

高速 PIV を用いた時間フィルタ法による乱流成分の分離手法構築とハイブリッド用エンジン開発への適用

Construction of Turbulent Component Decomposition Method
Using Time Filtering with High-speed PIV and Application to Hybrid Engine Development

大 倉 康 裕¹
Yasuhiro OKURA
佐 藤 誓 祐⁴
Seisuke SATO

瀬 川 誠²
Makoto SEGAWA
浦 田 泰 弘²
Yasuhiro URATA

鬼 丸 裕 美³
Hiromi ONIMARU

要 旨

ABSTRACT

エンジン燃焼促進に寄与する乱流成分を分離する手法として時間フィルタ法を構築した。時間フィルタ法では流れの周波数特性が変化する周波数をカットオフ周波数としており、この周波数は燃焼室や吸気ポートとともにピストン形状により誘起される比較的大きな流れの時間スケールに相当することを確認した。さらに流れの積分時間スケールの逆数をカットオフ周波数とすることにより、カットオフ周波数を一義的に決定できることを明らかにした。吸気切り替えデバイスであるタンブルコントロールバルブを搭載した流動場へ時間フィルタ法を適用した。得られた乱流は実機の燃焼期間と高い相関性があり、分離手法の確かさを確認することができた。時間フィルタ法を市販解析ソフトへ実装し、ハイブリッド用エンジンの開発へ適用した。開発初期仕様に対して吸気ポートとピストンの形状を変更した流動強化仕様では乱流が強化されており、急速燃焼を実現するための流動強化コンセプトを検証することができた。

A time filtering method was constructed as a means of decomposing the turbulent component that contributes to promoting engine combustion. This time filtering method used the frequency at which the frequency characteristic of the in-cylinder flow changes as the cut-off frequency, and this frequency was confirmed to correspond to the time scale of the relatively large in-cylinder flow induced by the combustion chamber, intake port, and piston shapes. It was also clarified that the cut-off frequency can be uniquely determined by using the inverse of the integral time scale of in-cylinder flow as the cut-off frequency. The time filtering method was applied to a flow field equipped with a tumble control valve, which is an intake switching device. The obtained turbulence was highly correlated with the combustion duration of a metal engine, which confirmed the reliability of the decomposition method. The time filtering method was implemented in commercial analysis software and applied to hybrid engine development. Turbulence was enhanced by the in-cylinder flow enhancement specification that changed the intake port and piston shape from the early development specification and verified the in-cylinder flow enhancement concept for achieving rapid combustion.

1. ま え が き

近年、人類の経済活動により排出された二酸化炭素(CO₂)による地球温暖化等の環境問題が社会的に注目されている。2022年度における日本の運輸部門から排出されたCO₂量は全体の約18.5%であり、乗用車はそのうちの

約44.9%を占めている⁽¹⁾。乗用車から排出されるCO₂を削減するため、内燃機関の販売禁止や、バッテリーまたは燃料電池をパワーユニットとする電動化シフトなどが世界規模で進んでいる。一方、バッテリーにはコバルトなどのレアメタルが必要であり、採掘や地金生産の地域が限られていることから安定的な供給に課題があると考えられてい

¹ 本田技研工業株式会社, 博士 (工学)

E-mail: yasuhiko_okura@jp.honda

² 本田技研工業株式会社

³ 先進パワーユニット・エネルギー研究所

⁴ 株式会社ホンダ・レーシング

る⁽²⁾。さらにバッテリー製造や火力発電などで発生されるCO₂排出などを考慮したライフサイクルアセスメントでは、バッテリー電気自動車のCO₂排出量がガソリン車に対して多い場合があることを示唆している⁽³⁾。そういった背景をもとに、自動車用内燃機関ではカーボンニュートラルを目指してガソリン燃焼に適した燃料組成の開発^{(4),(5)}や既存インフラをそのまま活用できるドロップインを想定した再生可能電力由来の合成燃料(Erneuerbarer strom - fuel: e-fuel)の研究⁽⁶⁾が進められている。

火花点火(Spark Ignition: SI)ガソリンエンジンでは熱効率向上を目的とし、リーンバーン燃焼^{(7),(8)}や大量排ガス再循環(Exhaust Gas Recirculation: EGR)⁽⁹⁾による燃焼コンセプトが研究されている。これらの燃焼コンセプトは、空気と燃料による混合気に、余剰となる空気やEGRガスを加えてポンプ損失や熱損失などを低減させるものである。一方、混合気の希薄化や希釈による燃焼速度の低下を補うため、吸気ポート形状の最適化などにより流動強化がおこなわれている⁽¹⁰⁾。しかし、このような手法では中高回転領域で吸気抵抗が増加するため、出力の低下を招くおそれがある。この課題を解決するために、エンジン運転条件に応じたタンブル比増加と吸気抵抗低減の両立を狙った吸気切換えデバイスの研究や開発がおこなわれている^{(11),(12)}。

2. 乱流成分の分離手法

2.1. 従来手法の課題

SIガソリンエンジンの火炎伝播燃焼を促進するためには乱流強化が有効であり、エンジン筒内の乱流評価にはサイクル平均法が従来用いられてきた。サイクル平均法とは、サイクル平均された速度に対する瞬時速度の差を乱流成分と定義するものである⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾。しかし、この手法では平均流成分の比較的低周波なサイクルごとの変動も乱流成分に含まれることが指摘されており、乱流を過大に評価

してしまう可能性がある。他の分離法として時間フィルタでの分離を試みた研究がある。この手法は圧縮上死点付近の速度から定常的時間平均法を用いて1サイクルごとに平均流成分と乱流成分を分離するものである。圧縮上死点付近において各サイクルの短い期間ではガス流動を定常流とみなせると仮定したものであるが、定常流とみなす平均化時間の明確な物理的定義は与えられていない^{(16),(17)}。また、サイクル平均された速度の積分パワースペクトルが90%以上となる周波数をカットオフ周波数とすることが提案されているが、カットオフ周波数には任意性があるとしている^{(18),(19)}。このように、乱流成分の分離に関しては種々の手法が提案されているが、カットオフ周波数の設定にあいまいさが残る。そのため、例えば計測された乱流強度を判断基準に吸気ポート設計をおこなう場合、乱流を過大に評価してしまうことにより再設計が必要になる場合がある。

2.2. 時間フィルタ法

筆者らは高速で計測可能な高速粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry: PIV)による時間分解能の高さを利用した時間フィルタ法を新たな乱流成分の分離法として提案した⁽²⁰⁾。Fig. 1に吸気行程から圧縮行程の速度 u と、流れの周波数特性を示す(速度の方向は後述のFig. 6を参照)。任意サイクルの速度はサイクル平均された速度に対して変動しており、従来手法であるサイクル平均法ではこの変動を乱流成分としていた。時間フィルタ法では1サイクルごとに離散フーリエ変換により周波数特性を求める。それから、サイクル平均した特性の傾きが変化する周波数をカットオフ周波数 f_{c_slope} と定義し、 f_{c_slope} よりも周波数の高い成分を乱流成分として分離する手法である。ここで、 $\hat{u}$, $\hat{v}$ は u , v 速度成分の離散フーリエ係数である。Fig. 2にサイクル平均法と時間フィルタ法で得られた乱流運動エネルギー k の比較を示す。これより、サイクル平均法の乱流運動エネルギー k_c は時間フィルタ法の乱流運動エネ

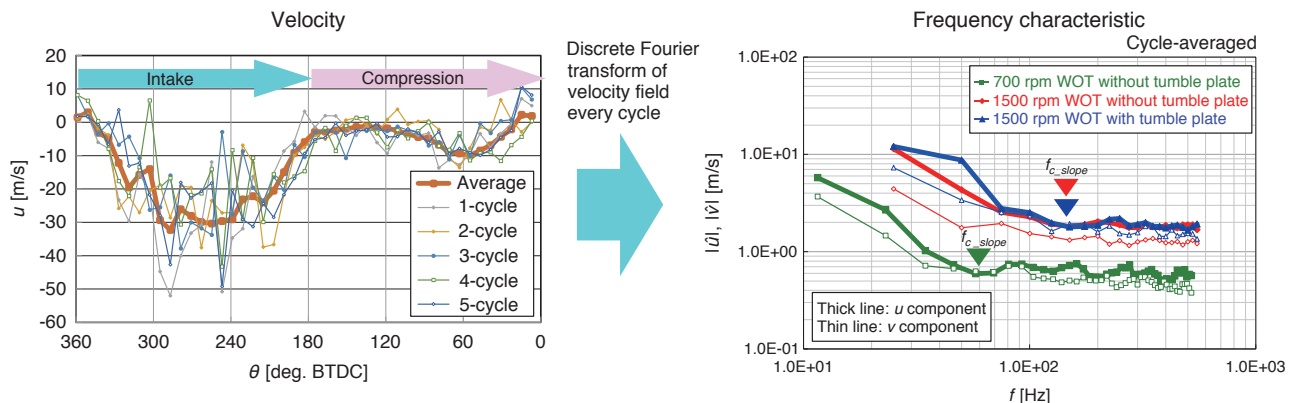


Fig. 1 Velocity and frequency characteristic of in-cylinder flow

ルギ k_f に対して全体的に過大評価されている。特に圧縮行程後半の乱流運動エネルギーは燃焼へ直接影響することから燃焼特性を過大に評価してしまう可能性がある。以上のことから、時間フィルタ法では、カットオフ周波数より高い周波数成分を乱流成分とすることにより、燃焼促進に寄与しないと考えられる平均流成分 (低周波成分) のサイクル変動分を乱流成分に含めないことが特徴である。

本研究ではエンジン筒内流動へ適用可能な乱流解析法の構築を目的とする。最初に時間フィルタ法に必要な時間分解能の影響を確認し、平均流成分と乱流成分を分離するためのカットオフ周波数の設定について検討をおこなう。次に吸気切換えデバイスであるタンブルコントロールバルブ (Tumble Control Valve: TCV) への適用をおこない、得られた乱流と燃焼特性の相関性から乱流解析法の確からしさを検証する。最後に時間フィルタ法を市販の PIV 自動解析ツールへ実装し、ハイブリッド用エンジンの流動強化コンセプトを検証する。本論文ではこれらの内容を報告する。

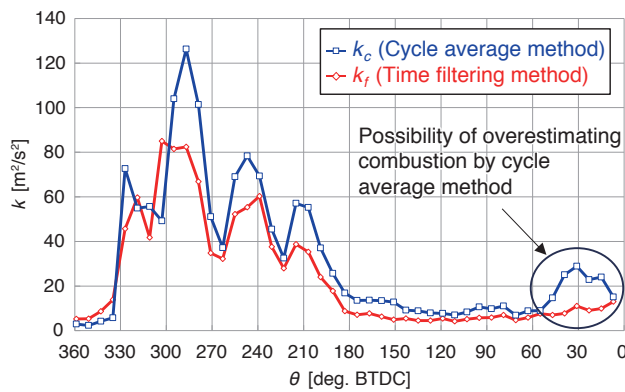


Fig. 2 Comparison of turbulent kinetic energy obtained by time filtering method and cycle average method

3. 時間フィルタ法の構築

3.1. 実験方法

3.1.1. エンジン諸元

エンジンの主要諸元を Table 1 に、エンジンの外観を Fig. 3 にそれぞれ示す。エンジンは株式会社小山ガレージ製の全行程単気筒可視化エンジンで、ボア径は 73 mm、ストロークは 89.4 mm である。吸気と排気バルブはそれぞれ二つずつ備えている。ヘッドとブロックの間に石英製スリーブが設置されており、吸気行程から圧縮行程にかけてシリンダ内の様子を側方から可視化することが可能である。延長ピストンのトップ形状は部品交換により形状変更が可能である。ピストン下方から可視化をおこなう場合に

Table 1 Engine specifications

Engine	Optical single-cylinder engine with quartz sleeve
Bore × Stroke	73 mm × 89.4 mm
Displacement	374 cm³
Valve train	DOHC 4 valves

は、石英製ウィンドウを持つフラット形状へ変更し、延長ピストンの下方に設置された角度 45 度ミラーを介して可視化が可能である。

3.1.2. 計測装置

速度計測に用いた PIV とは、気流中に混入させたトレーサ粒子にレーザなどの照明を当て、カメラにて撮影された画像内の粒子移動量から速度を求めるものである。光源には高繰り返しダブルパルス Nd:YAG レーザ (Lee Laser 社製, LDP-50MQG) を用い、レーザ光の波長は 532 nm である。粒子画像の撮影には高速度 CMOS カメラ (Photron 社製, APX-RS) を用いた。トレーサには、平均粒径 3 μm の SiO_2 (鈴木油脂工業株式会社製, ゴッドボール B-6C) を用い、スロットル直後の吸気チャンバからエンジン内に吸入させた。トレーサ粒子の濃度は、後述する PIV 解析の検査領域 16 × 16 pixel に数個程度撮影できるようトレーサ供給装置の空気圧を調整した。

計測をおこなったクランク角度範囲を Fig. 4 に示す。吸気バルブリフト、筒内圧 P_{cyl} と吸気管内圧力 P_{intake} を参考として図に加えた。計測クランク角度は、吸気上死点 (Top Dead Center: TDC) であるクランク角度 $\theta = 360 \text{ deg}$. BTDC から圧縮 TDC である $\theta = 0 \text{ deg}$. BTDC までとし、これを複数サイクルにわたり計測した。得られた粒子画像は市販の西華デジタルイメージ株式会社製 PIV 解析ソフト Koncerto ver1.0 により解析をおこなった。解析アルゴリズムには再帰的 FFT 相互相関法を用い、検査領域を 64 × 64 pixel から 16 × 16 pixel まで 3 段階に変化させ、オーバーラップを 50% とした。テスト条件は、

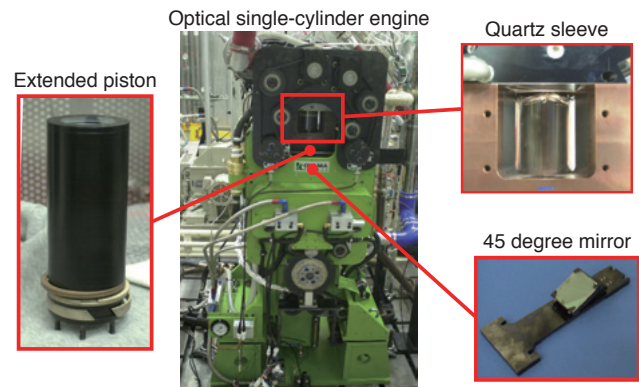


Fig. 3 Appearance of optical single-cylinder engine

$N_e = 700 \text{ rpm}$, 1500 rpm , 2000 rpm の3条件とし、いずれもスロットル全開 (Wide Open Throttle: WOT) とした。

3.2. カットオフ周波数設定法の検討

本節では、時間フィルタ法に必要な時間分解能を明らかにするとともに、カットオフ周波数の設定法や物理的意味についての検討をおこなった。

テストに用いた PIV システムのレイアウトを Fig. 5, 計測と解析領域を Fig. 6 に示す。レーザ光はシリンドリカルレンズにより厚さ 0.5 mm のシート状に引き伸ばされた後、エンジン側面から透明スリーブを通過させてシリンダ内へ照射される。計測位置はボアセンタである。撮影速度を 20 キロフレーム毎秒 (frame per second: fps), 撮影範囲を横 40 mm , 縦 18 mm で、空間解像度 0.077 mm/pixel ($512 \times 256 \text{ pixel}$) にて撮影をおこなった。また、圧縮 TDC 付近まで乱流解析をおこなえるように、シリンダ上部の横 36 mm , 縦 6 mm の範囲を解析領域とした。

3.2.1. 時間フィルタ法とサイクル平均法の比較

吸気行程初期 $\theta = 300.1 \text{ deg}$. BTDC における筒内流動を例に、サイクル平均速度分布と瞬時速度分布の比較を Fig. 7 に示す。これより、Fig. 7(b) に示した任意6サイクルでは瞬時速度分布や渦中心 (赤丸) がサイクルごとに異なっていることが分かる。次に Fig. 7(a) に示したサイクル平均された速度分布は、どのサイクルの速度分布とも異なっている。

時間フィルタ法とサイクル平均法により分離されるエネルギーの違いを Fig. 8(a) に示す。縦軸のエネルギー E は解析点における u 速度成分と v 速度成分の2乗平均値である。時間フィルタ法では1サイクルごとに離散フーリエ変換で周波数特性を求め、サイクル平均値を青色で示した。傾きの変化する周波数 f_{c_slope} は 360 Hz であり、それ以上の高周波

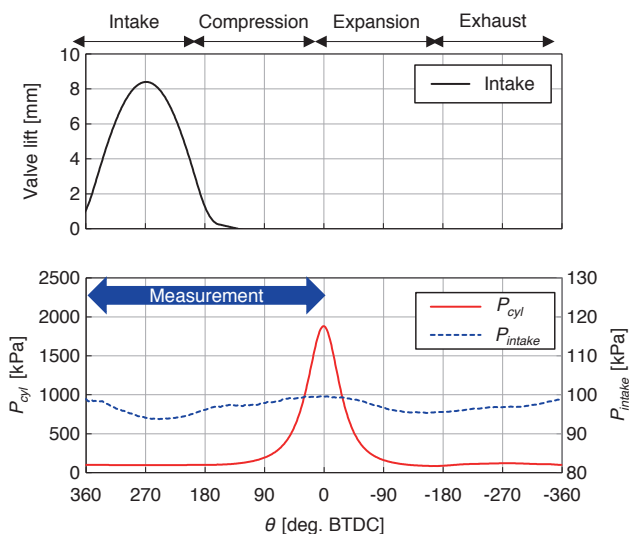


Fig. 4 Measurement range of in-cylinder flow

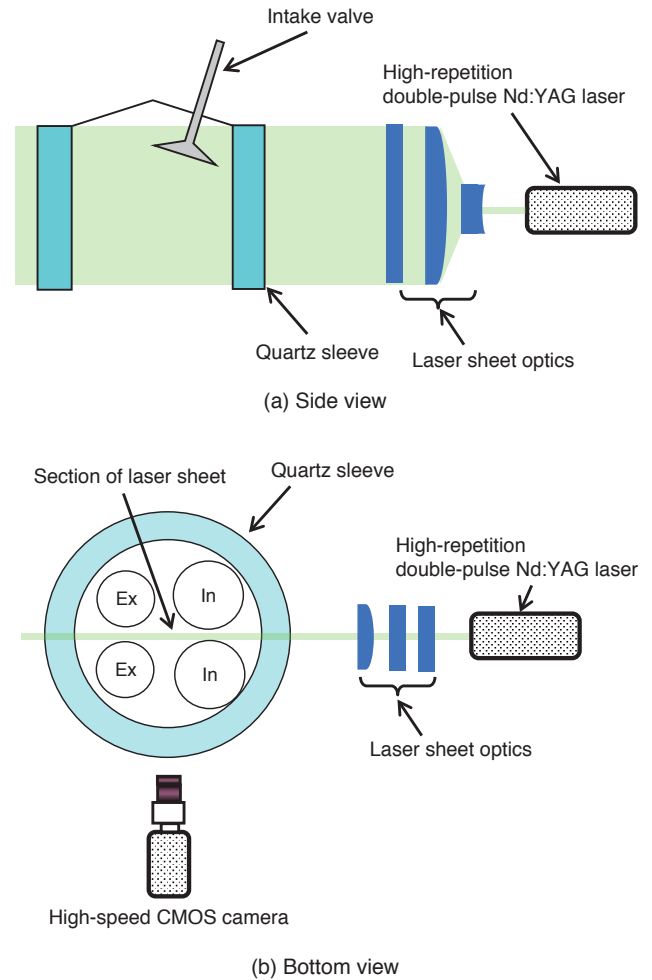


Fig. 5 Layout of PIV system for construction of turbulent analysis method

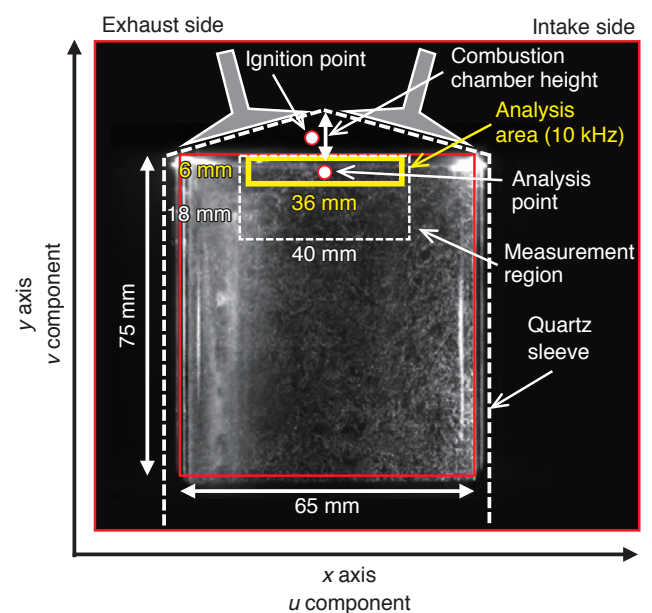


Fig. 6 Measurement region and analysis area for construction of turbulent analysis method

数帯を乱流成分とした (青色で塗られた領域). この乱流成分は Fig. 8(b) で示す平均流と瞬時の速度差の 2 乗平均値に相当する. サイクル平均法の周波数特性はサイクル平均した速度から離散フーリエ変換により周波数特性を求めて Fig. 8(a) へ赤色の実線で示した. サイクル平均法の乱流成分は時間フィルタ法とサイクル平均法のスペクトルにより囲まれた赤色の領域であり, 黒点線で囲まれた領域が時間フィルタ法に対して過大に評価されている. この過大評価された領域は Fig. 8(b) の時間フィルタ法とサイクル平均法の速度差の 2 乗平均値, すなわち平均流成分のサイクル変動分である.

3.2.2. 時間分解能が及ぼす影響

時間フィルタ法で重要になると考えられる時間分解能について解析をおこなった. 時間分解能が解析点における u 速度成分のエネルギースペクトル E_u へ及ぼす影響を Fig. 9 へ示す. 時間分解能は同一計測データをクランク角度方向に間引くことにより疑似的に減少させた. これより, 時間分解能が 10 kHz から 2.5 kHz 程度の間であれば傾きに変化する周波数に大きな影響は見られなかった. ここで, 本解析では離散フーリエ変換をおこなっていることから, 時間分解能を減少させるとエイリアシングにより真のスペクトルと時間分解能の 1/2 の周波数であるナイキスト周波数

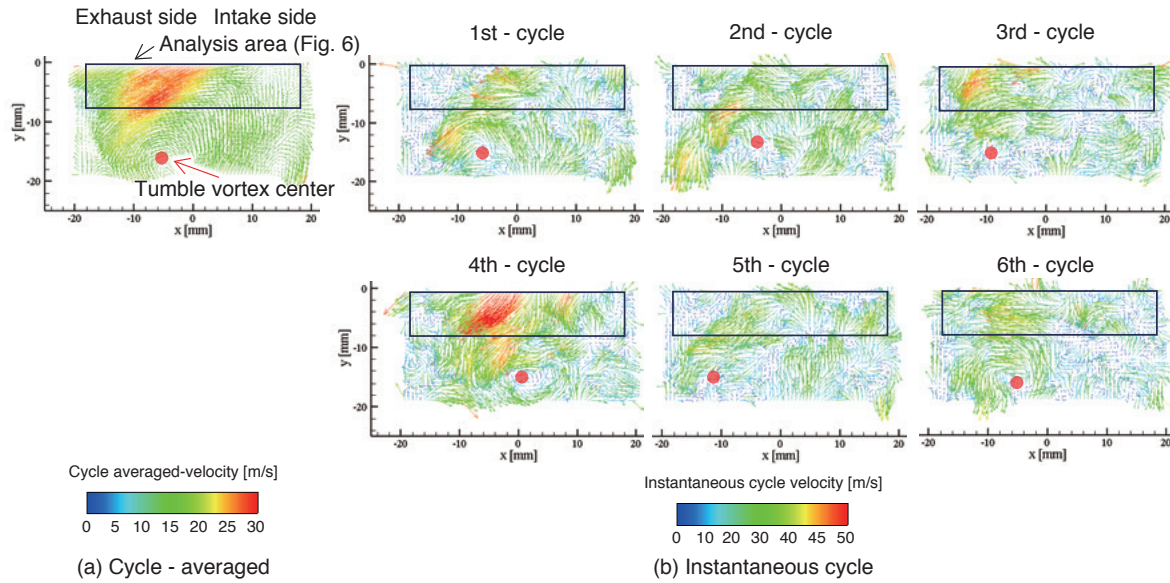


Fig. 7 Comparison of cycle-averaged in-cylinder flow and instantaneous in-cylinder flow for 6 cycles in measurement region, $Ne = 1500$ rpm WOT at $\theta = 300.1$ deg. BTDC

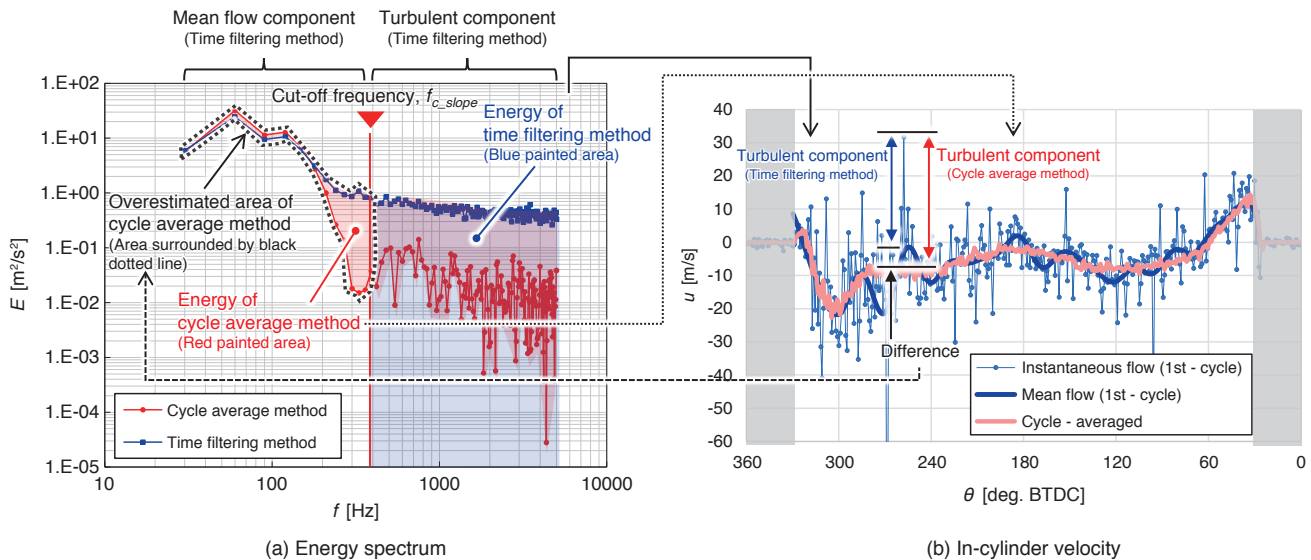


Fig. 8 Comparison of energy obtained by time filtering method and cycle average method at analysis point, $Ne = 1500$ rpm WOT

f_N の整数倍だけ異なった周波数が同一視される。すなわち、真のスペクトルに f_N 間隔ごとのスペクトルが折り重なってしまい、離散化にともなう誤差を生じる⁽²¹⁾。本流動場において、時間分解能が10 kHzから5 kHzへ減少した場合でも360 Hz以上のエネルギーの減少は約5%であることから、時間分解能が5 kHz程度であればエイリアシングが f_{c_slope} へ及ぼす影響は小さいと考える。

3.2.3. カットオフ周波数の設定法

本項では、流れの積分時間スケール τ についての考察をおこない、 f_{c_slope} の物理的な意味についての考察とカットオフ周波数の設定について検討をおこなった。

解析領域内の空間平均された流れの積分時間スケールとピストン速度の特性時間 τ_p の比較をFig. 10に示す。 τ_u は瞬時速度 u から式(1)を用いて自己相関係数 R_{uu} を計算した後、式(2)を用いて自己相関係数 R_{uu} が0となるまで積分して求めた⁽²²⁾。 v 速度成分の流れの積分時間スケール τ_v も同様に計算をおこなった。

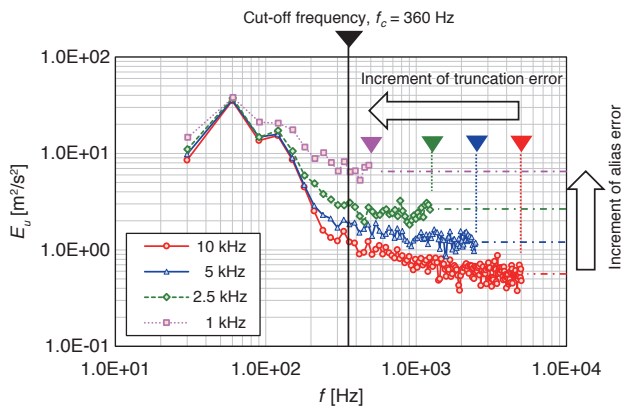


Fig. 9 Effect of time resolution on cycle-averaged in-cylinder energy spectrum at analysis point, Ne = 1500 rpm WOT

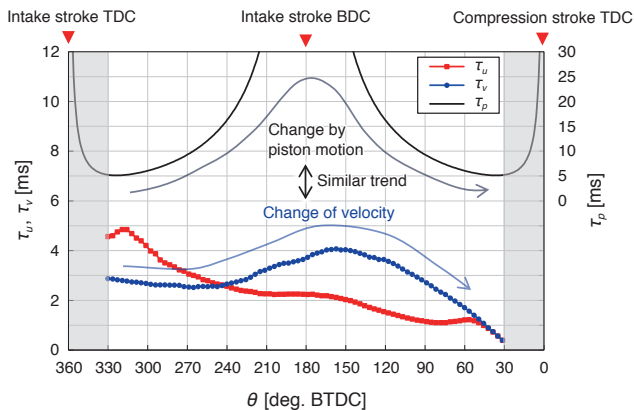


Fig. 10 Comparison of spatial-averaged integral time scale of in-cylinder flow, τ_u , τ_v in analysis area and time scale of piston speed, τ_p . Test condition is Ne = 1500 rpm WOT.

$$R_{uu}(\Delta\theta) = \frac{1}{u(\theta)^2} \sum u(\theta)u(\theta + \Delta\theta) \quad (1)$$

$$\tau_u = \sum R_{uu}(\Delta\theta) \quad (2)$$

τ_p はボア中心におけるペントループ燃焼室頂点からピストントップまでの燃焼室高さ h_p を瞬時ピストン速度 u_p で除した値と定義した。TDCの h_p は15 mmである。これより、流れの積分時間スケールで、特に τ_v のクランク角度に対する変化は τ_p と近い傾向を示している。この関係性は、流れの積分時間スケールが燃焼室や吸気ポート形状とともにピストン速度によって誘起される比較的大きなスケールの流れに相当するものと考えられる。吸気行程中盤である $\theta = 270$ deg. BTDCの τ_u と τ_v の平均を流れの積分時間スケール τ とし、逆数 $f_{c_ \theta=270}$ と f_{c_slope} の比較をFig. 11に示す。図には第4章のデータもプロットした。これより、 $f_{c_ \theta=270}$ と f_{c_slope} の相関係数は第3章で0.936、第4章を加えた全体で0.918であり、高い相関が見られた。

以上のことから、流れの周波数特性の傾きが変化する周波数 f_{c_slope} は、流れの積分時間スケール τ と相関があり、燃焼室、吸気ポート形状やピストン速度によって誘起される比較的大きなスケールの流れに相当すると考えられる。また、カットオフ周波数は流れの積分時間スケールの逆数 $f_{c_ \theta=270}$ とすることで、一義的に決定することが可能となった。以後、特別に断りがない場合には $f_{c_ \theta=270}$ をカットオフ周波数 f_c として用いることとする。

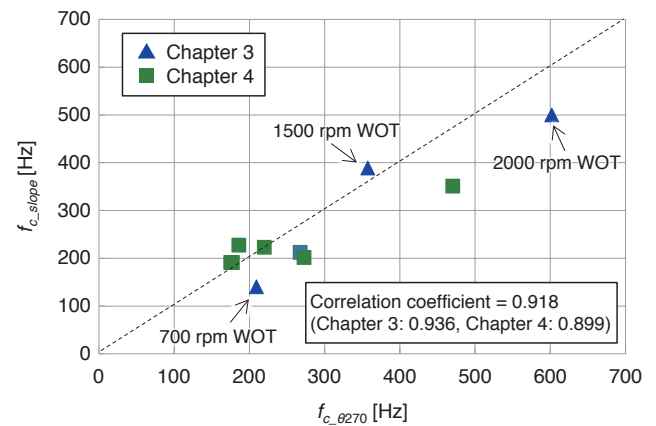


Fig. 11 Relationship between cut-off frequency at changed slope of in-cylinder flow frequency characteristic f_{c_slope} and cut-off frequency obtained from autocorrelation $f_{c_ \theta=270}$

4. 時間フィルタ法の確からしさ検証

本章では吸気切り替えデバイスTCVへ時間フィルタ法を適用し、得られた乱流と燃焼特性の相関性から乱流成

Table 2 Specifications of tumble control valve

Specifications	Flow part	G_{plate} [mm]	L_{plate} [mm]
UF 2 mm	Upper	2	93
UF 25 mm	Upper	25	70
UF 50 mm	Upper	50	45
LF 2 mm	Lower	2	93
LF 25 mm	Lower	25	70
LF 50 mm	Lower	50	45

分の分離手法である時間フィルタ法の確からしさを検証した。

TCV の仕様を Table 2, 模式図を Fig. 12 に示す。フラップにより隔壁の下側通路を閉じた場合、空気は隔壁の上側通路を流れることから、この仕様を上流とし、Upper Flow (UF) と表記する。逆にフラップにより隔壁の上側通路を閉じた場合、空気は隔壁の下側通路を流れることから下流とし、Lower Flow (LF) と表記する。隔壁長さ L_{plate} が長い程、隔壁の先端位置が吸気バルブシステムに近づき、燃焼室へ流入する流れの指向性が高くなると考えられる。そこで隔壁先端から吸気バルブシステムまでの距離 G_{plate} を隔壁のパラメータとして用い、2 mm, 25 mm, 50 mm の 3 仕様とした。以後、上流し、 $G_{plate} = 2$ mm の場合、UF 2 mm とし、フラップと隔壁の仕様をまとめて表記する。

計測範囲と解析領域を Fig. 13 に示す。レーザシート光は 45 度ミラーにより上方へ反射させ、ピストンウィンドウを通過させてエンジン下側から燃焼室内へ照射した。計測位置はボアセンタで、計測範囲は燃焼室内の横 46.6 mm, 縦 24 mm である。点火プラグによる着火から燃焼初期の乱流を解析するため、正規の点火プラグを取り外し、外側電極や中心電極をカットしたダミープラグを取り付けた。点火プラグの着火点 (Ignition point) は吸気行程中に吸気バルブにより隠されるため、解析には排気側へ 4.6 mm オフセットした位置 (Analysis point) を用いた。また、空間平均をおこなう場合、吸気バルブがリフトしても解析結果へ影響を及ぼさない横 8 mm, 縦 4 mm の範囲 (Analysis area)

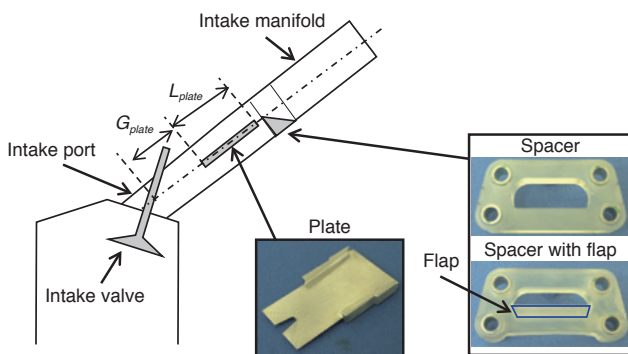


Fig. 12 Schematic diagram of tumble control valve

を対象とした。テスト条件は、 $Ne = 1500$ rpm WOT とした。

4.1. TCV の乱流解析

TCV 無し、TCV UF 2 mm (上流し) と TCV LF 2 mm (下流し) の場合の平均流成分と乱流運動エネルギー k_f の空間分布を Fig. 14 に示す。カットオフ周波数 f_c は、それぞれ 267 Hz, 219 Hz, 470 Hz である。乱流運動エネルギー k_f は式 (3) より求めた。

$$k_f = \frac{1}{2} (u_f'^2 + v_f'^2) \quad (3)$$

ここで、 u_f' と v_f' は時間フィルタ法により分離された乱流速度成分である。これより、TCV UF 2 mm の平均流速度は TCV 無しの場合に対して速く、渦中心は燃焼室中心付近に存在する。TCV LF 2 mm の平均流速度は、TCV 無しの場合と比べておおむね同じ値を示し、分布にも大きな差は見られない。TCV UF 2 mm の k_f は、TCV 無しの場合に対して高い値を示しており、タンブル流の渦中心がある燃焼室中心付近の k_f が特に高い値を示す。一方、TCV LF 2 mm の k_f は、TCV 無しの場合とおおむね同じ値を示し、分布にも差は見られない。この理由として、Fig. 14 の模式図に示したように吸気ポート下側から筒内へ流入した流れは吸気バルブにより排気側へ流され、タンブル流の強化に寄与しないためである。

4.2. 乱流火炎構造の推定

TCV を装着した際の火炎形態を乱流予混合燃焼ダイアグラム⁽²³⁾により予測した。圧縮 TDC 付近である $\theta = 0.4$ deg. BTDC の結果を Fig. 15 に示す。縦軸の乱流強度 u' は可視化エンジンでモータリング時に計測された乱流運動エネルギー k_f の平方根とした。層流燃焼速度 S_L は、流体の物性を当量比 $\phi = 1.0$, EGR 率 0% の混合気と仮定

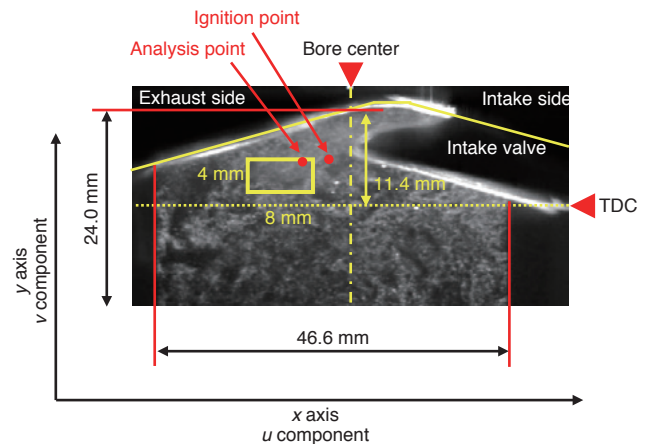


Fig. 13 Measurement region and analysis area for turbulent analysis with tumble control valve

し、素反応計算によりもとめた⁽²⁴⁾。燃料組成は疑似ガソリン (Primary Reference Fuel: PRF) で、条件は筒内圧 $P_{cyl} = 1270$ kPa, 筒内ガス温度 $T_{cyl} = 532$ K である。横軸の乱れの積分長さスケール l と火炎帯厚さ l_F は、それぞれ式 (4)、式 (5) より求めた。

$$l = u' \times \tau_l \quad (4)$$

$$l_F = v_F / S_L \quad (5)$$

ここで、 τ_l は乱流強度 u' の積分時間スケール、 v_F は混合気の動粘性係数であり、燃料組成は物性推算法⁽²⁵⁾ より求めた。

これより、TCV 無しと TCV UF 2 mm の場合の火炎形態は、いずれも corrugated flamelets に分類された。TCV UF 2 mm の u' と l は、TCV 無しに対して大きいことからやや右上の位置にプロットされる。corrugated flamelets の領域では火炎面にしわが形成されているが火炎の内部構造にまでは乱流が影響を及ぼさないと考えられており、wrinkled flamelets 領域より火炎面のしわが強調されている⁽²⁶⁾。すなわち、乱れが強化され、火炎表面積の増加により燃焼促進を得られることが期待される。さらなる熱効率向上を見据え、リーンバーンや大量 EGR における

乱流火炎形態についても計算をおこなった。当量比 $\phi = 1.0$ から $\phi = 0.5$ へ混合気を希薄にすると S_L が約 42.4 cm/s から 11.5 cm/s へ減少し、thin reaction zones へと火炎形態が変化する。 $\phi = 1.0$ にて EGR 率を 35% へ増加すると S_L が 0.35 cm/s へ減少し、火炎形態は broken reaction zones へ移動する。これらの火炎形態では乱れにより局所的に火炎

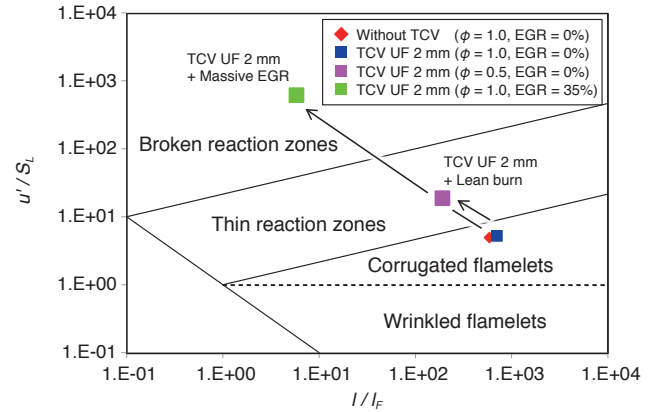


Fig. 15 Effect of enhancement of in-cylinder flow by TCV in analysis area, $Ne = 1500$ rpm WOT at $\theta = 0.4$ deg. BTDC

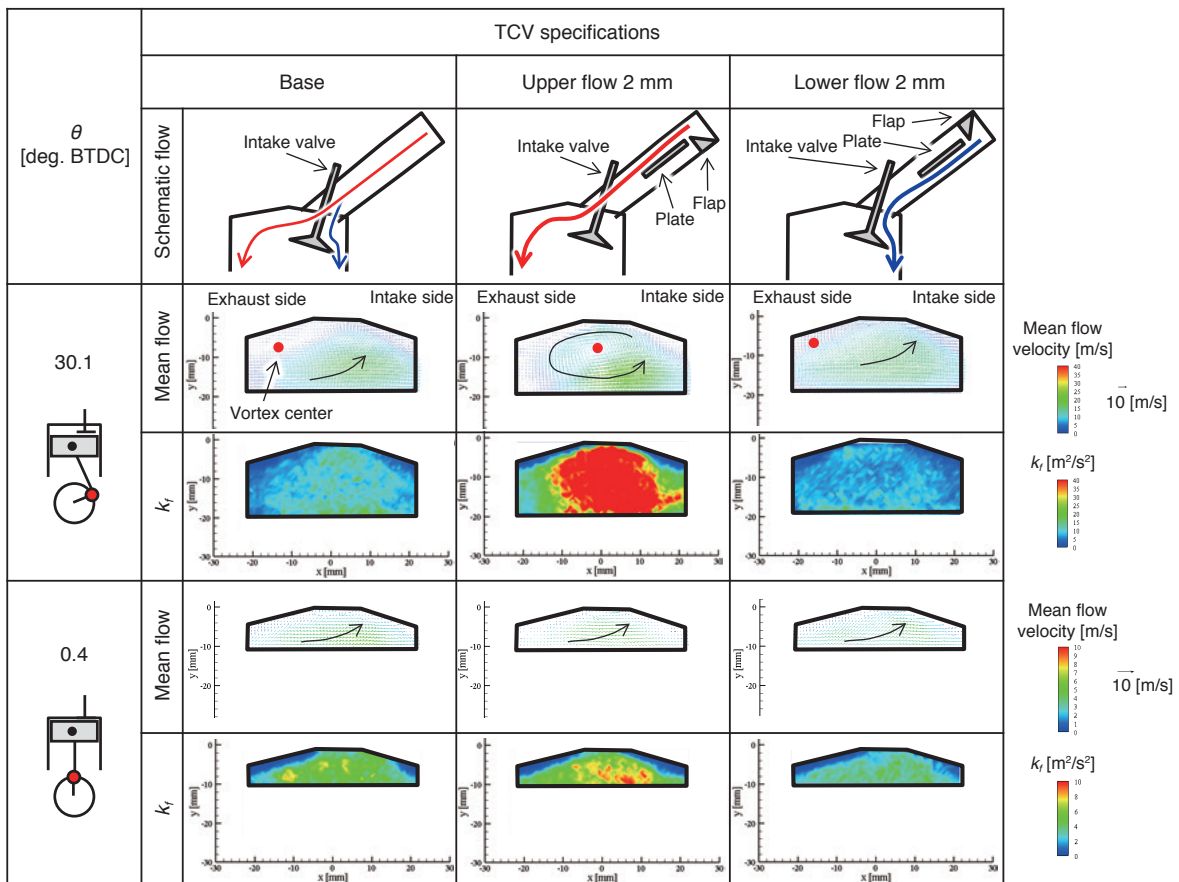


Fig. 14 Distribution of mean flow velocity and turbulent kinetic energy k_t obtained by time filtering method, $Ne = 1500$ rpm WOT in without TCV, upper flow 2 mm and lower flow 2 mm

の消炎が起こると考えられている。すなわち、このような火炎形態となる場合には単に流動強化をおこなうだけでは燃焼を促進できない可能性がある。したがって、例えば点火プラグ周りの平均流のサイクル変動を低減するなどして着火性を向上させるなどの追加対策が必要となる。

4.3. 乱流と燃焼特性の関係

同一諸元を持つ実機単気筒エンジン（以下、実機エンジン）にて TCV が燃焼へ及ぼす影響を確認した。可視化エンジンのモータリング時に得られた乱流運動エネルギー k_f と実機エンジンのファイアリング時に得られた燃焼期間の関係を Fig. 16 に示す。実機エンジンの負荷は圧縮行程から膨張行程の図示平均有効圧力 (Indicated Mean Effective Pressure High-loop: IMEP.H) = 1000 kPa である。点火から質量燃焼割合 (Mass Fraction Burnt: MFB) が 10% となるまでの期間を初期燃焼期間 θ_{ig} -MFB10 と定義し、 k_f は点火時期 θ_{ig} の時の値を用いた。これより、TCV により k_f を増加させると、それにともない θ_{ig} -MFB10 は減少する。TCV 無しに対して、効果の大きい TCV 仕様は UF 2 mm と UF 25 mm である。一方、 θ_{ig} -MFB10 が増加した仕様は LF 2 mm であった。乱流運動エネルギー k_f と θ_{ig} -MFB10 の相関係数は 0.875 であり、時間フィルタ法で得られた k_f は燃焼と相関性が見られることから乱流解析法の確からしさを確認することができた。

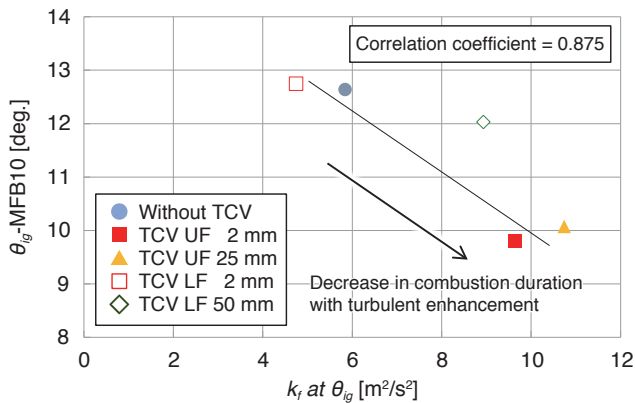


Fig. 16 Relationship between combustion duration on metal single-cylinder engine and turbulent kinetic energy, k_f obtained by time filtering method at ignition timing on optical single-cylinder engine, $N_e = 1500$ rpm IMEP.H = 1000 kPa

5. ハイブリッド用エンジン開発への適用

5.1. 解析ツールの標準化

構築した時間フィルタ法を誰でも簡単に活用できるように、フローテックリサーチ社製の市販 PIV 自動解析ツール FtrPIV-Cruise へ筒内流動解析機能として実装をおこ

なった。本ツールの特徴として、PIV の計測設定、PIV 解析、統計処理 (乱流解析など) とレポート作成までの処理を同一のツールにて一連でおこなうことが可能である⁽²⁷⁾。グラフィカルユーザーインターフェイス (Graphical User Interface: GUI) により時間フィルタ法を選択するだけで、乱流解析と WEB ブラウザ形式のレポート作成を自動でおこなう機能を追加した。GUI による簡便な設定と自動化により、乱流解析とレポート作成に要していた工数を約 30% 低減することが可能となり、エンジン開発プロジェクトへタイムリーに検証結果をフィードバックできるようになった。

5.2. 流動強化コンセプトの検証

エンジン仕様は 2 モータハイブリッド用直列 4 気筒直噴エンジンで、排気量は 2.0 L である。クラストップレベルの燃費を達成するため、本エンジンの圧縮比は 13.9 とし、Cooled EGR システムを搭載する。急速燃焼を実現するため、吸気ポートによりタンブル流が強化され、ピストンによりスムーズに上昇流へ変換するボウルイン型のピストンが採用されている⁽²⁸⁾。

流動強化のため吸気ポートやピストン形状を数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics: CFD) にて検討した。この流動強化コンセプトを検証するため、開発初期仕様と流動強化を目的とした流動強化仕様の筒内流動解析を PIV にておこなった。 $N_e = 2000$ rpm WOT にて 60 サイクル計測をおこない、時間分解能は 3 deg. BTDC (撮影速度 8 kfps) である。CFD 解析には市販の Ricardo 社製 3 次元汎用流体解析ソフト VECTIS を使い、乱流モデルには標準 $k-\varepsilon$ モデルを適用した。開発初期と流動強化仕様のサイクル平均された筒内流動比較を Fig. 17 に示す。 $\theta = 180$ deg. BTDC において PIV により得られた流動強化仕様の速度は開発初期仕様に対して増加しており、吸気ポートから流入した流れがスムーズに上昇流へ変換されている。圧縮行程後半である $\theta = 30$ deg. BTDC のにおいても PIV により得られた流動強化仕様の速度が速く、これらは CFD の解析結果と同様の傾向であった。

PIV により得られた開発初期仕様と流動強化仕様の乱流運動エネルギー k_f の比較を Fig. 18 に示す。開発初期仕様に対して流動強化仕様の k_f は $\theta = 60$ deg. BTDC 以降で大きい値を示す。 $\theta = 30$ deg. BTDC の k_f 分布では、開発初期仕様に対して流動強化仕様の k_f は燃焼室中心付近で高い傾向である。

時間フィルタ法とサイクル平均法の乱流運動エネルギー k_f の比較を Fig. 19 に示す。時間フィルタ法では開発初期仕様から流動強化仕様へ変更することにより k_f は約 21.9% 増加しているが、サイクル平均法では 24.9% 増加しており、サイクル平均法の k_f は約 3% 大きく見積もられている。

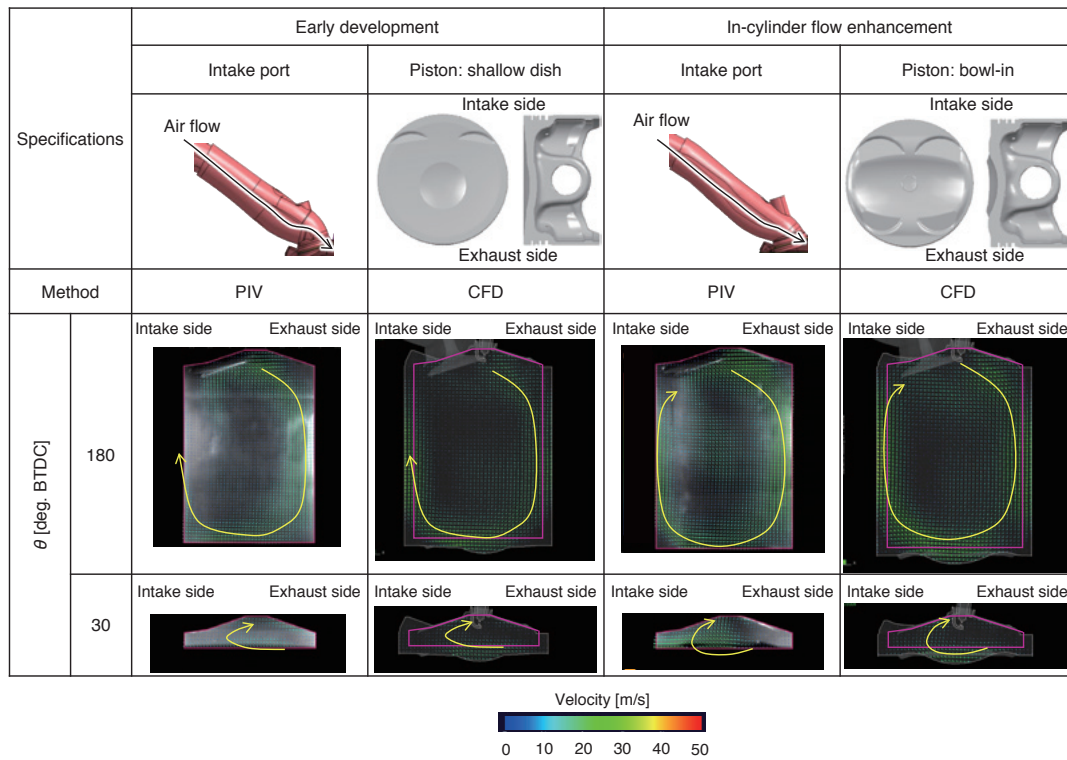


Fig. 17 Comparison of in-cylinder flow with early development and in-cylinder flow enhancement specification obtained by PIV and CFD, $Ne = 2000$ rpm WOT

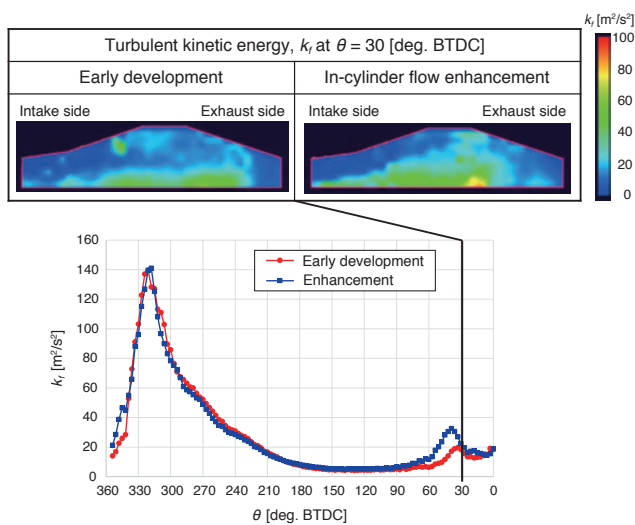


Fig. 18 Comparison of turbulent kinetic energy k_t with early development and in-cylinder flow enhancement specification obtained by PIV, $Ne = 2000$ rpm WOT

6. まとめ

高速 PIV による時間分解能の高さを利用した時間フィルタ法を新たな乱流分離法として提案し、エンジン筒内流動への適用を検討した。さらに市販の PIV 自動解析ツール

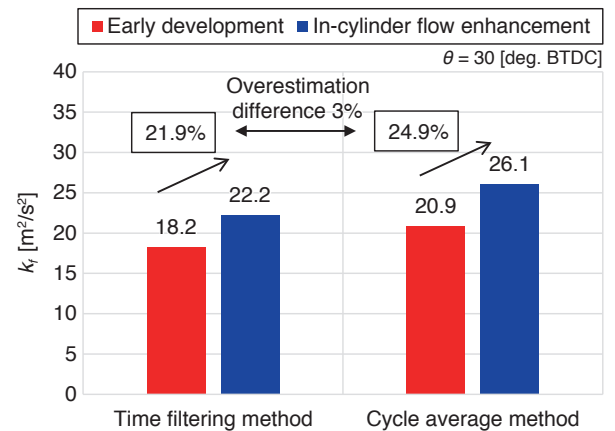


Fig. 19 Effect of time filtering method, $Ne = 2000$ rpm WOT at $\theta = 30$ deg. BTDC

へ時間フィルタ法を実装し、ハイブリッド用エンジン開発へ適用することにより以下の結論を得た。

- (1) 時間分解能を疑似的に変化させ、乱流運動エネルギーの特性を検証した。本流動場において平均流成分と乱流成分を分離するためのカットオフ周波数は 5 kHz 以上の時間分解能があれば大きな影響を受けないことがわかった。
- (2) 流れの周波数特性で傾きの変化する周波数は燃焼室や吸気ポート形状とともにピストン速度によって誘起さ

れる比較的大きなスケールの流れに相当するものであることがわかった。さらに流れの積分時間スケールの逆数をカットオフ周波数とすることで一義的にカットオフ周波数を決定することが可能となった。

- (3) 吸気切換えデバイスであるタンブルコントロールバルブの乱流特性を時間フィルタ法にて解析したところ、火炎形態は corrugated flamelets に分類され、乱流により燃焼促進効果をえられることが確認された。乱流運動エネルギーと実機燃焼期間との間に良い相関が見られたことから、乱流解析法の確からしさを確認することができた。
- (4) 時間フィルタ法を市販 PIV 自動解析ツールへ実装し、誰でも簡単に活用できるように解析ツールの標準化をおこなった。これをハイブリッド用エンジン開発へ適用し、急速燃焼を実現するための流動強化コンセプトを検証することができた。

参考文献

- (1) 国土交通省: 運輸部門における二酸化炭素排出量, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html, (参照 2024/07/17)
- (2) 経済産業省: 自動車新時代戦略会議 中間整理, https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/jidosha_shinjidai/pdf/20180831_01.pdf, (2024/07/23)
- (3) 木村修二, 松浦浩海, 菊池隆司, 土屋賢次: 内燃機関搭載車両におけるカーボンニュートラルに向けた AICE の技術シナリオの検討, 自動車技術会 2021 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No. 121, 20216181, (2021)
- (4) 松原直義, 北野康司, 横尾望, 中田浩一, 小島健, 野村守, 藤本尚則, 三好明: 自動車の早期低炭素化を実現する内燃機関/燃料組成の開発, 自動車技術会 2023 年春季大会学術講演会講演予稿集, No. 20, 20235090, (2023)
- (5) 金子和樹, 松原直義, 北野康司, 横尾望, 中田浩一, 安武優希, 内木武虎, 小島健, 渡邊学: スーパーリーンバーンエンジンにおける燃料組成が熱効率に及ぼす影響, 自動車技術会 2023 年春季大会学術講演会講演予稿集, No. 20, 20235091, (2023)
- (6) 中山智裕: e-fuel に関する技術調査と実証試験, 日本機械学会誌, Vol. 27, No. 1266, p. 40-43, (2024), doi: 10.1299/jsmemag.127.1266_40
- (7) 木村幸四郎, 坂井洋志, 大村哲生, 高橋大志: カーボンニュートラル実現に向けた熱効率 50% スーパーリーンバーンエンジンの開発, 自動車技術会 2023 年春季大会学術講演会講演予稿集, No. 32, 20235145, (2023)
- (8) Hanabusa, H., Kondo, T., Hashimoto, K., Sono, H., Furutani, M.: Study on Homogeneous Lean Charge Spark Ignition Combustion, SAE Technical paper 2013-01-2562, (2013), doi: 10.4271/2013-01-2562
- (9) 田岸龍太郎, 池谷健一郎, 高沢正信, 山田健人: ガソリンエンジンの熱効率追求, 自動車技術会 2014 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No. 121, 20145712, (2014)
- (10) 高橋大志, 中田浩一, 葭原泰司, 太田行紀, 西浦博之: HV 車用エンジンの熱効率 40% 実現に向けた燃焼開発, 自動車技術会 2015 年春季大会学術講演会講演予稿集, No. 1-15S, p. 15-20, 20155004, (2015)
- (11) 能川真一郎, 中田浩一, 神田睦美: 過給リーンバーンエンジンによる熱効率向上, 第 21 回内燃機関シンポジウム講演論文集, A7-4, p. 533-538, (2010)
- (12) Heiduk, T., Kuhn, M., Stichlmeier, M., Unselt, F.: The new 1.8l TFSI Engine from Audi Part 2: Mixture Formation, Combustion Method and Turbocharging, MTZ, Vol. 72, p. 58-64, (2011), doi: 10.1365/s38313-011-0078-1
- (13) 城戸裕之, 和栗雄太郎, 村瀬英一, 藤本勝也, 王智民, 富田攻: 圧縮行程中でのシリンダ内乱れの空間尺度の変化, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 50, No. 452, p. 1114-1121, (1984), doi: 10.1299/kikaib.50.1114
- (14) 鄭海泳, 古井隆, 西山淳, 池田裕二: PIV と LDV を利用した点火プラグ近傍の乱流特性計測, 第 22 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 20117085, (2011)
- (15) Müller, S. H. R., Böhm, B., Gleißner, M., Grzeszik, R., Arndt, S., Dreizler, A.: Flow field measurements in an optically accessible, direct-injection spray-guided internal combustion engine using high-speed PIV, Experiments in Fluids, Vol. 48, p. 281-290, (2010), doi: 10.1007/s00348-009-0742-2
- (16) 脇坂知行, 浜本嘉輔, 木下史郎: 内燃機関の燃焼室内における乱流特性, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 48, No. 430, p. 1198-1205, (1982), doi: 10.1299/kikaib.48.1198
- (17) 浜本嘉輔, 富田栄二, 三葉浩義: 四サイクル機関シリンダ内乱流の計測, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 53, No. 491, p. 2226-2232, (1987), doi: 10.1299/kikaib.53.2226
- (18) 神本武征, 八木田幹, 森吉泰生, 小林治樹, 盛田英夫: 透明シリンダエンジンによるシリンダ内空気流動に関する研究, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 53, No. 492, p. 2686-2693, (1987), doi: 10.1299/kikaib.53.2686
- (19) 大谷英男, 森吉泰生, 八木田幹, 神本武征: 圧縮行程

- 中のシリンダ内乱れの減衰と生成に及ぼすスワールの影響 (空間相関法による乱れスケールの LDV 測定), 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 56, No. 530, p. 3173-3180, (1990), doi: 10.1299/kikaib.56.3173
- (20) 大倉康裕, 樋口和哉, 浦田康弘, 染矢聡, 店橋護: 高速 PIV によるエンジン燃焼室内の乱流計測, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 79, No. 806, p. 2193-2206, (2013), doi: 10.1299/kikaib.79.2193
- (21) 日野幹雄: 離散化にともなう誤差, スペクトル解析, 朝倉書店, p. 175-177, (1997)
- (22) 日野幹雄: 自己相関関数, スペクトル解析, 朝倉書店, p. 25-39, (1997)
- (23) Peters, N.: Regimes in Premixed Turbulent Combustion, Turbulent Combustion, Fourth printing with corrections, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, p. 78-86, (2006)
- (24) Ohashi, T., Yang, X., Takabayashi, T., Urata, Y., Kubota, S., Katsuyama, H.: Ignition and Combustion Simulation in HCCI Engines, SAE technical paper 2006-01-1522, (2006), doi: 10.4271/2006-01-1522
- (25) 大江修造: 気体の粘度の推算法, 物性推算法, データブック出版社, p. 228-236, (2002)
- (26) 店橋護: 乱流予混合燃焼 I - 乱流と予混合火炎の代表スケール -, 日本燃焼学会誌, 第 51 巻, 158 号, p. 295-302, (2009), doi: 10.20619/jcombsj.51.158_295
- (27) FLOWTECH RESEARCH: <https://www.ft-r.jp/soft/cruise.html>, (参照 2024/07/18)
- (28) 笠島祐也, 江川猛, 牛尾信博, 近藤智文, 山口亮, 池谷健一郎: 2.0L 直列 4 気筒直噴エンジンの開発, 自動車技術会 2022 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No. 111, 20226128, (2022)

List of Symbols

E	Mean square of u and v velocity components [m^2/s^2]
E_u	Energy of u velocity component [m^2/s^2]
f	Frequency [Hz]
f_c	Cut-off frequency [Hz]
f_{c_slope}	Cut-off frequency at where spectrum slope changes [Hz]
$f_{c_ \theta = 270}$	Cut-off frequency which was calculated from inverse of integral time scale of the in-cylinder flow at crank angle 270 deg. BTDC [Hz]
f_N	Nyquist frequency which is half frequency of time resolution [Hz]
G_{plate}	Gap from tip of tumble plate to intake valve stem [mm]
h_p	Height of combustion chamber from top of pent-

	roof to piston surface top at bore center [mm]
k	Turbulent kinetic energy [m^2/s^2] (Subscripts f : time filtering method, c : cycle average method)
l	Turbulent integral length scale [mm]
l_F	Flame thickness [mm]
L_{plate}	Length of tumble plate [mm]
Ne	Engine speed [rpm]
P_{cyl}	In-cylinder pressure [kPa]
P_{intake}	Intake manifold pressure [kPa]
R_{uu}	Auto correlation coefficient of u velocity component
S_L	Laminar burning velocity [m/s]
T_{cyl}	In-cylinder gas temperature [K]
u	Instantaneous velocity component in x direction [m/s]
u'	Turbulent intensity [m/s]
u'_f	Turbulent velocity component in x direction decomposed by time filtering method [m/s]
u_p	Instantaneous piston speed [m/s]
v	Instantaneous velocity component in y direction [m/s]
v'_f	Turbulent velocity component in y direction decomposed by time filtering method [m/s]
x	Coordinate to bore direction [mm]
y	Coordinate to stroke direction [mm]
θ	Crank angle [deg.]
θ_{ig}	Ignition timing [deg. BTDC]
ν_F	Dynamic viscosity of mixture [m^2/s]
τ	Integral time scale of in-cylinder flow [ms] (Subscripts u : x direction, v : y direction)
τ_t	Turbulent integral time scale [ms]
τ_p	Characteristic time of piston speed [ms]
ϕ	Equivalent ratio [-]

List of Abbreviations

BDC	Bottom Dead Center
CFD	Computational Fluid Dynamics
e-fuel	Erneuerbarer strom - fuel
EGR	Exhaust Gas Recirculation
fps	frame per second
GUI	Graphical User Interface
IMEP.H	Indicated Mean Effective Pressure High-loop
MFB	Mass Fraction Burnt
LF	Lower Flow
PIV	Particle Image Velocimetry
PRF	Primary Reference Fuel
SI	Spark Ignition

TCV	Tumble Control Valve
TDC	Top Dead Center (Before TDC: BTDC)
UF	Upper Flow
WOT	Wide Open Throttle

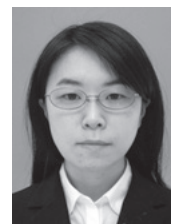
■著 者■



大倉 康裕



瀬川 誠



鬼丸 裕美



佐藤 誓祐



浦田 泰弘