火花点火機関における吸気弁早閉じが機関性能に及ぼす効果*

志賀 聖一^{*1}, 八木 静夫^{*2}, 盛田 宗宏^{*3}
松本 隆^{*4}, 柄沢 隆夫^{*1}, 中村 寿雄^{*1}Effect of Early-Closing of Intake-Valve on the Engine Performance
in a Spark-Ignition EngineSeiichi SHIGA, Shizuo YAGI, Munehiro MORITA,
Takashi MATUMOTO, Takao KARASAWA and Hisao NAKAMURA

In this paper we present the first stage of a study on the effect of early closing of intake valve on the engine performance in a spark ignition engine. A four valve single cylinder engine was used with several values of expansion ratio and a half early closing intake cam. The half early closing leads to almost a half of the volumetric efficiency and the BMEP for all cases of the expansion ratio. It can realize an improvement of about 7% in thermal efficiency under WOT, and about 4% under partial load of BMEP = 0.2 MPa. These beneficial results are considered to be mainly caused by the effect of the more expansion. The ratio of expansion to compression ratios was estimated to be around 1.4 on the basis of motoring pressure analyses. Under the early closing condition, an increase in the residual gas fraction was suggested and verified by a heat release analysis using a two zone combustion model.

Key Words: Internal Combustion Engine, Spark-Ignition engine, Combustion, Early Closing of Intake Valve, More Expansion Cycle, Two-Zone Model

1. 緒 言

昨今の電子制御技術の飛躍的進展とともに、各種可変機構の適用が試みられている。なかでも機関性能を直接支配する火花点火機関の動弁機構の可変性は、古くからの課題といえ、Horie らによる油圧フルイデックスを電子制御する方式などがすでに実用市販されている⁽¹⁾。これは、正味平均有効圧力(BMEP)の最大点をより広い範囲の回転数に拡大することを目的としており、吸気慣性や脈動効果の最適利用によるものである。

一方著者の一人は、単純なアクチュエータ以外は純粋に機構学的方法により、吸排気弁の開閉時期およびリフトを連続的に可変化するシステムを開発した⁽²⁾。この可変機構によって、低負荷時の熱効率向上と燃焼改善とを実現している。さらに同機構は、大幅な弁開閉時期の可変化が可能であることから、吸気弁早閉じあるいは遅閉じによる、いわゆる超過膨張効果を通常

のポペット弁機構のままで実現する可能性をもつと考えられる。超過膨張効果に関しては、古くは Taylor⁽³⁾ によって言及され、実用化についてはアトキンソンエンジン⁽⁴⁾ といわれるものの存在が知られている。そのため、これはアトキンソンサイクルあるいはミラーサイクルと呼ばれており、最近特に注目されるようになってきている。このミラーサイクルの最適化については、酒井⁽⁵⁾ が詳細な検討を加え、実用システムへの適用例を含め広範な解説を行っており、過給との組合せで大きな効果の現れること、自然吸気でも有効な弁可変機構の出現が大きな可能性を生むことなどを報告している。一丸ら⁽⁶⁾ はこのミラーサイクル機関の性能予測を、点火遅れモデルに基づくノック発生までを考慮した詳細なシミュレーションによって行い、性能改善の程度を明らかにした。実験的には、張ら⁽⁷⁾ が比較的大形のガス機関を用い、回転弁制御と高過給との組合せによって最大で10%程度の熱効率向上を報告している。このミラーサイクル効果を固定弁開閉時期によって実用エンジンに適用し、すでに商品化した例もある⁽⁸⁾。

このように、超過膨張の研究はきわめて活発に行われ、基礎、実用ともに数多くの知見が得られている。しかしながら、複雑なエンジンシステムにおいて、準静

* 原稿受付 1995年6月30日。

^{*1} 正員、群馬大学工学部 (〒376 桐生市天神町15-1)。^{*2} 正員、(株)本田技術研究所社友 (自宅：〒351 朝霞市三原3-20-29)。^{*3} 群馬大学大学院。^{*4} 群馬大学学生。^{*5} 群馬大学工学部。

的熱力学に根拠を置く超過膨張効果が、その最適化を含めて系統的に十分明らかにされたとはいえないように思われる。単純な理想サイクル計算から、超過膨張効果を見積もった研究⁹⁾によると、圧縮比に対して2倍の膨張比を与えた場合、図示平均有効圧力の半減と約12%の図示熱効率向上の得られることが示されている。このごく単純な理想サイクル計算の実証も目下著者の知るかぎり行われた例はない。

このようなことから本研究では、超過膨張効果が実機関においてどのように現れ得るのかを明らかにすることを目的とする。第1段階としては、現象を極力単純化するために、自然吸気条件のみとし、膨張圧縮比(膨張比/圧縮比)の変化は行程体積一定でスキマ体積のみの変化により、吸気弁閉時期はオリジナルの半分に設定した。本研究においては、基本性能と指圧線図の解析結果についての知見を報告する。なお、膨張比や膨張圧縮比などの一般的でない用語については2章において詳述する。

2. 実験装置および方法

表1に供試機関の主要な諸元を示す。前述の可変バルブタイミング機構開発、実験に用いたものと同一であるが、ここではその連続可変機構は用いず、固定のカムによった。動弁系の諸元を表2に示す。オリジナルと、吸気弁閉時期およびリフトを変更した早閉じカムの2種を用いた。開弁時期はオリジナルの230° Cr. A. に対して早閉じでは114° Cr. A. とちょうど半分となっている。これに伴ってリフトは機械力学的制約から3 mmに低下している。

実験装置の概略配置を図1に示す。排気系はオリジナルのままとしているが、吸気系は吸気管長をオリジナルに合せ、吸入空気計測のためのタンクオリフィス付きサージタンクを接続した。ここでの圧力降下は避

Table 1 Specifications of tested engine

Type	4-Stroke, S.I., 1-Cylinder, Liquid-Cooled, DOHC, 4-Valve
Bore x Stroke [mm]	70 x 64.8
Displacement [cc]	249
Max. Power [kW]/[rpm]	18.8 / 8500
Max. B.M.E.P. [MPa]/[rpm]	1.17 / 7000
Min. B.S.F.C. [g/kWh]/[rpm]	284 / 5000
Fuel	Regular Gasoline

Table 2 Valve timings

Original timing:	
Intake lift	8.1 mm
Exhaust lift	7.5 mm
Intake opening	10 deg BTDC
closure	40 deg ABDC
Exhaust opening	10 deg BBDC
closure	5 deg ATDC
Early-closing timing:	
Intake lift	3 mm
Intake opening	10 deg BTDC
closure	74 deg BBDC (106 deg ATDC)
Exhaust opening	same as
closure	original

Fig. 1 Schematic of experimental setup

Table 3 Operating conditions

Engine speed; varied from 2500 to 5000 rpm
B.M.E.P. ; varied from 0.2 MPa to W.O.T.
A/F ; 12.5 and 14.5
Expansion ratio; 11(original), 16, 20, 22

けられず、動的吸気特性が変化し、最大体積効率 η_v は若干低回転側に移動した。指圧計には KISTLER 6061 A を燃焼室にフラッシュマウントし、データ収集システムには ELMEC 2390 をクランク角 0.72° の外部トリガで用いた。燃料供給には化器を用い、 A/F 制御はフロート室圧力調整器で行った。

実験条件を表 3 に示す。機関回転数はおもに装置上の制約から 2 000~5 500 rpm とした。負荷については、全負荷~BMEP=0.2 MPa の範囲とし、 A/F は 12.5 および 14.5 の 3 点を設定した。ここで、通常圧縮比と呼ばれるもの、すなわち [(すきま体積)+(行程体積)]/(すきま体積) を本研究では「膨張比」と呼ぶことにする。これは、有効な圧縮が始まる時期を呼気弁閉時期で制約するため、この有効な圧縮比が大きく変化するとともに、後述するようにその見積もりが本研究の重要な点の一つであることに基づく。またこの見積もられた有効な圧縮比と膨張比との比を「圧縮膨張比」と呼び、超過膨張の効果を表すための指標とする。膨張比としては、オリジナルの 11 を含め、16, 20, 22 の 4 種を設定したが、それはピストン頂部への肉盛りによって行った。

3. 結果および考察

3・1 吸気弁早閉じが基本性能に及ぼす影響 図 2 に、吸気弁早閉じが体積効率 η_v の正味平均有効圧力(BMEP)依存性に及ぼす効果を示す。図 2 中の記号説明における E.C. は「早閉じ」(Early-Closing)の意味であり、数値の 11~22 は前述の膨張比を示す。早閉じの場合、 η_v 、BMEP ともにオリジナルの約半分までにしか到達していない。これは吸気弁閉期間をオリジナルに対して半分にしたことに対応している。また早閉じの膨張比 16 以上では η_v の依存性が全体的に低下しており、熱効率の改善が明らかであるが、11 の場合にはオリジナルとの顕著な違いは認められない。なお回転数については η_v 、BMEP、BSFC の変化が少ない 3 000~3 700 rpm の範囲のものを示した。

図 3 は各 A/F における BSFC の BMEP に対する依存性を示す。オリジナル、早閉じを問わず最大 BMEP は全開(WOT)条件であり、それ以外ではいず

Fig. 2 Effect of early closing of intake valve on the volumetric efficiency

Fig. 3 Effect of early closing of intake valve on the fuel conversion efficiency under almost constant speed condition

れにおいても吸気絞りをを行っている。にもかかわらず、いずれの A/F においても、BSFC はここに示した BMEP の広い範囲にわたって早閉じのほうが低い。その程度は早閉じの全開(WOT)においておおむね 7% である。ただし図 2 でも示唆されていたように、この改善効果は膨張比 16 以上で現れ、11 では顕著ではない。これは、早閉じを負荷制御に適用した場合には熱効率の大幅な改善効果が現れにくいことを示している。膨張比 16 以上では、膨張比の増大は BSFC には影響していない。このことは図 2 の η_v の BMEP 依存性において示唆されていたことに対応し、膨張比増大が熱効率改善に及ぼす効果は、限界的事実であることが明らかとなった。本実験範囲内では、膨張比の増大が機械効率に対しては顕著な影響が認められないことから、これは主として熱損失の増大に基づくものと推察され

る。さらにまた、膨張比の増大はノック傾向を強めることが観察された。膨張比 20 以上の WOT では、図 2, 3 に示した回転数範囲でつねに軽いノックが発生しており、特に 22 では、3 000 rpm 以下の WOT で、強いノック発生によって MBT への到達が不可能であった。したがってノック発生もまた一つの要因とも考えられるが、ここに示した条件ではすべてにおいて MBT への到達が可能であったことや軽いノックはむしろサイクル効率を向上させる可能性のあることから、ノック発生が影響したためとは考えにくい。

図 4 は BMEP および A/F 一定の条件で、広い回転数範囲にわたる早閉じの効果を示す。BMEP = 0.2 MPa と、かなり低い負荷でしかも吸気絞りがすべての条件で行われているのにもかかわらず、これまでとほぼ同様な傾向が認められる。すなわち、膨張比 16 以上で熱効率改善が現れ、それが膨張比に対して限界のであるとともに、膨張比 11 では早閉じの効果は顕著には現れていない。またこのような早閉じの効果は回転数によらず現れることもここで明らかとなった。ただし、本条件の場合、熱効率の改善しるは高負荷の場合よりも若干低く 4~5% 程度である。これは、吸気絞りの効果が大きい低負荷条件であることが過膨張の効果を減殺したことによると考えられる。

3・2 過膨張効果の発生機構に関する一考察

3・1 節の結果が得られたメカニズムを考察するために、まず指圧線図から吸排気のポンプ損失を求めた。

図 5 は、これまで示した条件における図示平均ポン

プ圧力(IMPP)の図示平均有効圧力(IMEP)に対する依存性を示す。データのばらつきは大きい、IMEP の低下とともに IMPP が増大すること、すべての条件において早閉じ条件のほうが低いポンプ損失となっていること、そして、早閉じの場合の膨張比の増大はポンプ損失の低下に影響しないことが現れている。このように、吸気弁早閉じはポンプ損失を低下させるが、膨張比 11 においても同様に低下されるにもかかわらず先の BSFC にオリジナルとの顕著な差が目下のところ明らかではないことから、膨張比 16 以上での熱効率改善という現象はポンプ損失低減のみによるものではなく、他の要因、すなわち過膨張の効果のほうが大きいということが示唆される。

Fig. 5 Effect of early closing of intake valve on the pumping work

Fig. 4 Effect of early-closing of intake valve on the fuel conversion efficiency under constant load condition over wide range of speed

Fig. 6 Peak pressures of motoring condition

この超過膨張効果に関連して、モータリング最高圧力の回転数依存性を図6に示す。オリジナルと早閉じとでは、最高圧力の回転数依存性が逆転している。オリジナルの場合、回転数の増大は圧縮時間の減少となり、熱損失の低下からポリトロップ指数の増大となったものと考えられる。一方、早閉じの場合にこれと逆の傾向を示すのは、前述の弁リフト減少による吸気弁部での絞り効果が影響していることによると考えられる。

Fig. 7 Measured and estimated mortoring pressure variations with the ratio of compression to expansion ratios

図7に低回転数と高回転数の各条件について、早閉じの場合の実測したモータリング圧力を、3種の膨張圧縮比の場合に予測される到達圧力とともに示した。予測に用いた圧縮のポリトロップ指数は、オリジナルの場合から得られた値を対応する二つの回転数について用いた。ここで設定した膨張圧縮比は、2が開弁期間がオリジナルのちょうど半分であることから期待される値、1.39は早閉じの時期から幾何学的に期待される、すなわち変化が準静的で設定した時期に理想的に閉弁するとしたときの値、そして1は早閉じ効果がない場合に相当する。前述の体積効率が約半分となっていることから膨張圧縮比が2であることが推定されるが、少なくともモータリング条件下では、高速で低リフトによる絞り効果が予想される条件を除いて、いずれの最高圧力も高くなっている。低膨張比低回転数においては膨張圧縮比1、すなわちオリジナルの場合と大きな違いがないほどに圧力が上昇している。このように、膨張圧縮比は少なくとも2よりも低いものと推定される。

図8は、同じモータリング条件において得られた吸気および圧縮過程の指圧線図を対数軸で表したものである。吸気弁閉時期は体積割合でおおむね70%程度にあるように見え、これは膨張圧縮比1.4に相当する。また、この値は回転数によって大きくは変化していないことから、早閉じ時期は回転数に依存せず、先のモータリング最高圧力が早閉じの高回転数時に低いことは主として吸気弁部の絞り効果によるものと考えられる。

図9は図7の条件は図8と同様な表し方で吸気と圧

Fig. 8 Measured logarithmic p v diagrams during intake and compression strokes

Fig. 9 Measured motoring pressures and predicted log $p-v$ diagrams during intake and compression strokes

縮過程を示したものである。5000 rpm の条件(□)が絞り効果を強く受けており、早閉時期を約70%とすれば、実測された2500 rpm はおおむね期待される最高圧力よりも高い。これは、バルブオーバーラップ中の排気からの再吸入が影響していることによると考えられる。点火運転条件では排気圧力が高く、吸気系への排気逆流効果もあることから、早閉じの場合の残留ガス割合はかなり高いものと予想され、このことが早閉じ時期から見積もられた膨張圧縮比が1.4付近であるにもかかわらず、体積効率が約半分となっていることの主たる原因であると考えられる。

3.3 2領域モデルを用いた熱発生解析による残留ガス割合の評価 早閉じ条件が残留ガス割合を増大させるかどうかを実験的に確認することは圧縮行程中のガス組成の計測などによらなければならない⁽¹⁰⁾、容易ではない。そこで2領域熱力学モデルによる評価を行った。モデルの概要を図10に示す。ここでは、実測指圧波形を入力し燃焼質量割合を求めた。熱損失はWoschiniの式を、未燃部は組成凍結で既燃部は11化学種の化学平衡とし、燃焼室は円すいで球状火炎面と仮定した。これをオリジナル条件に適用したところ、最高圧力において累積燃焼質量割合がほぼ1となったことから、その残留ガス割合を増大させて早閉じ条件に適用した結果を図11に示す。ここでいう残留ガス割合とは、前述の静的早閉じ時期から期待される体積効率70%に対する割合を意味する。したがって実測体積効率46%から、 $70 - 46 = 24\%$ の残留ガス割合はこの定義からは $24/0.7 = 34\%$ となる。図11に示した条件では、この定義での残留ガス割合を28%とした場合におおむね最高圧力で累積燃焼質量割合が1となっている

Fig. 10 Description of 2 zone combustion model utilized for heat release analysis

Fig. 11 Measured cylinder pressure and calculated mass fraction burned using the 2 zone combustion model

る。A/Fの異なった運転条件の場合にもこの値が27%となり、オリジナルの約1.4倍程度となった。これは34%よりは低い値であり、計算のモデルと実燃焼過程との違いや、実際の燃焼終了と最高圧力との食い違いなどの影響要因が考えられるものの、少なくともオリジナルよりもかなり残留ガス割合が増大していることは示されたといえよう。

4. 結 論

吸気弁早閉じが火花点火機関の性能に及ぼす効果を明らかにするための第1段階として、固定弁開閉時期による実験的および解析的研究を行った結果、以下の知見が得られた。

(1) オリジナルに対してちょうど半分の開弁期間と低リフトカムを用いた結果、体積効率もほぼ半分の値となり、正味平均有効圧力もおおむね半減した。

(2) 膨張比 16 以上において、吸気弁早閉じは最大で約 7% の正味熱効率改善効果をもつ。これは最大出力と量論の二つの空燃比のいずれにおいても認められた。

(3) BMEP=0.2 MPa および上記 2 種の空燃比一定の条件下で、設定したすべての回転数範囲にわたって、吸気弁早閉じは約 4% の正味熱効率改善をもたらす。

(4) 吸気弁早閉じによってポンプ損失は減少する。しかし、それは膨張比 11 においても認められることから上記の正味熱効率改善効果がポンプ損失減少のみによってもたらされたとは考えにくく、超過膨張効果によるところが大きいと考えられる。

(5) モータリング圧力解析の結果からは、超過膨張効果(膨張圧縮比)は約 1.4 と見積もられる。この値は、先の約半分という体積効率とは一致せず、モータリング最高圧力の挙動から残留ガスの増大に起因する

ことが示唆された。

(6) 2 領域熱力学モデルによって燃焼過程の熱発生解析を行った結果、残留ガス割合はオリジナルの約 1.4 倍と見積もられ、(5) の示唆と定性的には一致することが明らかとなった。

論文作成には本学 4 年生、小森顕博君の協力を得た。記して謝意を表す。

文 献

- (1) Horie, K., ほか 2 名, SAE Paper, No. 920445(1992).
- (2) Yagi, S., ほか 2 名, SAE Paper, No. 920450(1992).
- (3) Taylor, C. F., *The Internal Combustion Engine in Theory and Practice*, II (1979), 403, The M. I. T. Press.
- (4) 富塚清, 内燃機関の歴史, (1982), 42, 三栄書房.
- (5) 酒井宏, 自動車技術会講演論文集, No. 951, 横浜, (1995), 285-288.
- (6) 一丸浩平・ほか 2 名, 自動車技術会講演論文集, No. 951, 横浜, (1995), 273-276.
- (7) 張福榮・ほか 5 名, 自動車技術会講演論文集, No. 951, 横浜, (1995), 277-280.
- (8) Goto, T., ほか 2 名, SAE Paper, No. 940198(1994).
- (9) Heywood, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, (1988), 183, McGraw Hill Book Co.
- (10) 文献(9)の 230 ページ.