



負のオーバーラップによるガソリンHCCIの吸気バルブタイミングと燃焼の性質

Basic Characteristics of Gasoline Fueled HCCI Using Negative Valve Overlap about intake valve timing and combustion

猪原建彦 飯田実 デイビッドE.フォスター

Abstract

YAMAHA Motor Co., LTD. had been conducting cooperative research concerning HCCI (Homogenous Charge Compression Ignition) with the Engine Research Center in University of Wisconsin - Madison, in a program that saw a steady development of new point of focus since 1998. In our past work, we discussed the fundamental characteristics of HCCI with various fuel¹⁾, and the effects on combustion under heterogeneity²⁾ and so on. In this report, we investigate HCCI using regular gasoline fuel considering practical application. The heat of burnt gas generated in the previous cycle is kept in cylinder by means of early closing of the exhaust valve, called "Negative valve Overlap" (NOL), to obtain an ignitable condition. In addition to this, sometimes we use small amount of direct injection during NOL to augment ignitability.³⁾ In this way we verified that HCCI operation is possible under similar compression ratio in conventional spark ignition (SI) engines. Besides, there is a certain width of operating range even with a fixed valve timing operation, when using this method. In this paper, we discuss mainly the relation between intake valve timing and available operational range.

要旨

ヤマハ発動機では、ウィスコンシン大学エンジンリサーチセンターとの共同研究として、1998年よりテーマを発展させながらHCCIについて研究してきた。過去に多種の燃料によるHCCIの基礎的な特性研究¹⁾や不均一性の効果の研究²⁾などを行ったが、今回報告する研究では実用化を視野に入れて、通常のレギュラーガソリンを使用した場合の応用について検討した。着火条件を得るために排気バルブタイミングを早く閉じて「負のオーバーラップ」(NOL)とすることで前サイクルの既燃ガスの熱を保持し、さらに一部燃料をこのNOL期間中に筒内に噴射することで燃焼を補助する³⁾。この方法により、通常のスパークイグニッション(SI)で使用する範囲の圧縮比でもHCCI運転ができ、しかもバルブタイミングを固定したままでも、ある程度の範囲で負荷制御が可能であることを確認した。本報告では主に吸気バルブタイミングと使用できる運転領域の関係を議論した。

1 はじめに

酸性雨や光化学スモッグといった自動車排気ガスにまつわる公害問題、あるいは地球温暖化(温室効果ガス)問題や石油資源の枯渇問題が叫ばれはじめてから久しく、多くのエンジン技術者が長い間解決策を模索してきた。その結果、今日にいたってエンジン補機や触媒、制御技術は多くの進展を見ている。しかし、コンポーネントとしては複雑化の一途をたどっており、エンジンとして根本的な解決が望まれている。均一予混合自着火(HCCI)技術は、そのような中で計測や計算技術の発展とともに注目されてきた燃焼技術のひとつである。

HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition)は、燃料をあらかじめ均一な混合気として供給し、しかも火炎伝播によらない自着火による燃焼のため火炎伝播限界に縛られない希薄な領域での燃焼が可能である⁴⁾。希薄な条件では、NO_xが生成する温度に達しない燃焼も可能であり、しかも直噴エンジンの場合問題となる過度な不均一によるスモークの発生も原理的にない。従って高価なNO_x触媒が不要になり、かつパティキュレートフィルターなどによるスモークの処理も必要もない。その上一般にスロットルバルブによる絞りを使用しないためポンプロスが少なく、低温燃焼のため熱損失も少なく、しかも燃焼は極めて早いためサイクル論的にも時間損失の小さい効率の高い運転が可能である。HCCIは排気ガスや燃費の点で有利な特質を備えているのである。

ただし、自着火燃焼に関係する技術的な難しさがHCCIの実用化を阻んでいる。具体的には、燃料成分や運転条件により変ってしまう着火時期の制御や比較的低い燃焼効率(HCやCO排出)、燃焼速度の制御などである。

熱発生が急激である点は、特に高めの負荷において騒音や強度などで問題となる。そのため、高負荷領域を他の燃焼方式と切替えるコンセプトがある^{5, 他)}。HCCIの燃焼制御としても完全な予混合ではなく、ある程度不均一性も残した混合気による燃焼として熱発生を制御する考え方も提案された²⁾。燃焼効率向上にも効果のあるこの考え方は、特に最近の直噴ディーゼルエンジンで予混合性をあげたNO_x対応の燃焼方式で、PCCIと呼んで各社が研究している。

2 NOL-HCCIについて

ガソリン混合気を自着火させるためには1000K程度が必要であり、低い圧縮比では、圧縮前温度で450K以上の高温が必要⁶⁾である。この温度条件を整えるために前サイクルの高温の既燃ガスを利用するという方法がある。今回報告する研究ではこのコンセプトのひとつである負のオーバーラップ(NOL:Negative Valve Overlap)を利用したシステムについて検討する。NOLとは、通常吸気バルブと排気バルブが同時に開いている

期間を指すオーバーラップに対して、いずれのバルブも同時に閉じている期間を同じ尺度で表現したものである。図1に示すようにNOLでは早く排気バルブを閉じてしまうため、NOL期間中に2つ目の小さな

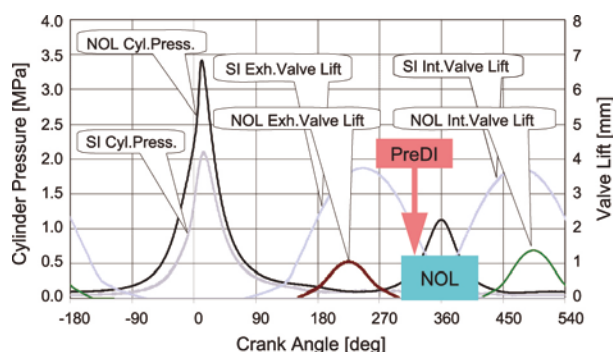


図1 NOL運転

圧力ピークが見られる。NOLは、速い応答性や他の手段と比較した時の排気から利用可能になるエネルギー量などの点からガソリンHCCI燃焼の実用エンジンに適していると思われる。ここでは、NOL運転の特徴と要求されるバルブタイミングや運転領域について議論する。

3 実験装置

この研究にはモーターサイクル用エンジンをベースとしたDI(燃料直噴)単気筒水冷250cc研究用エンジンが使われた。主な諸元は表1に示した。PI(吸気管噴射)とDIに使用したインジェクターは、同一仕様の低流量仕様スワールインジェクターとした。DI用インジェクターはシリンダーボアの中央に配置され、燃料はピストン頂部の中央に向かってヘッドから噴射される。これらインジェクターの燃料噴射圧は5Mpaである。スパークプラグはDIインジェクターの横に2つ取り付けた。

表1 エンジン諸元

Bore × Stroke	73.0 × 59.6mm
Connecting-rod length	116.0mm
Displacement Volume	249.4cc
Compression Ratio	14
Numbers of Valves	Intake 2 & Exhaust 2

実験装置全体は図2に示す。外部オイルポンプとオイルタンクを使用し、PIDコントローラーによりオイル温度は $75^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、冷却水の温度も $80^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ に制御された。この研究に使用した燃料はUSレギュラーガソリンである。オクタンインデックス、 $(\text{RON} + \text{MON})/2$ 、は87で、センシティビティ $(\text{RON} - \text{MON})$ は5.4である。

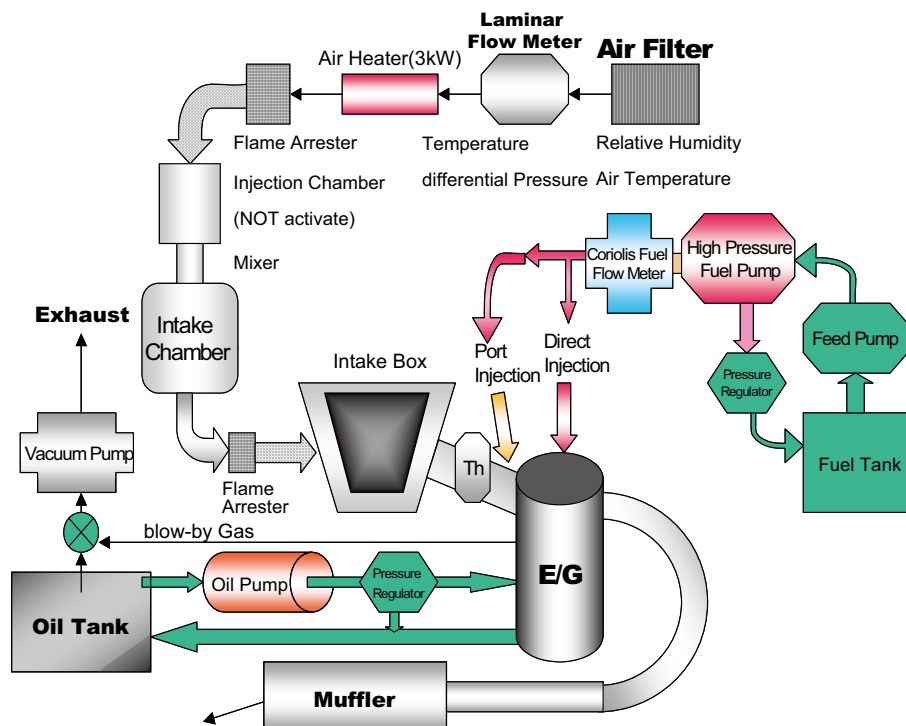


図2 実験装置

4 一般的なNOLのエンジンサイクルの特徴

HCCI運転が可能なバルブタイミングの選定には、吸気や筒内温度の一般的な挙動の情報が必要である。この検討には一次元シミュレーションが使われた。一次元シミュレーションは筒内の燃焼までは予測できないが、適当な燃焼を仮定することにより温度や圧力は計算できる。

4.1 燃焼による体積効率の変化

NOLではスロットルを使用しないにも関わらず、筒内にトラップされる新気量がエンジンの運転負荷に強く影響される。図3は筒内にトラップされたガスの量を示す。NOL期間中と圧縮行程のガス量の差は入れ替ったガスの量を意味し、着火運転時はモータリング時よりもかなり多い。この計算で体積効率はモータリング時の0.18からファイアリング時の0.33まで増大している。そのため、モータリング時の体積効率から、あるバルブタイミング設定時に得られる負荷を予想できない。

NOL期間の長さを変化させたときの残留ガス率（筒内状態）と体積効率（外気状態）の関係を図4に示す。この計算では体積効率を変化させるために、IVCとEVOを固定して吸気と排気の両方のバルブが開いている期間を変更した。図4に使用されたバルブタイミングはひとつの例としてIVCが 135° bTDCとEVOが 135° aTDCである。この計算の各ポイントは、吸気と排気は同じバルブ開き期間とした。また2100rpmにてAFRを変更したいくつかの系列について計算した。

新気は、残留ガスと混合される結果、筒内では図4における残留ガス率の補数の比率まで膨張する。

残留ガスもこの混合により収縮する。モータリングでは吸気と排気の温度がほとんど同じであるため、直線的な関係があることが分かる。図4中の矢印は、同一バルブタイミングでモータリングからファイアリングへ当量比を変更したときの変化を示す。濃い混合気の場合、バルブタイミングを変更させなくても残留ガスは大きく収縮し、かつ大きな体積効率となる。濃いAFRではモータリング条件の直線からより大きく離れる。

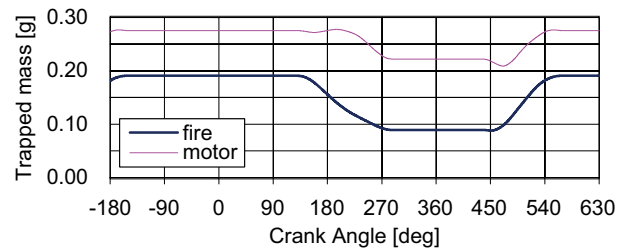


図3 筒内ガス量のサイクル内変化

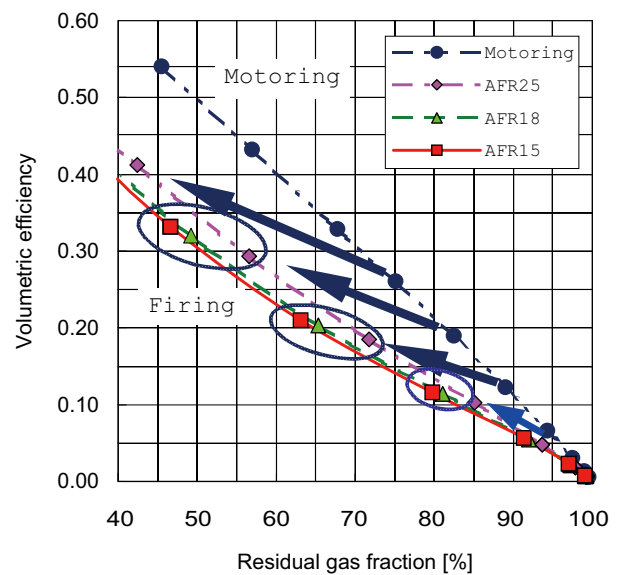


図4 バルブタイミングによる筒内ガス挙動

4.2 筒内ガス温度に影響される残留ガス率の傾向

モータリングを含んだいくつかのAFRにおける、排気TDC、吸気後のBDC、ファイアリングTDC、といったエンジンサイクル中のいろいろな時点での温度を図5に示す。ここではIVCとEVOはTDCを挟んで対称に、TDCのそれぞれ前と後135°とした。

残留ガス率で0.6~0.7のときにファイアリングTDCの温度は最大値をとる。(残留ガス量増大とともにガス温度は増大するわけだが)この点を超えると大量の残留ガスのためにガス温度は低下する。仮にTDCにおけるガス温度が1000K以上で自着火運転ができるならば、運転可能範囲は体積効率でおよそ0.1~0.35の間になる。

図6に、IVC後に筒内にトラップされたガス量を残留ガス率に対してプロットした。着火しやすい条件であるファイリングTDCにおける高温ガスは同時に低密度である。これは熱容量が小さいので燃焼時には大きな圧力上昇率となる。そして燃焼後のガス温度も高くなる。このことは低負荷で完全燃焼させるためにはよいことだが、高負荷ではNO_x排出につながる。

4.3 着火条件のエンジン回転数依存

高回転時のHCCI燃焼は、与えられた時間が少ないために短い着火遅れを要求される。図7では、エンジン回転数以外は固定してシミュレーションを行った。その結果TDCの温度はエンジン回転数とともに上昇した。このことは高回転下で着火遅れが短縮し、着火しやすくなることを示す。逆に筒内ガス量はエンジン回転数とともに減少した。

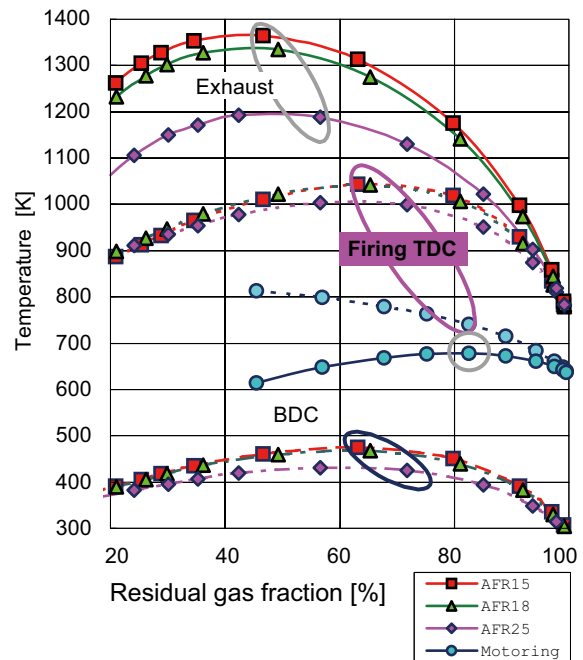


図5 バルブタイミングによる筒内温度挙動

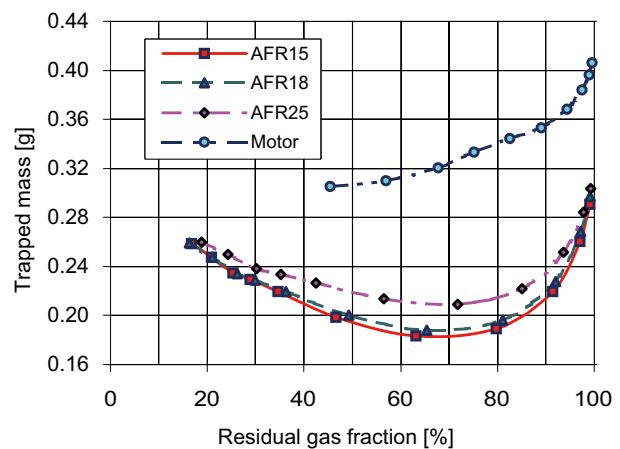


図6 筒内ガス量の傾向

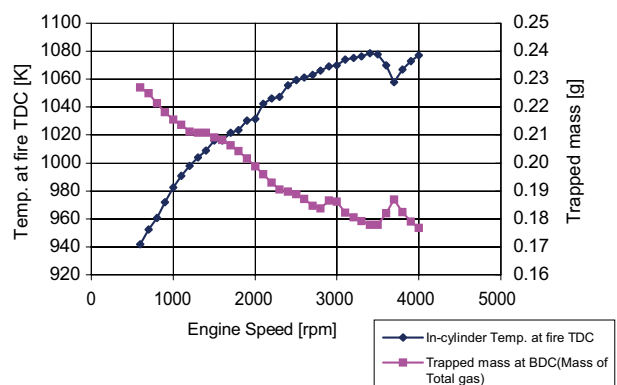


図7 回転数と筒内ガス温度

5 実験結果

シミュレーションの結果を踏まえて3つの固定バルブタイミングで運転可能領域を実験で確認した。選択したバルブタイミングは、排気バルブリフトプロファイル(リフト1.4mm)をひとつと、吸気バルブリフトプロファイルは表2と図8に示すような開いている期間と最大リフトの違う3つである。各セットはワイド、ミッド、ナローと呼ぶ。

ポート噴射が主な燃料供給であり、全ての条件で燃焼を助けるためおよそ0.9mgのプリDI(NOL期間中の筒内直噴)が使われた。スパークも失火時の早期回復のために使用した。圧縮比14ではスパークはNOL運転での燃焼に影響しないことを確認している。

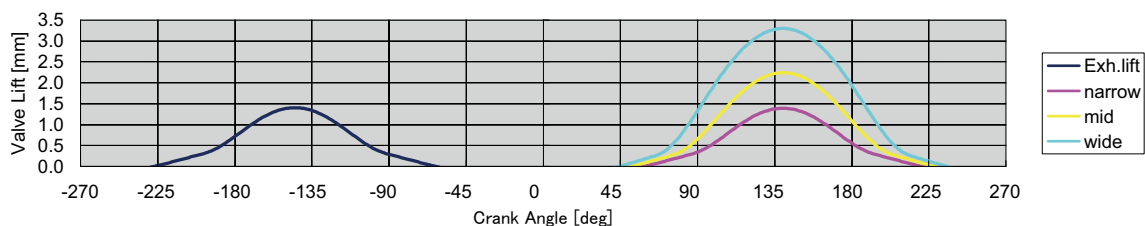


図8 供試バルブタイミング

表2 供試バルブタイミング [after TDC of firing]

	Int. Lift [mm]	Int. ValveTiming		Exh.ValveTiming	
		IVO	IVC	EVO	EVC
wide	3.30	403	-123	137	294
mid	2.25	412	-132	137	294
narrow	1.55	419	-140	137	294

5.1 負荷領域の境界

エンジン出力は、燃料量を増やすと理論空燃比より若干濃いめまで増大を続ける。そしてこの点よりも濃くなると低下する。

我々の過去の研究^{1~2)}では、運転領域の上限にMRPR1000kPa/deg(最大圧力上昇率)を使用した。しかし、この論文で報告する実験の結果では、MRPRはこの境界まで到達しなかった。燃焼は、理論空燃比近傍でもっとも激しく、より濃い領域ではまたゆっくりとなり、最終的には着火しなくなる。このように、ここでは最大負荷は燃焼特性ではなく、最大吸気量で制限される。最小負荷限界は燃焼安定性で決まる。つまり、運転領域は失火しないことが条件である。しかしながら運転領域下限のNMEPの変動率は、それほど悪くはない。これはNOL運転では前サイクルの影響がとて強いことによる。失火ひとつで燃焼を止めてしまうので、その運転条件はすでにHCCIの運転領域から外れている。AFRの範囲は広いところで11~18だったが、回転数が高くなると理論空燃比近傍に限られるようになる。

5.2 運転領域マップ

図9には3つのバルブタイミングセットの運転領域を示した。バルブタイミングによってその形状が異なることが分かる。

高回転における負荷領域の上限は、体積効率の減少に伴い低くなり、かつ領域は狭くなる。低負荷限界はバルブタイミングセットに関わらず2000rpm以上ではおよそ200kPa、そして低い回転数ではこの限界NMEPは高くなる。それぞれのバルブセットの低負荷限界はエンジン回転数に対して変動している。これは吸気と排気の動的効果に関係していると思われる。

ナローのバルブタイミングセットは低回転で安定であったが、高回転側の限界が低かった。ワイドの条件では4800rpmまで運転できたが、2000rpm以下の低回転では燃焼が不安定になって運転領域が縮小した。

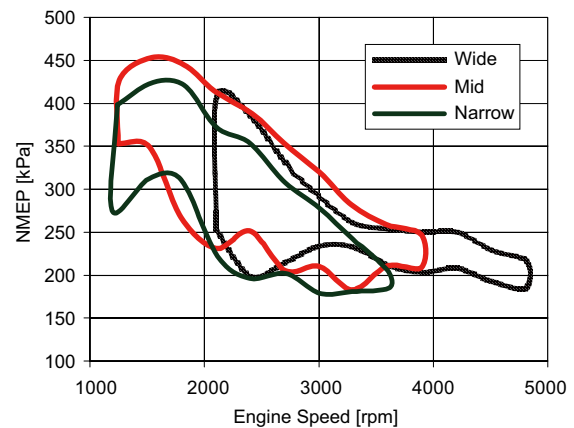


図9 運転領域

5.3 燃焼

図10に典型的なNOL-HCCIの筒内圧履歴をMBF(質量燃焼割合)とともに示す。

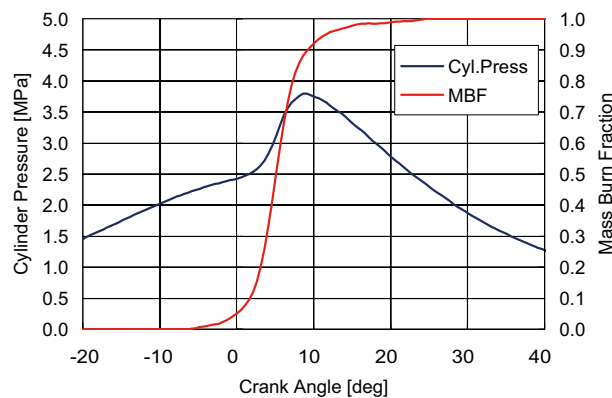


図10 典型的な筒内圧履歴

AFRで整理した、燃焼位相(50%燃焼割合位置)と燃焼変動率(NMEPの変動率)を、それぞれ図11と図12に示す。燃焼安定性は希薄条件で悪化するが、燃焼位相がほとんど変わらないことに注意してほしい。ストイキ(理論混合比)から濃い方向にAFRを変化させると燃焼位相は単調に遅角する。希薄領域では、低回転を除いて薄くなると若干遅角するが、ほぼ同じ位相となっている。燃焼位相は、エンジン回転数に対しても明白な傾向は見られない。これは、図7で検討した高回転ほど筒内ガス温度が上昇する傾向に関係があると思われる。

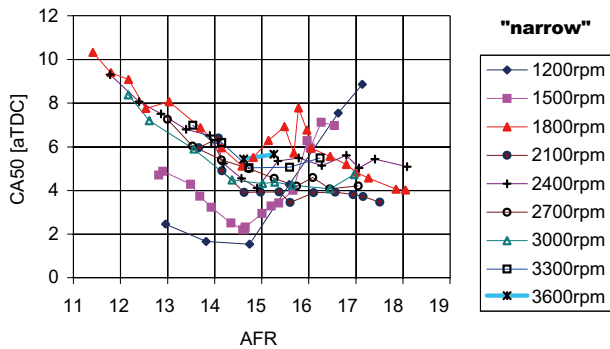


図11 燃焼位相 (CA50)

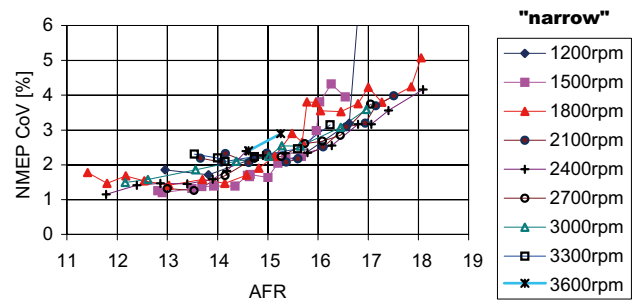


図12 燃焼変動率

我々の過去の研究^{1~2)}のように吸気を加熱して行うHCCIでは、同一吸気温度で当量比を小さくしていくと燃焼位相は遅くなり、安定性も悪くなる。図12に示す燃焼変動率の傾向は、この傾向と矛盾しないが、図11の燃焼位相は異なる。希薄領域でも燃焼位相が変化しない事実は燃焼前の温度履歴が変わらないか、あるいはより高温になっていることを示唆する。このことはファイアリングTDCの温度が、そのピークにおいてほとんど一定である図6に示した計算結果によっても裏付けられる。

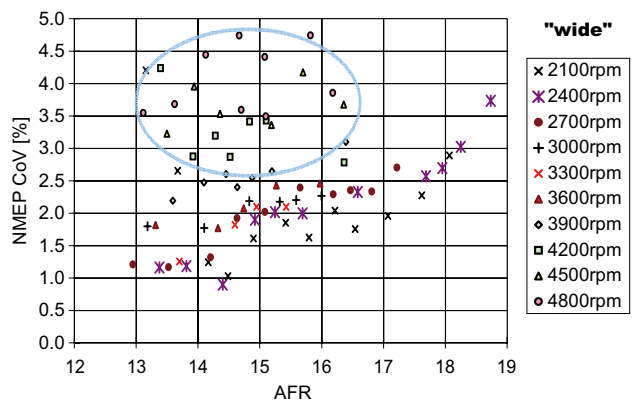


図13 高回転における燃焼変動率

図13はワイドの燃焼安定性を示す。これは3600rpm以上の高回転領域のデータを含む。変動率は高回転で高い値となるが、低回転での変動率はナローの場合とほぼ同様に希薄であるほど変動率が增大する傾向である。これはミッドでも同様である。

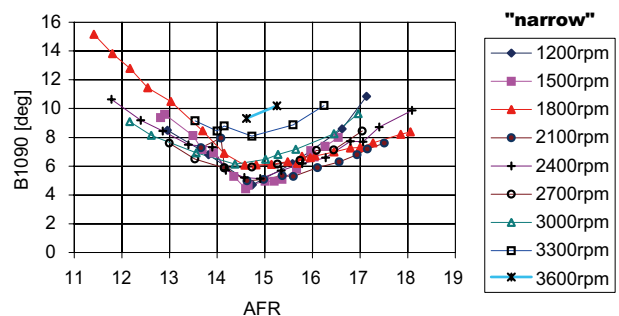


図14 燃焼期間

図14はAFRに対する燃焼期間(質量燃焼割合10%から90%までの期間)を示す。燃焼期間は典型的なSI運転よりもかなり短い。燃焼期間の傾向はフィッシュフックカーブのようであり、最も短い燃焼期間は理論混合比のときに見られる。このことは、理論混合比で燃焼が最も活発で、その結果が(燃焼の)最高温度が最も高くなることを意味する。

残留ガス率は、吸気量や混合気温度に密接な関係がある。図15に残留ガス率の包絡線を示す。残留ガス率は筒内圧と吸排ガス温度及び吸気流量から計算した⁷⁾。この実験結果で、データは高負荷

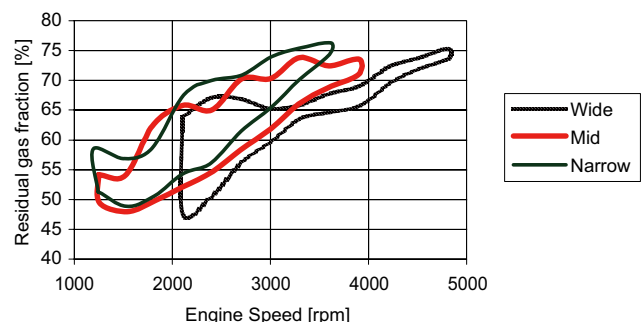


図15 残留ガス率

時に48%、低負荷で76%の範囲に分布している。最大負荷の残留ガス率はナローからワイドに変更すると小さくなる。

低負荷限界が残留ガス率でおよそ70%にあることは図5で示した最大温度は残留ガス率が70%程度で得られるとした計算結果と整合している。この検討では、70%よりもさらに高い残留ガス率ではIVCのタイミングでより低い温度になる。その結果、実験では低負荷限界が残留ガス率75%になったものと思われる。

それぞれの負荷条件に対して、ある最適なバルブの開き期間があると思われる。ナローからワイドに変更していくと、最小残留ガス率は単調に減少している。体積効率は運転領域を決定する最も重要な要素であり、残留ガス率はこれに間接的に関わっていると結論できる。

図16に排気ガス温度を示す。温度の分布は広範囲にわたる。排気バルブタイミングが同一なので、残留ガスの体積は全域で同一である。同一の体積の残留ガスから図9のように広い運転範囲となるのは、主に排気ガス温度の範囲が大きいためである。

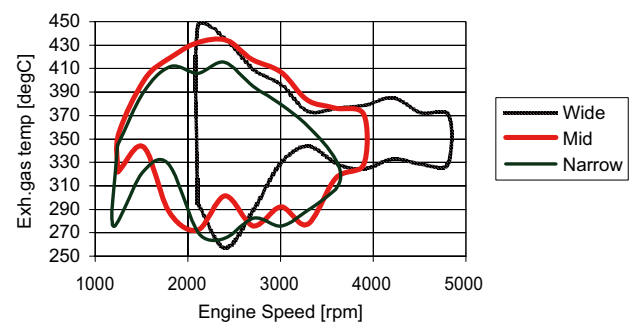


図16 排気ガス温度

5.4 効率(燃料消費)

3つのバルブセットの燃料消費率の包絡線の比較を図17に示す。ナローは他の条件よりも燃費が悪い。

特定のエンジン回転数(2100rpm)の燃料消費の傾向を図18に示す。高い負荷ほど良い燃費に見える。また、ワイドがベストと読める。図18にはHCCIとSIの比較のため1点のみSIのデータもプロットした。SIの参照データは同一エンジンだが、違うバルブタイミングのAFR15の条件である。HCCIはSIよりよい効率を示している。

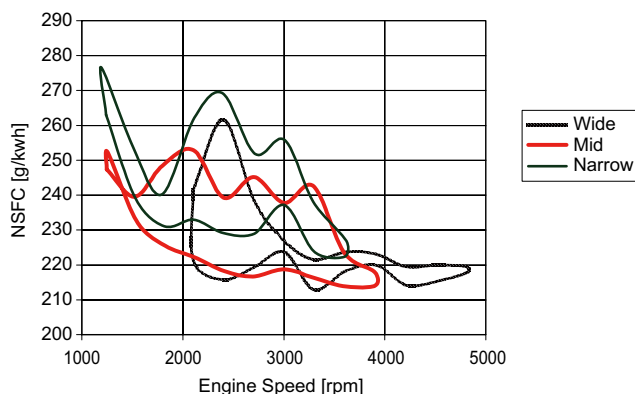


図17 燃費率(全体比較)

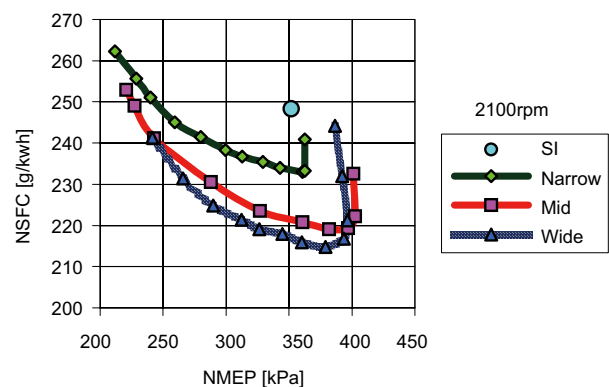


図18 2100rpmの燃費挙動

5.5 NOL-HCCIのNO_x排出特性

2700rpmのNO_x排出量をNMEPでまとめた結果を図19に示す。ISNO_xは全てのバルブセットで希薄条件からAFRが濃くなるにつれ負荷とともに増大し、理論混合比で最大値をとると、リッチ側では出力が増加しないので、ただ低下している。ここでは示さないが、この傾向は回転数に関係なく見られる。

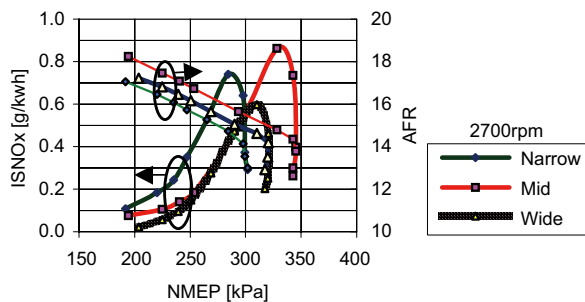


図19 2700rpmのNO_x排出挙動(NMEPによるまとめ)

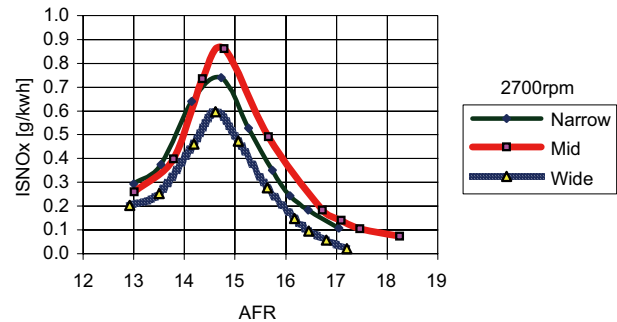


図20 2700rpmのNO_x排出挙動(AFRによるまとめ)

3つのIVO期間を比較すると、ナローが他のものよりも同じ負荷でより多くNO_xを排出していることが分かる。なぜナローがより多くのNO_xを排出するのかは、図20に示す通り同一負荷におけるAFRに関係する。負荷が違っていても全てのバルブタイミングセットで、理論混合比が最も多くNO_xを生成することは明らかである。

6 おわりに

実験と計算の両方によってガソリン燃料の負のオーバーラップによるHCCIを検討した。以下の結果が得られた。

1. バルブタイミングを変更しないまま広いNOL-HCCIによるエンジン負荷領域が確認された。この広い運転領域は供給燃料量によって吸気量に変化し、その結果着火条件が保たれることによる。最大負荷は理論混合比となる。
2. 広いバルブ開き期間ほど、高回転に適している。4800rpmなどでも可能である。また同時に比較的低いNO_x排出量で、かつ、燃費も良くなる。しかし、低回転では不安定になる。
3. 広い運転領域にわたって低いNO_x排出量で、かつ、許容可能な燃焼変動とするには、精密な熱的条件の制御が必要である。
4. 計算によると、TDCでの温度は残留ガス率が60～70%で最大となる。これは実験結果とよく合う。
5. 燃焼安定性は、高回転で悪くなる。

NOxが少ないというHCCIの特徴を生かすには、低い負荷に限定するか希薄混合気とすることである。しかし、希薄混合気による運転は燃焼変動率が悪化するため、VVT機構などにより、ある運転条件に対して適切なバルブタイミングを選ぶことが必要である。さらに負荷上限を拡大するためには、過給などにより筒内ガス量、つまり、熱容量を増大させることが有効である。一方 本報告によれば、使用領域が限定されている場合は固定カムでもある程度の負荷範囲があるので、安価な応用も可能であると考えられる。

謝辞

この研究はウィスコンシン大学エンジンリサーチセンターとともに行われ、また部分的に米国エネルギー省のサポートも受けた。

参考文献

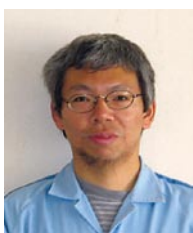
- 1) Tanet Aroonsrisopon, Davit E. Foster et al. "Comparison of HCCI operating ranges for combinations of intake temperature, engine speed and fuel composition" SAE2002-01-1924
- 2) Tanet Aroonsrisopon, Davit E. Foster et al. "Expanding the HCCI Operation with the Charge Stratification" SAE2004-01-1756.
- 3) T.Urushihara, K.Hiraya, A.Kakuhou, T.Itou, "Expansion of HCCI Operating Region by the Combustion of Direct Fuel Injection, Negative Valve Overlap and Internal Fuel Reformation" SAE2003-01-0749
- 4) Najt, P.M., and Foster, D.E. "Compression-ignited homogeneous charge combustion" SAE Paper 830264, 1983
- 5) Richard Standing, Navin Kalia, Tom Ma and Hua Zhao, Martin Wirth and Andreas Shamel, "Effect of Injection Timing and Valve Timing on CAI Operation in a Multi-Cylinder DI Gasoline Engine" SAE2005-01-0132
- 6) Robert J.Iverson, Randy E. Herold, David E. Foster et.al. "The Effects of Intake Charge Preheating in a Gasoline-Fueled HCCI Engine" SAE2005-01-3742
- 7) Takeru Ibara, Minoru Iida, David E. Foster, "Study on Characteristics of Gasoline Fueled HCCI Using Negative Valve Overlap" SAE2006-32-0047

著者



猪原 建彦
Takeru Ibara

コーポレートR&D統括部
コア技術研究部



飯田 実
Minoru Iida

コーポレートR&D統括部
コア技術研究部



デビッドE.フォスター
David E. Foster

ウィスコンシン大学
エンジンリサーチセンター