

Feature Article

特集論文

HCCI燃焼における残留排出ガス及び温度の同時画像化

Rothamer David

残留排気ガスと温度分布が、予混合圧縮着火(HCCI)燃焼に及ぼす影響を研究するための新しい診断技術を紹介する。この技術は蛍光トレーサ(ジエチルケトン)の2波長励起を利用することで、光学を用いて可視化されたエンジン筒内の燃焼中のEGR(排気再循環)と温度分布の高忠実度画像を得るものである。この診断法は、筒内混合気の成層化がHCCI燃焼過程に及ぼす影響を解明するために開発された。

はじめに

予混合圧縮着火エンジンは、窒素酸化物(NO_x)とすすの排出を大幅に低減できる可能性に加え、燃焼効率においてもディーゼルエンジンと肩を並べられる^[1]。この燃焼方式の主な欠点は、エンジン負荷と速度範囲が制限されることと、燃焼開始を直接制御できないことである。この限界を克服するため種々の方法が提案され、多くは大規模な内部EGRによる筒内混合気の層状化と温度勾配を利用している。これらの手法の成否は層状化の精度と制御にかかっており、層状化の過程を理解するため必要となるのが、EGRレベルと温度の層状化を筒内で監視できる空間分解診断法である。

筒内EGRと温度分布計測に対する要求から、HCCI燃焼中のEGRと温度の同時画像化を実現する診断法が開発された。この診断法は、従来から用いられている固定波長パルスレーザー2基と、デュアルフレームのインタライン転送インテンシファイドCCDカメラを使用し、吸気と燃料に添加されたトレーサ分子の蛍光画像を撮影する。またデータを適切に補正して蛍光画像を温度とEGRに変換することができる。この診断法ではHCCI燃焼に伴う広範囲の温度条件と圧力条件において最良の計測精度が得られるように最適化されている。本論文では、この診断法の概要を説明し、2つのHCCI燃焼方式で得られた結果を紹介する。

EGR/温度画像の2波長診断法の概要

この研究の診断技術としてトレーサを用いた平面レーザー励起蛍光(PLIF)法を採用した。トレーサを用いたPLIF法は、計測が容易な吸収帯と発光帯を持つ蛍光トレーサを利用して流れ環境における計測を行う。Einecke他^[7]、Fujikawa他^[8]、Kakuho他^[9]などがすでにこの方法による温度計測を実施している。本研究でも温度の計測にはデュアル励起波長法を採用した。この方法は、2つの蛍光画像を2つのレーザー励起波長で連続して撮影する。2つの画像は、流れが静止して見えるほど短い間隔(今回の例では5 μs)で撮影される。次にバックグラウンド及びレーザー光シートの不均一性を補正し、2つの画像の比を取る。トレーサ物質と励起波長を適切に選択することにより、温度との強い相関関係を示す信号比を得ることができるようになる。

蛍光トレーサにはジエチルケトンを用いデュアル波長励起を行った。ジエチルケトンを用いたのは酸素による蛍光のクエンチングに対する抵抗性があり、**図1**に示すように吸収スペクトルの幅が比較的広いというメリットがあるからである。吸収範囲が広いと、一般的なレーザーでも励起が可能となる。波長270 nm以上の長い波長ではジエチルケトンの吸収断面積は温度と共に大幅に増大する。この特性により高温における蛍光量子収率の低下を抑えて、より長い励起波長で1000 Kに近い温度での画像

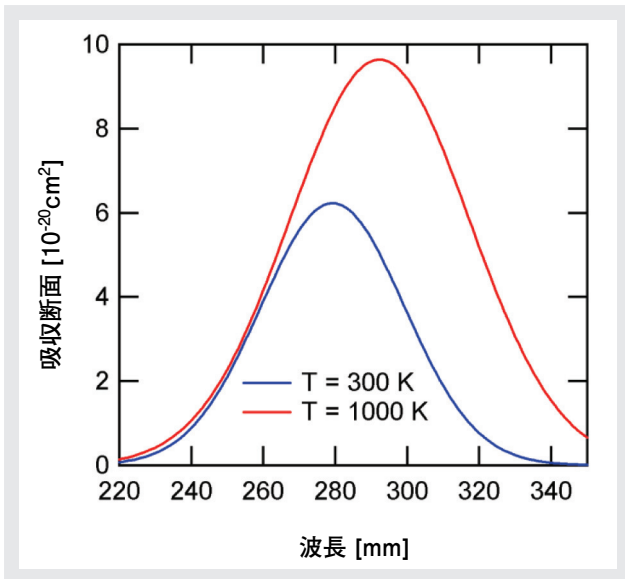


図1 Kochの曲線近似^[10]を用いて算出した2つの温度におけるジエチルケトンの吸収スペクトル

化が可能となる。

温度計測のために集録した複数のジエチルケトン蛍光画像の一つを、EGR分布の計測に利用する。トレーサは吸気と燃料のいずれにも添加されるため、ジエチルケトンの蛍光信号からは局所的な空気と燃料のモル分率が得られる。筒内の内容物は空気、燃料、EGRの3成分として理想化でき、いずれかの2成分を計測することで3成分目を求めることができる。すべてのトレーサが燃焼過程で消費された場合、EGRのモル分率は空気と燃料のモル分率から1を引いた値になる。

$$\chi_{EGR} = 1 - (\chi_{Air} - \chi_{Fuel}) \dots\dots\dots (1)$$

χ_{EGR} はEGRのモル分率で、 χ_{Air} は空気のモル分率、 χ_{Fuel} は燃料のモル分率である。DeschampsとBaritaud^[11]は過去に同様の手法でEGRを計測し、これを負PLIF (N-PLIF)と呼んでいる。

エンジンの圧力と温度の診断最適化

わずかな温度差と組成の違いが、HCCI燃焼の点火と放熱過程に大きな影響を及ぼすことがある^[5]ため、温度とEGRを共に正確に計測するためには、できるだけ高性能のシングルショットレーザパルスが望ましい。蛍光信号が比較的高く検出確率がショットノイズによって制限される場合、蛍光のS/N比は蛍光信号の平方根に比例する。従ってS/N比を最大にして精度を上げるには、蛍光信号を対象エンジン状態の全範囲において最大化する必要

がある。線形励起限界における蛍光信号は以下の式によって求められる。

$$S_f = \frac{E}{h\nu} dV_c \frac{\chi_{abs} P}{kT} \sigma(\nu, P, T, \chi_i) \phi(\nu, P, T, \chi_i) \eta_{col} \dots\dots\dots (2)$$

ここで S_f は捕獲された蛍光光子の数で、 E はパルスあたりのレーザエネルギー、 h はプランク定数、 ν は励起光子の周波数、 χ_{abs} は吸収種のモル分率、 P は圧力、 T は温度、 σ は吸収断面積、 ϕ は蛍光量子収率、 η_{col} は光学系の捕集効率である。

式(2)に基づき、特定トレーサの信号レベルを励起波長において最大にするには、 $\sigma \phi / \nu$ の積を最大にする必要がある。最適化の過程において、全励起波長の考慮はせず、高パルスエネルギーのレーザ系またはこれらの系によりラマンシフトした波長のみを考慮した。これらの系には、248 nmのフッ化クリプトン(KrF)エキシマレーザ、266 nmのNd:YAGレーザの第4高調波、308 nmの塩化キセノン(XeCl)レーザ、351 nmのフッ化キセノン(XeF)レーザが含まれる。

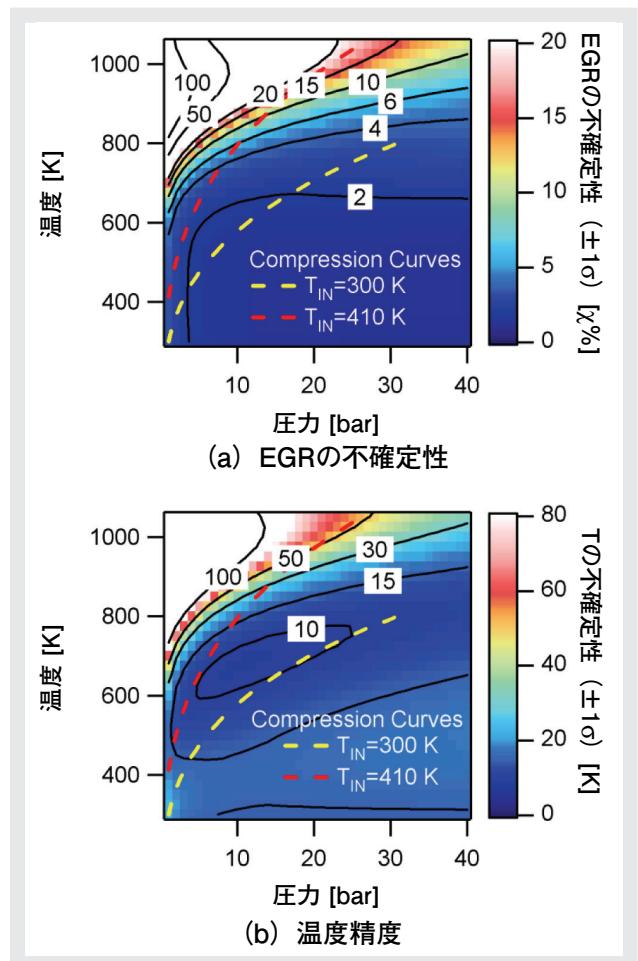


図2 波長277 nmと308 nmの組み合わせにおける不確定性 (a)EGRの不確定性 (b)温度の不確定性

Feature Article 特集論文 HCCI燃焼における残留排出ガス及び温度の同時画像化

対象となる筒内条件範囲内における温度とEGRの精度を推定するため、蛍光量子収率と吸収断面のモデルを使用した。シングルショット画像用の277 nmと308 nmの組み合わせによる最適励起波長の計算結果を図2(a)と図2(b)に示す。277 nmの波長は、高圧水素中の248 nmのKrFレーザ出力をラマンシフトにより生成する。その結果生じるEGRと温度の不確定性はこの実験条件によるもので、ピクセルビニングのレベルを上げるなど実験パラメータを変更することで、更なる改良が可能である。

HCCI燃焼中のEGRと温度の同時計測

開発した診断法を2つのHCCI燃焼方式に適用した。第1の方式は、空気とn-ヘプタンの当量比が0.30と低い、均一な混合気を用いた純粋なHCCIである。第2の方式は、ネガティブ弁重なりと直接燃料噴射のHCCIである。この方式は内部EGRを高レベルで保持することで流入する空気と燃料の混合気の加熱と大幅な希薄化を実現し、当量比0.8での動作を可能にする。

筒内の均一な混合気のPLIF画像のサンプルを図3に示す。吸気弁と排気弁、そしてインジェクタの位置が重ね合わせられている。励起に使用したレーザ光シートは、画像の下から上に向かって伝播している。

純HCCI燃焼結果の画像を図4に示す。純HCCI動作において、筒内EGRの総体的なレベルは約8%であった。画像の空間分解能は0.5 mmで、空間分解能を維持しつつノイズを低減する3x3メディアンフィルタを使用した。図4(a)と図4(b)は-336CAD(吸気弁の開弁時は

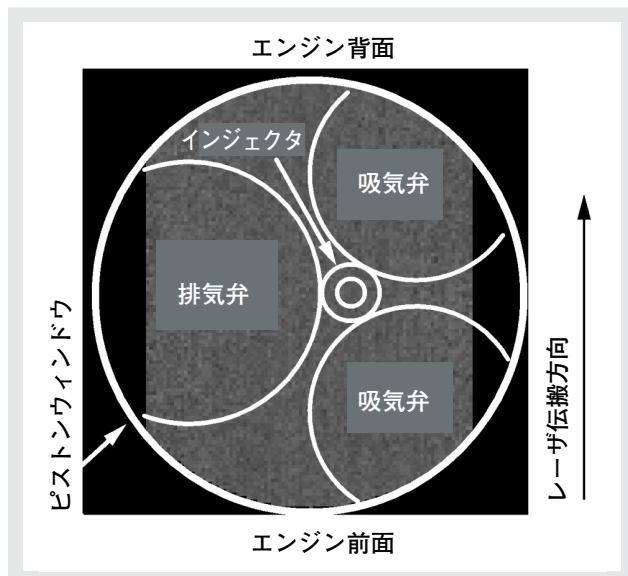


図3 弁やインジェクタ位置を重ね合わせた均一なPLIF画像のサンプル

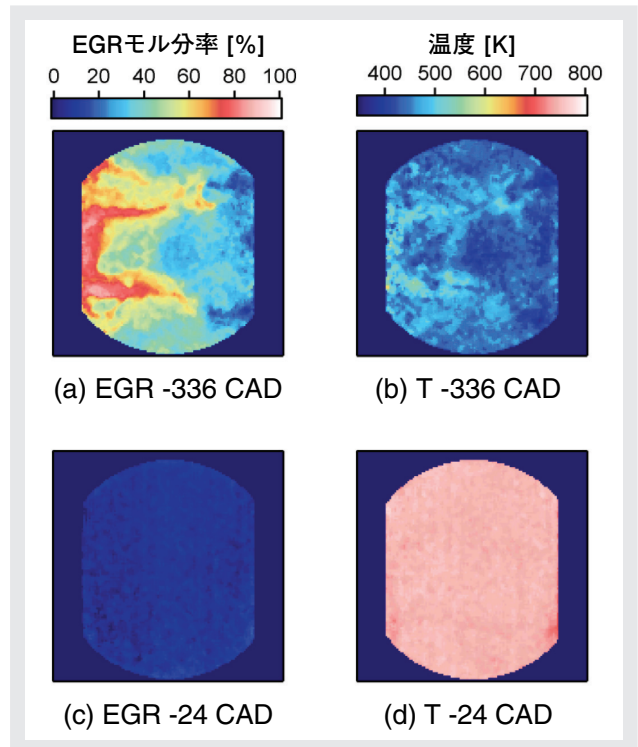


図4 純HCCI動作時、吸気弁の開弁(-336CAD)直後及び圧縮上死点(-24CAD)直前に撮影したEGRと温度の同時画像

24CAD)でのEGRと温度の分布を示す。この時点でのEGRと温度の分布は均一ではなく、EGRレベルは局所的に100%に近づいている。図4(c)と図4(d)に示すような点火直前の画像では、混合気は均一に近く、低レベルのEGRが混合気中に均一に分布されている。

NVO(ネガティブ弁重なり)動作における吸気弁と排気弁のタイミングは、純HCCI動作で採用する標準的なタイミングとは大きく異なる。特に、排気弁は276CAD(84CAD BTDC)で閉まり、相当量の排気ガスが筒内に閉じ込められる。NVO時に燃料の約30%が噴射され、部分的な放熱が発生する。吸気弁は-297CAD(63CAD ATDC)と遅く開くため、吸気弁が72CAD間も開弁されているにもかかわらず、図5(a)の画像には大量のEGRが存在する。同時に撮影した図5(b)の温度画像から、温度分布がEGRに対応して成層化されていることが分かる。一方、TDC直前の遅いタイミングの画像では、筒内の混合気はまだ均一ではないことがわかる(図5(c), (d))。この不均一性はEGRと温度双方の分布に現れている。しかし、高EGRと高温の相関関係はTDC付近では低いようである。

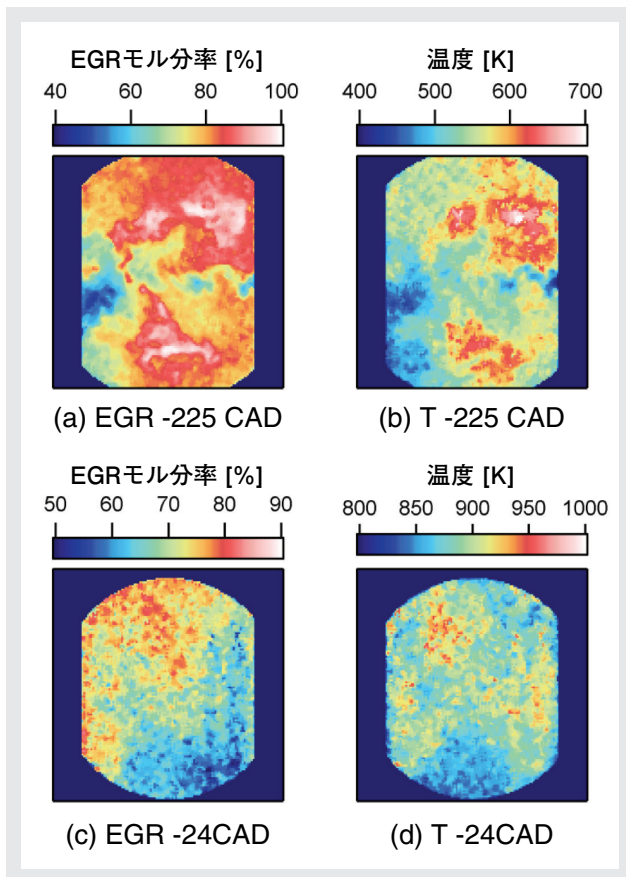


図5 NVO動作時、-225CAD(45CAD BBDC)及び圧縮上死点-24CAD(24CAD BTDC)直前に撮影したEGRと温度の同時画像

おわりに

撮影した画像には、この診断法があらゆる筒内状態におけるEGRと温度の分布を捕らえていることが示されている。EGRと温度のトレーサを用いた負PLIFに使用するトレーサと励起波長を慎重に採用することでこの診断法を最適化し、あらゆる筒内状態における画像を撮影できるようにしたためである。今後の研究では、高い筒内圧力や適度な筒内圧力下での高温といった特定の条件に対する最適化に主眼をおきたい。

参考文献

- [1] J.E. Dec, M. Sjöberg, SAE Technical Paper 2004-01-0557.
- [2] T. Amano, S. Morimoto, S. Kawabata, SAE Technical Paper 2001-01-1024.
- [3] T. Noda, D.E. Foster, SAE Technical Paper 2001-01-0250.
- [4] A. Kakuho, M. Nagamine, Y. Amenomori, T. Urushihara, T. Itoh, SAE Technical Paper 2006-01-1202.
- [5] M. Sjöberg, J.E. Dec, N.P. Cernansky, SAE Technical Paper 2005-01-0113.
- [6] R.E. Herold, D.E. Foster, J.B. Ghandhi, R.J. Iverson, J.A. Eng, P.M. Najt, Int. J. Engine Res. 8(3) (2007) 241-257.
- [7] S. Einecke, C. Schulz, and V. Sick, Applied Physics B-Lasers and Optics, 71(5) 717-723, 2000.
- [8] T. Fujikawa, K. Fukui, Y. Hattori, and K. Akihama, SAE Technical Paper 2006-01-3336.
- [9] A. Kakuho, M. Nagamine, Y. Amenomori, T. Urushihara, and T. Itoh, SAE Technical Paper 2006-01-1202.
- [10] J. Koch, Personal communication, 12/2007.
- [11] B. Deschamps and T. Baritaud, SAE Technical Paper 961928.
- [12] J.B. Ghandhi, Exp. Fluids 40 (4) (2006) 577-588.



Rothamer David

University of Wisconsin-Madison
Mechanical Engineering Department