火花点火式天然ガス機関の燃焼室内における燃焼特性*
(第2報, スワール比, 点火栓電極向きおよび点火栓位置の影響)深野行義^{*1}, 久木治男^{*2}
喜多茂雄^{*2}, 角田敏一^{*3}In-Cylinder Combustion in a Spark-Ignited Natural Gas Engine
(2nd Report, Effect of Swirl Ratio, Spark Plug Electrode Direction
and Spark Plug Position)Yukiyoshi FUKANO^{*4}, Haruo HISAKI,
Shigeo KIDA and Toshikazu KADOTA^{*4} Osaka Gas Co., Ltd., Engineering Dept., 4-1-2, Hiranomachi, Chuo-ku, Osaka, 541-0046 Japan

An experimental study was made to investigate the effect of swirl ratio, spark plug electrode direction and spark plug position on in-cylinder combustion in a spark-ignited natural gas engine. Flame propagation in a single-cylinder visualization engine was observed from bottom of the piston by the high speed schlieren method, over the wide range of nominal swirl ratio, spark plug electrode direction and spark plug position. The results showed that larger swirl ratio led to more rapid flame propagation, resulting in larger heat release rate and larger cylinder pressure. Spark plug electrode direction had little effect on flame propagation, resulting in little difference in heat release rate and cylinder pressure. Farther spark plug position to cylinder axis led to more rapid flame propagation, resulting in larger heat release rate and larger cylinder pressure, excluding extremely far spark plug position.

Key Words: Internal Combustion Engine, Spark-Ignited Engine, Gas Engine, Combustion, Flame, Schlieren, Swirl Ratio, Spark Position

1. 緒 言

火花点火式天然ガス機関の熱効率および排ガス有害成分の生成は、機関の燃焼室内の流動、混合ならびに燃焼の特性に大きく依存しているため、これらの特性を明らかにすることは、機関性能の向上にとって極めて重要である。

火花点火式天然ガス機関の燃焼室内の流動、混合ならびに燃焼の特性に関する研究としては、いくつか報告されている^{(1)~(4)}。しかしながら、研究例が極めて少なく、未解明な部分が多く残されている。しかも、大部分は定容容器等を用いた基礎的なものであり、実機関に近い条件でこれらの特性を取扱った研究はほとんど報告されていない。

よって、著者らは、実機関に近い条件で火花点火式天然ガス機関の燃焼室内の流動、混合や燃焼の特性を明らかにするための体系的な研究に取り組んでき

た^{(5)~(7)}。第1報⁽⁷⁾では、燃焼特性解明の一環として、高速シュリーレン法を用い可視化用単気筒機関の燃焼室内における燃焼状態を可視化し、燃焼室内における火炎の挙動、それに及ぼすピストン燃焼室形状および上死点すきまの影響等について明らかにした。燃焼室内における火炎の挙動は、吸気流動や点火系諸元によっても異なることが考えられ、燃焼の解明のためにはこれらの影響を明らかにする必要がある。

そこで、本論文では、スワール比、点火栓電極向きおよび点火栓位置を変更して、可視化用単気筒機関の燃焼室内における燃焼を第1報⁽⁷⁾と同じ装置により可視化し、それらの機関諸元が燃焼室内の火炎の挙動に及ぼす影響を明らかにしたので、報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置 実験装置は第1報⁽⁷⁾で用いたものと同じである。主として、可視化用単気筒機関、燃料・空気の供給系、シュリーレン装置、高速度カメラによる撮影系、画像処理装置、燃焼室内圧力解析装置より構成されている。可視化用単気筒機関は、ボア 75 mm, ストローク 62 mm, 圧縮比 10.5 の伸長ピストン機関である。なお、詳細は第1報⁽⁷⁾を参照願いた

* 原稿受付 1998年6月22日。

^{*1} 正員, 大阪ガス(株) (☎ 541-0046 大阪市中央区平野町 4-1-2)。^{*2} 大阪ガス(株) (☎ 550-0023 大阪市西区千代崎 3-2-37)。^{*3} 正員, 大阪府立大学工学部 (☎ 599-8231 堺市学園町 1-1)。

E-mail: yfukano@osakagas.co.jp

Fig. 1 Piston

Fig. 2 Spark plug direction

い。

実験に用いたピストン燃焼室を図1に示す。ピストン燃焼室Cはピストン燃焼室Aに比べ、燃焼室径が小さく燃焼室深さが大きい。ピストン燃焼室C'は、ピストン燃焼室Cと同一形状であるがシリンダ軸に対して点火栓側へ6 mm 偏心している。上死点すきまは0.7 mm とした。

シリンダヘッド爆面は平面であり、また点火栓の取付位置は、図2に示すように、シリンダ中心から L [mm] 偏心している。吸気ポートは、ヘリカルポートである。シリンダヘッドを交換することにより、スワール比を0.8, 1.5, 2.2と、また点火栓位置 L を9, 14, 19, 24 mm と変更した。

点火栓外側電極向きは、点火栓の座金厚さを調整することにより、図2に示すように、点火栓中心を通る水平右方向を基準とした半時計回りの角度で45°と225°と変更した。225°の向きは、第1報⁷⁾で明らかにした火炎の伝播方向に外側電極を配置した場合であり、45°の向きはその逆である。

実機関の燃焼室内における燃焼に近づけるために、シリンダおよびシリンダヘッドに冷却水通路を設け、機関を温水により加熱できるようにしてある。予備試験の結果、本機関の燃焼時の燃焼室内圧力は実機関の燃焼時の燃焼室内圧力とほぼ同等であり、本機関は実

Fig. 3 Calculated flame area

機とほぼ同等の燃焼を実現していることを確認している。

2.2 実験方法および条件 スワール比、点火栓電極向きおよび点火栓位置を変更し、以下に示す方法により燃焼室内の火炎の挙動を計測した。なお、詳細は第1報⁷⁾を参照願いたい。

Xe ランプからの光は、シュリーレンレンズにより平行光とされた後、ピストンのガラス部を通して機関燃焼室内へ照射される。照射された光は、シリンダヘッドミラー等で反射され、高速度カメラ方向へ進む。この光は、燃焼室内における混合気や燃焼ガス等により屈折されるため、シュリーレンレンズの焦点位置を通らない。この光の一部をシュリーレンレンズの焦点位置でナイフエッジにより遮断する。これにより、燃焼ガスがシュリーレン像として可視化される。撮影領域は約40 mm×60 mm である。

撮影されたフィルム画像を基に、画像処理装置を用い火炎面先端抽出や火炎領域面積計算等の処理をした。点火栓がシリンダ中心から偏心した位置にあることを考慮し、図3に示すように、点火栓電極を中心とする90°の範囲において既燃ガスが占める領域を火炎面積とした。

高速度カメラのフィルムには16 mm カメラ用120 m フィルム(ASA 400)を用い、撮影速度は8 000 fps とした。

燃焼の撮影と同時に燃焼室内圧力の計測を行った。

機関回転数は1 200 rpm、スロットルバルブ開度は全開、空気過剰率は1.4、点火時期は15°BTDC、冷却水の機関出口温度は80°Cとした。使用した天然ガスの組成は、メタン88%、エタン6%、プロパン4%、ブタン2%である。

本機関回転数では、1回の計測で13サイクルの燃焼が計測される。解析は、燃焼が安定する4サイクル目以降を対象とした。各実験条件で20回の計測を行っ

Fig. 4 Effect of swirl ratio on flame propagation

た。1回の計測で得られる4~13サイクルのデータを、20回の計測にわたって統計処理することにより、火炎面積の時間変化、火炎伝播速度および燃焼室内圧力を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 スワール比の影響 図4は、ピストン燃焼室C'、上死点すきま0.7 mm、点火栓位置 $L=24$ mmにおける火炎伝播に及ぼすスワール比の影響の例を示したものである。これは、燃焼画像から画像処理装置を用い火炎面先端を抽出しクランク角 5° ごとに重ね合わせたものである。図4においてスワールは半時計方向である。

スワール比が大きいほど、火炎はより速く伝播する。スワール比にかかわらず、火炎は、点火栓を中心に同心円状に伝播するのではなくスワールにより図4中左側へ偏って伝播する。その偏りの程度はスワール比の増大とともに小さくなる傾向がある。これな、既報⁽⁶⁾で報告したように、スワール比の増大とともに、燃焼時期のスワール速度は増大するが、それ以上に燃焼速度が大きくなったからであると考えられる。

スワール比の増大とともに、火炎面先端の凹凸が小さくなっていく。また、本稿には示していないが、火炎構造を示すと思われる火炎中の格子模様が細かくなっていく。これは、既報⁽⁶⁾で報告したように、スワール比の増大とともに乱流エネルギーが増大することにより乱流場の渦のサイズが小さくなり、火炎構造が微

Fig. 5 Effect of swirl ratio on time history of flame area

Fig. 6 Effect of swirl ratio on flame speed

細化していったためであると考えられる。

図5は、図4と同じ条件における火炎面積の経時変化に及ぼすスワール比の影響を示したものである。これは、20回の計測のアンサンブル平均値である。スワール比が大きいほど、全燃焼期間において火炎面積はより速く増加する。スワール比は、火炎核が一定の大きさまで成長する初期燃焼およびそれ以降の燃焼ともに大きな影響を及ぼす。これは、スワール比が初期燃焼を支配する点火栓電極付近の混合気流動、および燃焼室内全体の混合気流動に及ぼす影響が大きいからであると考えられる。

図6は、火炎伝播速度に及ぼすスワール比の影響を示したものである。ここで、火炎伝播速度は、図5の火炎面積を時間微分することにより求めた。スワール比が大きいほど、火炎伝播速度は大きくなる。これは、既報⁽⁶⁾で報告したように、スワール比の増大とともに、乱流エネルギーが大きくなり燃焼速度が増大したためであると考えられる。

図7は、図4と同じ条件における燃焼室内圧力および熱発生率に及ぼすスワール比の影響を示したものである。これは、20回の計測のアンサンブル平均値であ

Fig. 7 Effect of swirl ratio on cylinder pressure

 $\lambda=1.4, ST=15^\circ \text{ BTDC, WOT, 1200rpm}$

Fig. 8 Effect of spark plug direction on flame propagation

る。前述の火炎伝播に対応するように、上死点付近においてすでに、熱発生に差が現れている。スワール比が大きいほど、前述のように火炎伝播速度が大きくなるため、熱発生率および最大燃焼室内圧力は大きくなる。

3.2 点火栓電極向きの影響 図8は、ピストン燃焼室A、上死点すきま0.7 mm、点火栓位置 $L=9$ mm、スワール比1.5における火炎伝播に及ぼす点火栓電極向きの影響を示したものである。点火栓電極向き45°に比べ点火栓電極向き225°では、初期火炎の生成が少し遅くなる傾向があるが、本実験の範囲内では、点火栓電極向きがスワールによる火炎伝播の偏りおよび火炎面先端の凹凸の大きさに及ぼす影響は小さい。また、本稿には示していないが、点火栓電極向きが火炎中の格子模様の高さに及ぼす影響も小さい。なお、点火栓電極向き225°の場合に初期火炎の生成が少し遅くなる傾向があるのは、伝播中の火炎が外側電極により冷却されることなどが原因と考えられる。

図9は、図8と同じ条件における火炎面積の経時変化に及ぼす点火栓電極向きの影響を示したものである。これは、20回の計測のアンサンブル平均値である。図9から明らかなように、本実験の範囲内では、点火栓電極向きが火炎面積の経時変化に及ぼす影響は

Fig. 9 Effect of spark plug direction on time history of flame area

Fig. 10 Effect of spark plug direction on cylinder pressure

小さい。したがって、本実験の範囲内では、火炎伝播速度は点火栓電極向きにほとんど依存しない。

点火栓電極向きが火炎伝播、火炎面積の経時変化および火炎伝播速度に及ぼす影響が小さいのは、点火栓電極向きが燃焼室内における流動場に及ぼす影響が小さいためだと考えられる。

図10は、図8と同じ条件における燃焼室内圧力および熱発生率に及ぼす点火栓電極向きの影響を示したものである。前述のように、点火栓電極向きが火炎伝播、火炎面積の経時変化および火炎伝播速度に及ぼす影響が小さいため、熱発生率および燃焼室内圧力は点火栓電極向きにほとんど依存しない。

3.3 点火栓位置の影響 図11は、ピストン燃焼室C、上死点すきま0.7 mm、スワール比1.5における火炎伝播に及ぼす点火栓位置の影響の例を示したものである。点火栓位置 L が大きいほど、火炎はより速く伝播していくが、点火栓位置 $L=24$ mmでは火炎の伝播は遅くなる。点火栓位置 L を変化させても、火炎は、点火栓を中心に同心円状に伝播するのではなくスワールにより図11中左側へ偏って伝播する。ま

$\lambda = 1.4$, $ST = 15^\circ$ BTDC, WOT, 1200rpm

Fig. 11 Effect of spark plug position on flame propagation

Fig. 12 Effect of spark plug position on time history of flame area

た、点火栓位置 L にかかわらず、火炎面先端の凹凸の大きさはほぼ同じである。本稿には示していないが、点火栓位置が火炎中の格子模様の高さに及ぼす影響も小さい。

図 12 は、図 11 と同じ条件における火炎面積の経時変化に及ぼす点火栓位置の影響を示したものである。これは、20 回の計測のアンサンブル平均値である。全燃焼期間において、点火栓位置 L の増大とともに、火炎面積はより速く増加するが、点火栓位置 $L = 24$ mm では低下する。

図 13 は、図 12 を基に算出した火炎伝播速度に及ぼす点火栓位置の影響を示したものである。点火栓位置

Fig. 13 Effect of spark plug position on flame speed

Fig. 14 Effect of spark plug position on cylinder pressure

Fig. 15 Effect of spark plug position on maximum swirl velocity

L が大きいほど、火炎伝播速度は大きくなっていくが、点火栓位置 $L = 24$ mm では低下する。

図 14 は、図 11 と同じ条件における燃焼室内圧力および熱発生率に及ぼす点火栓位置の影響を示したものである。前述の火炎伝播に対応するように、初期燃焼の時期である上死点付近においてすでに、熱発生に差が現れている。また、図 13 に示した火炎伝播速度の大きさに対応して、点火栓位置 L の増大とともに、熱発生率および最大燃焼室内圧力は増大するが、点火栓

位置 $L=24$ mm では低下する。

点火栓位置の差による火炎伝播速度の違いは、点火栓位置における混合気流速が関係していると考えられる。図 15 は、既報⁹⁾の計測結果を基に、点火栓位置でのスワール速度の最大値を示したものである。機関運転条件は、回転数 600 rpm, WOT, モータリングである。点火栓位置を変えたときの火炎伝播速度の変化の傾向は、点火栓位置における混合気流速の変化の傾向とよく対応している。すなわち、点火栓位置における混合気流速が大きいほど、火炎伝播速度が大きいことがわかる。

4. 結 論

火花点火式天然ガス機関の燃焼室内における燃焼状態を高速シュリーレン法を用い可視化し、燃焼に及ぼすスワール比、点火栓電極向きおよび点火栓位置の影響について明らかにした。本研究で得られた結論は以下のとおりである。

(1) スワール比が大きいほど、スワールによる火炎伝播の偏りが小さくなり、火炎面先端の凹凸および火炎構造を示すと思われる火炎中の格子模様的大小が小さくなっていく。また、スワール比の増大とともに、全燃焼期間において、火炎伝播速度は大きくなる。

その結果、熱発生率および最大燃焼室内圧力が大きくなる。

(2) 本実験の範囲内では、点火栓電極向きが火炎伝播の偏り、火炎面の凹凸および火炎中の格子模様的大小、火炎伝播速度に及ぼす影響が小さい。その結果、熱発生率および最大燃焼室内圧力はほぼ同じになる。

(3) 本実験の範囲内では、点火栓位置が火炎面の凹凸および火炎中の格子模様的大小に及ぼす影響は小さい。点火栓位置 L の増大とともに、火炎伝播速度は増大するが、点火栓位置 $L=24$ mm では低下する。その結果、熱発生率および最大燃焼室内圧力は、点火栓位置 L が大きいほど増大するが、点火栓位置 $L=24$ mm では低下する。

文 献

- (1) 片岡克己・ほか 3 名, 機論, **62**-596, B(1996), 1638-1644.
- (2) 片岡克己・ほか 3 名, 機論, **63**-608, B(1997), 1456-1462.
- (3) Segawa, D., ほか 4 名, *SAE Paper*, No. 961937(1996).
- (4) Wolff, D., ほか 3 名, 第 13 回内燃機関合同シンポジウム講演論文集, (1996), 429-434.
- (5) 深野行義・ほか 3 名, **64**-618, B(1998), 272-278.
- (6) 深野行義・ほか 3 名, 舶機学会誌, 34-11, (1999), 764-773.
- (7) 深野行義・ほか 3 名, 機論, **66**-643, B(2000), 934-940.