ガソリン直噴エンジンの現象設計を支えた可視化技術*

桑原 一成**, 安東 弘光**

Eyes and Insight for Gasoline Direct Injection Engine

Kazunari KUWAHARA and Hiromitsu ANDO

1. はじめに

エンジンの世界で燃焼診断という言葉が一般的に使われるようになったのが十年程前である。その後の十年間にシリンダ内現象の可視化・計測技術は、レーザ、光増倍といった光電子技術や高速度撮影技術の進歩に支えられ大きな進展を遂げてきた。ピストンの動きとともに急速に形状が変化する空間の中に閉じ込められ、時間的にも空間的にも変動が大きい流動、混合気形成、燃焼といった現象を直接解析の対象とすることができるようになった。得られた結果は多くのサブモデルの確立に適用され、モデリング技術の向上のために役立てられてきた。これらの診断技術の進展によってシリンダ内現象への理解が進むにつれ、エンジン技術は燃焼を制御する発想と、それを実現する手段を手に入れることができるようになった。エンジンの燃焼制御は着火や火炎伝播を制御することを目的とするが、一旦燃焼が始まってしまうと現象を制御することが困難であるため、一般には燃焼開始前の場の構造を制御、最適化することによって実現される。最近では、目的に応じて現象を制御する現象設計という新しいアプローチがさまざまな局面で試みられている。

この典型的な例を、ガソリンエンジンの燃費低減の中心技術として各自動車メーカーが展開を図っている予混合リーンバーンエンジンとガソリン直噴エンジンに見ることができる。これらのエンジンでは、シリンダ内の流動、空気と燃料の混合を制御することによってそれぞれの燃焼コンセプトにとって最適な場を実現し、その中で着火と火炎伝播を行わせている。

通常のガソリンエンジンが全ての運転条件で理論混合比付近の予混合気を用いるのに対し、リーンバーンエンジンは高出力を必要としない条件で、その名の通り希薄な予混合気のもとで燃焼を行わせるものである。吸入空気の増量による絞り損失の低減、燃焼温度の低下による熱損失の低減、燃焼ガス温度の低減と混合気中の二原子分子の割合が増加することによる比熱比の増大が、熱効率向上の要因である。この場合、熱効率向上の効果を最大限に引き出すとともに NO_x 生成を低減するため、

予混合気の希薄燃焼限界を如何に拡大するかが現象設計のポイントである。層流燃焼速度が大幅に低下する燃焼限界付近で良好な燃焼を実現するためには、燃焼期間の乱れを強化して乱流燃焼速度を増大させることが必要である。このため、吸気行程で吸入空気に与えられた運動エネルギーを減衰し難いスケールの大きな旋回運動のかたちで圧縮行程後半まで保存し、燃焼直前に乱れに変換させる。希薄燃焼限界を拡大するためには、このプロセスを制御し燃焼期間の流れ場の構造を最適化することが重要である。これに混合気の濃度ムラを積極的に利用して燃焼限界を拡大する考え方を組み合わせることが有効であり、流れ場の制御は混合気濃度分布の最適化も視野に入れて行われる。

筆者らは、Fig. 1 に示す予混合リーンバーンエンジンの燃焼コンセプトを提案している¹⁾が、このコンセプトの基本技術は、タンブルと呼ばれる旋回流、タンブル制御ピストンと名付けたわん曲した頂面を持つピストン、吸気ポートに設けられた隔壁を用いることである。それ以前から、タンブルの希薄燃焼活性化の効果について検討するためにタンブルに支配された流れ場とその中で進行する希薄燃焼の特性を解析してきたが、コンセプトの発想に当たりその結果が重要な役割を果たした。

流れ場の特性は、高密度で二次元流速ベクトルを得ることができる二色レーザシート法²⁾、データ密度は劣るが瞬時の三次元流速ベクトルを得ることができる三色レーザシート法³⁾という二種類のPTVを使い分けるこ

Fig. 1 Premixed Leanburn Concept Employing Tumble and Tumble-Control Piston

* 原稿受付 1999年1月5日

** 正会員 三菱自動車工業(株) 乗用車技術センター エンジン研究部

とと高データレートLDVによって解析された。燃焼場の特性は、紫外感応型イメージンテンシファイアと高速度ビデオを用いて火炎の化学発光を撮影し、画像データベースと自動画像処理システムを構築することで多サイクル、時系列の膨大な画像データを解析することによって求められた⁴⁾。その結果、シリンダ内の希薄燃焼を記述するためには、流れ場をバルクフロー、数ミリのスケールを持った渦、乱れに分け、燃焼場を未燃領域、既燃領域、燃焼領域、消炎領域に分けて取り扱うことが必要であるというモデルを提案するに至った⁵⁾。強い乱れのもとでは火炎素面の至る所で消炎が起こるが、シリンダ内の拘束された空間の中では一旦消炎した領域が燃焼領域に取り込まれ再び燃焼する機会を与えられる。タンブル崩壊後の流れ場は多くの渦によって特徴づけられており、この中で希薄燃焼が進行するという事実を踏まえ、燃焼領域と消炎領域の混合に適したスケールを持つ渦は乱れとは燃焼に果たす役割を異にするものととらえるのが妥当である。スケールの大きいバルクフローのこのような混合への寄与は小さいであろう。

この考え方にもとづけば、タンブルの希薄燃焼活性化の効果を最大限に引き出すための流れ場の制御への要求は、燃焼直前に崩壊するタンブルをバルクフローが残存しないかたちで速やかに渦と乱れに変換することである。タンブル制御ピストンは、圧縮行程の半ばまではタンブルの旋回構造を効果的に保存することができるが、タンブル崩壊過程で経由するバルクフローの構造を不安定なものにし渦と乱れへの変換を加速する形状を持っている。このピストンは崩壊前のタンブルの旋回構造を明確にし旋回軸方向の流速成分を抑えることによって、吸気ポート隔壁の間の空間に噴射されシリンダ中央部の層に供給された燃料が周辺部に拡散するのを防ぐ役割も果たす。このため、タンブル崩壊後の点火時期でも点火プラグ周辺の混合気を僅かに濃くとどめておくことができる。このコンセプトによって流れ場の構造と混合気濃度分布の適合を巧妙に両立させることができている、優れた希薄燃焼特性を実現することができる。

コンセプト発案のポイントは、解析結果から問題点を洗い出し現象制御への要求を明確にすることができたことであると考えられる。現象制御のイメージを明確にできれば、それを実現する手法を思考の中で構築することはそれほど困難ではないと思う。

以上は筆者らの六、七年前の取り組みであるが、現象設計に現象診断技術を効果的に適用することができた例であるため紹介した。前置きが長くなったが、本稿の主旨は最近の取り組みであるガソリン直噴エンジンの現象設計とこれを支えた可視化技術であり、以下にこれについて述べたい。

2. ガソリン直噴エンジンの燃焼コンセプト

ガソリン直噴エンジンは、シリンダ外で空気に燃料を

供給して予混合気を形成する従来のガソリンエンジンとは異なり、シリンダ内に直接燃料を噴射するエンジン技術である。運転条件に応じて基本的に二つの混合状態を使い分けることができる。すなわち、高負荷運転条件では吸気行程中に燃料を噴射しシリンダ内に流入する空気との混合を進め、均一性の高い予混合気を形成する。この場合、通常のガソリンエンジンと同様に理論混合比に近い条件で燃焼を行わせ、優れた出力性能を実現する。低負荷条件では点火直前の圧縮行程後期に燃料噴射を行い、点火プラグ周辺に燃料を集める層状混合気の形成をねらう。この場合はディーゼルエンジンのように空気絞り弁を使わず、点火プラグ周辺の混合気は濃いしがシリンダ内の平均では極めて希薄な条件で燃焼を行わせ、高い熱効率を達成することができる。

このエンジンが出力と熱効率の両面で優れた特性を示すということは古くから分かっていたが、その実現は困難であった。これは、点火前の短時間の間に燃料の気化、空気との混合を進め、適度な濃さの混合気を点火プラグという限定された場所に、点火時期という限定された瞬間に配置するという高度な混合の制御が必要であるためである。これまでに試行されてきた数々のコンセプトは、燃料を点火プラグ周辺に安定に集める手段として、燃料噴霧が点火プラグに直接接するレイアウトをとってきた

	Fuel Injection in Early Stage of Intake Stroke	Fuel Injection in Late Stage of Compression Stroke
Concept
Spray	Wide Dispersion No Wall Wetting	Compact Atomization
Mixture	Uniform Mixture	Distinctively Stratified Mixture
Target	High Performance	Fuel Economy Improvement

(a) Mixture Preparation Strategies

(b) Stratified Mixture Preparation

Fig. 2 Mixing Control Concept for Gasoline Direct Injection Engine

が、液体燃料が付着したり混合気が濃すぎるために引き起こされる点火プラグのくすぶりがその実用化を妨げてきた。このエンジンを完成させることは長年にわたってエンジン技術者の夢であると考えられてきた。

この問題を解決したのが、点火プラグと燃料噴霧を離して配置し広い空間を利用して混合を制御する、Fig. 2に示す筆者らのコンセプトであった^(6),7)。燃料は点火プラグではなくピストン頂面に向かって噴射される。層状混合気を形成する場合にこの燃料を点火プラグ周辺に集めるため、球形ピストン燃焼室、直立吸気ポート、スワールインジェクタという三つの技術を採用している。圧縮行程後期に燃料噴射を行うと、ピストン頂面に向かう噴霧と上昇してくるピストンが対向するかたちとなり、噴霧はピストン燃焼室の壁面に衝突する。ピストン燃焼室は、その壁面に衝突する噴霧の運動と噴霧運動によって誘起された空気流動を利用して、気化、混合が進んだ燃料を点火プラグに導くように設計されている。直立吸気ポートからシリンダ内に流入する空気は、予混合リーンバーンの場合とは逆の旋回方向を持つタンブルを形成するが、ピストン燃焼室はこの流れを圧縮行程を通して保存しておくのにも適した形状になっている。この流れも燃料の点火プラグへの輸送を助ける。直立吸気ポートを用いることによって吸気側にインジェクタを取り付ける空間が生じ、意図した方向へ燃料を噴射することが可能になる。スワールインジェクタは、ピストン燃焼室の中に収まるようにコンパクトでありながら微粒化の進んだ噴霧を形成し、燃料の空気流動への追従性を高めるとともに気化、混合を促進する。インジェクタから点火プラグまでの長い経路をたどって混合を進めることによって、点火プラグ周辺の混合気が濃くなりすぎるのを防ぐ。

均一混合気を求める場合、吸気行程中に燃料噴射を行うと噴霧は下降していくピストンを追いかけるかたちとなり、最適な噴射時期では噴霧とピストンの衝突が起こらない状況が成立する。この場合、ピストンが下降してシリンダ内の空間が広がっていくにつれ、広がった部分を目指して噴霧が成長していくことで、燃料をシリンダ

内に早急に分散させることができる。混合気の均一性を高めるためには分散性に優れた噴霧が求められるが、これはコンパクトな噴霧を求めた層状混合気を形成する場合とは相反する要件である。スワールインジェクタは、状況に応じて広分散とコンパクトという矛盾した噴霧構造への要求に応えるために噴霧の分散を制御する技術でもある。

3. ガソリン直噴エンジンの現象設計のための現象診断

3.1 燃料噴霧の診断

上述のように、ガソリン筒内噴射エンジンの混合制御のポイントのひとつは、均一混合気と層状混合気を形成する場合で異なる噴霧構造への要求を実現することである。また、短時間で燃料の気化、空気との混合を進めるためには微粒化に優れた噴霧が必要である。噴霧の直進運動が強すぎると、吸気側から噴射した燃料が排気側のシリンダライナに衝突、付着し潤滑油の油膜を希釈してしまうため、この運動を抑えることも必要である。噴霧の微粒化が燃料に与えられた運動エネルギーを燃料粒子の表面張力のポテンシャルに置き換えるプロセスであることを考えれば、噴霧の微粒化の促進と直進運動の抑制も両立が困難な要件と言える。

こうした燃料噴霧に対する複雑な要求に応えるとともに燃料の噴射量と噴射時期を正確に制御するために用いたのが、電磁式スワールインジェクタである。噴射燃料に噴射孔接線方向の運動成分を与える構造を備え、この成分によって噴霧の直進方向に向いて旋回する空気流動を誘起する。この流動によって噴霧に旋回運動が与えられる。

このインジェクタの噴霧特性を調べるため、レーザーシートや高速ビデオを用いた可視化技術が効果的に用いられた。

Fig. 3は、ポリマーマイクロバルーンをシードした空間で自由噴霧を形成し、噴霧運動によって誘起される空気流動を観測した結果である。噴霧軸断面にレーザーシ

Fig. 3 Air Motion Induced by Fuel Spray Motion
(Injection Pressure : 5 MPa, Ambient Pressure : 0.1 MPa)

(a) Ambient Pressure: 0.1 MPa (b) Ambient Pressure : 0.5 MPa
Fig. 4 Fuel Spray Structures (Injection Pressure : 5 MPa)

トを照射した時に見られる空気流動は噴霧の直進運動を妨げる。水平断面に見られる空気流動は噴霧に旋回運動を与えるが、空気と噴霧は同方向に旋回するため、噴霧の旋回運動を妨げることはない。直進運動は急速に減衰するが、旋回運動は保存され易いという原理にもとづいて、噴霧の直進運動を抑えながら燃料の気化、混合に必要な運動を旋回運動として保持するという、ガソリン直噴エンジンに適した噴霧を実現するのが、スワールインジェクタである。

Fig. 4は自由噴霧の断面構造を観測した結果である。均一混合気と層状混合気を形成する場合には燃料噴射時期のシリンダ内圧力が異なる。吸気行程中の圧力は大気圧以下であるが、圧縮行程後期には圧縮が進み圧力は上昇している。大気圧下の燃料噴射では中空構造を持った噴霧が形成される。加圧下では燃料が噴霧軸周辺に集められ、噴霧はコンパクトになる。このインジェクタは、広分散とコンパクトという相反する噴霧構造への要求をシリンダ内圧力の違いだけを利用して自然に実現することができ、上述した噴霧運動の特性も含めて、意図する混合制御を実現するために最も適したものと結論づけることができる。

このような可視化を様々な条件や視点で行うことは、インジェクタの構造と噴霧運動の関係、噴霧運動とこれによって誘起された空気流動の相互作用の状況、これらが噴霧特性におよぼす影響などを明らかにし、インジェクタの構造を最適化するために大きな役割を果たした。

3.2 混合気形成の診断

コンセプトの成立要因に検討を加えるためにシリンダ内現象の可視化も行われた。これに際し、ピストン燃焼室が球形だとその中の現象にアクセスすることが困難で

あるため、その形状を円筒状の二次元形状に置き換えた。燃焼室のシリンダヘッド部分はベントルフ型でありその屋根部に吸・排気弁が配置されるが、側壁部に観測窓を設置することができ、Fig. 5に示すようにこの窓を通して燃焼室内を覗くことができる。燃焼室形状の変更が現象におよぼす影響はあるが、これについて議論するよりも、これを前提として得られた結果について思考を重ねることが重要であると考え。

Fig. 6は、両側壁部に設置した観測窓を用いたシャドウグラフ法によって、層状混合気を形成する場合にピストン燃焼室の壁面に衝突する燃料噴霧の挙動を高速度撮影した結果である。クランク角5度毎の噴霧の輪郭が示してある。タンブル有無の場合を比較すると、タンブルが点火プラグに向かう噴霧を加速させていることがわかる。タンブル有の場合、点火時期を上死点前15度に設定すると、点火時期までに点火プラグに噴霧が到達するかどうかという燃料噴射時期の境界条件は上死点前40度である。噴霧がピストン燃焼室の中に収まるかどうかという境界条件は上死点前70度である。すなわち、噴射時期を上死点前40度から70度までの範囲に設定すると、噴霧とピストンの衝突を利用して燃料を点火プラグに運ぶことができる。タンブル無の場合はこの範囲は狭くなる。上死点前40度で噴射された燃料は点火時期までに点火プラグに到達しないし、上死点前70度で噴射された燃料はピストン燃焼室の外に分散してしまう。タンブルによる噴霧の加速は、設定可能な噴射時期の範囲を拡大する役割を果たしている。

これまで試行されてきたコンセプトでは、燃料噴霧の運動量がエンジン回転速度に依存しないこと、これに対してシリンダ内流動の強度はエンジン回転速度にほぼ比

Fig. 5 Optical Access to Combustion Chamber

Fig. 6 In-Cylinder Fuel Spray Behavior Visualized with Laser Shadowgraphy (Engine Speed : 1000 min⁻¹, Wide-Open Throttle, Injection Pressure : 5 MPa, A/F : 35)

Fig. 7 Fuel Distribution at 15 °CA. BTDC Visualized with LIF of Gasoline (with Reverse Tumble, Other Conditions: See Fig. 6)

例して増大するというアンバランスが、適切な混合気形成を実現することができるエンジン回転速度の範囲を狭く限定していた。ここに示したコンセプトでは、噴霧のピストンへの衝突を混合気形成の主要因としながら、回転速度が上昇し混合気形成に使える時間が短くなるのにもとないタンプルの混合気形成への寄与が増大していくという巧妙な機構によって、広い回転速度の範囲でコンセプトを成立させることができる。

Fig. 7 は、ガソリンの LIF を用いて点火時期の燃料分布を可視化した結果である。通常点火プラグを取り付けている部分に円筒レンズを埋め込み、これを通してシリンダ内の中心断面にエキシマレーザのシート光を照射している。LIF の定量性には問題があるが、LIF 強度を概ねの燃料濃度の指標として扱うのは妥当であろう。上死点前 40 度の燃料噴射時期では、点火プラグは噴霧最先端部の濃い混合気に接触している。上死点前 50 度では、点火プラグは噴霧先端部に形成される巻き上がり渦のところに位置している。この領域では噴霧への空気導入が活発であると考えられる。上死点前 70 度では噴霧の分散が最も進んでいる。この結果は、噴射時期を制御することによって点火プラグ周辺の混合の進行を制御することができることを意味している。

エンジン回転速度と燃料噴射時期の広い範囲で層状混合気の実現することができ、その濃度を自由に制御することができるということは、このコンセプトの混合制御の自由度が高いということを示している。

3.3 燃焼の診断

はじめに、可視化技術ではないが、燃焼診断技術として威力を発揮した高速度分光器を用いた火炎発光のスペクトル解析について紹介したい。時間的にも空間的にも変動が大きくそのサイクル変動も大きいシリンダ内現象を解析するためには、時系列のデータを得ることが効果的である。このため、 $100\mu\text{s}$ という時間ステップ毎に 256 本のスペクトルデータを収集することが可能な分光器を開発した⁸⁾。可視化技術に全く関係ないというものでは

なく、この分光器の発想は、画像素子の高速度スキャン技術のことを考えれば、光電素子アレイから高速でデータを得ることができないわけではないであろうというところにあった。

Fig. 8 に、ピストン燃焼室の中心領域で収集したクランク角 1 度毎の火炎発光スペクトルを示す。均一混合気の形成をねらった場合、紫外域から可視域にかけての発光は、 $300\sim 400\text{ nm}$ の波長域に広がる O_2 の Schumann-Runge システムの発光と $350\sim 500\text{ nm}$ にわたる CO-O の再結合発光を主成分とし、これに OH ラジカルと CH ラジカルの発光が重なることによって構成されている。これは通常のガソリンエンジンの火炎と同様の特徴であり、均一混合気を求める混合制御の目的が達成されていることを意味する。

層状混合気を形成した場合は、濃い混合気の領域でスートが発生するため、火炎発光は本質的にスートからの固体熱発光に支配されている。これは、強く層状化された混合気の燃焼の典型的な特徴である。しかし、初期燃焼の期間にはこの発光に OH 、 CH 、 C_2 などのラジカル発光が重なっており、燃焼後半には CO-O の再結合発光が含まれている。

そこで、層状混合気の燃焼に見られる火炎発光の空間分布を調べるため、ラジカル発光の寄与が大きい $270\sim 370\text{ nm}$ の波長域の紫外発光と、ほぼ全てを固体熱発光と見なすことができる $510\sim 590\text{ nm}$ の可視発光を選択し、火炎挙動の高速度撮影を行った。微弱な紫外発光を可視化するためには紫外感応型イメージインテンシファイアが必要である。Fig. 9 に結果を示す。注目すべきことは、紫外発光によって定義される火炎面が燃焼室全域に急速に伝播した後、固体熱発光をとともう輝炎がその火炎面の背後の領域に伝播していくことである。すなわち主燃焼領域は、ある程度燃焼が進行しラジカルや CO に満たされた領域に伝播していくと考えられる。

(a) with Uniform Mixture Preparation (A/F : 14.7)

(b) with Stratified Mixture Preparation
(Injection Timing : 50 deg. BTDC, A/F : 35)

Fig. 8 Time-Series Flame Emission Spectra

(Engine Speed : 1000 min^{-1} , Injection Pressure : 5 MPa, Ignition Timing : 15°CA . BTDC with Reverse Tumble)

通常のガソリンエンジンでは火炎は可燃混合気に向かって伝播していき、ディーゼルエンジンであれば噴霧を取り囲む空気に向かって伝播していく。ガソリン直噴エンジンの層状混合気のもとでは輝炎は、燃料と空気だけでなくラジカルやCOが存在する領域に向かって伝播していく。輝炎が着火源となって始まるこの領域の燃焼は活発であり、層状混合気の周辺部に存在する可燃範囲を越えて希薄な混合気までも燃焼させてしまう。この燃焼に助けられ、スートも速やかに再燃焼し消滅するものと考えられる。このようにガソリン直噴エンジンでは、従来のエンジンの場合とは異なる燃焼形態が実現されているようである。

4. おわりに

これまでに筆者らは、シリンダ内現象の診断技術を効果的に適用して予混合リーンバーンエンジンとガソリン直噴エンジンの燃焼コンセプトを確立してきており、現象診断技術の現象設計への寄与のあり方を示してきた。現象診断技術の役割は、現象のイメージを明確にすることを出発点として、現象設計のイメージや現象制御の手法を思考の中で練り上げていくための手がかりを与えてくれることにあてられている。

ガソリン直噴エンジンによってエンジン技術は混合気形成の自由度を手に入れた。燃焼診断の結果、このエンジンの燃焼は上述のように特有の形態をとることがわかった。読者ならこの状況にどう応えるであろうか。筆者らは、このエンジンの混合気形成の自由度の高さを利用すれば、通常であれば時間的、空間的に分離されている燃焼の各過程の生成物や未燃混合気を混ぜ合わせることができないかと思いをめぐらせることによって、新しい燃焼制御手法に辿り着くことができた。

一つは、吸気行程中と圧縮行程後期の二回に分けて燃料噴射を行い、層状混合気の周囲に可燃範囲を越えた希薄な混合気を意図的に配置することによって、シリンダ内の平均混合気濃度が理論混合比付近であっても、層状混合気の燃焼で発生するスートを燃やしきってしまうものである⁹⁾。もう一つは、圧縮行程後期と膨張行程後半に燃料噴射を行うもので、適度に高温の既燃ガスの中で緩やかな着火反応を引き起こしその生成物のライフタイムを引き伸ばすことによって、過酸化化物からスートまでの燃焼の各過程の生成物が混在する状態を作り出しこの中でスートを燃やしきる。効果的に排ガス温度を上げることができる触媒活性化の促進手法である¹⁰⁾。

ガソリン直噴エンジンとは、単に一つのエンジン技術の名前ではなく、ガソリンエンジン、ディーゼルエンジンというのと同じレベルの新しいエンジンのカテゴリが生まれたことを意味するものであると考えている。このエンジンの今後の技術進化にとって重要なことは、さらに新しい燃焼形態、すなわち混合気形成への新しい要求を見出すことではないかと思う。このイメージを明確に

Fig. 9 Flame Propagation with Stratified Mixture
(Injection Timing : 40 °CA. BTDC, Other Conditions : See Fig. 8)

することができれば、それを実現するための手段は必ず見つかる。このために、シリンダ内現象の診断技術によって得られる結果を利用して直感力を研ぎ澄ましておくことが重要であると考えている。

参考文献

- 1) K.Kuwahara, T.Watanabe, S.Ohmori, J.Takemura, T.Kume and H.Ando: Optimization of In-Cylinder Flow and Mixing for a Center-Spark Four-Valve Engine Employing the Concept of Barrel-Stratification, SAE Paper 940986, 1994
- 2) K.Kuwahara and H.Ando: TDC Flow Field Structure of Two-Intake-Valve Engines with Pentroof Combustion Chamber, JSME International Journal, Series B, Vol. 36, No. 4, 1993, 688
- 3) 渡邊, 桑原, 河合, 安東: タンブルに支配された流れ場の三次元構造の解析, 日本機械学会論文集 (B編), 61巻, 589号, 1995, 264
- 4) K.Kuwahara, H.Ando: Analysis of Barrel-Stratified Lean Burn Flame Structure by Two-Dimensional Chemiluminescence Measurement, JSME International Journal, Series B, Vol. 37, No. 3, 1994, 650
- 5) K.Kuwahara, T.Kawai and H.Ando: Influence of Flow Field Structure after the Distortion of Tumble on Lean-Burn Flame Structure, International Symposium COMODIA 94, 1994, 89
- 6) T.Kume, Y.Iwamoto, K.Iida, N.Murakami, K.Akishino and H.Ando: Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engine, SAE Paper 960600, 1996
- 7) 桑原, 渡邊, 首藤, 安東: 火炎温度計測による筒内噴射ガソリンエンジンの燃焼解析, 第13回内燃機関シンポジウム講演論文集, 1996, 145
- 8) K.Kuwahara, K.Ueda and H.Ando: Mixing Control Strategy for Engine Performance Improvement in a Gasoline Direct Injection Engine, SAE Paper 980158, 1998
- 9) K.Kuwahara and H.Ando: Two-Stage Combustion for Quick Catalyst Warm-up in Gasoline Direct Injection Engine, International Symposium COMODIA 98, 1998, 293

口絵 1 燃焼過程の流れ場の可視化結果
(バルクフローを速やかに渦や乱れに変換することが、予混合希薄燃焼エンジンの現象設計のポイントであった。)

	Fuel Injection during Intake Stroke	Injection in the Late Stage of Compression Stroke
Concept
Spray	Wide Dispersion, No Wall Wetting	Compact, Atomization
Combustion	Homogeneous	Stratified
Target	High Performance	Fuel Economy Improvement

口絵 2 ガソリン直噴エンジンの燃焼コンセプト

口絵 3 混合気形成のモデリング結果

口絵 4 ピストン燃焼室内の可視化結果