、エンジン仕様の変更にもともなう流量係数の見直しを余儀なくされるなど、計算精度は必ずしも十分ではない。これを解決する手段として、吸気系同様に3次元シミュレーション開発が今後求められる。

3. 筒内挙動

エンジンの性能向上を達成する上で、燃焼状態をより良くすることは欠かせない。加えて、現在のF1エンジンは、高回転とビッグボアのために、量産エンジンと比較し、燃焼期間が長く、燃焼期間の短縮が求められた。

燃焼短縮する上で、筒内のガス流動状態と燃料分布を整えることが必要と考えた。そのためには、筒内ガス流動を予測し、燃料噴霧および混合気分布の形成をシミュレートできることが不可欠である。

3.1. 筒内ガス流動

量産エンジンを対象に検証を実施し、その結果に基づいてF1エンジンへの適用を図ったが、実機との相関が得られなかった。そのため原点に立返り、F1エンジンの筒内流動検証からやり直すこととした。

Fig. 6 に筒内流動計測用装置を示す。可視化エンジン⁽⁶⁾を用いた。レーザには高繰り返し YAG レーザ2台を使用

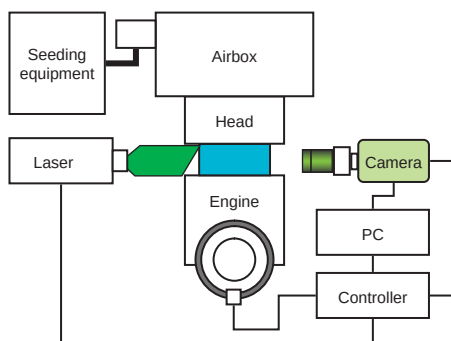


Fig. 6 Schematic of PIV measurement system with optical single cylinder engine

Table 2 Calculation conditions of in-cylinder gas motion

Calculation region	Whole engine
Number of calculation cycle	4 cycles
Mesh density (for combustion chamber)	1 st to 3 rd cycle: 2.0 mm 4 th cycle: 1.5 mm (Half the above size is used near the wall.)

し、波長は YAG の第2高調波 532 nm である。カメラは Vision Research 社製 Phantom V7 を使用し、解像度は 656 × 328 pixel とした。トレーサは中空樹脂を用い、粒径はφ 40 μ m、密度は 36 kg/m³ である。トレーサの粒径と密度から、空気流れの追従性は約 300 Hz の変動に対して 95% の減衰率であると考えられる。計測データは、100サイクルの平均を用いた。

シミュレーションソフトには、3次元流動解析ソフト (VECTIS)を用いた。シミュレーションモデルを Fig. 7 に示す。吸排気脈動を正確に表現するために、吸気チャンバから排気管まで単気筒エンジンすべてを計算対象とした。

Table 2に計算条件を示す。これらの条件は、計算結果が PIV 測定結果を再現できると同時に、吸気脈動、体積効率および筒内乱流エネルギーが収束する条件として選定した。メッシュサイズをサイクル数に応じて変更している理由は、計算精度確保と計算時間短縮を両立するためである。乱流強度以外はメッシュサイズ 2 mm と 1.5 mm で計算結果に差は生じないが、乱流エネルギーについてはメッシュサイズ 2 mm ではサイクル変化を表現できなかった。そのため、3サイクル目までは粗いメッシュで計算をおこなうことで計算時間を節約し、4サイクル目は細かいメッシュを用いて計算精度を確保している。

Fig. 8 には回転数 10000 rpm、モータリングにおける可視化結果とシミュレーション結果を示す。図中のクランク角度は吸入上死点からの角度を示す。計測は図中の右上に示すように吸気バルブ下の断面にておこなわれた。吸気管長 200 mm と 150 mm の二種類の吸気管長を用いて、流動の違いを比較している。左の列が吸気管長200 mm、右側が 150 mm である。

F1 エンジンの筒内流動は、クランク角度 216 deg ATDC



Fig. 7 Simulation model of in-cylinder gas motion

に代表されるように、ボア中心の大きな渦と吸気ポートのアゴ側に形成される渦の二つで構成されている。吸気管長の違いにより、双子渦の構成は変わらないが、ガスの流入速度や渦中心および渦の速度は、吸気管長によって左右されることが示された。すなわち、吸気脈動は体積効率のみならず、燃焼に対しても影響を与えることを意味する。

計算結果は、可視化結果と良く一致したフローパターンを示している。吸排気脈動を表現できる形状と計算条件を選定すれば、10000 rpm の高回転時の筒内流動を正確にシミュレーションできることが示された。

これらの取り組みにより、F1エンジンという超高回転エンジン内のガス流動予測が可能となった。また、シミュレーション技術を構築する上で、現象を把握する計測の重要性

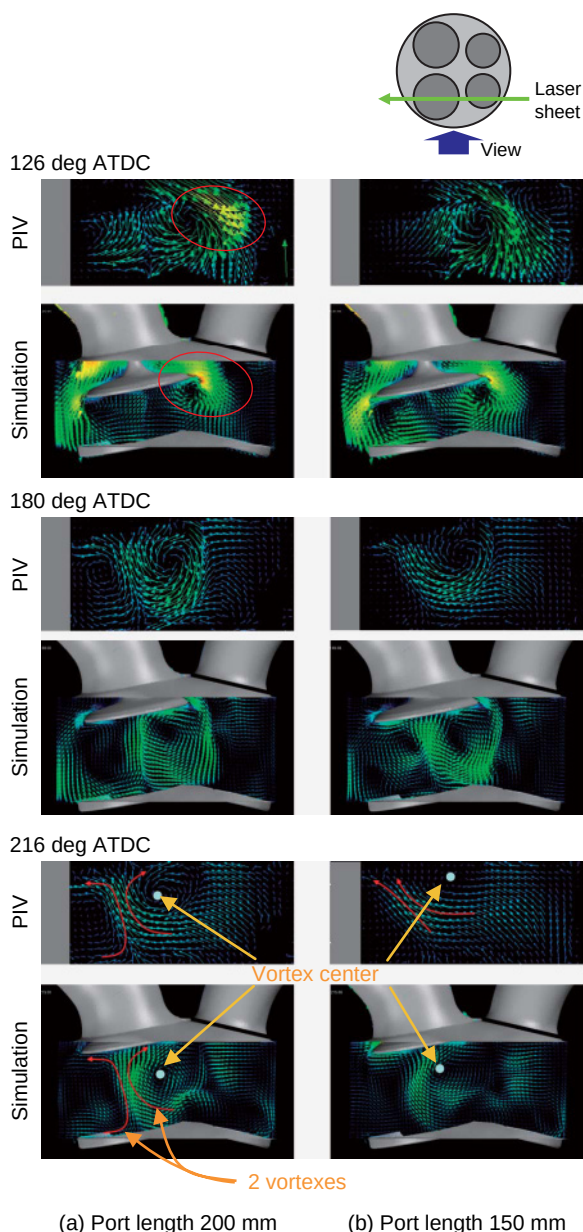


Fig. 8 Comparison of flow vectors between PIV measurement and simulation results at 10000 rpm

を再認識させられた。PIV の計測結果がない状態では、計算サイクル数やメッシュサイズをどの程度に設定すべきか決められない。

課題として、乱流強度が未検証であり、燃焼への影響を含めた解析が望まれる。

3.2. 筒内燃料挙動

筒内における燃料の分布は燃焼の良否を左右する因子の一つであり、それを事前にシミュレーションで予測することは重要である。しかし、筒内の燃料分布の計測には課題があり簡単には計測できない。そのためシミュレーションで解析することは、事象解析を進める上で価値がある。

F1エンジンのインジェクタは、ファンネル端面近傍に取り付けられるのが一般的である。理由は、燃料の蒸発潜熱を利用した吸気冷却による体積効率増加である。このため、吸気管内に向けて噴かれた燃料は、吸気脈動により変動する流動の影響を受けながら筒内へ流入することとなる。したがって、筒内の燃料分布を計算するためには、吸気管内における挙動も含めた計算が必要とされる。

シミュレーション検証については、可視化エンジンを用いて撮影した筒内に流入する液滴噴霧の挙動のデータを用いておこなった。2種類のインジェクタを用いて、噴霧形態の違いをシミュレーションで再現できるかを評価した。一つは、燃圧 1.2 MPa のピントル形式であり、二つ目は、燃圧 10 MPa の6孔プレート式である。それぞれザウタ平均粒径は約 40 μm と約 16 μm の特性を有する。

可視化エンジン⁽⁶⁾を用い、光源はストロボにて噴霧液滴の直接撮影をおこなった。運転条件は、モータリング、10000 rpm、スロットル全開とした。

シミュレーションは、筒内流動計算と同じ VECTIS を用いた。単気筒エンジン全体をモデル化し、噴霧計算を追加した。燃料噴射の計算は、あらかじめインジェクタ単体で噴射した状態を計測結果と合わせこんでおき、その噴霧計算条件を単気筒計算に入力する手法を採用した。

インジェクタ単体での噴霧形状を Fig. 9 に示す。

燃圧 1.2 MPa および 10 MPa の両インジェクタともに、計算が実際の噴霧形状を十分に表現できていることがわかる。

エンジン内の燃料噴霧計算では、筒内の混合気形成が収束するのに5サイクル程度必要であることがわかった。

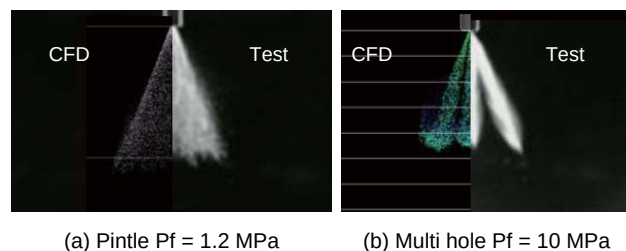


Fig. 9 Fuel spray form

Fig. 10 に 10 MPa インジェクタを用いたエンジン内噴霧計算時の筒内平均 A/F と A/F の分散のサイクル履歴を示す。ファンネル端面から噴射された燃料は、噴射後の 2 サイクル目によく筒内に流入を開始するが、その量は少ない。4 サイクル目から 5 サイクル目にかけて筒内の燃料の挙動が収束しているのが読み取れる。余裕を見て、計算サイクル数は 5 サイクルとして解析をおこなうこととした。

Fig. 11 には筒内噴霧の撮影結果と計算結果を示す。

計測結果は撮影輝度に応じて色付けを施している。計算結果では噴霧液滴がドットで示され、おおまかな噴霧存在位置を破線で表現している。

ピントルの噴霧は粒径が大きく、噴霧の慣性力が大きい。そのため、クランク角度 120 deg で示されるように、吸気バルブから筒内に流入した噴霧は排気バルブの下を通過して、シリンダ壁へ衝突している状態が撮影されている。一方、高圧インジェクタの噴霧は慣性力が小さく、筒内流入後は空気の流れに乗ってシリンダを下向きにピストンへ向かっている。また、吸気バルブから流入する噴霧は排気側のみではなく、反対のポートアゴ側からも流入している。

燃焼室全体に燃料をいきわたらせるには、粒径を小さくして慣性力を小さくすることが効果的といえる。

シミュレーションは、おおむね計測結果を表現できており、事前のインジェクタ単体噴霧の合わせこみをおこなうことで、筒内燃料挙動を予測可能とした。これは、吸気管内を含めたガス流動が正確に解かれていることが要因の一つと考える。

3.3. 燃焼

ガス流動計算、燃料挙動シミュレーションの次のステップとして、それらが燃焼に与える影響を直接評価できるようにするため、また残留ガス量の見積もりなどを予測するため燃焼シミュレーションに着手した。

使用したソフトウェアは VECTIS であるが、燃焼シミュレーションのモジュール⁽⁴⁾は Honda 内製で、VECTIS に組み込まれている。

シミュレーションの評価にあたっては、F1エンジンその

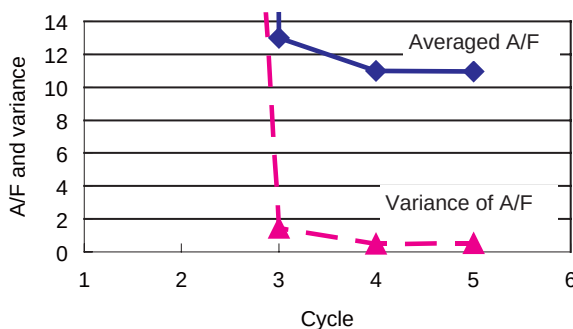


Fig. 10 Simulation convergence of averaged A/F and variance of A/F in cylinder

ものではなく、F1エンジンと同じ諸元を有する単気筒エンジンを対象とした。計算モデルは Fig. 7 に示す筒内流動および燃料噴霧のモデルと同一である。

計算の手順としては、最初にモータリング状態にて筒内流動と燃料挙動の計算を 5 サイクル目の点火直前までおこない、ガス流動と混合気濃度を収束させる。その後、燃焼室形状のモデルのみで燃焼計算に入る。

単気筒エンジンの 15000 rpm と 17750 rpm における筒内圧力の実測値と計算結果を Fig. 12 に示す。使用した燃焼シミュレーションは、燃焼速度を調整する定数を同定する必要があるが、同じ定数にて異なる回転数の筒内圧力を再現することができている。ただし、量産エンジンに使用さ

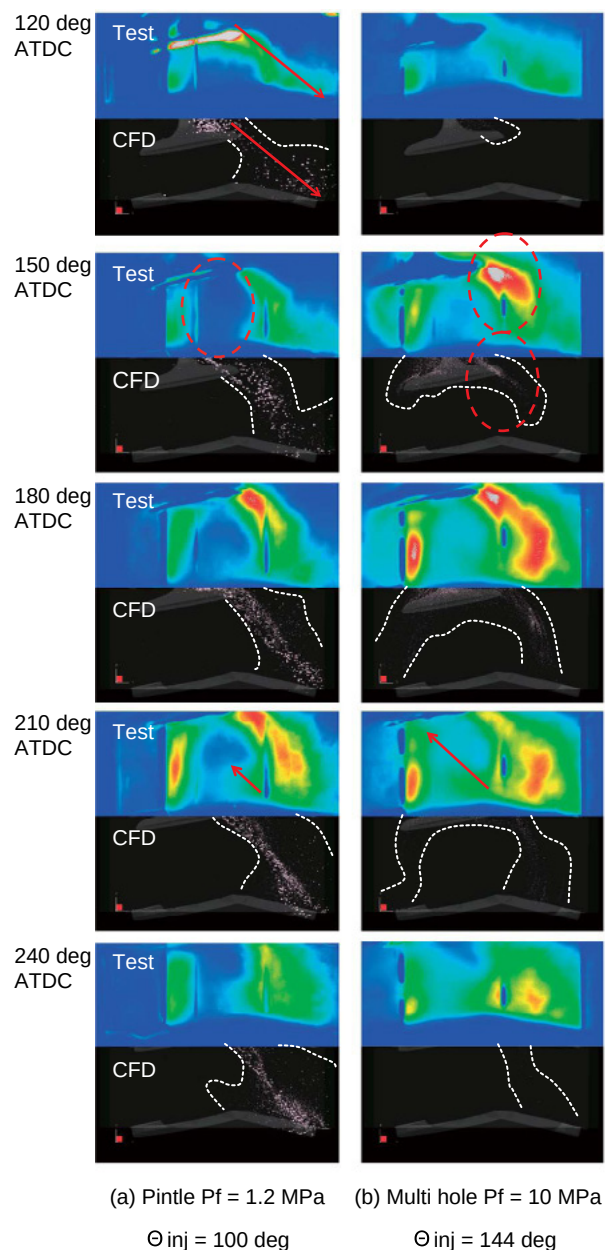


Fig. 11 Comparison of fuel droplets in cylinder between measurement with optical engine and simulation with VECTIS at 10000 rpm

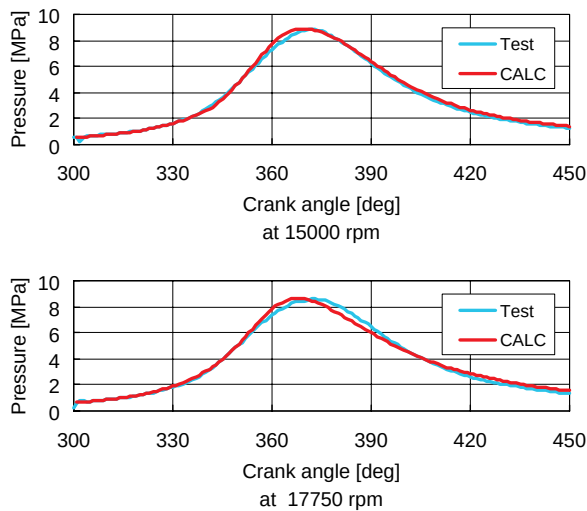


Fig. 12 Comparison of cylinder pressure between measurement and simulation

れている定数とは異なった値となっており、F1エンジン固有の設定が必要であることが確認された。Honda 内製の燃焼シミュレーションが F1 エンジンにも適用できる見通しが立ち、さらに多くの運転条件に対して汎用性を持っているかどうかの確認を実施している段階である。

4. むすび

より高性能な F1 エンジンにより早く開発するため、シミュレーション構築をおこなってきた。

さまざまなモデルが用いられるシミュレーションは、計算対象ごとに検証を確実に実施しないと、その能力を発揮できない。

今後、F1で検証し構築したモデルをベースに地球環境へ適合できるエンジン CFD 技術開発へ取り組んでいきたい。

参考文献

- (1) Takabayashi, T., Hotozuka, Y., Tsushima, H.: The Three-dimensional Pulsation Flow Simulation and Its Application for Engine Intake and Exhaust Systems, 2000 FISITA World Automotive Congress, F2000A091(2000)
- (2) Ishikawa, N., Hiraide, A., Takabayashi, T.: Air/Fuel Distribution Simulation in a Port-Injected Gasoline Lean-Burn Engine, SAE Paper, 2001-01-1230(2001)
- (3) Zhu, G., Reitz, R. D., Xin, J., Takabayashi, T.: Characteristics of Vaporizing Continuous Multi-Component Fuel Sprays in a Port Fuel Injection Gasoline Engine, SAE Paper, 001-01-1231(2001)
- (4) Yang, X., Ohashi, T., Takabayashi, T., Kubota, S., Katsuyama, H., Urata, Y.: Ignition and Combustion

Modeling with G-Equation in Spark Ignition Engines, The 13th International Pacific Conference on Automotive Engineering(2005)

- (5) Ohashi, T., Yang, X., Takabayashi, T., Urata, Y., Kubota, S., Katsuyama, H.: Ignition and Combustion simulation in HCCI Engines, SAE Paper, 2006-01-1522(2006)
- (6) 柳澤長生, 花田尚喜, 濱川丈, 萩山一志, 後藤哲男: F1 エンジンの計測技術, Honda R&D Technical Review, F1 Special (The Third Era Activities), p.96-102

■ 著 者 ■



花田 尚喜



平出 篤志



高橋 真嘉