二ストロークエンジンにおけるサイクル変動*

(第1報, 流速・圧力・HC濃度の関係)

池田 裕二^{*1}, 中井 博^{*2}
市 聡 顕^{*3}, 中島 健^{*4}

Cyclic Variation in a Two-Stroke Engine

(1st Report, Correlation between Velocity, Pressure and HC Concentration)

Yuji IKEDA^{*5}, Hiroshi NAKAI,
Satoaki Ichi and Tsuyoshi NAKAJIMA

^{*5} Kobe University, Dept. of Mechanical Engineering, Rokko, Nada, Kobe, Hyogo, 657-8501 Japan

Cyclic variation analysis was demonstrated to grasp scavenging flow fluctuation in a practical small two-stroke engine in terms of pressure, velocity and HC emission. Simultaneous measurements of velocity, pressure and HC emission were carried out in an exhaust pipe with high time resolution over thousand cycles. The results show typical variation characteristics of scavenging flow and gas exchange in the cylinder, which can be estimated by pressures at the crankcase and the exhaust pipe. The HC emission variation was examined with time-series IMEP.

Key Words: Gasoline Engine, LDV, Two-Stroke Engine, Cyclic Variation, HC Emission, FID

1. はじめに

二ストロークエンジン⁽¹⁾は小型二輪車用の機関として広く使用されているが、多くの未解決の問題が残っている。その代表的なものに、アイドリング運転時などの、部分負荷運転時の失火⁽²⁻⁴⁾やサイクル変動^(5,6)がある。これらにより高濃度の未燃炭化水素の排出や燃料消費の悪化を招くとともに、環境面からも無視のできない状態にある。近年では排気ポート可変機構を用いた性能向上⁽⁷⁾や失火低減の研究開発⁽⁸⁾がなされている。サイクル変動等を制御するパラメータとしては、主に圧力データが用いられるが、圧力データのみによる燃焼現象の把握と掃排気流の最適制御を行うには、さらなる研究が必要である。

二ストロークエンジンのサイクル変動は、前のサイクルの影響が次のサイクルの現象に強く影響する。この現象の解明には、数サイクルにもおよぶ現象間の関係を正確に把握することが望まれる。しかし、アンサンブル平均されたデータでは、個々のサイクル

間の関係は調べられず、多サイクルのデータを高時間分解能で計測しなくてはならない。また、測定される各パラメータの同時性が要求される。

これまで著者らは、実機の二ストロークエンジンを用いて、各部の流速を光ファイバ・ドップラ流速計(FLDV)によって計測⁽⁹⁾し、圧力変動と掃排気流の関係を明らかにし、筒内圧力を用いたコンディショナルサンプリングにより燃焼状態別の掃気流動を把握してきた。クランク室-排気管の差圧変動と流速変動との強い相関を示し⁽¹⁰⁾、圧力変動の計測によって流速変動予測が可能であることを示してきた⁽¹¹⁾。排ガス成分濃度も同時に測定することで、発火サイクル後には排気管からの既燃ガスの大量逆流が生じることを確認した⁽¹²⁾。さらに、流速及び排ガスの炭化水素(HC)濃度を個々に時系列測定を行うことにより、サイクル毎の燃焼状態と排気管内流速、HC濃度の変動との関係を確認した。

しかし、排気管から逆流する成分濃度の違いが次のサイクルの燃焼状態に与える影響などは、アンサンブル平均や単独のパラメータの計測では把握できないため、各パラメータを時系列で同時に計測することが必要である。

本研究では、実用機関における流速、HC濃度、圧

* 原稿受付 1998年5月14日。

^{*1} 正員, 神戸大学機器分析センター (〒651-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)。

^{*2} 正員, 神戸大学大学院。

^{*3} 学生員, 神戸大学大学院 [現: 川崎重工業(株)]。

^{*4} 正員, 神戸大学工学部。

E-mail: ikeda@mech.kobe-u.ac.jp

力を同時に時系列計測し、サイクル変動時の各パラメータの関係、すなわち掃気特性把握をするためのパラメータ抽出を試みる。本報では、サイクル変動の時系列解析を目的として、排気管内の流速、排気管内HC濃度、シリンダ内圧力の同時計測を高時間分解能で行った。1000サイクルの時系列計測により、サイクル変動の解析が可能となった。実験とデータ解析は、以下の項目について重点をおいて行った。①シリンダ内圧力(IMEP)と充填されるHC濃度の関係、②シリンダから排気管へのブローダウン流による排気管内圧力伝播特性、③排気管からの既燃ガスのシリンダへの逆流特性、④その逆流から新気流入が受ける影響、⑤それら一連の変動とそれらによるサイクル変動解析。

2. 実験装置

2.1 供試機関と実験条件 本実験では二輪車用水冷単気筒シュニーレ掃気方式の小型機関を使用した⁽¹³⁾。燃料はレギュラーガソリンとオイルを50:1で予め混合したものを用いた。諸元を表1に示す。実験条件は失火サイクルを含むサイクル変動が確認できる、3,000 r/min、スロットル開度7.5% (自立運転が可能な部分負荷状態) とした。

2.2 計測装置と測定位置 流速測定装置にFLDVを使用した⁽¹⁴⁻¹⁶⁾。測定点は、排気ポートより後方122mmの排気管内とし、燃焼ガス流動の計測(データレート5~7kHz)を行った。圧力は燃焼室、クランク室、排気管の三点で計測した。

ガス濃度は高濃度の排出が問題となるHC濃度をひとつのパラメータとして選択した。測定には水素炎イオン化法(FID)を用いた高速応答HC分析器

(HFR-400: CAMBUSTION 製)⁽¹⁷⁻¹⁸⁾を使用した。HC分析器の応答遅れは、あらかじめ予備実験を行い、データ処理時に時間補正(13ms)を行った⁽¹⁹⁾。HCのサンプリングは燃焼後のガス交換過程を重視しているため、排気管に挿入してガスを直接採取した。採取位置は流速測定位置近傍とし、流速測定位置でのガス成分濃度が把握できるように設定した。各パラメータの測定位置を供試機関断面図と併せて図1に、測定風景を図2に示す。

データは高速多チャンネルのA/D変換器(1MHz, 16ch)に入力して同期をとり、ワークステーションへ転送した。測定は、流速1、圧力3、ガス濃度1、時間情報1の計6チャンネルである。使用した計測システムの構成を図3に示す。この条件下での時間分解能は最高166KHzとなり、クランク角0.5°

Fig. 1 Measurement Points

Table. 1 Engine Specification

Type of Engine	Single-Cylinder, Two-Stroke, Spark Ignition, Crankcase Compression with Reed Valve, Schnurle Scavenging	
Cooling System	Water-cooled	
Displacement (cm ³)	124	
Bore x Stroke (mm)	56.0 X 50.6	
Exhaust Port	Open	105.2
Timing (C.A. ATDC)	Close	254.8
Scavenging Port	Open	119.5
Timing (C.A. ATDC)	Close	240.5
Ignition Timing (C.A.)	BTDC 17.0	
(Engine Speed)	(3000 r/min.)	
Compression Ratio	8.93

Fig. 2 LDV/HC Measurement

の分解能で15,000r/min程度までの計測が可能である。実際には、FLDVのデータレート、HC分析器の時間応答性により時間分解能の限界が決定される。

3. 実験結果と考察

3.1 燃焼状態が次サイクルの燃焼状態に及ぼす影響 本研究の実験条件 (3000rpm, 7.5%) における燃焼状態を図4に示す。この運転条件下ではIMEPが負となる失火サイクルは約40%に達している。さらに、IMEPの変動状況を見ると、IMEP<0の失火サイクルとIMEPが大きくて強い燃焼サイクルの他に、IMEPが小さい不完全燃焼と考えられるサイクルが存在する。このような燃焼状態がサイクルごとに変動する条件において、前のサイクルの燃焼状態が次のサイクルに及ぼす影響を見るために、連続した二サイクルの燃焼状態の関係を統計的に調べた。結果を図5に示す。

前のサイクルが失火 (IMEP<0MPa) の場合、次のサイクルは約95%が発火サイクル (IMEP>0MPa) である。また、前のサイクルのIMEPが0.2MPa以上の場合には、次サイクルはほとんど失火となっている。発火サイクルの内、IMEPが0.2MPa以下の場合、次サイクルのIMEPは幅広く分布しているが、全体の傾向としては、最初の発火が小さいほど次のサイクル大きくなる傾向にある。本研究は失火を含む燃焼変動時の掃気特性の把握を目的としているので、失火 (IMEP<0MPa) と発火 (IMEP>0.2MPa) が交互に生じる条件、すなわち失火-発火または発火-失火が生じるサイクルについてのみ検討する。

3.2 燃焼状態と流速・圧力・ガス濃度の相互関係 燃焼変動について検討する場合、燃焼圧だ

Fig. 3 Measurement System

けでなく、燃焼圧の影響を受けた掃期過程のガス流動や、燃焼の結果生成、排出されるガス成分が次のサイクルに与える影響を考慮する必要がある。そのために、実際の時系列データを用いてサイクル変動時の圧力・流速・排ガス濃度と燃焼状態の関係を図6示す。排ガスの濃度は、その排気管内での動きを把握するために、流速測定位置近傍の排気ポートより後方100mmの位置で行った。

まず、IMEPをみると、この四つのサイクルは発火、失火が繰り返される燃焼状態を示している。左端のサイクルではIMEPが大きく、強い燃焼が生じたことが確認される(①)。排気ポートが開くと(EO)、燃焼圧の影響により③のブローダウン流が生じ、排気管内には大きな正の圧力波(⑤)が伝播する。その後、排気管には負圧(⑥)、クランク室には大きな正圧(⑦)

Fig. 4 Cycle Change of Combustion

Fig. 5 Correlation between Combustion States of Two Consecutive Cycles

を持つため、排気管内には大きな正の流速が生じる(③)。EO後のHC濃度に注目すると、EOからしばらくしてHC濃度は大きく減少を始める(②)。これは、③のブローダウン流で燃焼により発生した既燃ガスが大量に排出されたことを表している。その後、BDC付近において、排気管内圧力が正圧に転じ、それに遅れてクランク室圧力が正圧となり大きなピークを持つ(⑧)。このクランク室圧力のピークと同じ時期に、排気管内には大きな逆流ピーク(④)が確認できる。排気管内圧力が正圧になることにより生じた逆流が、クランク室からシリンダへの新気の流れを妨げたことが考えられる。この時、排気管内のHC濃度は相対的に低く、排気管内の既燃ガスを多く含んだガスがシリンダ内に再充填され、シリンダ内の残留既燃ガスの増加を引き起こすことが予想される。新気濃度の低下と既燃ガスの大量残留が、次サイクルの失火(①')を引き起こすと考えられる。

次の失火サイクルでは(①')、筒内圧が低くなるため、排気管内にシリンダへの逆流が生じている(③')。

この時、HC濃度は増加する傾向を示している。一方、クランク室内圧力は、SO後徐々に減少していく(⑦')。これは、クランク室からシリンダへ新気が流入していることを表している。排気管内圧力は、BDC直前に正のピークを持ち(⑥')、また、排気管内流速はBDC後に正の流速(④')へと変わっている。これは、クランク室内圧が一様に減少していることから以下のように予測される。掃気過程初期に生じた排気管内の逆流は、クランク室から流入した新気とシリンダ内で干渉する。その後、新気の流れが優勢となることにより、シリンダ内のガスが排気管内に押し出される。それにより、排気管内圧力は上昇し、排気管内に正の流速が生じる。以上のことから、シリンダには十分な新気が供給され、充填ガス中の未燃ガス成分が多くなり、次サイクルが発火(①)になると考えられる。

図中でIMEPをTDCの位置で表現しているが、BDCから次のBDCまでの間で計算されたものである。

Fig. 6 Time-Series Data

図の後半の失火、発火サイクルでも一、二番目のサイクルと同様の現象が見られる。他のサイクルにおいても、上記の内容と同様の現象が確認できる。それぞれの燃焼状態での圧力、流速、HC濃度の関係が示されたと考える。また、掃気過程におけるシリンダ内のガス交換には、発火サイクルでは排気管内圧力が、また、失火サイクルではクランク室内圧力の影響が強いと考えられる。さらに、一番目と三番目のサイクルで逆流流速に差が見られないにも関わらず、その生じるタイミングの排気管内のHC濃度には差が見られる。つまり、逆流量が同じでも、前のサイクルの燃焼状態により、再充填される混合気濃度に差が生じる可能性があることが示されている。

3.3 燃焼状態と排気管内HC濃度の関係

3.2において、燃焼状態によりEO後の排気管内HC濃度の変動に相違があり、次サイクルの充填ガスへの影響が異なることが示された。ここでは、EO後に排出されるHCの変動と燃焼状態との関係調べるため、掃気期間(EO→EC)のHCの変動の勾配を矢印で示す(図7)。

まず、HC濃度とIMEPの時間変動を比較する。左から、IMEPの大きな燃焼サイクルではHCの大きな減少を示す。失火サイクルでわずかにHC濃度が上昇し、再びIMEPの大きなサイクルでHC濃度は大きく減少を示すが、最後の失火サイクルでは、HC濃度は増加を示している。

次に、個々のサイクルで掃気期間におけるHC濃度の変動とIMEPの関係を確認する。各サイクルのIMEPに対して、HC濃度の変動の勾配を図7のように矢印で表した。結果を図8に示す。燃焼状態が発火サイクル(IMEP>0.2MPa)と失火サイクル(IMEP<0MPa)の場合に分けて示す。

まず、発火サイクルでは、EOからECに向けて大きくHC濃度の減少が見られる。しかし、EOにおけるHC濃度が低下するに従い、HC濃度の減少割合が小さくなっている。EO時におけるHC濃度は、前のサイクルに排出されたガス濃度の影響が強く表れるため、充填されたHC濃度に影響を与えている。この結果から、発火サイクルでは充填される混合気状況により、燃焼状態が変化し、その影響が排出ガス濃度に表われると考えられる。

次に失火サイクルでは、EOとECでHC濃度はほとんど変化しない。失火時には燃焼がほとんど生じていないことを考えると、シリンダ内に充填されていた混合気が新気により押し出されてきたものと思

われる。

以上の解析結果からクランク室、排気管内圧力と流速、流速とHC濃度の関係を結び付け、さらにそれらに燃焼状態の経時変化を併せて考えることによってサイクル変動時の掃気によるガス交換機構の把握が可能となる。また、燃焼状態とHC濃度の掃気期間における増減には強い相関があることがわかった。

4. 結論

サイクル変動を解析するために、排気管において流速とHC濃度を時系列で同時測定し、さらに複数点の圧力を多サイクルサンプリングした。得られたデータの相互の関係を調査してサイクル変動解析に適用し、以下の知見を得た。

- (1) 多サイクルの時系列計測により、失火サイクルを連続したIMEPの相関関係で整理した。

Fig. 7 Fluctuation in HC Emission

Fig. 8 HC Emission Variation

- (2) サイクル変動時が発生する原因の1つとして、既燃ガスのシリンダへの再充填が主な因子と考えられる。失火後のサイクルにおいては、排気孔からも未燃HCが逆流し、これがサイクル変動の一因となる。
- (3) 充填HC濃度のサイクル変動が生じるメカニズムを確認した。発火サイクルで、EO後のブローダウンにより既燃ガスが排出され、排気管内はHC濃度が低下する。ブローダウン時に生じた排気管内圧力波の影響で、排気管からシリンダへの逆流が生じる。この逆流は、排出された既燃ガスを再充填し、クランク室からの新気の流入を妨げる。これにより、充填されるHC濃度が低下し、失火が発生する。
- (4) 筒内圧力と排気管内のHC濃度の時系列変動から、IMEPと排気管内HC濃度の増減には強い相関があることが分かった。IMEPの大きな発火サイクルでは、EO後にHC濃度が大きな減少を示し、失火サイクルでは、横這いか上昇傾向となることが確認された。

5. 謝辞

今回の研究の遂行にあたり、神戸大学大学院学生の掛水賢一郎君(現、本田技研工業(株))に多大な協力を頂きました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- (1) J. B. Heywood and E. Sher, The Two-Stroke Cycle Engine: Its Development, Operation, and Design, *SAE Publication R-267*, 1999
- (2) Anderson, R.W., et al., *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 43, 182, 1985
- (3) 藤川ら, "可視化による二ストロークエンジンの軽負荷失火観察", *機論*, 95-0914, 1995
- (4) 大東, "不正燃焼について", *自動車技術* Vol. 27, No. 4, 333, 1973
- (5) K. Tsuchiya, et al., "A Study of Irregular Combustion in Two-Stroke Engine," *SAE Paper* No.830091, 1983
- (6) 大東ら, "ガソリン機関における点火遅れと火炎伝播", *機論* 36-282, 1970
- (7) S. Yasuo, "Two-Cycle Engine Exhaust Control Device," *Proceedings of SETC* No. 911228, 1991
- (8) T. Fujikawa, et al., "Development of Automatic Exhaust Valve Control Device of Two-Stroke Engines," *Proceedings of SETC* No.911226, 1991
- (9) Y. Ikeda, et al., "Flow Vector Measurements at the Scavenging Port a Fired Two-Stroke Engine," *SAE Trans. Vol.101*, Paper No.9020420, 1992
- (10) T. Ohira, et al., "Exhaust Gas Flow Behavior in a Two-Stroke Engine," *SAE Trans. Vol.102*, Paper No. 930502, 1993
- (11) Y. Ikeda, et al., "Time-series Analysis of Velocity and Pressure in a small Two-Stroke Engine", *ISATA*, 97EL079, 1997
- (12) T. Ohira et al., "Experimental Detection of Misfiring Source from Flow Rate Variation at Transfer Port and Exhaust Pipe in a Two-Stroke Engine", *Proceeding of SETC95*, pp183-191
- (13) H. Nakai et al. "Cyclic Variation in HC Concentration near the Spark Plug in a Two-Stroke Engine", *Proceeding of SETC97*, pp261-268
- (14) M. Lorentz, et al., "Cycle resolved LDV Measurements on a Fired SI-Engine at High Data Rates Using a Conventional Modular LDV-System," *SAE Paper* No.900054, 1990
- (15) 森吉, 東京工業大学学位論文, 1989
- (16) 小保方ら, "小型二サイクル火花点火機関における燃焼室内ガス流速のLDA測定", *機論* 87-0736, A, (1987)
- (17) N. Collings, et al., "A New Technique for Measuring HC Concentration in Real Time in a Running Engine," *SAE Paper* No.880517, 1988
- (18) D. N. Thompson, et al., "Effect of Engine Operating Variables and Piston and Ring Parameters on Crevice Hydrocarbon Emissions," *SAE Paper* No.940480, 1994
- (19) 掛水ら, "2ストロークエンジンにおけるサイクル変動時のHC濃度変動", 第12回内燃機関シンポジウム No.57, 1995