部分酸化燃焼器の利用によるニートメタノールエンジンの 低温始動性改善*

(部分酸化燃焼器で生成される可燃ガスのエネルギー)

赤井 泉 明^{*1}, 岩井 信 夫^{*1}

Improvement of Cold Startability of Neat Methanol S. I. Engines Using Partial Oxidation Combustor (Energy of Flammable Gases Produced by Partial Oxidation Combustor)

Motoaki AKAI and Nobuo IWAI

The energy of the hydrogen and carbon monoxide produced by the partial oxidation of methanol in the combustor located in the intake system of a S. I. engine was investigated in order to improve the cold startability of neat methanol S. I. engines. The range of load over which stable engine operation was obtained using the combustor was discussed by comparing this flammable gas energy with the energy required to operate the engine at -30°C . The test results show that the energy of a flammable mixture consisting of the flammable gas produced by the combustor and air is 500-850 J/cycle in the case of a 2L engine. The maximum energy of this flammable mixture is comparable to that required for no-load engine operation, and so only no-load operation is possible using the combustor after the starting engine.

Key Words: Alternative Energy, Internal Combustion Engine, Burner, Methanol Engine, Cold Startability

1. まえがき

ニートメタノールを火花点火エンジンの燃料とした場合に問題となる低温始動性能を改善するために、著者ら⁽¹⁾⁽²⁾は以下の改善方法を提案した。また、図1にコンセプトの概略図を示す。

まず、エンジンの吸気系に取り付けた燃焼器(部分酸化燃焼器)において噴射したメタノールの超音波噴霧⁽³⁾を放電火花により点火し(図1の項目1)、過濃燃焼させることによって生じる部分酸化反応により水素と一酸化炭素を瞬時に生成させる(図1の項目2)。次に水素と一酸化炭素などの可燃ガスとともに空気(希釈空気)をエンジンの燃焼室に導入し、水素および一酸化炭素と空気による可燃混合気(図1の項目3)でエンジンを始動させる。本コンセプトの場合、水素および一酸化炭素などの可燃ガスの生成には燃焼反応が利用されるため、触媒反応方式⁽⁴⁾に比べて瞬時に可燃混合気を形成できる利点がある。

このコンセプトを4気筒のニートメタノールエンジ

ンに適用することにより、 -30°C の環境において10秒前後のクランキング時間によってエンジンを始動でき、本コンセプトの可能性を実証した。また前報⁽⁵⁾では、部分酸化燃焼器で生成された可燃ガスと希釈空気により形成される混合気の点火に必要な条件(酸素濃度; 約9%以上, 水素濃度; 約5%以上)を明らかにし、エンジン始動のために必要な希釈空気量の条件を求めた。しかし、エンジン始動直後に、部分酸化燃焼器で得られた可燃ガスのみで持続運転(アイドリング)

Fig. 1 Concept of the partial oxidation combustor

* 1995年9月13日 第73期機械学会全国大会において講演、原稿受付 1996年5月14日。

^{*1} 正員、(財)日本自動車研究所 (〒305 つくば市荻間 2530)。

させると、図2に示すようにエンジン回転速度を1000rpm以上に上昇させることができなかった。図2は-30℃においてエンジンを始動させた結果であり、図中にはバッテリー電圧、エンジン回転速度および油温の時間変化を示す。

本報では、図2に示すようなエンジン回転速度が上昇しない要因を明らかにするため、-30℃においてエンジンの無負荷運転に要するエネルギーと部分酸化燃焼器で得られる可燃ガスの重量から求めた可燃混合気の発熱量との対比を行い、部分酸化燃焼器で発生したエネルギーで運転できる負荷の範囲を検討する。

2. 部分酸化燃焼器で得られる可燃ガスの発熱量

水素や一酸化炭素などの可燃ガスと希釈空気により形成される混合気によってエンジンを始動させるためには、燃焼室に供給する混合気が可燃範囲内にあり、かつ運転(始動)に必要なエネルギーを持つことが重要な条件である。従来の研究⁽⁴⁾では可燃範囲となるために必要な条件を把握しているの、ここでは混合気を持つエネルギー(低位発熱量)に関する検討を行う。

部分酸化燃焼器で得られる可燃ガスのほとんどが水素および一酸化炭素である⁽⁴⁾ことから、この2成分の発熱量を明らかにするため、部分酸化燃焼器に供給する空気流量や燃料流量、エンジン回転速度、環境温度を変化させて可燃ガスの重量を求めた。以下に実験装置および実験方法について述べる。

2.1 実験装置および実験方法

部分酸化燃焼器で生成される可燃ガスがエンジン燃焼室に入る重量は、生成した可燃ガスをエンジン内で燃焼させずに排出させて測定すれば求めることができる。図3に示す排気量が2Lの4気筒エンジンの2気筒のみに部分酸化燃焼器を取り付け、メタノールを過濃燃焼させて可燃ガスを生成させた。供試したエンジンの主要諸元を表1に示す。図3において、部分酸化

Fig. 2 Engine speed data for cold starting test at -30°C

燃焼器で生成された可燃ガスはシリンダ内で点火されずに排出された後、定流量採取装置(Constant Volume Sampler; CVS)に導入される。ここで可燃ガスなどの重量が測定され、混合気の発熱量などが求められる。また残りの2気筒には、通常のポートインジェクタからガソリンを噴射してエンジンを運転させた。部分酸化燃焼器における空気過剰率 λ_p は、超音波燃料噴射弁から供給される燃料噴射量と吸入吸気量の両方で調節される。なおこの実験では、部分酸化燃焼器下流からの希釈空気の導入を停止している。

また実験を行う際には、エンジンを環境温度(20℃および-30℃)と同じになるまで放置し、部分酸化燃焼器を取り付けていない2気筒のみで始動し、運転させた。エンジン回転速度が安定した後、部分酸化燃焼器内で噴射されたメタノールを点火し、部分酸化反応で生成した可燃ガスを測定した。このとき、部分酸化燃焼器を取り付けたシリンダの吸気管圧力は大気圧付近である。また実験では、SAE粘度5W-30の潤滑油を使用した。

2.2 水素と一酸化炭素からなる可燃ガスの発熱量

環境温度とエンジン回転速度を変えたときに部分酸化燃焼器から得られる水素と一酸化炭素からなる可燃ガスの低位発熱量を、部分酸化燃焼器における空気過剰率 λ_p に対してまとめ、図4に示す。図4の縦軸は1気筒分から1サイクル当たりで得られる可燃ガスの低

Fig. 3 Schematic of experimental apparatus

Table 1 Specifications of the test engine

Engine Type	4 stroke, 4 cylinder, DOHC
Displacement	1958 cm ³
Bore × Stroke	81.0 mm × 95.0 mm
Compression Ratio	9.4
Fuel Supply	Multi Point Injection

位発熱量である。この結果から、温度条件が同一であれば回転速度を700～1700rpmの範囲で変化させても1サイクル当たりに得られる可燃ガスのエネルギーはほぼ同じであること、 -30°C の条件ではそのエネルギーが最大で1気筒当たり約500J/cycleであることが明らかになった。 -30°C では、 20°C の条件に比較して可燃ガスの発熱量が約20%大きくなるのは、空気密度の増大による影響と考えられる。

次に部分酸化燃焼器に供給した燃料の低位発熱量に対する生成された可燃ガスと未燃分の低位発熱量の割合および部分酸化燃焼器における燃焼によって二酸化炭素となり利用できないエネルギーの割合について議論する。

図4に示した結果をもとに、 -30°C の条件で生成された水素および一酸化炭素からなる可燃ガス、未燃分(UBF)の持つ低位発熱量と、二酸化炭素および水に変化した燃料のエネルギー(低位発熱量)をカーボンバランス法から求め、図5に示す。ここで、二酸化炭素および水に変化したエネルギーは、熱に変化するエネルギーを意味し、始動時の燃料として利用できるのは可燃ガスの持つエネルギー(低位発熱量)である。図5の横軸は部分酸化燃焼器における空気過剰率 λ_b であり、縦軸は部分酸化燃焼器への空気量を一定(最大)とし、メタノール理論混合気の低位発熱量を1とした場合のエネルギー比である。また図中の各点は実験値を示し、実線は初期温度を337.8K(メタノールの沸点)とした場合のメタノールの過濃予混合気の燃焼により生成される水素および一酸化炭素の低位発熱量と、二酸化炭素および水に変化する燃料の低位発熱量を断熱炎温度における平衡計算により予測した結果である。このとき、空気過剰率 λ_b が約0.41以下では過濃限界のた

め予混合燃焼でなくなる⁽⁵⁾。

図5において、空気過剰率 λ_b が0.6以下の過濃領域で実験値と計算値が異なるのは、部分酸化燃焼器における燃焼状態が予混合燃焼と異なり、燃料のすべてが反応に利用されないことを示している。この結果は、従来の研究⁽⁵⁾において可燃ガスの濃度を調べた結果と同様であった。また、部分酸化燃焼器における空気過剰率 λ_b が0.4では、理論混合気の約80%のエネルギー(低位発熱量)を持つ水素および一酸化炭素(図5の●印および破線)が生成されることがわかる。

さらに得られた計算結果が、部分酸化燃焼器で得られる可燃ガスの持つエネルギーの最大値であると仮定すると、部分酸化燃焼器における燃焼状態を予混合燃焼に近づけても得られる可燃ガスの最大エネルギーは、本実験における最大値の約15%しか増加しないことがわかる。

2.3 可燃ガスと希釈空気による可燃混合気の発熱量

部分酸化燃焼器で得られた可燃ガスでエンジンを始動させる場合、可燃ガスのほかに空気(酸素)が必要となる。部分酸化燃焼器の下流では酸素がほとんど存在しないので、エンジン燃焼室の直前で可燃混合気の形成に必要な量の希釈空気を導入する必要がある。図4に示した可燃ガスの低位発熱量は、この希釈空気量を考慮していないため、ここでは希釈空気量を考慮した可燃混合気の低位発熱量について検討する。

混合気の点火条件は、混合気中の酸素濃度と水素濃度に大きく影響され、導入される希釈空気量(希釈率)の調節によって可燃混合気の形成が可能になる。図6は、部分酸化燃焼器で得られる水素濃度と点火可能な混合気を形成するために必要な希釈率の関係をまとめ

Fig. 4 Effects of excess air ratio of the combustor (λ_b) on heating value of flammable gas

Fig. 5 Effects of excess air ratio of the combustor (λ_b) on energy ratio of flammable gas

たもの⁽⁵⁾であり、希釈率は次式で定義した。

$$DR = \frac{Ap + Ad}{Ap}$$

ここで、DRは希釈率、Apは部分酸化反応に利用される空気流量、Adは希釈空気流量である。図6の下限(Lower Limit)は、希釈空気量をゼロから徐々に増加させたときに点火が成功する境界であり、酸素濃度が支配的な境界である。また上限(Upper Limit)は希釈空気量を最大から徐々に減少させたときに点火が成功する境界であり、水素濃度が支配的な境界である。可燃混合気の形成は、これらの境界線で囲まれる範囲(図6の斜線領域)に希釈率を設定することにより可能になる。

希釈空気を考慮した可燃混合気の低位発熱量は、図4に示した結果から、以下の方法によって求められる。まず、図6に示す水素濃度と可燃範囲を与える希釈率の関係および部分酸化燃焼器における空気過剰率 λ_b と水素濃度の関係⁽⁵⁾から、 λ_b に対する可燃範囲を与える希釈率の関係を求める。図4に示した λ_b に対する可燃ガスの低位発熱量をこのようにして求めた希釈率の上限値および下限値で除すと、可燃混合気の低位発熱量が得られる。このとき、希釈空気を希釈率の下限値(Lower Limit)となるように導入した場合、部分酸化燃焼器における空気過剰率 λ_b が小さい(可燃ガスの濃度が高い)と、可燃ガスが過濃な混合気となるために、空気が不足した状態となることがある。

図7は、1サイクル1気筒あたりに部分酸化燃焼器で得られる可燃ガスの理論空気量(Theoretical Amount of Air)と、可燃範囲を与える希釈率の下限値(Lower Limit)となるように希釈空気を導入した場合の空気量(Amount of Air)を部分酸化燃焼器における空気過剰率 λ_b に対してまとめた図である。この結果より、 λ_b が約0.5以下になると、図7の斜線領域で示されるように

混合気中の空気量が理論空気量以下になるため、希釈空気と反応する可燃ガス量しかエネルギーとして取り出せなくなる。また、希釈空気を希釈率の上限値(Upper Limit)となるように導入した場合には、可燃ガスが希薄な混合気となるため、部分酸化燃焼器で得られた可燃ガスの低位発熱量分が取り出せるエネルギーとなる。

以上より、可燃ガスと希釈空気による可燃混合気の低位発熱量を求め、部分酸化燃焼器における空気過剰率 λ_b に対してまとめた結果を図8に示す。図の縦軸は、4気筒2Lエンジンの1サイクル当たりのエネルギーである。図中の○および□印は、それぞれ可燃ガスの低位発熱量を可燃範囲を与える希釈率の上限および下限で除した場合の発熱量である。希釈率が下限のときには、上述したように λ_b が約0.5以下において空気が不足するため、混合気中に存在する空気と反応する可燃ガスすなわち理論混合気の低位発熱量を求め■印で示した。この結果より、部分酸化燃焼器の利用に

Fig. 7 Effects of excess air ratio of the combustor(λ_b) on air mass flow

Fig. 6 Effects of primary H_2 concentration on dilution ratio(DR)

Fig. 8 Effects of excess air ratio of the combustor(λ_b) on heating value of flammable mixture

より得られる可燃混合気の発熱量の範囲は、○印と■印で囲まれる範囲で示され、500~850J/cycleであることが明らかになった。

この可燃混合気を持つエネルギー(低位発熱量)のメタノール理論混合気のエネルギーに対する割合を図9に示す。図中aは、通常運転時の理論混合気のエネルギー(体積効率=80%)⁽⁶⁾で、この値を1とした。bは部分酸化燃焼器を利用したとき($\lambda_b=1$)の吸入空気量で形成されるメタノール理論混合気のエネルギーである。エネルギー比aとbの差は、燃料蒸気の存在、燃焼によるモル比の増加、ガス温度の上昇などによる体積効率の低下が関係している。体積効率を実際に測定すると、部分酸化燃焼器の空気過剰率 λ_b にあまり影響されず30~40%の範囲であった。cは、 λ_b を0.4とした場合に生成される可燃ガスのエネルギーであり、図5で得られたように理論混合気(図中b)の約80%となる。この値に希釈空気を考慮して可燃混合気のエネルギーを求めるとdになる。

この結果より、部分酸化燃焼器の利用により得られる可燃混合気のエネルギー(低位発熱量)は、体積効率80%のメタノール理論混合気を持つエネルギーの10~15%であることが明らかになった。

3 エンジンの運転に必要なエネルギー

エンジンが無負荷で運転されている際には、冷却損失、排気損失、機械損失の全エネルギーと燃料が実際に燃焼したエネルギーがバランスしている。ここではまず、環境温度が-30℃と20℃の両条件においてエンジンの無負荷運転に必要なエネルギーを測定した。以下に実験装置および実験方法について述べる。

Fig. 9 Energy ratio of flammable mixture

3.1 実験装置および実験方法

第2章の実験と同一のエンジン(諸元を表1に示す)を用い、通常ガソリンエンジンの吸気および燃料供給系とした。また排気管をCVSのサンプル導入管に接続し、排出ガス重量からカーボンバランス法の適用によって運転に必要なエネルギーの推定を試みた。

燃料にガソリンを使用したのは、-30℃の環境においても安定してエンジンを始動、連続運転させるためである。実験では、ポートインジェクタからの燃料噴射量とスロットルバルブを通過する空気量を調節することによってエンジンの回転速度を変化させた。実験を行う際には、エンジンを環境温度(20℃および-30℃)と同じになるまで放置した後に始動させ、エンジン回転速度が安定した後の排出ガスを測定した。

排出ガスの成分からエンジンの無負荷運転に必要なエネルギーを推定する際には、まず排出ガス中の一酸化炭素および二酸化炭素の重量からカーボンバランス法により無負荷運転(アイドリング)時の燃料消費量を求めた。このとき、未燃分(THC)はエンジンの運転に寄与せずにそのままの状態では排出されたと仮定し、燃料消費量の算出に用いなかった。排出ガス中の一酸化炭素および二酸化炭素重量から求めた燃料消費量の持つ発熱量がエンジンの無負荷運転に必要なエネルギーであると考えられるが、排気中には水素や一酸化炭素などのエネルギーを持った可燃のガスが存在する。したがって、このようにして求めた燃料の持つ低位発熱量から水素および一酸化炭素の低位発熱量を減じてアイドリングの持続に必要なエネルギーとした。

3.2 エンジンの運転に必要なエネルギー

環境温度が20℃および-30℃のとき、エンジンの運転に必要なエネルギーをエンジン回転速度に対してまとめ、図10に示す。縦軸のエネルギーは、排気量が2Lの4気筒エンジンを用いた場合の、1サイクル当たりの運転に必要なとされるエネルギーである。この結果より、エンジンの回転速度が高いほど運転に必要なエネルギーが大きくなること、環境温度が低いほどそのエネルギーも大きくなることがわかる。また-30℃の環境において、始動直後にエンジン回転速度を1000rpmに保持しながら運転させるためには、1100~1300J/cycleのエネルギーが必要であることがわかる。次章では、ここで求めたエネルギーと部分酸化燃焼器で得られる可燃ガスのエネルギーを比較する。

4 部分酸化燃焼器で得られる可燃ガスの発熱量とエンジンの運転に必要なエネルギーの対比

図8に示した可燃混合気の発熱量と図10に示したエンジンの無負荷運転に必要なエネルギーをまとめて図11に示す。図中の実験点(●印)は、図10で-30℃の条件におけるエンジンの運転に必要なエネルギーであり、下部の斜線領域は、図8に示した部分酸化燃焼器の利用による可燃混合気の発熱量の範囲(500~850J/cycle)である。同図より両者の領域が重なり合うエンジン回転速度の最大値は約800rpm(図中の破線)であり、この速度が水素および一酸化炭素の可燃ガスでエンジンを運転させる場合の最大値である。この結果は、-30℃におけるエンジン回転速度の限界(図2)と近い値を示した。したがって、部分酸化燃焼器で得られる可燃ガスのエネルギー(低位発熱量)では、無負荷運転が限度であること、つまり部分酸化燃焼器の利用により-30℃の環境でエンジンを始動した後に暖機運転まで可能であることが示された。

Fig. 10 Relationship between engine speed and energy of no-load engine operation

Fig. 11 Relationship between engine speed and energy of flammable mixture, energy of no-load engine operation

部分酸化燃焼器で得られる可燃混合気のエネルギーが負荷運転に必要なエネルギーとならない理由のひとつに、部分酸化燃焼器下流のガス温度が高いことによる体積効率の低下(本実験では約40%程度)が挙げられる。この問題を解決するためには、部分酸化燃焼器下流のガスの冷却や未燃分のエネルギーの利用などが考えられる。またエンジンを負荷運転させる場合には、始動後の早期における燃料噴射(超音波燃料噴射弁からポートインジェクタ)の切り換えなどが課題となる。

5. まとめ

本報では、部分酸化燃焼器で得られる可燃ガスのエネルギー(低位発熱量)を、4気筒エンジンを用いて把握し、以下の知見を得た。

- (1) 部分酸化燃焼器の利用により得られる可燃混合気の発熱量の範囲は、500~850J/cycleであり、この値は体積効率80%の場合のメタノール理論混合気の10~15%に相当する。
- (2) エンジンの無負荷運転に必要なエネルギーと、部分酸化燃焼器の利用による可燃混合気の最大エネルギーとが釣り合う最大回転速度は約800rpmであり、部分酸化燃焼器からの可燃ガスのエネルギーにより、無負荷運転まで可能であることが示された。

本研究は、通産省資源エネルギー庁の委託を受けて(財)石油産業活性化センターが実施した「自動車用メタノール燃料の利用に関するフィージビリティ調査」の一環として実施したものである。

参考文献

- (1) 赤井・岩井・細貝・西村, 部分酸化反応によるニートメタノールエンジンの低温始動性改善, 自動車技術会論文集 Vol.26 No.3 (1995), 45-50
- (2) N. Iwai, M. Akai, D. Hosogai and J. Nishimura: Cold Startability Improvement of Neat Methanol S.I. Engine by Using Ultrasonic Partial Oxidation Combustor, 10th Int. Symp. on Alcohol Fuels (1993), 929-939
- (3) J. Nishimura, D. Hosogai, T. Ito, N. Iwai and M. Akai: Study of Partial Oxidation Combustor Using Ultrasonic Atomizer to Improve Cold Startability of Methanol Engine, SAE Paper No.940767 (1994)
- (4) 滝下・酒井・山口・鮎澤・金, メタノール改質ガス火花点火エンジンの開発研究—第1報 メタノール改質ガスを用いた低温始動器の開発—, 自動車技術会論文集No.31 (1985), 21-28
- (5) 赤井・金・岩井・伊藤, 部分酸化燃焼器の利用によるニートメタノールエンジンの低温始動性改善(可燃ガスの生成と可燃混合気形成の条件), 機械学会論文集(B編)61巻590号 (1995), 212-217
- (6) 例えば, 自動車技術ハンドブック「基礎・理論編」, 自動車技術会編, 17-20