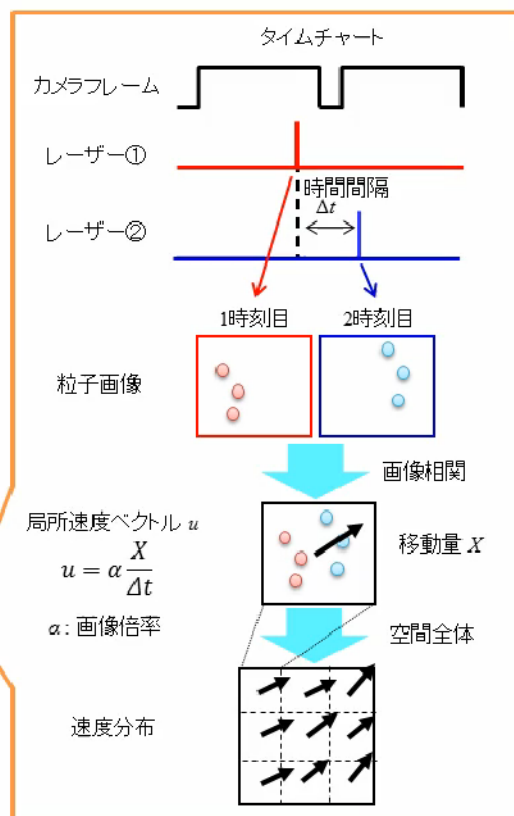
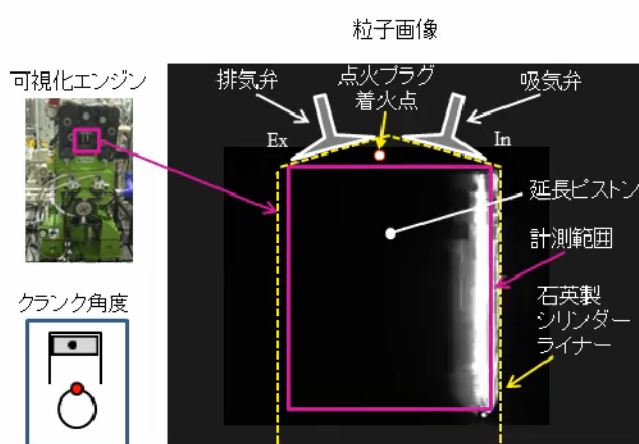


ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 7 No. 3 2017

JSAE エンジンレビュー

特集：動画で見るエンジンレビュー エンジンの筒内可視化号
・「エンジン筒内可視化（第1報）-吸気から圧縮行程-」



この記事には、PDF 上で Flash Player を用いて再生される動画が埋め込まれております。
現在動作が確認されている環境は以下です。

- ・Windows (7,8,10), macOS(Sierra)
- ・Adobe Reader Ver. 10.1.5 以前のもの
- ・Adobe Reader Ver. 10.1.5 以降+Flash Player NPAPI 版(プラグイン版)

上記環境であっても、お使いの機器及びブラウザ環境によっては、再生されない場合があります。

動画再生に関するご質問は受けかねますのでご了承ください。



公益社団法人 自動車技術会

- コラム: ●代燃車をご存じですか? : 1
Do you know "Substitute Fuel Vehicle" ?
山口 恭平(自動車技術総合機構)
Kyohei YAMAGUCHI (National Agency for Automobile and Land Transport Technology)

- 特集: 動画で見るエンジンレビュー エンジンの筒内可視化号 4
-「エンジン筒内可視化(第1報)-吸気から圧縮行程-」
Visualization of Engine In-Cylinder (First Report)
大倉 康裕 (株式会社本田技術研究所)
Yasuhiro OKURA (Honda R&D Co., Ltd.)

この記事には、PDF 上で Flash Player を用いて再生される動画が埋め込まれております。

現在動作が確認されている環境は以下です。

・Windows (7,8,10), macOS(Sierra)

・Adobe Reader Ver. 10.1.5 以前のもの

・Adobe Reader Ver. 10.1.5 以降+Flash Player NPAPI 版(プラグイン版)

上記環境であっても、お使いの機器及びブラウザ環境によっては、再生されない場合があります。

動画再生に関するご質問は受けかねますのでご了承ください。

■ JSAE エンジンレビュー編集委員会

委員長: 飯田 訓正 (慶應義塾大学)

副委員長: 村中 重夫 (元日産自動車)

幹事: 飯島 晃良 (日本大学)

委員: 遠藤 浩之 (三菱重工業エンジン&ターボチャージャ)

大西 浩二 (日立オートモティブシステムズ)

金子 タカシ (JXTG エネルギー)

菊池 勉 (日産自動車)

小池 誠 (豊田中央研究所)

小酒 英範 (東京工業大学)

清水 健一 (元産業技術総合研究所)

下田 正敏 (日野自動車)

西川 雅浩 (堀場製作所)

野口 勝三 (本田技術研究所)

平井 洋 (日本自動車研究所)

山口 恭平 (自動車技術総合機構)

山崎 敏司 (編集)

発行所: 公益社団法人 自動車技術会

発行日: 2017 年 5 月 30 日

発行人: 石山 拓二 (京都大学)

〒102-0076 東京都千代田区五番町 10-2

電話: 03-3262-8211

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN

Vol. 7 No. 3 2017

●コラム

代燃車をご存じですか？

Do you know "Substitute Fuel Vehicle" ?



山口 恭平
Kyohei YAMAGUCHI

(独)自動車技術総合機構
National Agency for Automobile and Land Transport
Technology

1. はじめに

私の業務である自動車の排出ガス・燃費の試験法に関する研究では、試験等を通じて乗用車から重量車まで様々な車両に触れる機会があります。そこで、今回のコラムではこれまで試験をした車両の中から、JSAE エンジンレビュー読者の方々であっても試験の経験はないと思われる珍しい車両を紹介します。

2. 代燃車とは？

今回紹介する車両は、大変古くレトロな“代燃車”のバスです（図1）。



Fig. 1 代燃車バス

代燃車って何だろう？と思われる方が多数かと思います。代燃車とは「石油代用燃料使用装置設置自動車」の略称で、ガソリンエンジンを搭載した車両をベースにガス発生装置を追加で設置し、石油に代わって木炭や薪、石炭などを加熱して発生したガスを燃料とする車両です。見慣れない大きな装置がバスの後部に装着されていますが、それがガス発生装置になります（図2）。



Fig. 2 ガス発生装置

燃料である石油の入手が困難であった戦時中や戦後間もない頃に考案された車両であり、ベース車両に比べ動力性能が劣るなど不便な点も多く、戦後、エネルギー事情が好転すると徐々に淘汰され、現在においては動態保存されている車両は数少なくなっています。

3. 世界初?! 代燃車の試験

代燃車は石油の入手が困難であった時代に利用されていましたが、近年においても石油などのエネルギーが入手困難になる可能性はあります。その一例として震災などの緊急時が挙げられます。実際、東日本大震災の直後にはガソリンスタンドに行列ができていたように、石油や電気といった遠方から運ばれるエネルギーは緊急時に途絶えるリスクを伴います。そのような緊急時の対策を検討した際に、身近にある「木」を燃料とする代燃車の存在を知りました。当然?のことながら、これまで代燃車の性能は定量的に評価されておらず、明確でなかったことから、動態保存されている代燃車を所有する神奈川中央交通株式会社の協力を得て、その性能を調査しました。なお、試験は公道走行ではなく、シャシダイナモ上にて行いましたが、(図 3)。おそらく、代燃車をシャシダイナモ上にて試験したのは世界初だと思います(今後もないかと...)



Fig. 3 シャシダイナモにおける試験風景

代燃車はエンジンを一発で始動させることが難しく、燃料となるガスをあらかじめ発生させておく必要もあるため、エンジンが始動するまでに数時間を要することもあります。また、ガスを発生させるために使用する木材の種類によって、エンジン始動までの時間が変化することもあり、何も考えずにキーを回せばエンジンが始動する現在の自動車の便利さを改めて実感しました。



Fig. 4 ガスを発生させる作業風景

このような代燃車を運転するには、現在の自動車に比べ、多くの操作が必要となります。その一つに空燃比の調整が挙げられます。現在のガソリンエンジンでは排出ガスや燃費性能の面から空燃比が適切な値になるよう電子制御されていますが、代燃車には当然そのような制御装置はついておりません。代燃車ではドライバーがアクセルで燃焼ガス量を制御しつつ、同時にチョーク弁を操作し空気を制御することで空燃比を調整します。そのため、適切な空燃比から大きくかけ離れていると予想していましたが、実際のところ大きくかけ離れることなく制御されており、人の“勤と経験”を侮ってはならないと感じました。



Fig. 5 エンジン

ここで、代燃車の動力性能に着目すると、今回の試験で得られた最高到達出力は約 18kW (約 23 馬力) でした。ちなみに、現在の中型バスにおける最高出力は 150kW 以上です。代燃車のベースとなったガソリンエンジンの最高出力が約 91kW であり、測定方法の違いを考慮しても、出力が大きく低下していることが分かります。代燃車のバスでは上り坂に差し掛かると乗客が降りてバスを押ししていたと言われていますが、それも納得できる出力です。

次に、その燃費性能について、石油を燃料としない代燃車では“燃費”という表現は正確ではありません。そこで、一般的なエンジン車の燃費に相当する“薪消費率”を計算すると、薪 1kg で 1km 前後走行可能なレベルでした。薪を入れるガス発生炉（釜）の容量から言えば、“満タン”状態から 50km 程度は走行可能ですが、“空”になるまで継続して走行出来るわけではなく、実質的にはその半分程度の航続距離でした。このように出力が低い上に航続距離が短いことも、代燃車が淘汰された理由と言えます。

4. おわりに

“代燃車”という大変古く、貴重な車両を今回のコラムにて紹介させて頂きました。試験終了後、構内にて試乗しましたが、今のバスでは決して味わえない、薪を燃やしたにおいやエンジンの音、振動は心を和ませてくれるものでした。代燃車は 50 年以上前に考案されたシステムではありますが、細部にわたりよく考えて作られており、当時の高い技術力や石油が入手出来ないという追い込まれた状況下で発揮された底力を感じさせられました。これから 50 年後、未来の人が現在の車両に触れる機会があれば、彼らはどのように感じるのでしょうか。

動画で見るエンジンレビュー

「エンジン筒内可視化(第1報)-吸気から圧縮行程-」

Visualization of Engine In-Cylinder (First Report)

大倉 康裕

Yasuhiro Okura

株式会社本田技術研究所 四輪 R&D センター

Honda R&D Co., Ltd. Automobile R&D Center

この記事には、PDF 上で Flash Player を用いて再生される動画が埋め込まれております。現在動作が確認されている環境は以下です。

- ・Windows (7,8,10), macOS(Sierra)
 - ・Adobe Reader Ver. 10.1.5 以前のもの
 - ・Adobe Reader Ver. 10.1.5 以降+Flash Player NPAPI 版(プラグイン版)
- 上記環境であっても、お使いの機器及びブラウザ環境によっては、再生されない場合があります。動画再生に関するご質問は受けかねますのでご了承ください。

1 はじめに

自動車産業を取り巻く環境と課題の大きさを図 1 に示す。自動車産業を取り巻く環境は、時代とともに大きく変化しており、1970 年代には自動車からの排ガス等による大気汚染問題が深刻となっていた。これらの課題をクリアするために、自動車では、排ガス中の未燃炭化水素、窒素酸化物や一酸化炭素などの有害物質低減が行われてきた。1990 年代から現在にかけては、二酸化炭素による地球温暖化問題が社会的に注目されており、自動車の効率向上(二酸化炭素の排出低減)が行われてきた。今後、化石燃料の枯渇によるエネルギー不足が大きな問題になると考えられ、バイオ燃料や水素などの再生可能エネルギーへの転換を含めた自動車用エンジンのさらなる効率向上が求められると考えられる。

自動車に搭載されている一般的なガソリンエンジンの動作を図 2 に模式的に示す⁽¹⁾。ガソリンエンジンは、吸気～圧縮～膨張～排気の 4 つの行程(ストローク)を 1 サイクルとする 4 ストロークエンジンである。吸気行程では、吸気弁が開いた後にピストンが下降することにより、空気とガソリンの混合気がエンジン筒内へ吸入される。圧縮行程では、吸気弁が閉じた後にピストンが上昇することにより混合気が圧縮され、点火プラグで発生させた電氣的な火花により燃焼を開始させる。膨張行程では、筒内の圧力上昇によりピストンが押し下げられ、連接棒(コンロッド)を介してクランクを回転させることにより動力を発生する。排気行程では、排気弁が開いた後にピストンが上昇することにより、筒内から排ガスを吐き出すことで 1 サイクルを完了する。これらの行程を、連続的にかつ短時間で行うことにより、自動車を高速で力強く走らせることができる。ガソリンエンジンでは、火花点火により燃焼が開始されると、その後の燃焼特性を制御できないことから、点火直前の筒内の状態が非常に重要となる。そのため、吸気から圧縮行程における筒内の状態が、ガソリンエンジンの燃焼特性を決めているといっても過言ではない。

本稿では、通常、「視る」ことのできないエンジン筒内で起こっている現象について、可視化エンジン等で計測された画像や動画を交えながら、分かりやすく紹介していくことを目的としている。第 1 報では、まず、吸気から圧縮行程で形成されるエンジン筒内の流動特性について紹介する。なお、その後に行われる点火、火炎伝播による燃焼、ノック(異常燃焼)については、第 2 報にて紹介する予定である。

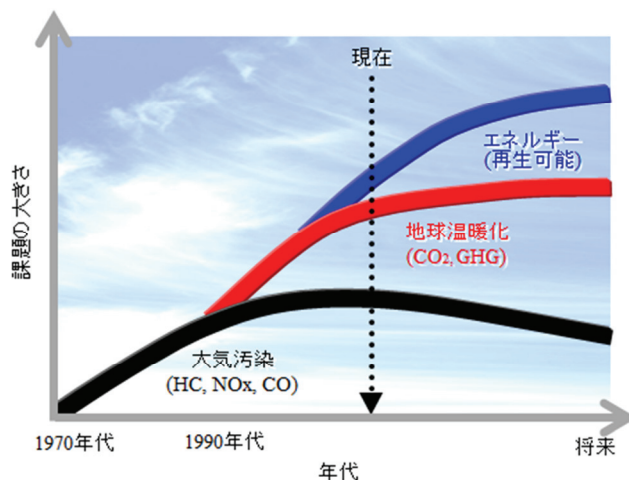


Fig. 1 自動車産業を取り巻く環境と課題の大きさ

2 エンジン筒内の可視化計測技術

2.1. 可視化エンジン

自動車に搭載されているエンジン⁽¹⁾と可視化エンジンの比較を図 3 に示す。可視化エンジンは、テスト室内の定盤(金属製)に設置された状態で、ダイナモーターにドライブシャフト等により接続されて制御・使用されるテスト専用エンジンである。そのため、自動車用エンジンの外観とは全く異なるが、その代りに、通常、「視る」ことのできないエンジン筒内を可視化することが可能となっている。筒内可視化の模式図を図 4 に示す。円筒形石英製シリンダーライナーがシリンダーヘッドとシリンダーブロックの間に設置されており、エンジン側方からの可視化を可能としている。また、延長ピストンとピストン頂面に設置された石英製ウィンドウにより、45° ミラーを介して筒内下方からの可視化も可能である⁽²⁾。他に高回転

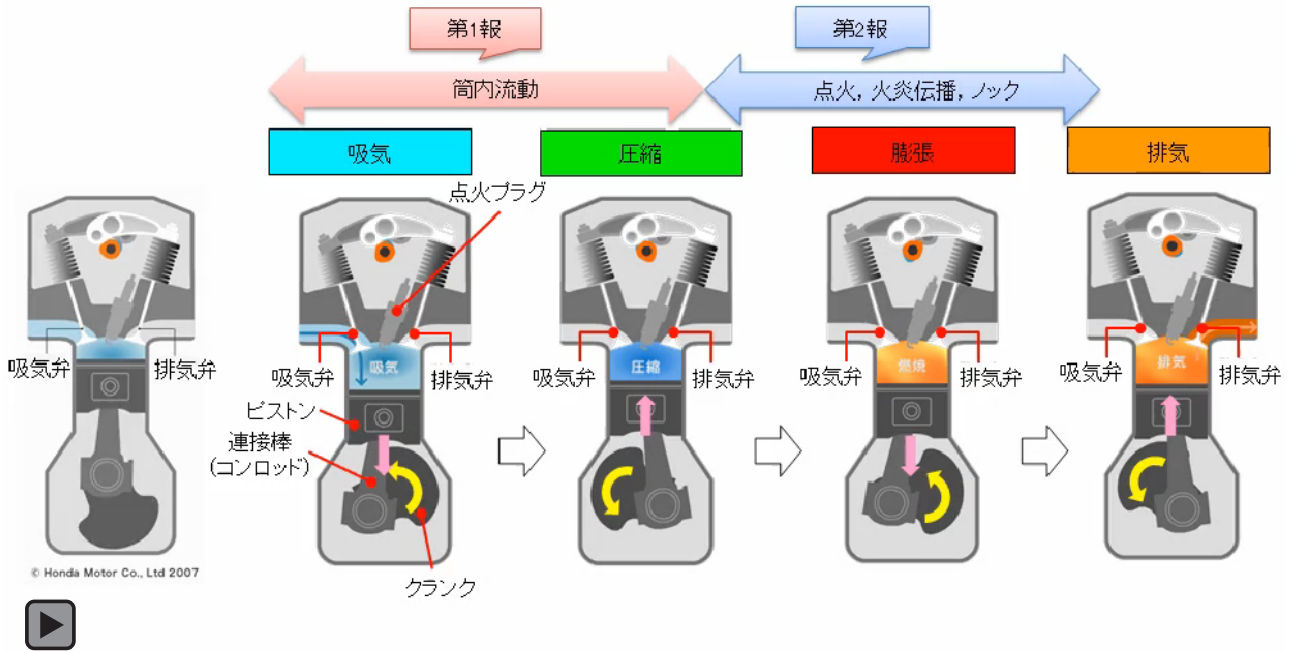


Fig. 2 4ストロークガソリンエンジンの各行程における動作⁽¹⁾【動画: 図をクリックすると動画が再生されます】

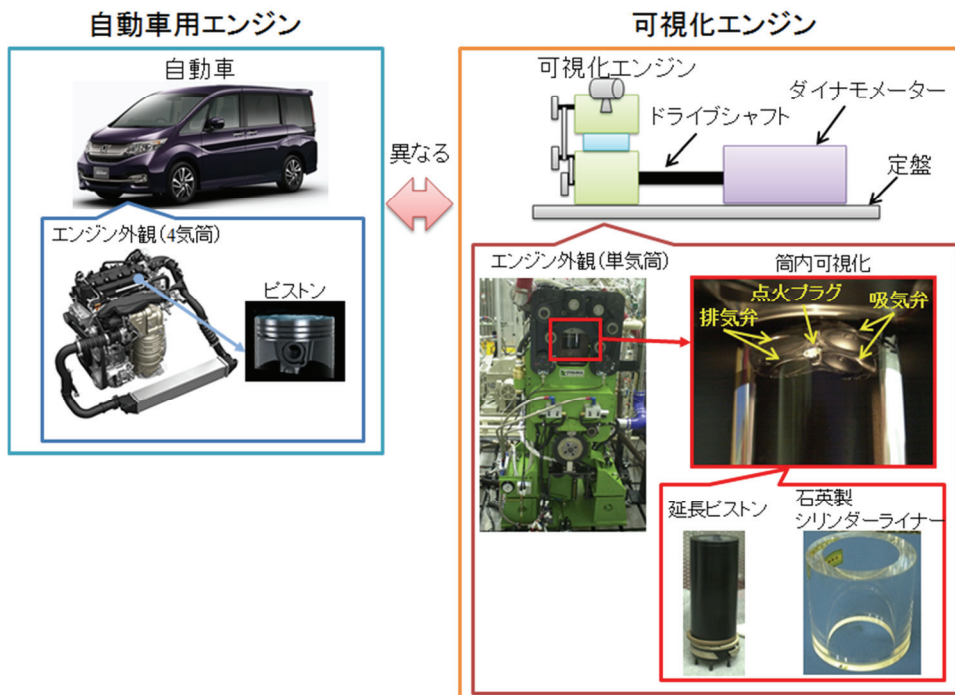


Fig. 3 自動車用エンジン⁽¹⁾と可視化エンジンの比較

高出力型エンジンの極限に位置する F1(Formula 1)レース用エンジンの筒内流動解析を目的として開発された可視化エンジンもある。F1 レース用エンジン⁽³⁾と可視化エンジンの外観の比較を図 5 に示す。高回転化を実現するために中空構造を持つ延長ピストンが開発され、エンジン回転速度 10000 rpm までの計測が可能となっている⁽⁴⁾。近年では、エンジン回転速度 6000 rpm までファイアリング運転可能な可視化エンジンの開発⁽⁵⁾や、可視化エンジンの市販化⁽⁶⁾が行われるなど適用範囲が広がってきている。今後、さらなる高効率エンジンの事象解析や、その仕様選定において、可視化エンジンの必要性が高まっていくと考えられる。

2.2. エンジン筒内における可視化計測法

2.2.1. 光の特性

エンジン筒内における可視化計測では、一般的に光学計測が用いられることが多い。まず、本項にて光の特性について説明し、次項にて代表的な可視化計測法を紹介する。

電磁波と波長の関係を図 6 に示す⁽⁷⁾。光は電磁波であり、人間の目に見える光を可視光と呼ぶ。その波長は 400 ~ 800 nm 程度である。この他にも紫外線や赤外線など、人間の目に見えない電磁波は多い。光の特性を図 7 に示す。光は波動性である「反射、屈折、干渉、回折」など

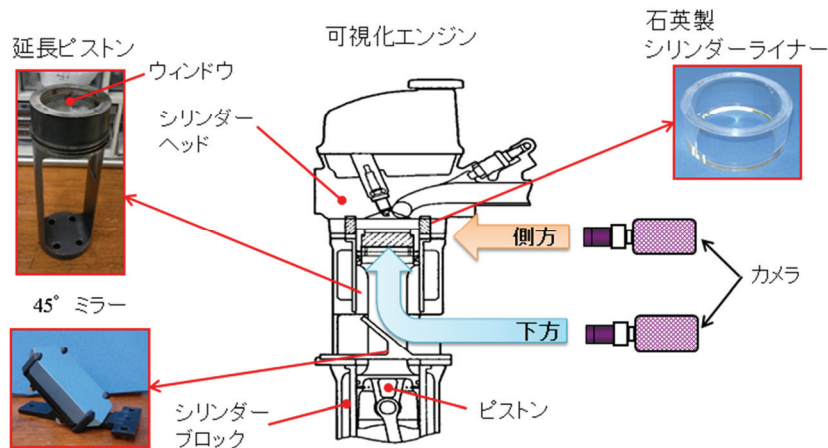


Fig. 4 筒内可視化の模式図

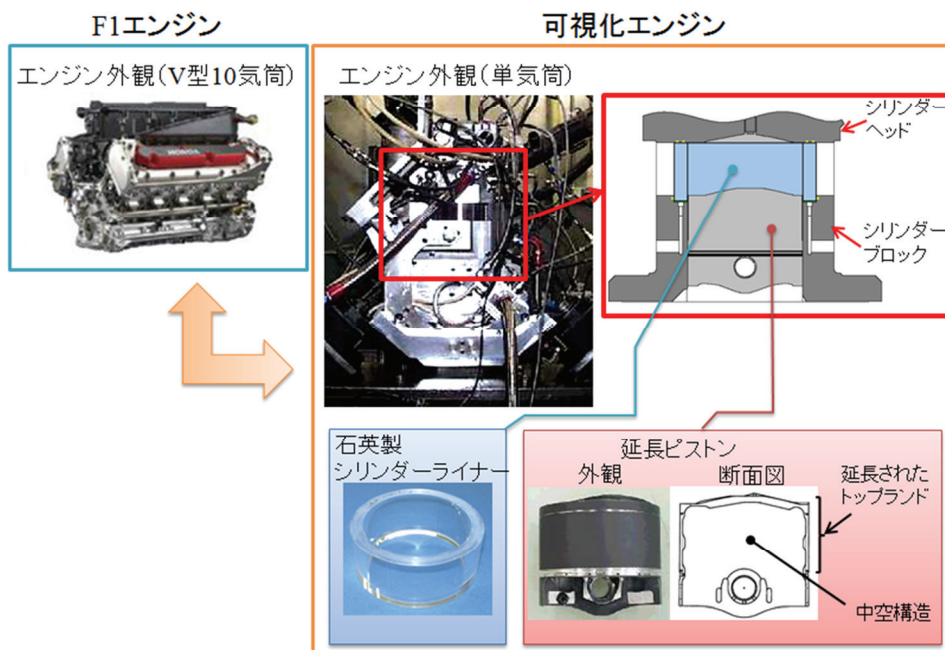


Fig. 5 F1エンジン⁽³⁾と高回転型可視化エンジンの比較

の特性を持つ。また、光は粒子性も合わせ持ち、「吸収、放出、散乱、光電効果」などの特性を持つ。これらの光の特性は、ごく身近で観察することができ、そのいくつかを図 8 に示す⁽⁸⁾。空気は無色であるが空は青く見える。この理由は、さまざまな光を含む太陽光(白色)のうち、空気中の分子により青色の光のみが強く散乱されるためである。ここで、光の波長(400 ~ 800 nm)に対して、粒子または分子が小さい散乱(約 100nm 以下)をレーリー散乱(Rayleigh scattering)と呼ぶ。また、コンパクトディスク表面にはピットと呼ばれる多数の小さな突起があり、そこに白色光を当てると反射光が虹色に見える。この理由は、光の回折(光が広がる現象)が影響しているためである。

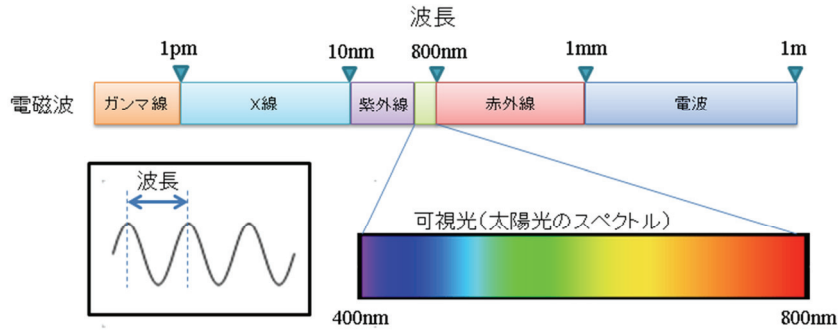


Fig. 6 電磁波と波長の関係⁽⁷⁾

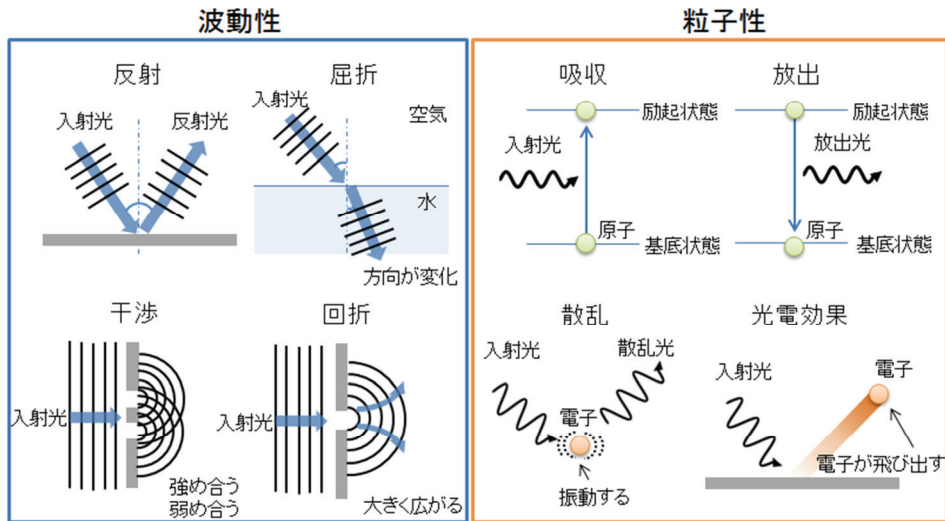


Fig. 7 光の特性

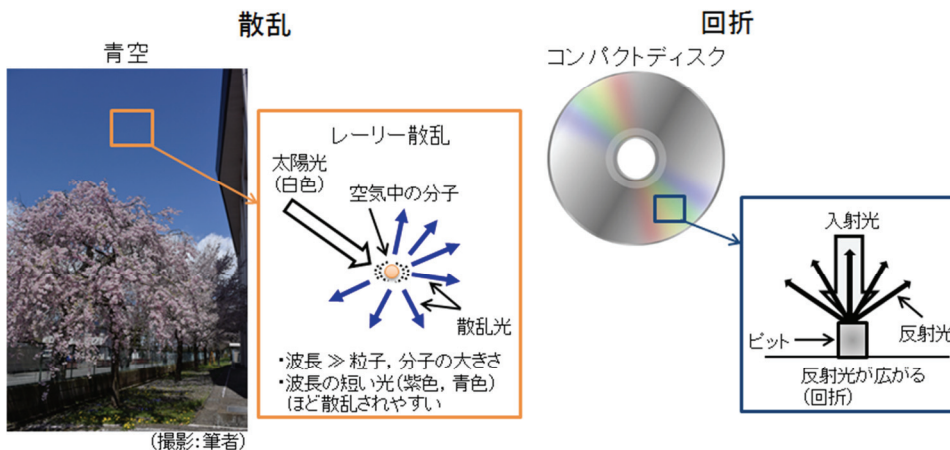


Fig. 8 身近な光の現象

2.2.2. 可視化計測法

エンジン筒内現象と主な可視化計測法を図 9 に示す。吸気行程では、ピストンが下降することにより吸気管から空気が筒内へ流入する。その時に筒内にはタンブル流(縦渦)やスワール流(横渦)が生成される。筒内流動の最適化を目的とし、レーザードップラー流速計(LDV : Laser Doppler Velocimetry)⁽⁹⁾や粒子画像流速計(PIV : Particle Image Velocimetry)⁽¹⁰⁾などが適用され、筒内の速度分布や渦中心位置などの計測・解析が行われている。吸気行程から圧縮行程前半では、燃料噴射弁により吸気管、または、エンジン筒内へ直接供給された燃料が蒸発・拡散しながら空気と混合する。混合気分布の均質性は燃焼安定性に影響するため、混合気分布の最適化を目的とし、シャドウグラフ法やレーザー誘起蛍光法(LIF : Laser Induced Fluorescence)などが適用されている。圧縮行程後半から膨張行程前半では、高速度カメラ等を用いた点火プラグの放電による着火や火炎伝播過程の計測が行われ、燃焼の評価に用いられている。近年、排ガス中の粒子状物質(PM : Particulate Matter)の質量や数が規制の対象となっている。そのため、膨張行程では、輝炎の有無や発生個所を特定するために、高速カメラ等による直接撮影法が適用されている。ここで、輝炎とは、燃焼によって生成された PM(すす)の固体粒子から放射される明るい黄色、または、黄赤色の発光である。さらに詳細な解析を行うため、PM の粒径や数密度の空間分布計測にレーザー誘起赤熱法(LII : Laser Induced Incandescence)⁽¹¹⁾、PM の発生源と考えられている壁面燃料付着の計測に LIF 法が適用されている。

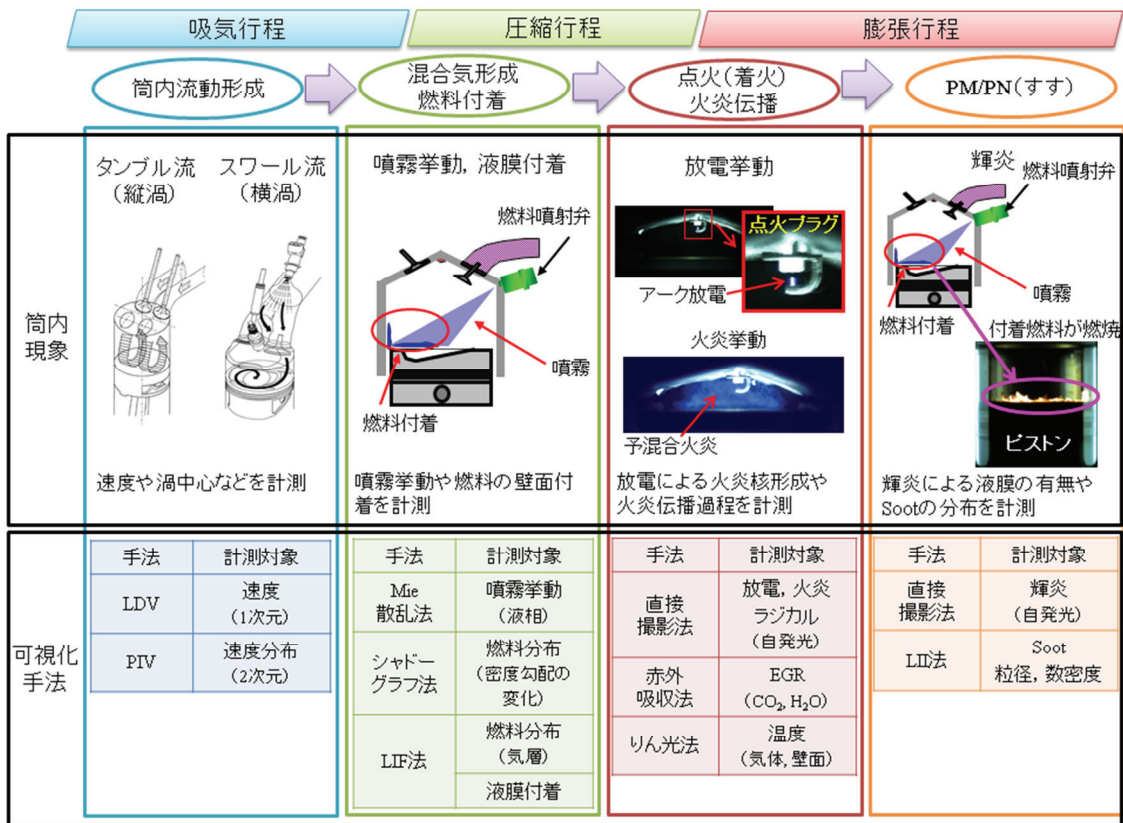


Fig. 9 エンジン筒内現象と主な可視化計測法

ガソリンエンジンの吸気から圧縮行程の計測・解析に頻りに用いられる PIV, シャドウグラフ法, LIF 法について, さらに計測原理を詳しく紹介する。PIV システムの模式図を図 10, 計測原理を図 11 に示す。PIV は, 光の特性のうち, 散乱を利用した計測法である。空気に良く追従する粒子(トレーサー)を吸気チャンバー等へ供給し, 空気とともに筒内へ吸入させる。そこに, レンズにてシート状に引き伸ばされたレーザーを, 異なる

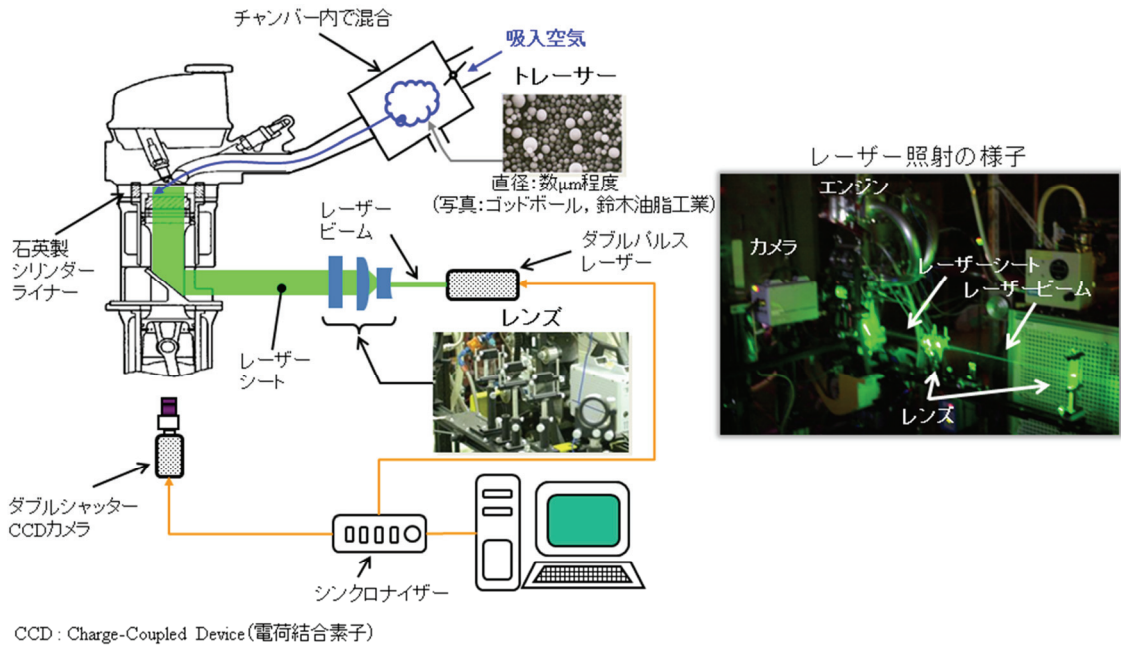


Fig. 10 PIV システムの模式図

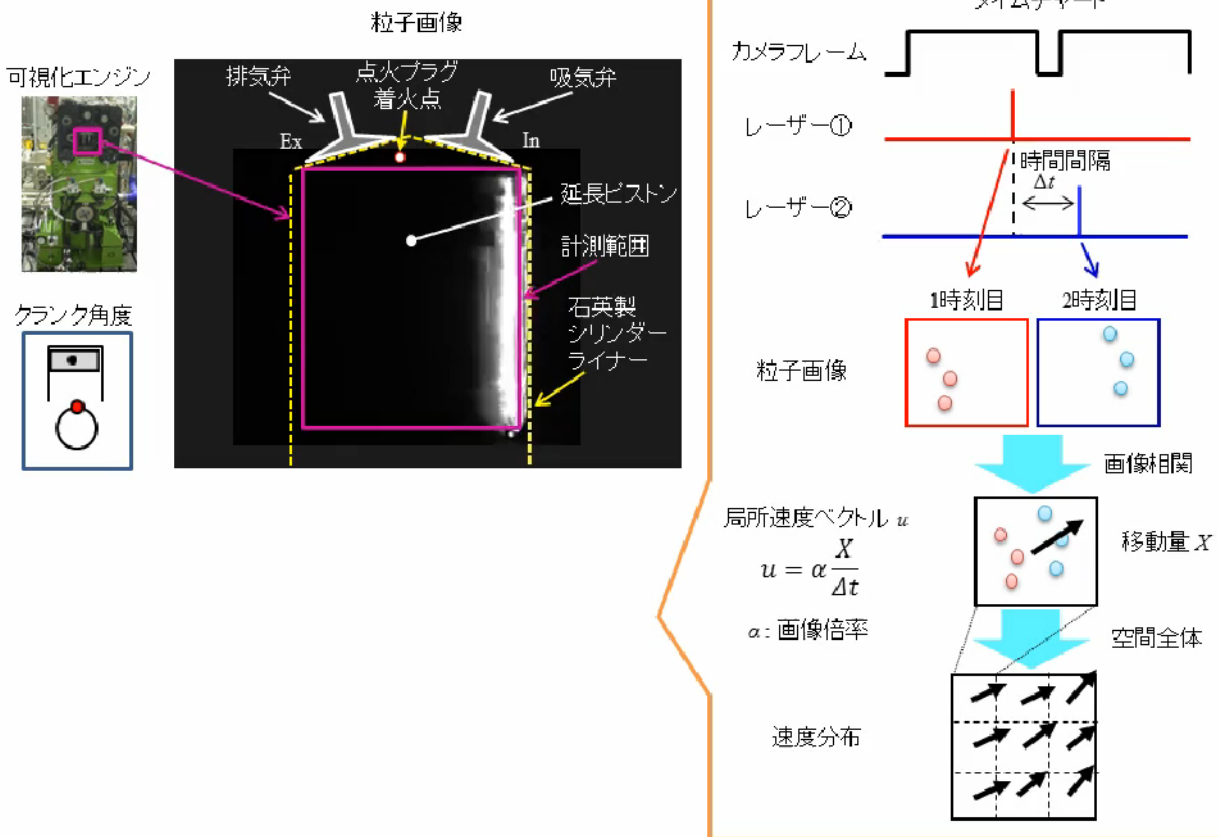


Fig. 11 PIV の計測原理 【動画: 図をクリックすると動画が再生されます】

時間間隔 Δt で 2 回照射する。照射したレーザー光はトレーサーにより散乱されるので、その散乱光をカメラにより粒子画像として 2 枚撮影する。得られた 2 枚の粒子画像から、画像相関法等を用いて求められた粒子移動量 X と、時間間隔 Δt により局所速度ベクトル u を求めることができる。さらに、この処理を画像空間全体に施すことにより、速度分布を得ることができる。なお、図 10 に示したカメラとレーザーシートの位置関係は模式的なものであり、実際のカメラ位置はレーザーシートに対して 90° の方向(紙面に対して垂直方向)である。また、PIV で一般的に用いられるレーザー光は緑色(波長:532nm)であり、トレーサー粒子からの散乱光も緑色となる。しかし、計測にはモノクロカメラを用いたため、例として示した粒子画像は白黒画像となる。

ここで、粒子画像から局所速度分布を求める際、レーザーシートの輝度ムラや石英製シリンダーライナー内壁での散乱光が、検出される速度ベクトルに悪影響を与える場合がある。そのため、前処理として粒子画像から背景画像を差し引く背景処理が有効な場合がある⁽¹²⁾。背景処理に用いられる背景画像の取得には 2 種類あり、1 つ目の方法はトレーサー粒子が無い場合の画像をあらかじめ取得しておく方法である。この方法は手順としては簡単であるが、背景画像の計測忘れやカメラ等の移動により、画像の利用ができなくなる欠点がある。2 つ目の方法は、PIV 計測により得られた多数の粒子画像から作成する方法である。具体的には、得られた多数の粒子画像の中で、1 画素毎に最小輝度値を求め、これを背景画像のそれぞれの画素における輝度値とする。この方法が適用できる理由として、粒子は計測範囲内を常に移動しており、画像毎に粒子の位置が異なること、また、画像における粒子の占有率が低いことが挙げられ、そのため、数十枚程度で鮮明な背景画像を得ることが可能である。図 12 に背景処理の一例を示す。なお、背景画像(図 12 中央)は、同一クランク角度(同一ピストン位置)における 50 枚の粒子画像から作成した。これより、背景画像には、レーザーシートの石英製シリンダーライナー内壁での散乱光やピストン移動のみが観察されるのみで、粒子が画像から除去されていることが分かる。次に、任意の 1 サイクルにおける未処理の粒子画像(図 12 左)から、前述の背景画像を差し引いた背景処理済の画像(図 12 右)では、未処理の粒子画像に見られるレーザーによる散乱光が除去されており、鮮明な粒子画像が得られていることが分かる。

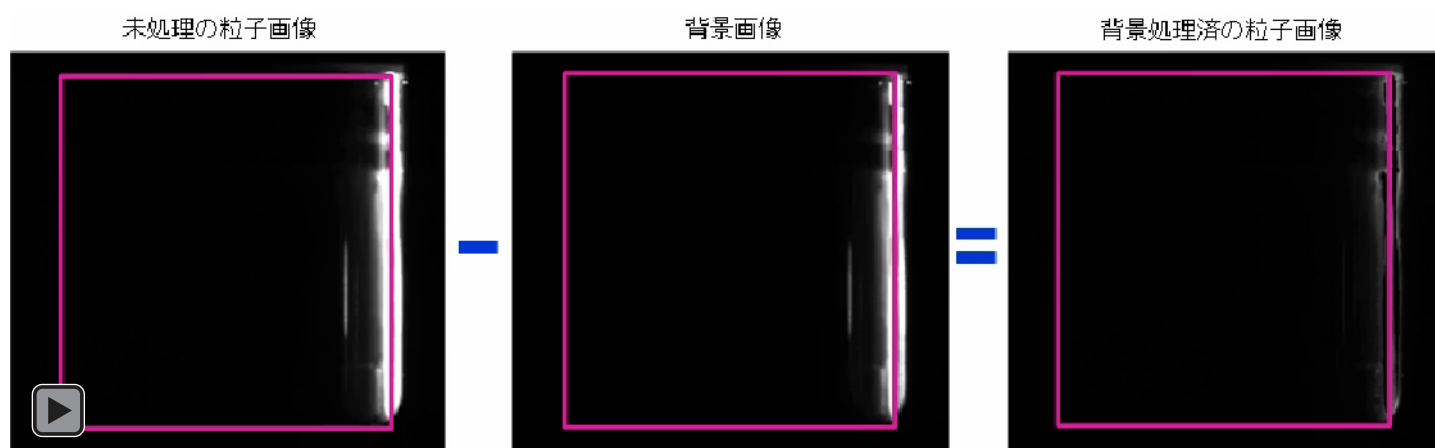


Fig. 12 背景処理の一例【動画:図をクリックすると動画が再生されます】

次にシャドウグラフ法の計測原理を図 13 に示す。計測原理は、光の特性のうち、屈折を利用した計測法で、気体あるいは液体の密度変化による光の影を、直接スクリーンやフィルム上に投影して観察するものである⁽¹³⁾。シャドウグラフ法によって得られるスクリーン上のコントラストは、密度の2次微分、すなわち、密度勾配の変化に比例する。光学系レイアウトの模式図を図 14 の左に示す。ピンホールにより点光源として絞られたキセノンランプ光は、第 1 主レンズにより平行光にされ、エンジン筒内へ入射される。エンジン筒内の燃料等による密度変化により屈折された透過光は、第 2 主レンズにより集光された後、高速度カメラ等で計測される。シャドウグラフ法により撮影された筒内直噴の計測画像を図 14 の右に示す。液滴を含む噴霧中心付近は、高密度であることから入射光の屈折が大きく、黒色として計測される。その周囲には蒸発した燃料や混合気が存在しており、液滴に対して密度が低いことから、やや明るく計測されている。以上のことから、定性的な燃料分布の計測・解析が可能であることが分かる。ただし、エンジン筒内からの透過光は、光路上のすべての密度から影響を受ける積分値であることに注意を必要がある。

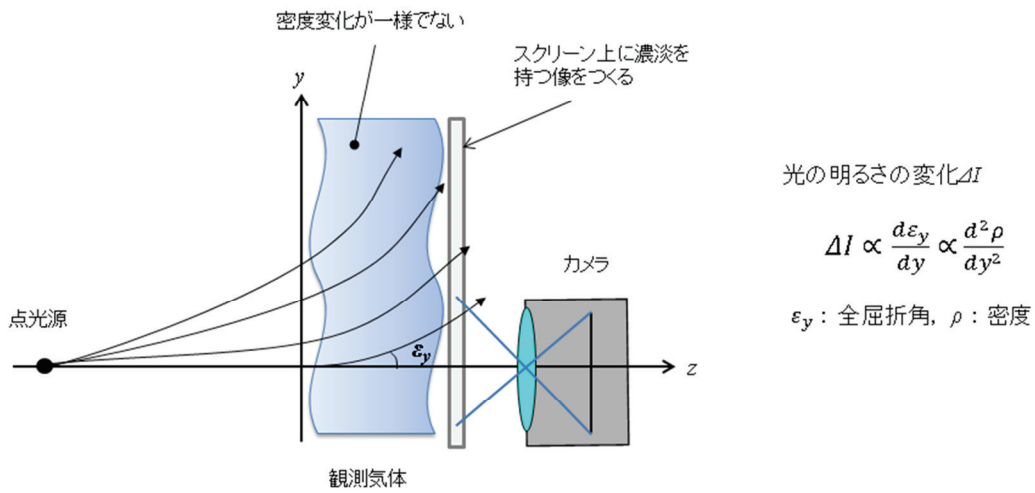


Fig. 13 シャドウグラフ法の計測原理⁽¹³⁾

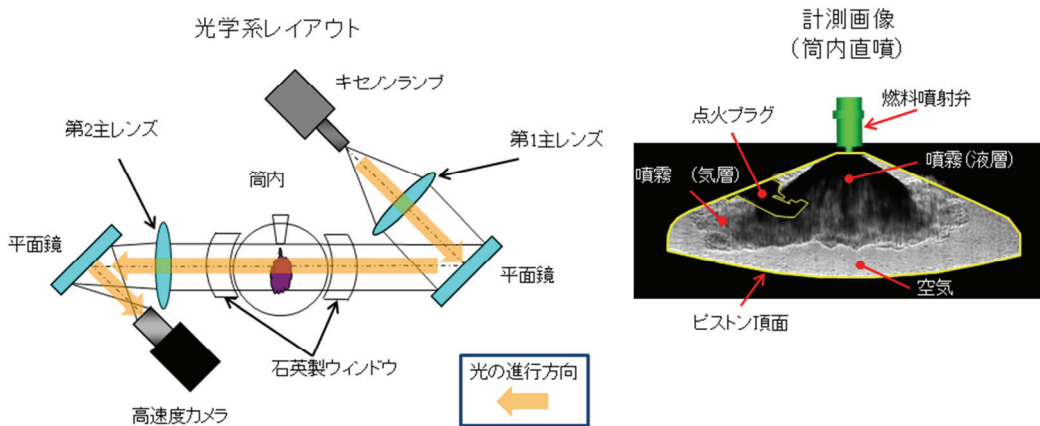


Fig. 14 シャドウグラフ法の光学系レイアウトと計測画像(筒内直噴)

最後に LIF 法の計測原理を図 15、光学系レイアウトの模式図を図 16 の左に示す。LIF 法は、光の特性のうち粒子性である吸収と放出を利用した計測法である。燃料中にトレーサーとして蛍光剤(3ペンタノン)を少量混入し、これに紫外線レーザー等を励起光として入射する。このレーザー光を蛍光剤が吸収した後、少し長い波長の光(蛍光)を放出する。蛍光剤からの光は、燃料の存在を示しており、その強度は燃料の濃度に比例する⁽¹⁴⁾。この特性により燃料濃度の計測が可能となる。なお、トレーサーからの蛍光は非常に微弱であるため、一般的なカメラでは計測できない。そのため、レンズとカメラの間に光強度増幅装置である光電子倍增管(イメージンシファイア)を取り付けて計測を行うことが多い。LIF 法により計測・解析された筒内直噴画像を図 16 の右に示す。液滴を含む混合気中心部は、燃料濃度が高く、その周囲では燃料と空気の混合気により、濃度が低くなっていることが分かる。ここで、蛍光強度は燃料濃度だけではなく、圧力・温度・酸素クエンチによっても変化することが知られている⁽¹⁵⁾。そのため、燃料濃度の絶対値を得るには多くの補正作業を必要とする。このような理由から、相対的な燃料分布の計測・解析に用いられることが多い。

3 吸気から圧縮行程における筒内可視化

3.1. TCV による筒内流動特性

3.1.1. 筒内速度分布

ガソリンエンジンでは、火花点火により燃焼が開始されると、その後の燃焼特性を制御できないことから、点火直前の筒内の状態が非常に重要となることは、前に述べた。ここからは、PIV により計測・解析された結果をもとに、吸気切換えデバイスである TCV(Tumble Control Valve)によるエンジン筒内の流動特性について紹介する⁽¹⁶⁾。

TCV の部品構成と筒内流動の模式図を図 17 に示す。TCV は主に隔壁とフラップの二つの部品により構成されおり、隔壁は吸気管内の中心

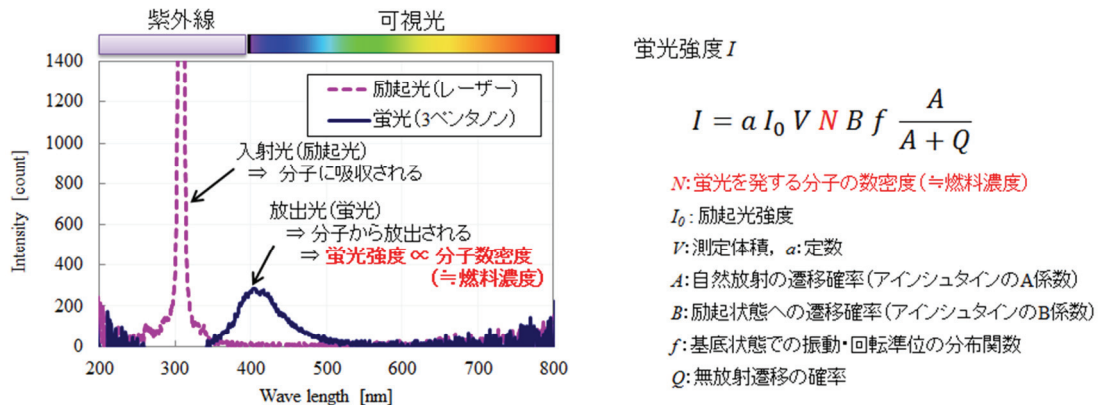


Fig. 15 LIF 法の計測原理⁽¹⁴⁾

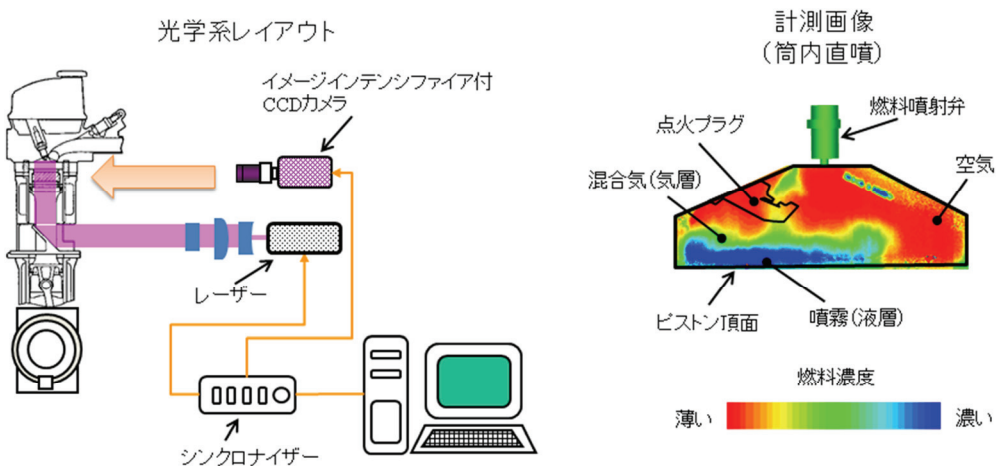


Fig. 16 LIF 法の光学系レイアウトと計測画像(直噴)

位置で、管内を上下に分割するように挿入される。TCV 無し(フラップ無し)の場合、吸気弁全周より筒内へ空気が流入すると予想され(左図の赤線と青線)、多くの空気を筒内に吸入することが可能である。また、TCV 有り(フラップ有り)の場合、吸気管を絞ることにより筒内へ流入する空気の速度が増加し、かつ、筒内の排気側へ向かって空気が流入することにより(右図の赤線)、タンブル流が強化されると予想される。エンジン回転速度が低い場合にフラップを閉じ、回転速度が高い場合にはフラップを開くことにより、タンブル流強化と吸気抵抗低減の両立が可能であると考えられる。なお、本報告では、部品を差し替えることにより TCV の仕様を変更した。計測条件は、エンジン回転速度 1500 rpm で、吸入空気量を調整するためのスロットルは全開状態とし、モータリング(燃焼無し)で計測を行った。

可視化エンジンを用いた TCV による筒内流動特性の解析結果を図 18 に示す。左図に TCV 有無による速度分布、右図にクランク角度に対するタンブル比の比較を示す。ここで、タンブル比は、エンジン(クランク)が 1 回転する間に筒内流動が何回転するかを表す指標であり、値が大

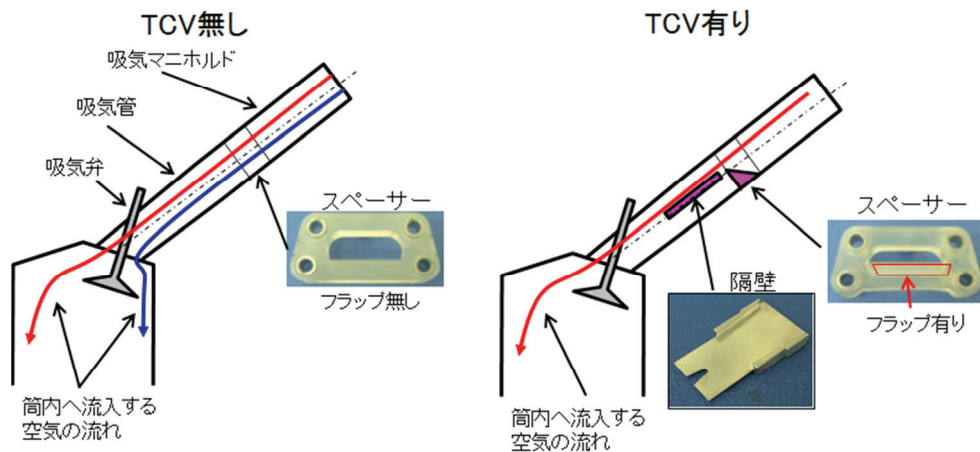


Fig. 17 TCV の部品構成と筒内流動の模式図

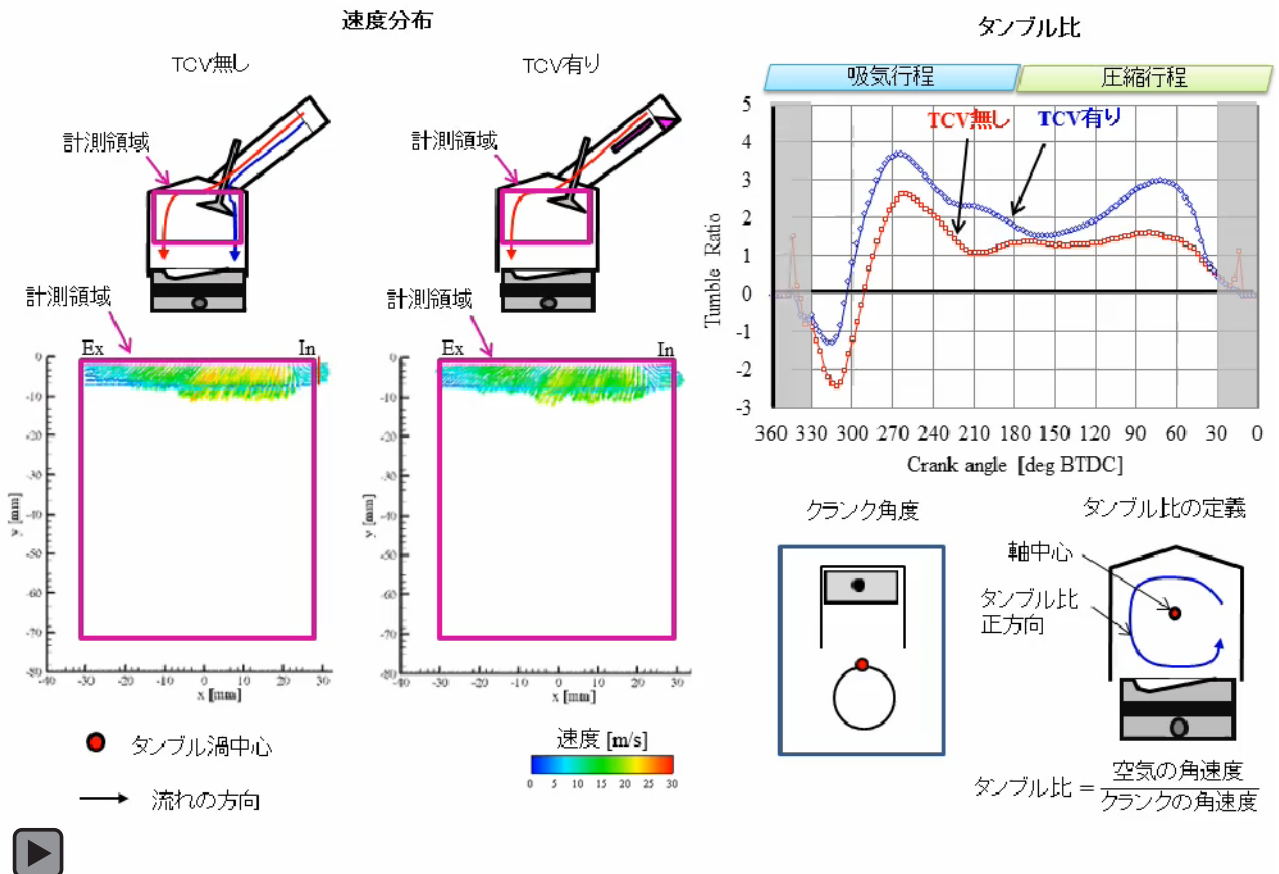


Fig. 18 TCV による筒内流動特性, エンジン回転速度 1500rpm スロットル全開 モータリング【動画: 図をクリックすると動画が再生されます】

きいほどタンブル流が強いことを意味する。TCV 無しに対して、TCV 有りの場合、吸気行程(クランク角度 $\theta = 270$ deg BTDC 付近)での流入速度が速く、タンブル比は 3.6 と高い値を示す。また、圧縮行程後半($\theta = 60$ deg BTDC 付近)においても、筒内の速度は速く、タンブル比も 3.0 と高い。以上のことから、TCV により流動強化が行われていることが分かる。また、TCV 有りの場合、そのタンブル渦中心は圧縮行程においてもシリンダー中心付近に位置している。これらの燃焼へおよび効果については、次項で述べる。

3.1.2. 筒内乱流分布

TCV 有無による筒内乱流特性を図 19 に示す。左図に平均流と乱流運動エネルギーの分布、右図にクランク角度に対する乱流運動エネルギーを示す。ここで、時間スケールの大きい主流成分を平均流、時間スケールの小さい変動成分を乱流と定義し、筆者が提案している時間フィルター法により、計測された瞬時速度から両者を分離した⁽¹⁷⁾。TCV 無しに対して TCV 有りの場合、吸気行程後半($\theta = 240$ deg. BTDC 付近)から平均流速と乱流運動エネルギーが増加する。圧縮行程後半($\theta = 60$ deg BTDC 付近)では、TCV 有りの場合の乱流運動エネルギーは、TCV 無しに対して高い値を示しており、乱流が強くなっていることが分かる。

TCV によるタンブル流強化の効果について図 20 で考察する。まず、TCV によりタンブル渦中心が、シリンダー中心付近に制御された効果について考察を行う。一般的なガソリンエンジンの点火プラグは燃焼室中央に設置されている。したがって、シリンダー中心付近に渦中心を持つタンブル流は、圧縮行程後半で、その渦中心が点火プラグ近傍に位置することとなる。渦中心付近の速度は周囲に比べて低いことから、初期火炎の吹き飛びが抑制されると考えられる。次に、TCV による乱流強化について考察を行う。一般にガソリンエンジン燃焼室内の火炎形態は、乱流により火炎表面がしわ状となっている。よって、圧縮行程後半の乱流を強化することより、火炎表面のしわ(表面積)が増加し、燃焼速度を増加させる⁽¹⁸⁾。以上のことから、TCV による燃焼促進効果が期待される。

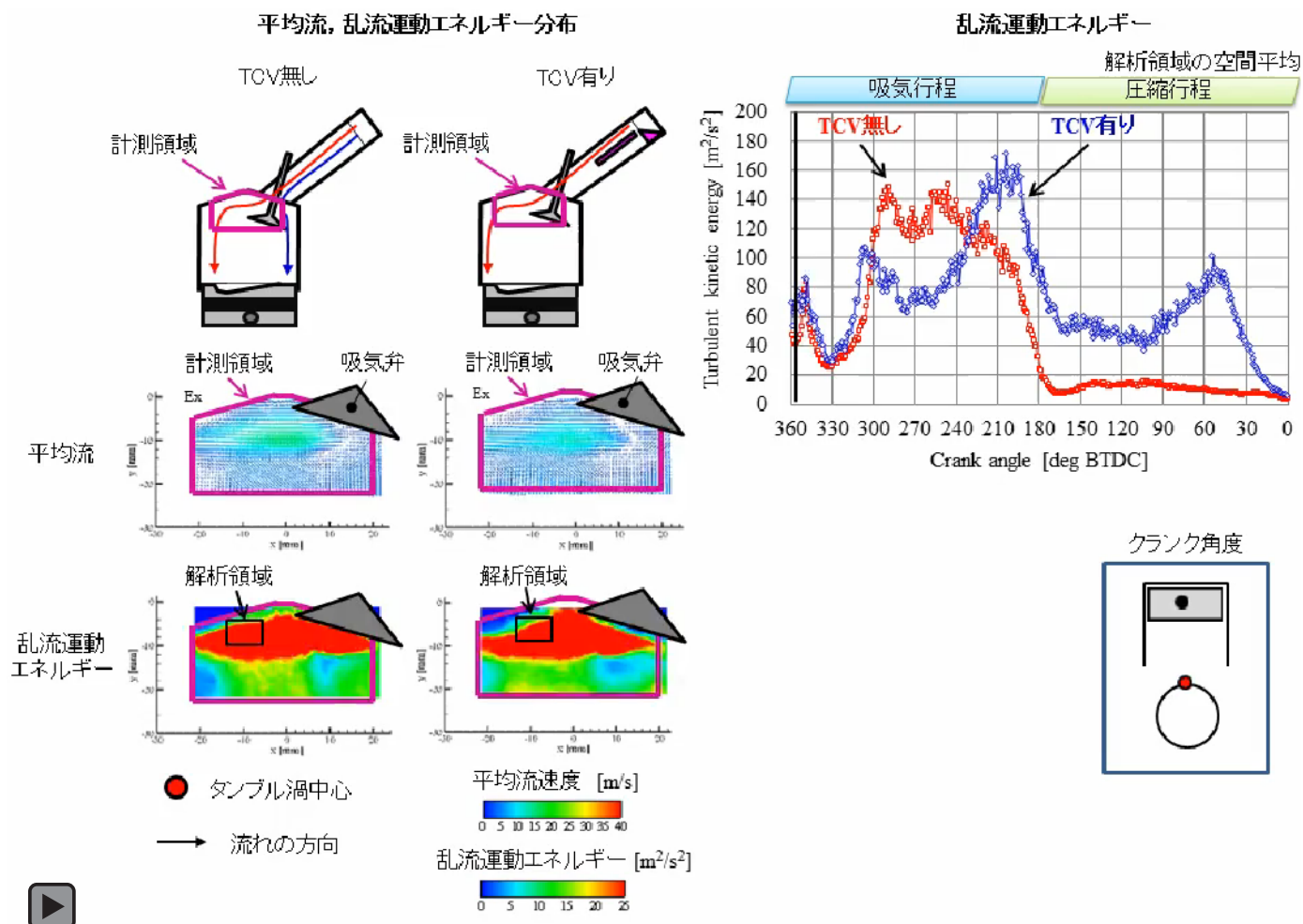


Fig. 19 TCV による筒内乱流特性, エンジン回転速度 1500rpm スロットル全開 モータリング 【動画: 図をクリックすると動画が再生されます】

3.2. TCVによる筒内噴霧特性

TCVによる流動強化が筒内噴霧特性へおよぼす効果を図 21 に示す。左図に噴霧挙動と筒内流動、右図に噴霧面積割合を示す。ここで、噴霧画像は、噴霧にレーザーを照射することにより得られる散乱光(Mie 散乱)を、高速度カメラにて計測した。また、噴霧面積割合には、ある基準となる明るさ以上の画素を噴霧として抽出し、得られた噴霧の面積を燃焼室とピストンで囲まれる面積により正規化した値を用いた。燃料は、多噴口ノズルを持つ燃料噴射弁(6 噴口)により筒内へ直接噴射され、吸気行程中に 2 回に分けて供給した。これより、吸気行程前半($\theta = 230$ deg BTDC 付近)では、TCVによる流動強化により燃料は筒内下方へ流される。圧縮行程後半($\theta = 40$ deg BTDC 付近)では、噴霧面積割合の

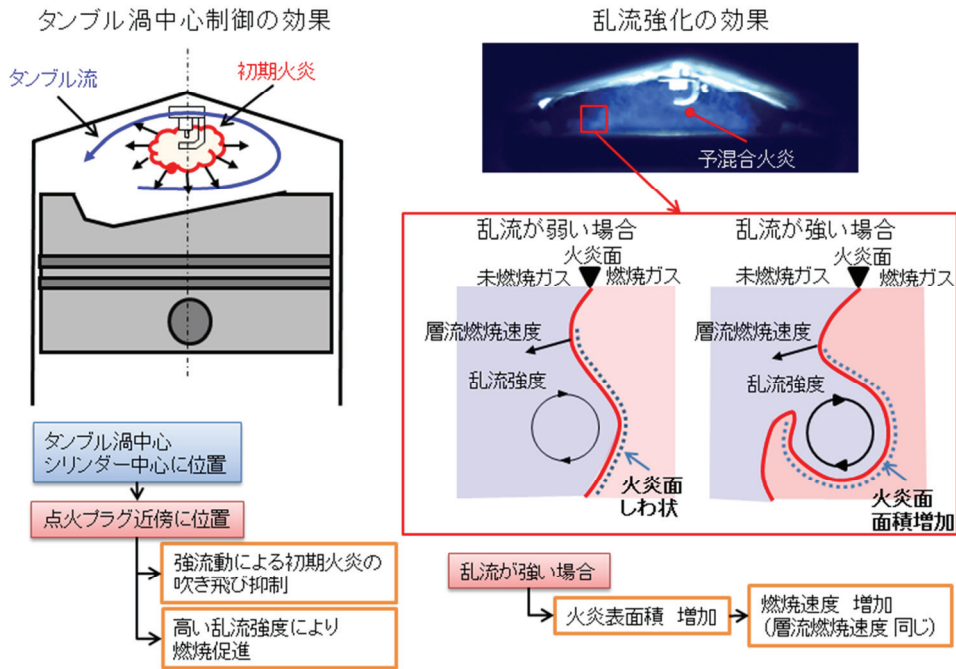


Fig. 20 タンブル流強化の効果⁽¹⁸⁾

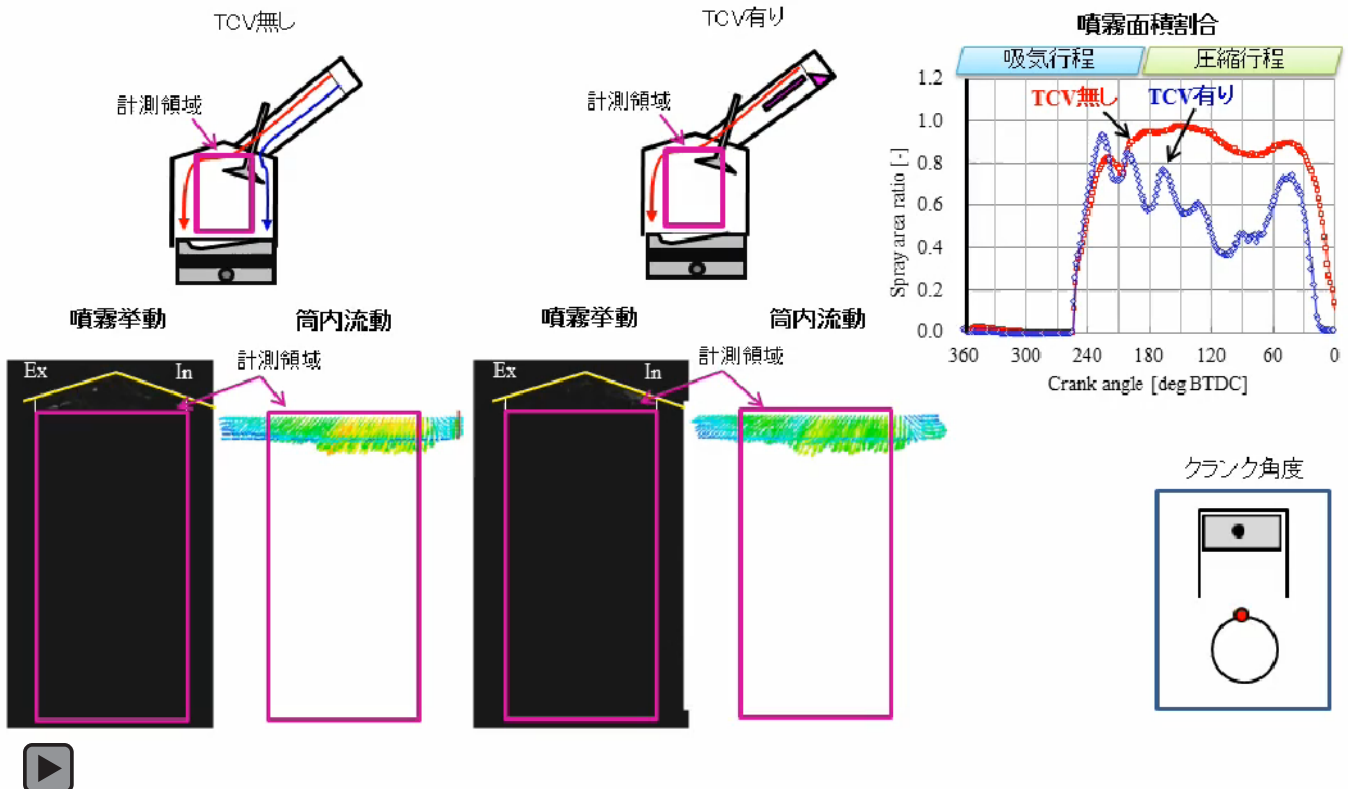


Fig. 21 TCVによる筒内噴霧特性, エンジン回転速度 1500 rpm スロットル全開 モータリング【動画: 図をクリックすると動画が再生されます】

減少から噴霧の拡散・蒸発が促進され、より均質な混合気が形成されていると考えられる。なお、TCV 有りの場合、噴霧面積割合が圧縮行程前半 ($\theta = 180 \sim 110$ deg BTDC) で減少するが、その後、 $\theta = 50$ deg BTDC に向かって増加している。これは、ピストンの圧縮により、蒸発していない噴霧液滴の空間密度が増加したためと考えられる。

3.3. TCV による筒内燃焼特性

可視化エンジンと同一諸元を持つ実機用 4 気筒エンジンを用いて、TCV による燃焼促進効果を確認した。図 22 の左図に筒内圧力、右図に熱発生率を示す。計測条件は、エンジン回転速度 1500 rpm、図示平均有効圧力 (IMEP : Indicated Mean Effective Pressure) 1000 kPa で、点火時期は最適点火時期である。ここで、熱発生率は、単位クランク角度あたりに発生する熱量を示しており、値が高いほど燃焼が急峻に進行していることを示す。また、IMEP は図示トルクを排気量で除した値であり、IMEP = 1000 kPa は、ターボ過給機を持たない自然吸気エンジンの最大トルク付近に相当する条件である。これより、TCV 無しに対して TCV 有りの筒内圧力は、急峻に増加しており、熱発生率も高い値を示している。このことから、TCV による流動強化により、燃焼促進効果を確認することができ、約 1 ~ 3 % 程度の燃費改善効果や、排ガス浄化用触媒の早期暖気効果を得ることができた。以上のことから、筒内流動が燃焼を決定する重要な因子の 1 つであることが明らかとなった。

4. さいごに

本稿では、通常、「見る」ことのできないエンジン筒内で起こっている現象について、可視化エンジン等で計測された画像や動画を交えて紹介してきた。可視化計測についてあまり馴染みの無い、理系学生や自動車開発に携わるエンジニアにも理解してもらえるよう、できるだけ平易にエンジン筒内現象と可視化計測技術を紹介することに努めた。筆者の意図が少しでも多く伝わり、エンジンや可視化計測に興味を持ってもらえれば幸いである。

近年、燃料電池車や電気自動車などに代表される電動化技術の進化は目覚ましく、昔に比べてエンジン研究・開発領域の勢いが衰えてきているように感じる。しかし、比出力やコストなど、他の動力源よりも優れている面は多く存在し、まだまだエンジンが自動車の主な動力源であることに間違いはない。今後、燃料を燃やして動力を発生するエンジンは、ハイブリッドシステムやバイオ燃料などの技術と融合・進化しながら、電動化時代まで主役であり続けられるように常に進化させていく必要がある。そのためにも、エンジン燃焼技術を支える存在である筒内可視化技術は進化させていくべきものと考えている。本稿では燃焼の前段階である吸気・圧縮行程を題材に紹介したが、次回報告予定である点火、火炎伝播による燃焼、ノック(異常燃焼)についても、ぜひ、一読して頂き、さらにエンジンの魅力を感じて頂きたい。

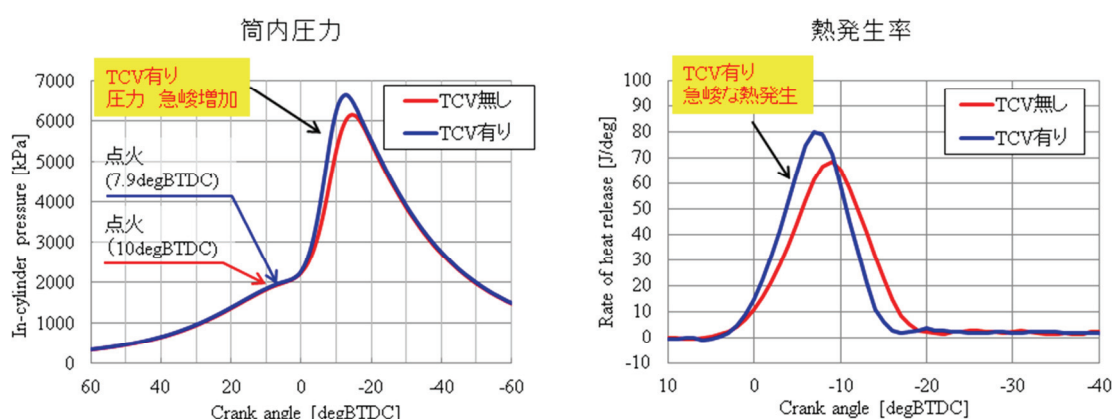


Fig. 22 TCV による燃焼促進効果 (実機用 4 気筒エンジン, エンジン回転速度 1500rpm IMEP=1000kPa)

【参考文献】

- (1) 本田技研工業, 本田技研工業 Web サイト, <http://www.honda.co.jp>.
- (2) 佐々木隆, 吉田一夫, 浦田泰弘, 大野敏久, 石井清, “筒内現象解析用可視化エンジンの紹介”, Honda R&D Technical Review, Vol.10(1998), pp.78-89.
- (3) 櫻原一雄, “第3期 F1 エンジン総括”, Honda R&D Technical Review(2009), F1 Special (Third Era Activities), pp.12-16.
- (4) 大倉康裕, 平出篤志, 高橋真嘉, 花田尚喜, 松原珠, “PIV による F1 エンジンの筒内流動解析”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.77, No.784(2011), pp.2493-2503.
- (5) Fuyuto, T., Hattori, Y., Fujikawa, T., Akihama, K., “Combustion Visualization Using Newly-developed Optically Accessible Single-Cylinder Engines”, R&D Review of Toyota CRDL, Vol.44, No.2 (2013), pp.43-53.
- (6) 小山ガレージ, “研究開発試験機”, 小山ガレージ Web サイト, <http://www.koyamagarage.com/development.htm>.
- (7) 江馬一弘, 光とはなにか, 改訂版(2010), pp.6-57, ニュートンプレス.
- (8) 光学のすすめ, 第1版(2003)pp.196-205, pp.245-252, オプトロニクス社.
- (9) 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(1987), pp.2686-2693.
- (10) 鄭海泳, 福西勇之助, 和智良裕, 池田裕二, “PIV を利用した可視化エンジン内のピストン速度変化による乱流特性の影響”, 第22回内燃機関シンポジウム講演論文集, 20117086(2011).
- (11) 植木毅, 村瀬栄二, “ガソリン直噴エンジンにおける PM 生成の空間分布解析”, 自動車技術会 2014 年秋季大会前刷集, No.94-14, 20145857(2014), pp.17-22.
- (12) 可視化情報学会 編, PIV ハンドブック, 第1版(2002), pp.58-62, 森北出版.
- (13) 浅沼強 編, 流れの可視化ハンドブック, 第5版(1982), pp.328-331, 朝倉書店.
- (14) 新岡嵩, 河野通方, 佐藤 順一 編著, 燃焼現象の基礎, 第1版(2001), オーム社.
- (15) 藤川武敏, “LIF 法による燃料濃度分布の定量測定及び燃焼変動解析への応用”, 自動車技術会シンポジウム講演論文集, No.10-2, 20024837(2002), pp.40-45.
- (16) 大倉康裕, 鬼丸裕美, 佐藤誓祐, 浦田泰弘, 店橋護, “吸気切換えデバイスにより誘起されるエンジン筒内流動の高速 PIV 解析”, 自動車技術 2016 年春季大会学術講演会講演予稿集, 20165344(2016), pp.1835-1840.
- (17) 大倉康裕, 樋口和哉, 浦田泰弘, 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.809(2013), pp.2193-2206.
- (18) Law, Chung K., COMBUSTION PHYSICS, Reprinted (2011), pp.496-500.