小形直接噴射式ディーゼル機関の 始動性と青・白煙に関する研究* (第5報, 燃焼室材料の影響)

石谷 博美^{*1}, 常本 秀幸^{*1}, 山田 貴延^{*1}

Cold Startability and Blue and White Smoke in a Small Direct Injection Diesel Engine (5th Report, Effects of Combustion Chamber Materials)

Hiromi ISHITANI, Hideyuki TSUNEMOTO, and Takanobu YAMADA

The combustion chamber surface and cylinder air temperatures during cranking have been investigated in a direct injection diesel engine with combustion chambers of various conductivity materials, and the influence of combustion chamber materials and surface deposits on the cold startability was tested. The insulated chamber made of bakelite indicated higher surface and air temperatures than did the copper chamber with larger conductivity. As the result, the starting time in the copper combustion chamber for cold operation was 5 times longer than that in the bakelite chamber, and it was found that there is a relationship between the cold startability and the thermal conductivity of combustion chamber materials, and that the cold startability is improved by the increase of the combustion chamber deposits.

Key Words: Automobile, Internal Combustion Engine, Diesel Engine, Blue and White Smoke, Startability, Ceramic

1. 結 言

本研究では、小形直接噴射式ディーゼル機関の低温始動性および暖機運転中の機関諸特性の改善を目的として、これまでに種々の検討^{(1)~(4)}を行ってきた。前報⁽⁴⁾では、低温時における着火の化学的な促進効果として、圧縮比と燃料のセタン価を変更した場合の始動諸特性、およびこれら両者の相互関係について検討を行った。いずれの場合にも始動性を改善するには、クランキング中の燃焼室内温度を高めることが重要であるが、この値は計算により求めている例⁽⁵⁾はあるものの、温度分布を含めて実測された例は少ない。

そこで本報告では、ベークライトから銅のように大幅に熱伝導率の異なる燃焼室を用いて、低温時の着火現象に大きな影響を与えている燃焼室内温度分布や壁温を実測するとともに、これらと始動諸特性の関係について実験を行った。また、燃焼室内に付着したたい積物は断熱効果があると考えられたため、その付着状態の違いによる始動性への影響についても調べてみた。

2. 実験装置および方法

実験に使用した機関は前報と同様に、水冷横置き、単気筒の四サイクル直接噴射式ディーゼル機関であり、ボア 86 mm, ストローク 90 mm, 行程容積 522 cm³, 圧縮比は 18.0 である。噴射ノズルは噴孔径 0.26 mm の 4 噴孔で、開弁圧は 22 MPa となっている。また、使用した燃料はセタン価 45 の EPA 標準軽油で、オイルは 10 W-30 を使用している。

図 1 は、燃焼室内温度の測定に用いた熱電対の取付方法、および測定位置を示したものである。

燃焼室表面温度は、図 1(a) のように表面がテフロ

図 1 温度測定方法と位置

* 平成元年 10 月 14 日 第 67 期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成元年 1 月 23 日。

^{*1} 正員、北見工業大学 (〒090 北見市公園町 165)。

ン被覆されている, 素線径 0.1 mm のクロメル-アルメル (C-A) 熱電対をシリンダヘッド上部から挿入し, 燃焼室内でストローク分だけスプリング状に巻き, 測温部を燃焼室表面に 0.5 mm 程度埋め込んで測定している。また燃焼室内空気温度は, 図 1(b) に示すようにシリンダヘッド上面からシース形 C-A 熱電対 (素線径 0.3 mm) を挿入し, その先端に測定用の $12.7 \mu\text{m}$ の C-A 熱電対を取付け, 図の A, B, C, D, E の 5 点で測定している。なお, 本機関のクランキングスピードは, ソーク温度 -10°C で約 350 rpm である。

表 1 は, 本実験で使用した燃焼室材料の熱的物性値を示したものである。なお燃焼室は, 図 1 に示すようにピストンクラウン部のみ交換可能な構造になっている。

始動試験においては, 前報と同様にひずみ計式の指圧計による燃焼圧力の測定, 透過式スモークメータによる青・白煙の評価あるいは NDIR 式の $\text{CO} \cdot \text{HC}$ メータを使った排ガス分析などを行っている。

3. 実験結果および考察

3.1 熱伝導率と圧縮温度の関係

3.1.1 燃焼室壁面温度 図 2 は, ソーク温度 -10°C のもとでクランキングを行い, この間の燃焼室表面温度の上昇経過を燃焼室材料の違いによって比較したものである。なお実測温度は, 圧縮あるいは膨張

表 1 燃焼室材料の熱的物性値

Material of combustion chamber	Thermal conductivity $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	Density kg/m^3	Specific heat $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
Bakelite	0.5	1600	1.59
Ceramic (Si_3N_4)	29	3270	0.711
Cast iron	42.8	7320	0.503
Aluminum alloy	156	2800	0.962
Copper	386	8900	0.418

図 2 燃焼室材料の違いによる燃焼室壁面温度

行程中のガス温度の変化に対応して変動するが, 図 2 ではこの間の平均温度を示した。

図 2 から明らかなように, 熱伝導率が小さい材料すなわち断熱度が高くなるほど温度上昇が早くなっている。特に熱伝導率の小さいベークライトの場合には温度上昇幅が大きく, クランキング開始後 10 s の間に約 57°C となり 67°C も上昇する。一方, 熱伝導率の高い銅製の燃焼室では -3°C 程度までしか上昇しておらず, ベークライトとの温度上昇の差は 60°C になっている。

3.1.2 燃焼室内空気温度 図 3 は, 燃焼室材料を変更した場合の燃焼室内空気温度および圧縮圧力を, クランキング開始後 5 s において, おおの 7 サイクルを平均して比較したものである。なお測定時の温度は, 図 3(a) のように熱電対の応答遅れによって圧縮圧力との間に位相差が認められることから, 真の温度ではないが, 銅よりベークライトを使ったほうが 5°C 程度高い温度を示している。図 3(b) は, 真の温度

図 3 燃焼室材料の違いによる燃焼室内空気温度

を推定するために測定温度と圧縮圧力のピーク値が一致するように時定数を考慮した温度補正プログラムを作り、計算により求めた圧縮時の温度推定カーブである。この計算によれば、銅とベークライトの温度差が約 15°C と実測値に比べ3倍近く高い値となっている。この実測値との差は、使用熱電対の周波数特性が悪く、圧縮上死点付近の出力が減衰するために生じた結果と考えられる。

図4は、図3の方法で求めたクランキング開始から60sまでの、燃焼室内空気の最高温度の推移を燃焼室材料の違いによって比較したものである。

図4から、クランキング開始後5sを見てみると、ベークライトでは約 400°C と最も高く、銅製の燃焼室では約 385°C になっている。また、15sを経過した場合でも銅、アルミニウム合金、鋳鉄、およびセラミックスの燃焼室では、 390°C 前後でその差が少ないが、断熱状態の良いベークライトでは 420°C となっており、他の燃焼室に比べて 30°C 程度高い温度を示している。なお、30s以降での温度上昇は低く、ベークライト以外の各金属間での温度差も少ない。

3・2 燃焼室内温度分布 図5は、ソーク温度 -10°C でアルミニウム合金燃焼室を用いて、圧縮上死点付近における燃焼室内空気の最高温度の分布を、クランキング開始後15sで比較したものである。

図4 経過時間と燃焼室内空気温度

図5 燃焼室内空気温度分布

図5から明らかなように、いずれの方向でも燃焼室中心部の温度が高く壁面付近で低い値を示しており、その温度差は約 40°C になっている。このような壁面付近での温度低下は、低温始動時の壁面付着燃料の蒸発あるいは暖機運転中の青・白煙の排出に影響を与えることが推察できる。特に暖機初期では、噴射終了後に燃焼が開始しており、主燃焼が壁面近傍で進行すると思われるから、材料変更時の壁面付近の空気温度は、低温時の燃焼改善には重要な要素となる。

3・3 燃焼室材料と始動諸特性 図6は、ソーク温度 -10°C で燃焼室材料を変更した場合の始動時間を、熱伝導率に対して比較したものである。

図6から明らかなように、銅、アルミニウム合金、鋳鉄、セラミックス、ベークライトの燃焼室の順に、熱伝導率が小さくなるほど始動時間が短縮されている。たとえば、銅の場合には完爆に至るまで70~80sの時間を要しているのに対して、ベークライトでは15sと約1/5になっている。これは、先の図4でもわかるように、銅のような熱伝導率の高い燃焼室では壁面温度が低く、この付近での圧縮端温度が上昇しないためと思われる。一方、ベークライトのように断熱状態の良い燃焼室では、早い時期から高い空気温度が得られ、完爆に至るまでの時間が大幅に短縮される。

図7は、燃焼室材料を変更した場合の燃焼状態を、始動後の経過時間1minおよび4minで比較した結果である。

図7の始動後の経過時間1minを見てみると、セラミックス、鋳鉄、銅のいずれの燃焼室も着火遅れは長い、燃焼による明確な圧力上昇が確認できる。一方、アルミニウム合金では圧力上昇点を確認できず、また熱発生率を見ても緩慢で燃焼期間の長い状態となっている。

ここで、始動時間が長かった銅がアルミニウム合金より良好な燃焼状態を示しているのは、銅製の燃焼室で銅表面が触媒として作用する可能性を考えている。特に低温時のようにホルムアルデヒドが多い場合は銅

図6 燃焼室材料の違いによる始動時間

の触媒効果があるとの報告⁽⁶⁾もあり、興味ある現象である。一方、4 min 付近での燃焼波形では、燃焼室内温度が上昇するため、アルミニウム合金でも燃焼圧のピーク値が圧縮圧力より高くなり、銅燃焼室との圧力差は小さくなる。なお、断熱性の高い鋳鉄およびセラミックス燃焼室では、経過時間の早い時期から燃焼室内温度が高くなるため着火が早く、燃焼波形も安定した状態を示す。

図8は、燃焼室材料を変更した場合の経過時間に対する着火遅れを整理したものである。なおこの場合の着火遅れは、初期燃焼の緩慢な部分の影響を除外するため熱発生率が5 J/deg になった点とした。

図8より、アルミニウム合金での着火遅れは1 min と8 min で約9°C A、時間にして1 ms と大きいが、熱伝導率の小さいセラミックスでは着火遅れも短く、1 min と8 min での差が4°C A とアルミニウム合金の半分以下である。

図9は、上記条件における暖機期間中のCOおよび青・白煙の排出濃度を示したものである。

図9から、CO濃度は先の燃焼状態に対応して熱伝

導率が高い燃焼室ほど高くなっており、経過時間2 min でのCO濃度は、アルミニウム合金で約0.4%とセラミックスに比べて2倍の排出濃度を示している。また10 min を経過しても、セラミックスに比べてアルミニウム合金のCO濃度は0.1%程度高く、断熱度の高いものは排ガス低減効果も大きいことがわかる。

一方、青・白煙も同様の傾向を示しているが、2 min を経過した段階では、いずれの燃焼室においても目視できないレベルまで低下している。なお、銅燃焼室の場合、始動初期に他の燃焼室に比べて高いオパシティ値を示すのは、始動時間が長いために排気系に付着していた燃料が排出されたためである。

3・4 燃焼室内たい積物と始動諸特性 図10は、燃焼室内にたい積する物質の始動性への影響を調べるために、ソーク温度 -10°C で繰返し始動実験を行った結果である。また、始動後の暖機運転は10 min 間で、その後、機関は低温室内で8 h 以上ソークを行い、クランキングスピードなどに実験間で差が生じない注意を払った。

図10から明らかなように、繰返し始動が4回付近

図7 燃焼室材料の違いによる燃焼状態

図9 燃焼室材料の違いによる排ガス濃度

図8 経過時間と着火遅れ

図10 繰返し始動回数と始動性

図 11 始動回数と燃焼変動

までは始動時間が短縮されるが、その後はほぼ一定値となる。その差は、1回めの約47sに対して4回めでは約33sとなり、14s程度改善されている。これは、燃焼室表面に付着したたい積物によって断熱性が改善され、燃焼室内のガス温度が上昇したためと考えている。

図11は、始動回数1, 4, 8回での暖機中の燃焼変動を、経過時間8min付近における燃焼最高圧90サイクルで比較した結果である。

図11より、暖機が進んで燃焼室内温度が高くなった8minでも、繰返し始動回数が増えるほど平均燃焼最高圧 $\bar{P}$ が高く、その変動率 C_p (C_p =標準偏差 S_p /平均燃焼最高圧 $\bar{P}$)も小さくなっている。たとえば8回めの場合には、1回めに比べて平均燃焼最高圧が0.072MPa高く、変動率は0.7%程度改善されており、繰返し回数が多いほど安定した燃焼状態であることがわかる。

図12は、始動回数が1回および8回の場合の燃焼状態を、経過時間1, 2, 4, 8minで比較したものである。

図12から、繰返し始動回数が多い場合には、暖機の早い時期から着火遅れが短く、圧力上昇率の高い燃焼状態を示している。たとえば、繰返し始動を8回行った場合の2minでは、1回めの暖機が進んだ8minにおける燃焼状態と同様の着火遅れあるいは熱発生率に

図 12 始動回数の違いと燃焼状態

なっており、燃焼室に付着したたい積物の断熱効果が明らかである。

4. 結 論

以上、燃焼室の熱伝導率と低温始動諸特性との関係を調べた結果、次のようなことが明らかとなった。

- (1) 燃焼室材料の熱伝導率が小さくなると、クランキング中の燃焼室壁面の温度上昇が早くなり、アルミニウム合金とペークライトではクランキング開始後10sで約60°Cの差が得られる。
- (2) 燃焼室内中心部の空気温度は、クランキングの早い時期で熱伝導率に対応して急速に上昇するが、その後の温度上昇は緩慢となる。なお熱伝導率に大きな違いがない場合には、燃焼室中心部での温度差は小さい。
- (3) クランキング中の燃焼室内空気温度は、中心部で高く壁面近傍では低くなり、その差は40°C程度になる。
- (4) 燃焼室材料の熱伝導率が小さいほど始動時間が短縮され、早期に安定した燃焼状態となる。しかし銅製の燃焼室では、触媒的效果によるためか暖機中の燃焼状態はアルミニウム合金より良好となる。
- (5) 燃焼室に付着したたい積物は断熱層となるため、始動性および暖機中の機関諸特性が改善される。

最後に、本研究の遂行に当たり、北見工業大学工学部 阿部清技官ならびに4年目学生 工藤亮二、末本洋通の両君に多大な協力をいただいた。ここに記して深く謝意を表する。

文 献

- (1) 石谷・常本・山田, 機論, 52-481, B(1986), 3413.
- (2) 石谷・常本・山田, 機論, 52-484, B(1986), 4079.

- (3) 石谷・常本・山田, 機論, 53-496, B(1987), 3827.
 (4) 石谷・常本・山田, 機論, 54-507, B(1988), 3295.
 (5) Ikegami, M., Kidoguti, Y. and Nisiwaki, SAE Paper, No.860467(1986).

- (6) 侯・ほか5名, 機論, 54-507, B(1988), 3290.

討 論

〔質問〕 角 田 敏 一〔広島大学工学部〕

アルミニウムは銅よりも壁面温度が高いにもかかわらず着火遅れが長く燃焼状態が悪いのはなぜか。とくに着火遅れ期間中の現象を表面の触媒作用で説明するのは困難だと思われる。また、この点の再現性につきご教示願いたい。

〔回答〕 付図1は、アルミニウムと銅燃焼室の着火遅れを繰返し始動回数の違いにより整理したものである。燃焼室表面が洗浄されている始動試験1回めの銅燃焼室はアルミニウム燃焼室に比べて暖機初期ほど着火遅れが短くなっている。しかし、燃焼室にカーボンなどのたい積物が付着し、これらに表面が覆れた状態の繰返し8回始動の場合には、いずれの経過時間でも両者の着火遅れの差はほとんど見られないことから、銅燃焼室の場合には、表面にたい積物などの付着割合が少ないとき銅表面が酸化銅となって、温度条件が満たされたとき触媒として作用していると考えている。なお、このような現象は本文中にも述べたように、ホルムアルデヒド濃度が高い場合に銅壁面は触媒作用があるとの報告〔文献(6)〕もあり、本実験のように吸気温度が低い場合でも燃焼ガス温度は数百°Cになるから、この効果が期待できると考えている。

また銅燃焼室の場合、熱伝導率の特性とは逆の燃焼状態となったため始動試験を4回程度行ったが、若干の差違はあるものの同様の傾向を示すことを確認している。

〔質問〕 中 北 清 己〔(株)豊田中央研究所〕

角田先生のご質問(燃焼室材料銅の触媒作用)に関

付図 1

連させていただく。

銅の場合は、アルミニウムより低温であるにもかかわらず、燃焼が活発となるが、これは銅の触媒作用によるとのことだが、燃焼室壁にカーボンなどのたい積物が付着した場合に銅壁は(アルミニウム壁と比較して)どのような特性を示すか。

〔回答〕 角田教授への解答に示した付図1に示すように、繰返し始動を8回行い表面がカーボンなどに覆われた状態の両者の着火遅れの差はほとんど見られないことから、銅燃焼室の場合には、表面にたい積物などの付着割合が少ないとき銅表面が酸化銅となって、温度条件が満たされたとき触媒として作用していると考えている。