自動車シュレッダーダスト熱分解ガスの内燃機関における燃焼特性*

首藤 登志夫^{*1}, 中島 泰夫^{*1}
長野 拓也^{*2}, 小林 政徳^{*3}Combustion Characteristics of Pyrolysis Gas of
Automobile Shredder Dust in an IC EngineToshio SHUDO^{*4}, Yasuo NAKAJIMA,
Takuya NAGANO and Masanori KOBAYASHI^{*4} Department of Energy Science and Engineering, Musashi Institute of Technology,
1 Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo, 158-8557 Japan

Shredder dust of disposed vehicles can be converted into low calorific flammable gas with a pyrolysis gasification system. The stationary electric power generation using internal combustion engines fueled with the gas is one of hopeful methods to reuse wastes. The shredder dust pyrolysis gas mainly consists of H_2 , CO, CO_2 , and N_2 . Composition and heating value of the gas depends on conversion system and property of waste. Characteristics of combustion and exhaust emissions in a premixed combustion spark ignition engine fueled with the shredder dust converted gas were analyzed in this research. Influences of heating value, CO/ H_2 ratio, and inert gas were analyzed parametrically. Observations of combustion flame were also done with a bottom view type optical engine.

Key Words: Internal Combustion Engine, Combustion, Gasification, Thermal Efficiency, Combustion Products, Waste

1. 緒 言

廃棄自動車のシュレッダーダスト等の廃棄物は、熱分解処理により水素や一酸化炭素を含む可燃性ガスに変換することが可能であり⁽¹⁾、このガスを燃料に用いた定置式発電が有望である。この場合の発電用動力システムには、燃料の組成や発熱量の変動に対応する必要があることから、燃料性状適応性に優れた内燃機関が最適である。

図1に、廃棄物を可燃ガスに変換するシステムの一例を示す。シュレッダーダスト等の廃棄物をキルンにより熱分解して得られるガスは、水素、一酸化炭素、二酸化炭素、および窒素などから成る混合ガスであり、廃棄物の種類や変換方式によってガスの組成および発熱量が変化する。これらの変化は燃焼特性に影響を及ぼすため、その影響の解析は廃棄物変換ガスを内燃機関において有効に利用する上で重要である。また、この変換ガスに含まれる水素の燃焼特性は他の燃料に比べて大きく異なり⁽²⁾⁻⁽⁹⁾、燃料中の水素の割合が燃焼および排気特性に影響を及ぼすことが考えられる。

本研究では、シュレッダーダスト等の廃棄物を変換して得られる可燃ガスを内燃機関の燃料に使用する場合の出力、熱効率、および排気について実験的解析を行い、それらの特性を明らかにした。

2. 実験装置および実験方法

本研究に使用した機関は、図2のような単気筒4サイクルル火点火機関(ボアφ85mm, ストローク88mm, 圧縮比13)であり、燃料ガスは吸気管内に連続的に供給した。シリンダーヘッドに取り付けたピエゾ式圧力変換器(AVL GM12D)により燃焼圧力を計測し、各実験条件につき100サイクル分のデータを平均した上で、図示平均有効圧、図示熱効率および熱発生率などの解析を行った。また、100サイクル分の図示平均有効圧の平均値に対する図示平均有効圧の標準偏差の割合を用いて燃焼変動率を評価した。なお、機関の出力は図示平均有効圧により、熱効率は図示熱効率により評価した。全て

Fig.1 Pyrolysis gasification system⁽¹⁾

* 原稿受付 2000年7月6日。

^{*1} 正員、武蔵工業大学(☎158-8557 世田谷区玉堤1)。^{*2} ヤマハ発動機(株)(☎438-0025 磐田市新貝2500)。^{*3} (株)東芝(☎230-0034 横浜市鶴見区寛政町20)。

E-mail: shudo@herc.musashi-tech.ac.jp

Table 1 Compositions of tested model gases

Case	CO/H ₂ vol. ratio	Inert gas	Inert gas vol%	LHV MJ/m ³ (kcal/m ³)
①	1.0	N ₂	58	5.02 (1200)
②	1.0	CO ₂	58	5.02 (1200)
③	1.0	CO ₂	36	7.54 (1800)
④	1.0	CO ₂	24	8.79 (2100)
⑤	1.3	N ₂	58	5.02 (1200)
⑥	1.3	CO ₂	36	7.54 (1800)
⑦	1.3	CO ₂	26	8.79 (2100)
⑧	1.6	N ₂	58	5.02 (1200)
⑨	1.6	CO ₂	37	7.54 (1800)
⑩	1.6	CO ₂	27	8.79 (2100)
⑪	0.6	CO ₂	56	5.02 (1200)

の実験において機関回転速度は1000rpm, 体積効率は燃料を含めて45%一定とした。

実験に使用した燃料は, 変換ガス化方式や廃棄物の種類による組成の変化を考慮して, 11種類の組成に設定したモデルガスであり, 混合ガスボンベよりレギュレータを介して供給した。使用した燃料ガスの組成および発熱量を表1に示す。なお, 燃料発熱量設定値の誤差は最大で2%程度である。燃料ガス流量の測定には, 熱式気体質量流量計(オーバル製)を用いた。

排気中のNO_x濃度の測定はCLD式NO_x分析計により, CO濃度の測定はNDIR式分析計により行った。また, 図3に示すように, 燃焼室下方より石英ガラス製透明ピストンクラウンを介して, イメージインテンシファイア(浜松フオトニクス C4273MOD)およびメモリー式高速度ビデオカメラ(フオロン FASTCAM ultima)により燃焼火炎を撮影し, 燃焼状態の観察を行った。

Fig.2 Combustion chamber geometry and observation region

Fig.3 Tested bottom view engine and optical system

Fig.4 Influence of heating value on combustion and emissions

Fig.5 Influence of CO/H₂ ratio on combustion and emissions

3. 結果および考察

3・1 発熱量の影響 CO/H₂割合を1.0としたままで、CO₂による希釈量で発熱量を変化させた場合の影響を調べた。図4に点火時期に対する図示平均有効圧、図示熱効率およびNO_x排出濃度を示す。設定した混合気濃度は量論混合比およびλ=1.5の希薄混合比の2通りである。最適点火時期MBTは燃料発熱量の低下に伴い進角側に移動することが分かる。また、NO_x排出濃度は点火時期の進角に伴って増加する傾向があるが、燃料の発熱量の低下により大幅に減少し、CO₂を58vol%含む燃料では量論燃焼においてもNO_xをほとんど排出しない。また空気過剰率λ=1.5の希薄燃焼では、何れの発熱量の燃料においてもNO_x排出濃度は非常に低い値である。図示平均有効圧は発熱量が最高の燃料において最大となるものの、7.54MJ/m³と8.79MJ/m³での熱効率には大きな差がないことが分かる。

3・2 CO/H₂割合の影響 COとH₂の燃焼特性は大きく異なっていることから、発熱量が同一であってもCOとH₂の比率によって燃焼特性が変化することが考えられる。発熱量を7.54MJ/m³に保ったままで、CO/H₂割合をパラメータとして点火時期の影響を調べた結果を図5に示す。設定した混合気濃度は量論混合比およびλ=1.5の希薄混合比の2通りであり、CO/H₂割合は1.0, 1.3, 1.6の3通りである。不活性ガスはCO₂であるが、ここで設定したCO/H₂割合の範囲ではCO₂による希釈割合に大きな差は無い。いずれの混合比においても、CO/H₂割

合の減少による燃焼速度の増加に伴ってMBTは遅角側へ若干移動する傾向がある。しかし、燃料の発熱量および不活性ガスが同一の場合、CO/H₂割合による出力の変化は小さいことが分かる。NO_x排出濃度は量論燃焼では水素割合の増加に伴って増加する傾向があるものの、希薄燃焼では十分に低い値となっている。燃焼状態がとくに劣る発熱量5.02MJ/m³の燃料において、水素割合の増加による燃焼改善効果を調べた結果を図6に示す。設定したCO/H₂割合は1.0および0.6である。燃料中の水素割合が増加することにより燃焼状態が改善され、出力および熱効率が向上する傾向がある。しかし、この際にもNO_xをほとんど排出しないことが分かる。

3・3 不活性ガスの影響 発熱量5.02MJ/m³の燃料において、不活性ガスの影響を調べた結果を図7に示す。CO/H₂割合は1.0であり、比較した不活性ガスはCO₂とN₂である。不活性ガスがCO₂の場合に比べて、N₂の場合には出力および熱効率が改善し、NO_xが増加している。また、不活性ガスがN₂の場合にはMBTが遅角側に移動しており、燃焼速度の増加が窺える。燃料の発熱量およびCO/H₂割合が同一であっても、不活性ガスにより燃焼特性が大きく変化することが分かる。この場合の発熱等容度 η_{gh} 、初期燃焼期間 θ_{10-30} および熱発生率最大値 $dQ/d\theta_{max}$ を図8に示す。不活性ガスがN₂の場合には燃焼期間が短く発熱等容度が高く、これが熱効率の向上につながったものと考えられる。更に、この際の燃焼火炎を観察した結果を図9に示す。設定した混合気濃度は量論混合比、点火時期は上死点前20度

Fig.6 Influence of CO/H₂ ratio on combustion and emissions

Fig.7 Influence of inert gas on combustion and emissions

である。図より、不活性ガスがN₂の場合に比べてCO₂の場合には火炎伝播が遅く、火炎発光が弱いことから燃焼温度の低下が窺える。図10は、火炎面積および火炎面積の平方根の推移を示したものである。火炎面積の平方根の傾きは概ね火炎伝播速度に対応するが、CO₂が存在する場合には火炎伝播速度が低下していることが明らかである。CO₂とN₂では比熱が大きく異なっており、比熱が燃焼速度に大きな影響を与えていることが考えられる。

図11に、発熱量5.02MJ/m³の燃料の熱効率改善効果とNO_x排出の関係を示す。比較のため、燃料中の可燃成

分の全てを水素としたCO/H₂=0.0の燃料による実験結果も併せて示している。不活性ガスを比熱が小さいN₂にすることにより、NO_xが若干増加するものの高い熱効率改善効果が得られている。一方不活性ガスがCO₂の場合にも、水素割合の増加により熱効率が改善するが、不活性ガスをN₂とした場合に比べて効果は小さい。しかし、可燃成分を全て水素とした場合においてもNO_x排出濃度は非常に低い値である。CO₂の存在に伴う比熱増加による燃焼温度低下およびN₂分圧低下のために、NO_x生成反応速度の低下につながったことが考えられる。

Fig.8 Influence of inert gas on combustion characteristics

Fig.9 Influence of inert gas on flame propagation

3・4 総合比較 本研究で用いた全ての燃料をMBTにおいて比較した結果を図12に示す。図より、発熱量が同一の場合には、 CO_2 希釈に比べて N_2 希釈の場合に燃焼状態が良好であり、出力および熱効率が高く、不活性ガスが同一の場合には発熱量が高いほど出力が高いことが分かる。また NO_x 排出濃度は、発熱量の増加および CO/H_2 割合の低下に伴って増加する傾向があるが、本試験で用いたような不活性ガス割合の高い燃料の場合、空気過剰率 $\lambda=1.5$ 程度の希薄燃焼を行うことにより、十分に低い NO_x 排出濃度を実現できることが分かる。この希薄燃焼による低い NO_x 排出濃度は、点火時期を遅延することなく得られるため、MBTの確保が可能であり、高热効率と低 NO_x 排出の両立が可能である。一方、何れの燃料においても CO 排出濃度は数1000ppmであり、実用の際には酸化触媒などによる低減策が必要であると考えられる。

(a) Stoichiometric

(b) Lean ($\lambda=1.5$)

Fig.10 Flame area for different inert gases

(a) Stoichiometric

(b) Lean ($\lambda=1.5$)Fig.11 Influence of CO/H_2 ratio and inert gas on thermal efficiency and NO_x emission

Fig.12 Comparison of all the tested fuels at MBT

4. 結 言

本研究において得られた結果を以下に要約する。

1. 発熱量が同一の場合、CO₂希釈の燃料に比べてN₂希釈の燃料は燃焼状態が良好であり、出力、熱効率、および燃焼安定性が高い。
2. NO_x排出濃度は、燃料の発熱量および水素割合の増加に伴って増加する傾向がある。
3. 本研究で用いたような不活性ガス割合が高い燃料の場合、空気過剰率 $\lambda=1.5$ 程度の希薄燃焼を行うことにより、十分に低いNO_x排出濃度が実現できる。
4. 希薄燃焼における低いNO_x排出濃度は、点火時期を遅延することなく得られるため、最適点火時期が確保でき、高熱効率と低NO_x排出の両立が可能である。
5. 本研究でシュレッターダスト熱分解ガスを想定して用いた何れの燃料においても、CO排出濃度は比較的高い値であり、実用の際には酸化触媒などによるCO排出低減策が必要であると考えられる。

謝 辞

本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から財団法人エネルギー総合工学研究所が受託したプロジェクトの再委託研究である。また、実験において本学学生小野義敬君の協力を得た。ここに記し、謝意を表する。

文 献

- (1) 唐戸・ほか, 東芝レビュー, Vol.54, No.4, (1999).
- (2) Lewis, B., ほか, *Combustion Flame and Explosion of Gases*, (1961), Academic Press.
- (3) Shudo, T., ほか, Proc. ASME, AES-Vol.39, (1999).
- (4) 首藤・ほか, 機論, 66-644, B編, (2000).
- (5) Shudo, T., ほか, JSAE Review, Vol.21, No.2, (2000).
- (6) 首藤・ほか, 自技論, Vol.31, No.4, (2000).
- (7) 首藤・ほか, 自技論, Vol.30, No.3, (1999).
- (8) Shudo, T., ほか, JSAE Review, Vol.21, No.1, (2000).
- (9) 首藤・ほか, 自技論, Vol.32, No.1, (2001).