

バックファイヤ発生メカニズムに関する研究

Study on Generation Mechanism of Backfires

斉 藤 信 二* 安 達 真 也*
Shinji SAITO Masaya ADACHI

要 旨

二輪車用エンジンにおいて、ボアの大径化に伴いバックファイヤの発生が問題となることがある。オーバーラップ上死点における点火(捨て火)や、排気行程で排出された高温の既燃ガスがオーバーラップ時に燃焼室内へ逆流することがバックファイヤの発生要因と考えられていた。バックファイヤ発生時における燃焼室内と吸排気ポートの圧力測定および高速度 CCD カメラによる燃焼室内の観察を実施した結果、排気行程中でも継続的に燃焼している極端に燃えの遅いサイクルが存在していることが分かった。この極端な遅燃えサイクルが火種となり次の吸気行程で新気に着火しバックファイヤを発生させることが確認できた。本論文では、その概要を報告し極端な遅燃えサイクルに影響を与える因子に関する考察を述べる。

ABSTRACT

In motorcycle engines, according with increase in size of the cylinder bore, backfires might become issues. Up to now, it had been thought that the backfire is caused by the extra ignition in top dead center at overlap and the high temperature exhaust gas which flows backward into combustion chamber when overlapping during exhaust stroke. The pressure measurements inside the combustion chamber, the inlet port and the exhaust port, and the observation inside the combustion chamber by the high speed CCD camera were conducted and it was found that a slow burning cycle which is continuously burning during exhaust stroke exists. Further, it was confirmed that the fresh air-fuel mixture at coming intake stroke ignited by the extremely slow burning generates the backfire. This paper describes the considerations of some factors which influence the extremely slow burning cycle.

1. まえがき

スロットル急開時にエンジンの吸気管より「パンッ」と燃焼音が発生するバックファイヤは、商品性上の重大な問題である。しかし、バックファイヤの発生メカニズムについては理論的な解析が行われていないのが現状である。

従来、バックファイヤの着火源はオーバーラップトップ時の点火(捨て火)や他の気筒の排気圧力波により排気管から逆流した高温の既燃ガスであると考えられていた。しかし、これらの要因を排除してもバックファイヤが発生する場合があった。本研究において、バックファイヤ発生時の各部の圧力測定や筒内を高速度カメラにより観察した結果、捨て火や逆流した既燃ガス以外の着火源が明らかになったので報告する。

*朝霞研究所

2. テスト装置

2.1. エンジン操作装置

供試エンジンの主要諸元を Table 1 に示す。本研究においてはV型二気筒(前後気筒配列)の996cm³のエンジンを用いている。基本的に、後方の気筒についてテストを行った。

バックファイヤは無負荷減速状態でスロットルを急開した場合が最も発生しやすい。従来は、手でスロットルを操作してバックファイヤの各種テストを行っていたが、発生頻度にバラツキが生じ精度も悪いので、本研究では、Fig.1の上側のダイアグラムに示す装置を製作してテストを行った。

この装置はエンジンの回転数を監視し設定回転数まで下

Table 1 Major specification of test engine A

Engine type	4-stroke V-90° twin cylinder
Cooling type	Liquid-cooled
Bore × stroke	98 × 66
Compression ratio	9.4
Valve train	DOHC 4-valve
Maximum power (kW/r/min)	77.3 / 9 000
Maximum torque (Nm/r/min)	93.1 / 7 000
Ignition timing	15° (BTDC)

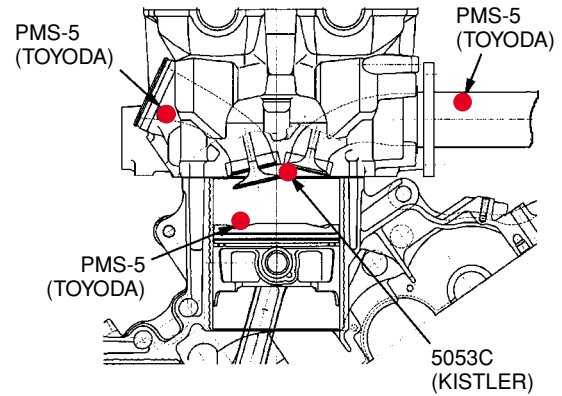


Fig.2 Installation position of pressure sensor

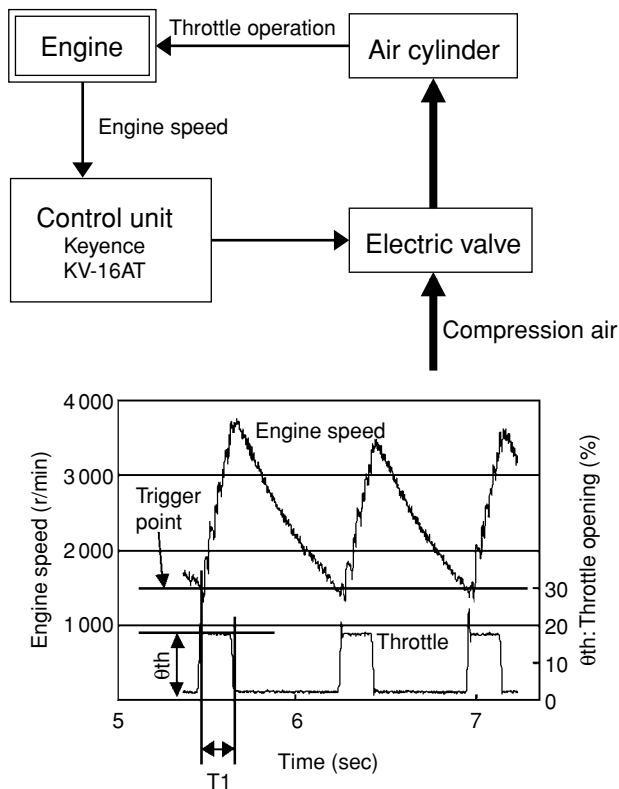


Fig.1 Backfire test device

がると電磁弁を操作しエアシリンダを作動させる。この装置は、Fig.1 の下側に示すようにスロットルが所定の時間(T1)、所定のスロットル開度(θ_{th})を開くようにした装置である。この装置により所定の回数の無負荷スナップを繰り返している。実際の動作中のエンジン回転数とスロットル開度の関係を Fig.1 の下側に示す。

2.2. 圧力センサの取り付け位置

バックファイヤ発生メカニズムを解明する為各部の圧力測定を行った。Fig.2に各圧力センサの名称と取り付け位置を示す。燃焼指圧測定用に KISTLER 社製の圧力センサ 5053C、吸排気管内の圧力測定用に TOYODA 社製の圧力センサ PMS-5 を取り付け。更に、下死点近傍の筒内圧力を

精度よく測定するために、クランクアングルで上死点より 95° に相当するデッキ面から 35mm 下がった位置のシリンダの側面に TOYODA 社製の圧力センサ PMS-5 を取り付けしている。

3. バックファイヤ発生状況

3.1. バックファイヤの発生条件

従来から経験的にバックファイヤはエンジンが低回転の運転時に急激にスロットルを開いたときに発生しやすいことが知られている。これは低負荷時に燃焼が不安定になっていると考えられる。これらの条件をまとめると次のようになる。

- ・大ボアのエンジン
- ・低負荷、低回転の運転後
- ・操作するスロットル開度が小さい
- ・スロットルの急開操作

3.2. バックファイヤの最も発生しやすい条件

2.1 項で提示した供試エンジンを用いて、Table 2 に示すように条件を設定し、バックファイヤの発生頻度が高い条件を確認した。

条件設定の手順

- (1) スロットル操作を開始するエンジン回転数を変更しながらバックファイヤの発生頻度を測定する (Fig.3)。
- (2) バックファイヤの発生頻度が最も高いエンジン回転数を選択し、スロットル開度を変更しながら発生頻度を

Table 2 Operation conditions

Item	Operation conditions
Engine speed of operation start (r/min)	1 300, 1 500, 1 700, 2 000, 2 400
Throttle opening (%)	5, 10, 15, 18, 20, 22, 30
Operation time (sec)	0.14, 0.17, 0.18, 0.20

測定する (Fig.4).

- (3) バックファイヤの発生頻度が最も高いエンジン回転数、スロットル開度を選択し、スロットルの操作時間を変更しながら発生頻度を測定する (Fig.5).

上記設定条件に従ってテストした結果、供試エンジンではスロットルの開き始めエンジン回転数は 1500r/min、スロットル開度 20%、時間 0.17sec が最も発生頻度が高いこ

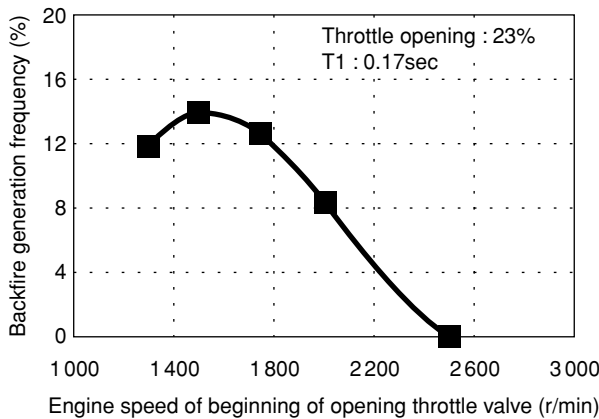


Fig.3 Backfire generation map (Changing engine speed)

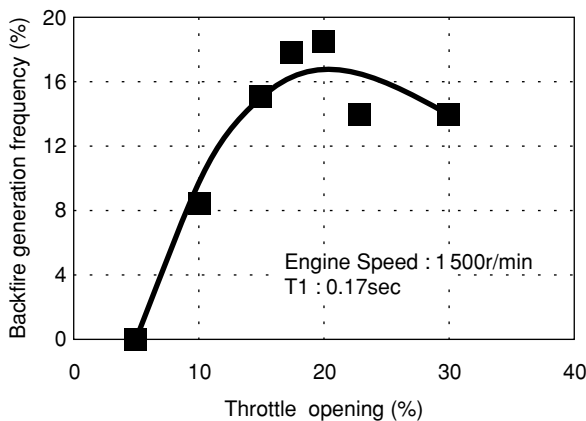


Fig.4 Backfire generation map (Changing θ th)

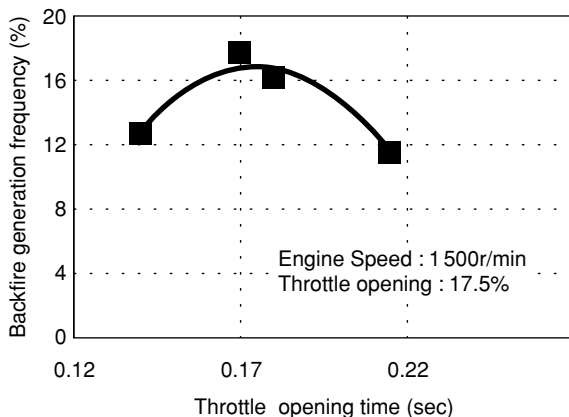


Fig.5 Backfire generation map (Changing T1)

とが分かった。この供試エンジンのアイドル回転数は 1200r/min に設定されており 1500r/min はアイドル回転数より若干高い回転数であることが分かる。また、スロットル開度は 15%以上開いていれば、バックファイヤ発生頻度はそれ程大きく変化しないことも分かった。

3.3. スロットルを開くタイミングの影響

バックファイヤ発生頻度とスロットルを開くタイミングの関係を Fig.6 に示す。吸気バルブが開いている間にスロットルを開くとバックファイヤの発生頻度が低いことが分かる。これは吸気バルブが開いている間にスロットルバルブが開くため、一般的に言われている流入空気に対する燃料の追従遅れがより顕著になり空燃比がリーン側にずれてバックファイヤが発生しなくなったためと考える。

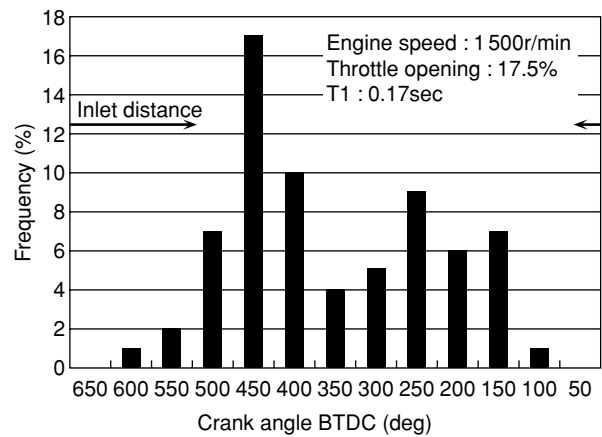


Fig.6 Throttle open timing

4. バックファイヤ発生時の各部圧力の測定結果

4.1. バックファイヤ発生時の圧力

バックファイヤ発生時の各部の圧力波形を Fig.7 に示す。

スロットル全閉 (下図青色線) 状態でエンジン回転数が下降し (下図赤色線), 1500r/min 近傍でスロットルが開きその直後吸気管内の圧力 (上図緑線) と筒内の圧力 (上図赤線) が上昇しバックファイヤが発生している。測定レンジが異なるため波形の山は小さいが KISTLER 社製の圧力センサにも圧力の上昇が認められる。

バックファイヤが発生している直前のオーバーラップ上死点付近で排気圧力波 (上図橙色線) は圧力変化が無い。従来から言われている他気筒の排気圧力波の影響でバックファイヤが発生しているのではないことが分かる。

通常、無負荷減速時は失火サイクルとなる。失火サイクルの場合、断熱圧縮、断熱膨張に近い状態となるため Fig.8 の上図に示すよう排気バルブが開く瞬間の筒内圧はその前の圧縮行程の始まる時の圧力とほぼ等しくなる。また、通常の遅燃えサイクルの場合、Fig.8 下図に示すよう排気バルブ

が開く瞬間の圧力は 100kPa 以上ある。

Fig.7においてバックファイヤが発生している1つ前のサイクルに着目する。一見失火サイクルのように見えるが排気バルブが開く瞬間の筒内圧(図中ブロック矢印部)は、その前の圧縮行程始まりの筒内圧よりも明らかに高く、失火サイクルではないことが分かる。しかし、通常の遅燃えサイクルほど高圧になっていない。つまり、失火サイクルにかな

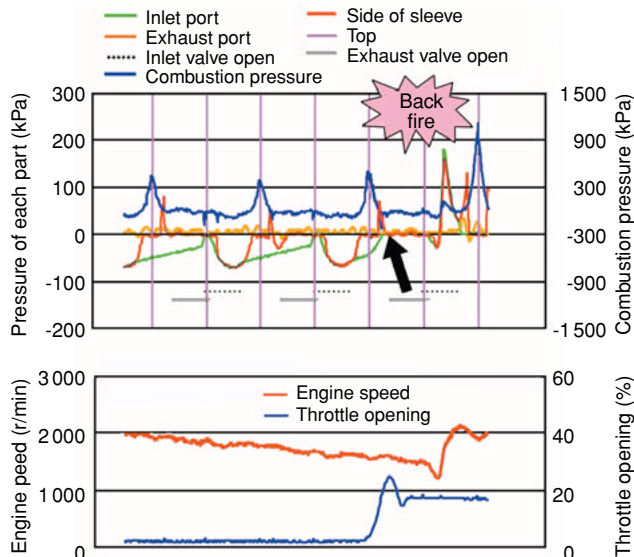


Fig.7 Pressure of each part when backfire is generated

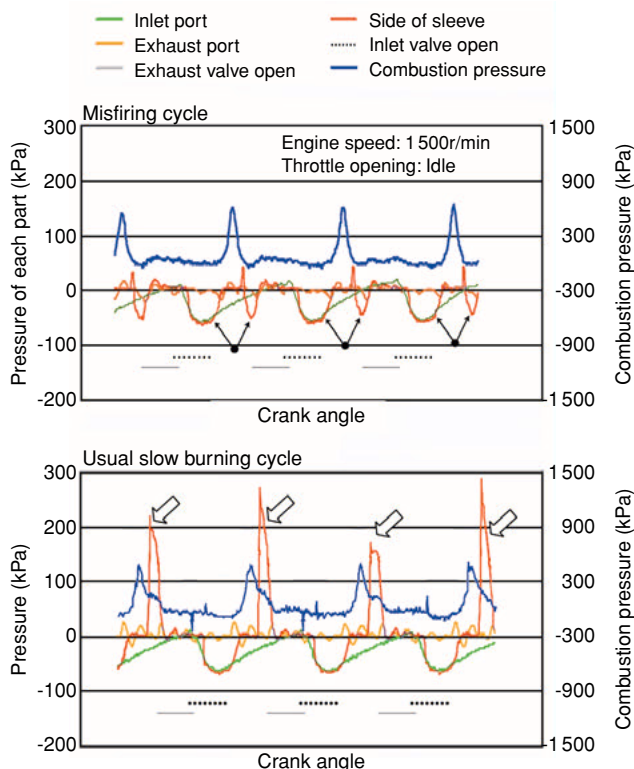


Fig.8 Pressure of each part when usual slow burning and misfiring cycle is generated

り近づいた極端に燃えの遅いサイクルであると考えられる。本研究においては、このような燃えの遅いサイクルを極端な遅燃えサイクルと呼ぶことにした。

4.2. P-V 線図

小野測器製の燃焼解析装置 DS-0928Ver3.58 を用いて測定した極端な遅燃えサイクルの P-V 線図を Fig.9 に示す。吸気行程の後半で筒内圧が上昇し、バックファイヤが発生している。このサイクルの燃焼行程から排気行程に移行する部分(図中丸印内)に注目する。排気行程の直前、排気バルブが開いたにもかかわらず筒内の圧力が変化していない。

ここでも通常の遅燃えサイクル、失火サイクルと比較してみる。Fig.10 の下図に示すように、通常の遅燃えサイクルでは燃焼しているため排気バルブが開けば筒内圧は大気

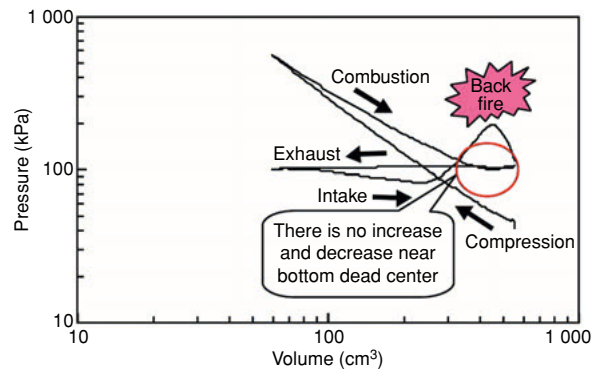


Fig.9 P-V Diagram (Extremely slow burning cycle)

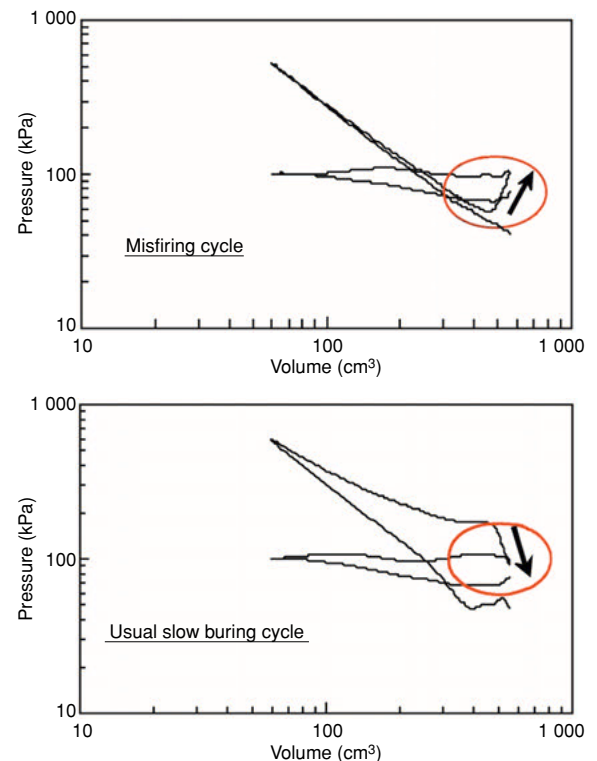


Fig.10 P-V Diagram (Misfiring and usual slow burning cycle)

圧に向かって下がる。また、Fig.10の上図に示すように、失火サイクルは圧縮し始めが負圧であるため排気バルブが開く直前の筒内圧も負圧になっていて排気バルブが開くと大気圧に向かって筒内圧は上昇する。極端な遅燃えサイクルはそのどちらでもない。

このように極端な遅燃えサイクルは排気バルブが開く前後で筒内圧が増減しないサイクルであると言える。それは遅燃えが更に遅くなり排気バルブが開いても、まだ燃焼が継続しているサイクルであるからだと考えられる。

極端な遅燃えサイクルは失火サイクルから遅燃えサイクルに移行する過渡の状態が発生する現象だと考えられる。Fig.11に示すよう、一般的に体積効率を下げていくと通常の燃焼サイクルから燃焼速度が次第に遅くなり最終的には失火サイクルとなる。無負荷減速状態からアイドルへ移行する場合はこれと逆の状態となる。すなわち失火サイクルの状態から遅燃えサイクルに移行する。そのとき、突然遅燃えサイクルとなるのではなく、失火サイクルと遅燃えサイクルの中間の状態として極端な遅燃えサイクルが発生すると考えられる。この極端な遅燃えサイクルの熱発生量は140～160Jであった。

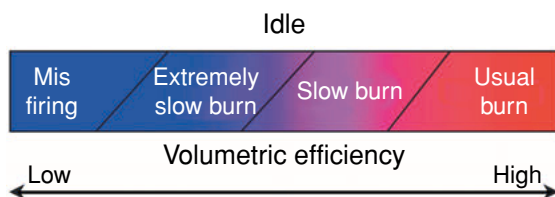


Fig.11 Generated area of extremely slow burning cycle

5. 筒内観察

バックファイヤが発生しているサイクルの直前サイクルを調べてみると、全て極端な遅燃えサイクルであることが分かった。これらから、バックファイヤが発生する着火源は極端な遅燃えサイクルであると考えた。極端な遅燃えサイクルは燃焼速度が遅いため燃焼行程中に燃焼が終了しないで、排気行程まで燃焼が継続しているサイクルであると仮定した。排気行程の後半で吸気バルブが開き新しい混合気が高圧の筒内に入ってきて燃焼し吸気行程でバックファイヤが発生すると考えられる。

排気行程で燃焼が継続していることを確認する手段としては、極端な遅燃えサイクルの発生の有無によって筒内の温度差を測定すれば良い。しかし筒内の高温、高圧条件下でしかも数ミリ秒の単位で精度良く温度を測定するのは困難であった。そこで筒内の目視観察を行った。

供試エンジンの燃焼室側壁に直径10mmの取り付け穴をあけAVL社製のエンドスコープを取り付けた。Fig.12上図に燃焼室内を観察している範囲を示す。図中の緑線の扇

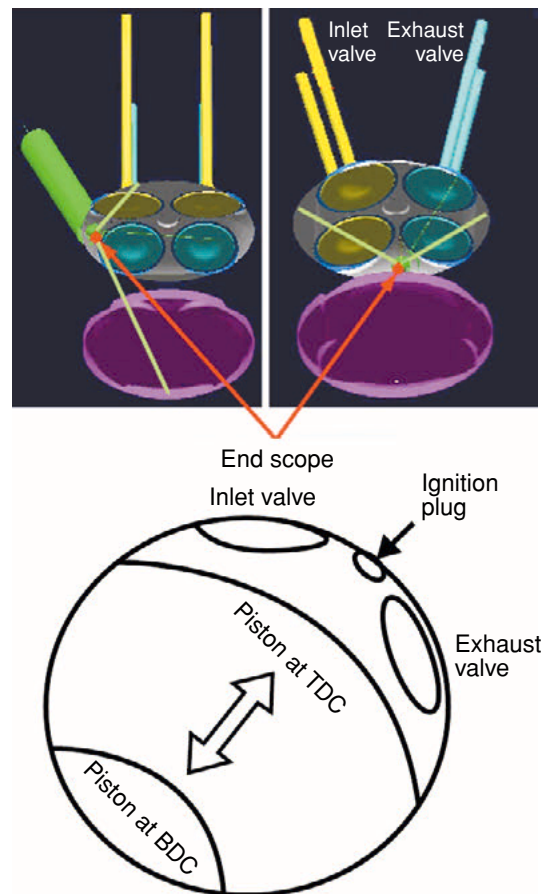


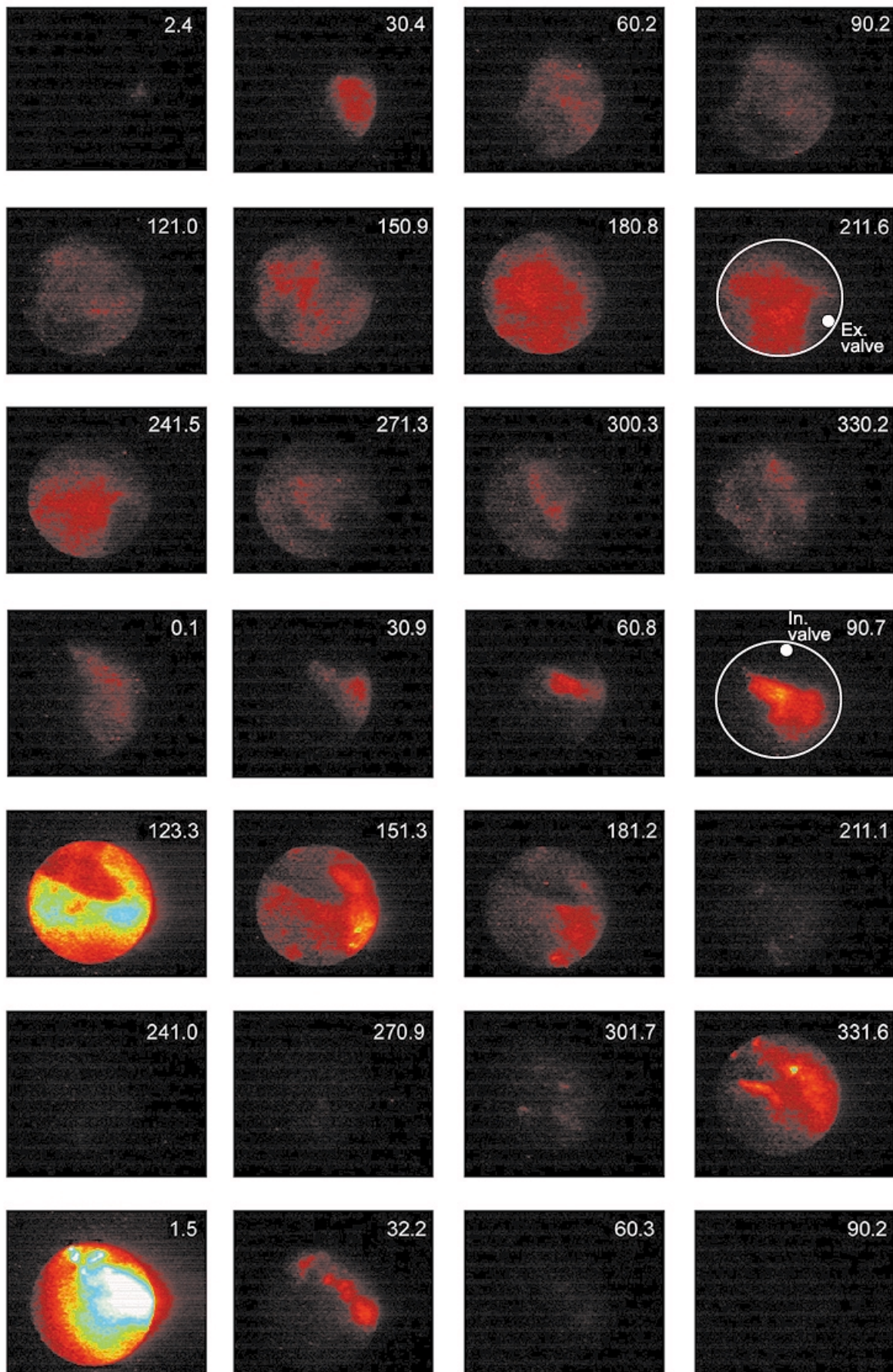
Fig.12 Observation area in cylinder

形の部分が観察範囲である。Fig.12下図にエンドスコープを通して観察した燃焼室内の模式図を示す。

エンドスコープ後端に浜松ホトニクス社製のイメージンテンシファイヤ C5836-60 を取り付け高速 CCD カメラ KODAK EKTAPRO HS MOTION ANALYZER MODEL 4540 にて撮影を行った。極端な遅燃えサイクル発生からバックファイヤ発生後までの間、一連の現象を連続で撮影した。撮影速度は4500コマ/秒である。Fig.13にクランク角で約30°ごとの画像を示す。画像内の数値はクランク角を示す。なお、本来の映像は白黒であるがFig.13は輝度に応じて着色処理を施している。

上死点前15°で点火プラグより点火し上死点後に火炎が広がっていく様子が分かる。上死点後約130°で排気バルブが開き始めるが画像で確認できるのは上死点後180°を過ぎてからである。以後排気行程中、つまり排気バルブが開いているにも関わらず燃焼が続いている。その後、吸気行程まで燃焼が続いているのが画像から分かる。吸気バルブが開き上死点後30°付近から吸気バルブ近傍で燃焼が始まりバックファイヤが発生している。

特に、上死点後120°前後で激しく燃焼しているのが確認できる。その後、バックファイヤは終了し吸気行程から圧縮行程に移行する。その後、圧縮行程中の上死点後300°を



Note: Figures in the photos show the crank angle(deg).

Fig.13 Photographs of burning in cylinder

過ぎたあたりから再び燃焼が発生する。上死点近傍で拡散燃焼のような明るい燃焼状態になり上死点後燃焼が終了する。点火タイミングは上死点前15°なので点火プラグによる着火ではない。画像を見ても点火プラグによって着火している様子ではない。

この現象は以下のように推測される。吸気行程でバックファイヤが発生したため吸気行程の終了、つまり圧縮行程が始まるときの筒内の温度が上昇し、その結果、圧縮行程途中で自己着火し燃焼が始まったと考えられる。

以上、バックファイヤ発生時の筒内の様子を観察することによりバックファイヤの着火源は排気行程中でも燃焼が継続している極端な遅燃えサイクルであることが判明した。

6. 極端な遅燃えサイクルとバックファイヤの関係

バックファイヤ発生頻度と極端な遅燃えサイクルの発生頻度の関係を調べた結果を Fig.14 に示す。前述のバックファイヤテスト装置を用いて無負荷スナップを約250回繰り返し、その時のバックファイヤ発生頻度とスロットルを開く直前が極端な遅燃えサイクルである頻度を測定した。空燃比を9.5～13.0まで変化させて、合計6回のテストを行った。

バックファイヤと極端な遅燃えサイクルの発生頻度は、ほぼ比例関係にあることが判明した。この直線の傾きが0.25程度と1以下であることから極端な遅燃えサイクルが発生してもバックファイヤが発生しないサイクルもあることが分かる。これは極端な遅燃えサイクルの燃焼自体に当然バラツキを持っているためと、吸気バルブとスロットルを開くタイミングによって発生頻度が異なるためだと考えられる。

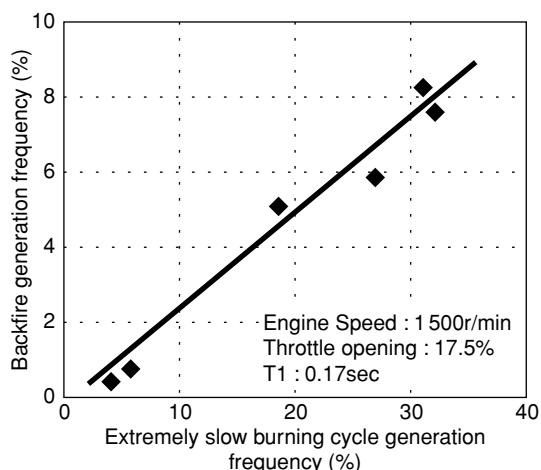


Fig.14 Relation between extremely slow burning cycle and backfire

6.1. 他の供試エンジンの場合

供試エンジンを変えバックファイヤと極端な遅燃えサイクルの発生頻度の関係を確認した。Table 3にそのエンジンの主要諸元を示す。この供試エンジンをB、前項までの供試エンジンをAと名づける。Fig.14と同様に各軸を取りバックファイヤと極端な遅燃えサイクルの関係を Fig.15 に示す。

供試エンジンBもバックファイヤと極端な遅燃えサイクルの関係は比例関係にあり、かつ供試エンジンAとほぼ同一直線上にあることが分かる。主要諸元の大きく異なっている二つのエンジンがほぼ同じ傾向を示していることから、他のエンジンでも同様の傾向を持っていると推測される。

Table 3 Major specification of test engine B

Engine type	4-stroke single cylinder
Cooling type	Air-cooled
Bore × stroke	100 × 82
Compression ratio	8.3
Valve train	SOHC 4-valve
Maximum power (kW/r/min)	28.1 / 5750
Maximum torque (Nm/r/min)	52.3 / 4500
Ignition timing	8° (BTDC)

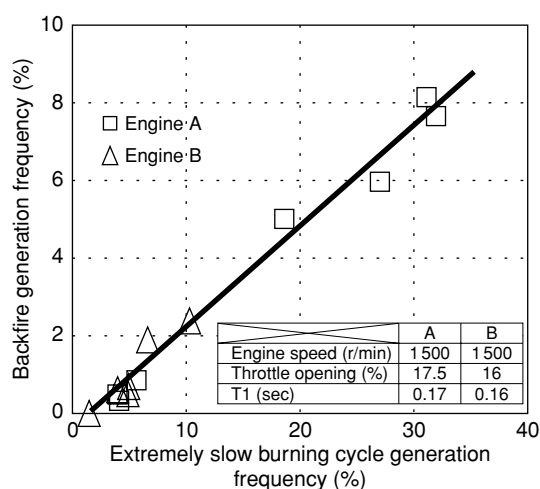


Fig.15 Relation between extremely slow burning cycle and backfire by different test engine

6.2. 極端な遅燃えサイクルに影響する要素

燃焼速度に影響を与える要素として、空燃比、圧縮比、スキッシュエリア、スワールレシオの4項目を変更し極端な遅燃えサイクルとバックファイヤ発生頻度の関係をテストした。Fig.16にその結果を示す。一般に燃焼速度が向上するような諸元変更を行うことにより極端な遅燃えサイクルの発生頻度が減少し、その結果としてバックファイヤの発生頻度も減少していることが分かる。そのような場合でも、

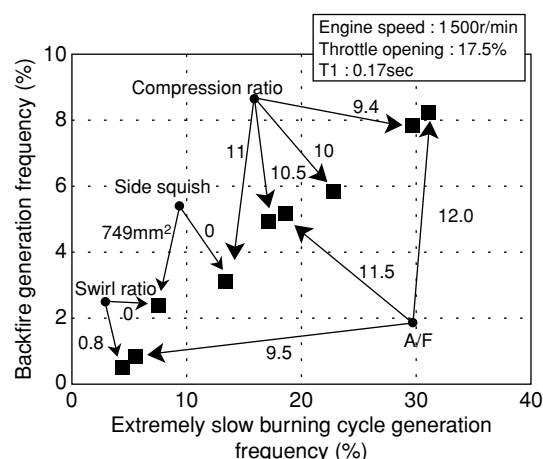


Fig.16 Factor in an extremely slow burning cycle which influences

バックファイヤ発生頻度と極端な遅燃えサイクルの発生頻度は比例関係にあることに変わりはない。

7. まとめ

今まで体系だった解析が行われていなかったバックファイヤの発生メカニズムを解析した。その結果、従来から考えられている要因以外にもバックファイヤの発生原因があることが判明した。以下に本研究において判明したことをまとめる。

- (1) 排気行程中でも燃焼が継続している極端な遅燃えサイクルが無負荷減速途中に存在する。
- (2) 極端な遅燃えサイクルが着火源となりバックファイヤが発生している。
- (3) バックファイヤ発生直後の圧縮行程では自己着火による燃焼が発生している。
- (4) 極端な遅燃えサイクルは燃焼速度を向上させることにより減少させることが可能である。

最後に本研究に当たり研究所内外でご支援、ご教授頂いた方々に心から感謝致します。

参考文献

- (1) Kondo, T., Iio, S., Hiruma, M.: A Study On the Mechanism of Backfire in External Mixture Formation Hydrogen Engines-About Backfire Occurred by Cause of the Spark Plug, SAE Paper 971704
- (2) Koyanagi, K., Hiruma, M., Furuhashi, S.: Study on Mechanism of Backfire in Hydrogen Engines, SAE Paper 942035

■ 著 者 ■



斉藤 信二



安達 真也