

論文・解説

33

タンブル流および逆スキッシュ流によるノッキング改善

Knocking Improvement by Tumble Flow and Reverse Squish Flow

田端道彦*¹ 藤本昌彦*² 岩井浩平*³
Michihiko Tabata Masahiko Fujimoto Kouhei Iwai

要約

逆スキッシュ流動を活用した後高の燃焼パターンによるノッキング改善を目的に、実機エンジンでの筒内ガス流動（タンブル流動，スキッシュ流動），火炎伝ばや燃焼パターンの計測を行い，種々の燃焼室形状に対して，タンブルとスキッシュ流動方向の関係，タンブル比の影響などを調べた。その結果，タンブルと逆スキッシュ流動が同一方向の場合はタンブル比を高める方向で，逆に相反する流動方向の場合はタンブル比を低減する方向で，逆スキッシュ流は強くなる。タンブルと逆スキッシュ流動が同一方向の場合と比較して，相反する場合には，相対的に低いタンブル比で逆スキッシュ流が強くなる。逆スキッシュ流動を強化することで後高の燃焼率を得ることができ，高いノッキング改善効果が得られることなどが明らかとなった。

Summary

This paper describes knocking improvement by achieving a high heat release pattern at late stage combustion using a reverse squish flow. The gas flow in a cylinder flow (tumble and squish flow), flame propagation, and the combustion pattern were measured with a real SI engine. A flow-direction relationship between the tumble and squish flows and the influence of a tumble ratio were examined for each of various combustion chamber shapes. This examination clearly shows the reverse squish flow becomes intense at a high tumble ratio when the tumble and reverse squish flows are in the same direction, while it becomes intense at a low tumble ratio when in a conflicting direction, and a relatively low tumble ratio makes the reverse squish flow the maximum when the tumble and reverse squish flows are in the conflicting direction compared to that in the same direction. Increasing the reverse squish flow rate can enlarge the heat release pattern at the late stage combustion, thus achieving a high effect of knock improvement.

1. はじめに

自動車用ガソリン機関は，一層の高出力・低燃費を実現するため高圧縮比化が進められており，その最大の障害となるノッキング改善が求められている。ノッキングは急激な圧力伝ばをともなう未燃ガスの自着火現象であることは広く認められており，これを抑制するためには，燃焼パターンの改善，すなわち①燃焼期間の短縮，②後高の熱発生

率（燃焼後期の熱発生率が高い燃焼パターン）^①を高次元で両立させ，ノッキングが発生し難い燃焼状態を毎サイクル安定して実現することが重要である。

燃焼速度や熱発生パターン，燃焼安定性はタンブル流やスキッシュ流など筒内ガス流動特性に大きく影響される。従来から吸気流速を強め，燃焼速度向上による燃焼改善がよく知られているが，最近では膨張行程の逆スキッシュ流による後半の燃焼加速がノッキング改善に有効であること

* 1 ~ 3 技術研究所
Technical Research Center

が注目されている⁽²⁾。スキッシュ流や逆スキッシュ流の形成は、吸気流動のない静的な条件下では、主としてスキッシュ部面積やスキッシュ部形状の影響を大きく受ける⁽³⁾。それに加え、実機エンジンでは、タンブル流などの筒内主流が存在し、その強さや方向が時間的・空間的に変化している。上死点近くで形成されるスキッシュ流や逆スキッシュ流は、これら筒内主流の影響を強く受けるものと考えられる。しかしながら、実機エンジンにおいてタンブル流とスキッシュ流の関連について調べた研究例は少ない。

そこで本研究では、実機エンジンの筒内流動をPIV (Particle Image Velocimetry) 法⁽⁴⁾により明らかにし、タンブルと逆スキッシュ流動の関係を明らかにした。更に、火炎伝ばや燃焼パターンを調べることで、ノッキング性能におよぼす逆スキッシュ流動の影響を調べたので報告する。

2. PIV流動計測装置

Fig.1に実験に使用した筒内可視化エンジンの概略を示す。燃焼室形状は4弁ペントルーフ形、スキッシュ形状は十分なスキッシュ部(面積比約20%)を確保するために、ピストン頂部の吸気側あるいは排気側の一部をペントルーフの傾きに沿って盛り上げた透明アクリルピストンを使用した。以降、両者をIN側スキッシュピストン、EX側スキッシュピストンと称する。なお、タンブル流を観察する際には石英シリンダ、スキッシュ流を観察する際にはペントルーフの側面に石英ウインドを挿入して、筒内を可視化できるようにした。筒内のガス流動は、アルゴンイオンレーザ(出力4W)と高速度ビデオ(9000FPS)を用い、マイクロバルーン(平均粒径40 μ m)をトレーサとした流れの可視化画像から相互相関PIV⁽⁴⁾法により計測した。測定はシリンダ中心軸断面(IN-EX方向)、運転条件はエンジン回転数が1000rpm、体積効率34%のモータリング運転とした。

3. スキッシュ部位置の影響

3.1 タンブル流動特性

Fig.2は圧縮行程における筒内タンブル流形成について、IN側スキッシュピストンとEX側スキッシュピストンで速度ベクトルを比較した結果である。IN側スキッシュピストンの場合、ピストン面に向かった吸気主流は、下死点においてスキッシュ部のエッジにトラップされ、そのままシリンダヘッド上方に立ち昇ることが分かる。その結果、タンブル流はコンパクトにスキッシュ部の外に収まったままピストン圧縮が進行し、BTDC120degでは、縦に長い楕円状の渦が形成される。それ以降も渦中心はスキッシュ部の外部に存在し続け、スキッシュ部内の流速は極めて低い。

EX側スキッシュピストンの場合、吸気主流はスキッシュ部面で吸気弁側シリンダヘッド上方に跳ね上げられ、再びスキッシュ部面に循環するタンブル流が形成される。ピストン圧縮が進行し、スキッシュ部が上方に移動するため、

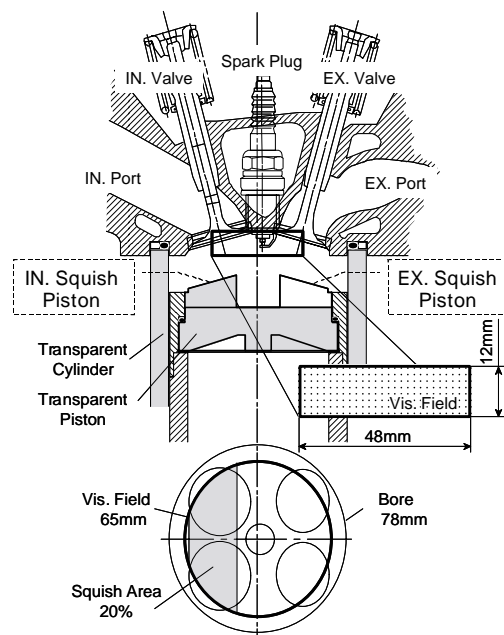


Fig.1 Transparent Engine and Piston

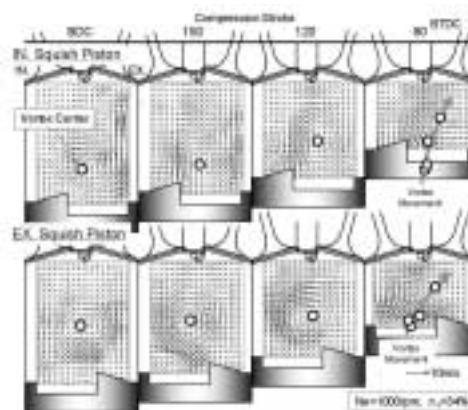


Fig.2 Effect of Squish Area Location on Tumble Flow Formation

ペントルーフ内を循環してきたタンブル流が渦形状を保てなくなり、BTDC120degでは、水平方向につぶれた渦が形成される。さらに圧縮が進むと、スキッシュ部の傾斜にガイドされるように渦中心がスキッシュ部内に入り込む方向に移動する。

Fig.3に、点火プラグ位置におけるx軸方向成分(タンブル方向を正)とz軸方向成分(シリンダヘッド方向を正)のガス流速の時間履歴を示す。なお比較のため、スキッシュ部なしフラットピストンのデータも同時にプロットしている。スキッシュ部なしフラットピストンでは、圧縮行程後半(BTDC30deg)まで正タンブル方向に高い流速成分が維持され、シリンダ軸方向の流速は極めて低い。すなわち、タンブル流は圧縮行程全般に渡ってシリンダ内を大きく循環するシンプルな縦溝構造となっている。一方、EX

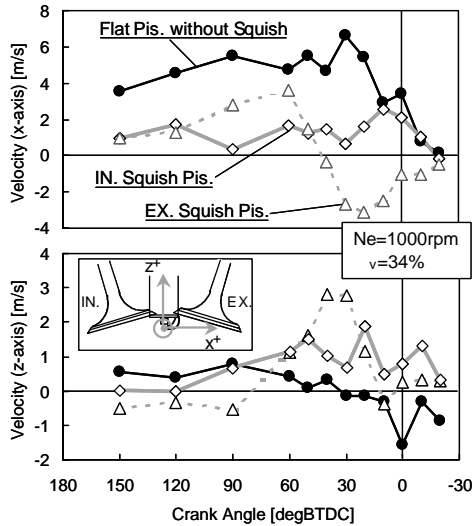


Fig.3 Time Histories of Velocity at Plug Location

側スキッシュピストンでは、BTDC50degを境に逆タンブル方向の流速とともに、シリンダ上方に向かう流速が急速に高まる。これは、Fig.2のようにスキッシュ部内にタンブル流が入り込み、ピストン圧縮によって渦構造を保てなくなったタンブル流が押しつぶされ、正スキッシュ流によって逆タンブル方向への強いガス流動を形成するためと考えられる。また、IN側スキッシュピストンでは、正タンブル、逆タンブル方向の流速が他の条件と比較して最も低く、圧縮行程中、シリンダ上方に向かう流速が比較的高い状態が維持されている。これは、タンブル流がシリンダ中心に対してスキッシュ部の外（排気側）にオフセットした状態でピストン圧縮が進むことを示している。

3.2 スキッシュ流動特性

Fig.4は、Fig.2のクランク角がさらに進行した際の圧縮行程 (BTDC20deg) と膨張行程 (ATDC20deg) におけるスキッシュ流動について、速度ベクトルを比較した結果である。圧縮行程において、IN側スキッシュピストンではスキッシュ部内の流速が低いのにに対して、EX側スキッシュピストンではタンブル流が押しつぶされる結果、ボア中心に向かって押し出される正スキッシュ流動が顕著となる。一方、膨張行程では、両者ともスキッシュ部でボア壁に向かう逆スキッシュ流が形成されるが、圧縮行程においてボア中心に向かうガス流速の低いIN側スキッシュピストンの方が、膨張行程での逆スキッシュ流動が顕著となる。

Fig.5はスキッシュ部入り口のガス流速の時間履歴を比較した結果である。なお、速度はボア中心方向を正、外周方向を負とした。本結果は吸気流による残存主流とピストンの圧縮・膨張によるスキッシュ流を明確に区別していないが、ATDC -30 ~ 30degで両者を比較すると、明らかに圧縮行程ではEX側スキッシュピストンの方が正スキッシュ方向の流速が強く、逆に膨張行程ではIN側スキッシュ

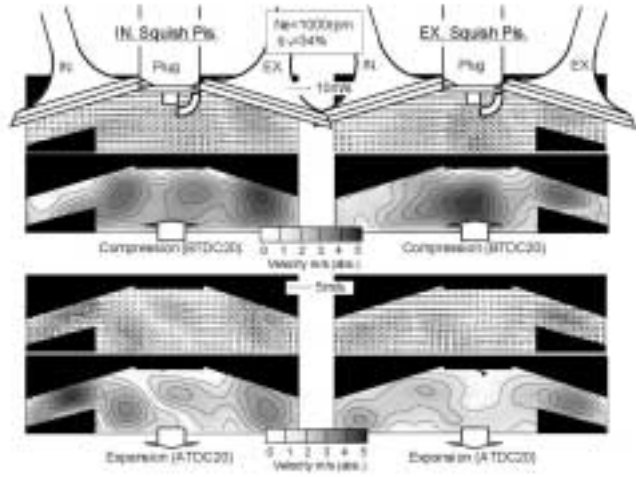


Fig.4 Effect of Squish Area Location on Squish Flow Generation

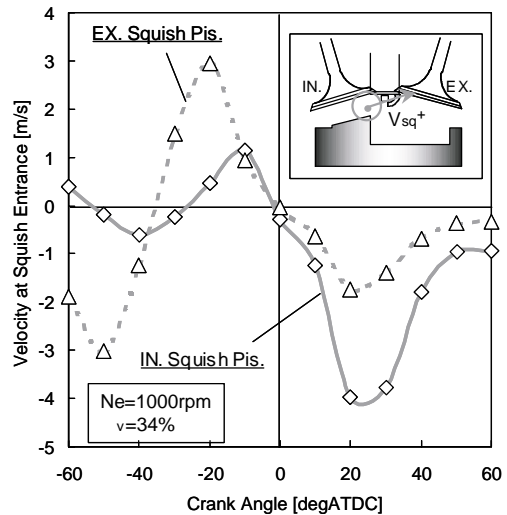


Fig.5 Time Histories of Velocity at Squish Entrance

ピストンの方が逆スキッシュ方向の流速が強くなるのが分かる。

3.3 火炎伝ば特性と燃焼パターン

Fig.6は、各ピストン形状で火炎伝ばを比較したもので、高速度直接火炎撮影により火炎面軌跡を重ね描きした結果である。スキッシュ部なしフラットピストンでは、タンブル流により初期火炎が排気側に大きく流されるため、吸気側の火炎成長が遅れ、エンドガス領域が形成される。一方、スキッシュピストンは両者ともスキッシュ部でライン密度が粗くなっており、この領域の火炎伝ばが加速されている。特にIN側スキッシュピストンではスキッシュ部の外と比較すると、スキッシュ部の火炎伝ば速度が大きく、燃焼後半の加速効果大きい。これは、Fig.5に示したように圧縮行程の正スキッシュ流と比較して、膨張行程の逆スキッシュ流が強まるガス流動特性のためである。Fig.7は、火炎画像を吸気側と排気側に分けて火炎面積割合の拡がり速度で整理し、その時間履歴を比較した結果である。この図

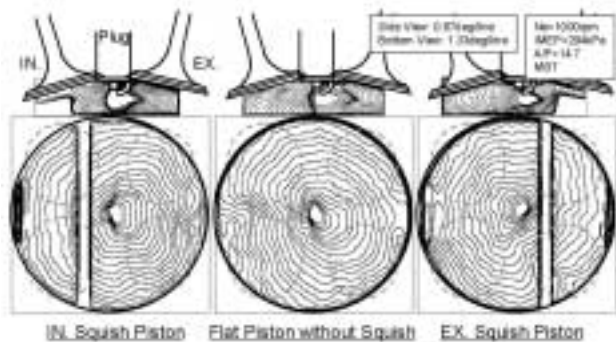


Fig.6 Flame Propagation Images

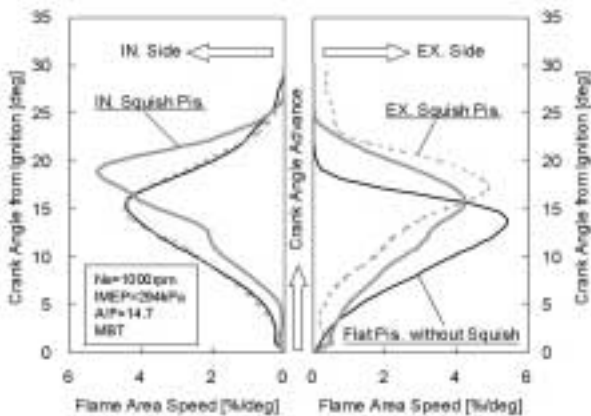


Fig.7 Comparison of Flame Area Speed

からもIN側スキッシュピストンの方が燃焼後半の火炎伝ば速度を増加する効果が大きいことが分かる。

Fig.8は、後半の燃焼加速効果の大きいIN側スキッシュピストンとスキッシュ部なしフラットピストンで熱発生率(50サイクル分)を比較した結果である。スキッシュ部がない場合には点火後比較的早くから熱発生が始まるのに対して、IN側スキッシュピストンでは点火後の初期の熱発生が抑えられ、その後ピークに向かって加速的に熱発生が大きくなる。さらに、点火直後の熱発生立ち上がり部分(図中の破線部分)の燃焼バラツキに着目すると、スキッシュ部がない場合のサイクル変動に比べ、IN側スキッシュピストンの変動が小さい。Fig.3のようにスキッシュ部がない場合では、点火時期においてタンブル流が崩壊しきれず、吸気側から排気側へ流れる点火プラグ付近のガス流速が強いため、初期火炎核形成が不安定になる⁽⁵⁾ものと考えられる。

IN側スキッシュピストンとスキッシュ部がない場合での燃焼期間、燃焼パターンおよび着火安定性を調べるために、4気筒1.5L実機エンジン(φ=10.0)を用い、空燃比と定常タンブル比($T_R=0.7$)を等しくシロトル全開運転試験を行った。Fig.9は回転数に対する影響を示す。なお、実機エンジン試験では、量産性を考慮して、IN側スキッシュピストンにバルブリセスを設置したものをを用いた。

いずれの回転数においても、IN側スキッシュピストン

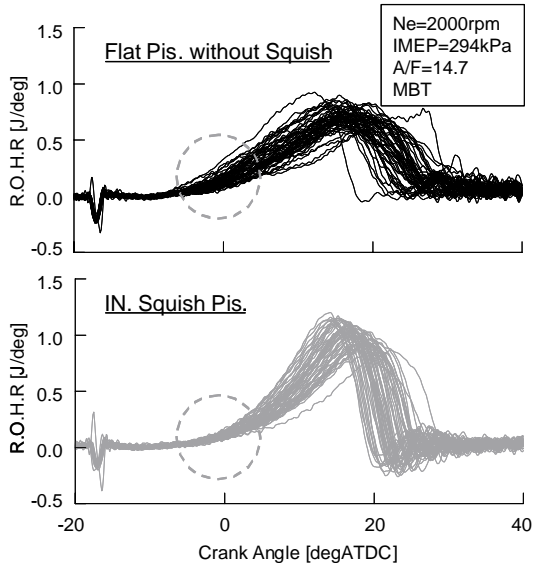


Fig.8 Comparison of Rate of Heat Release

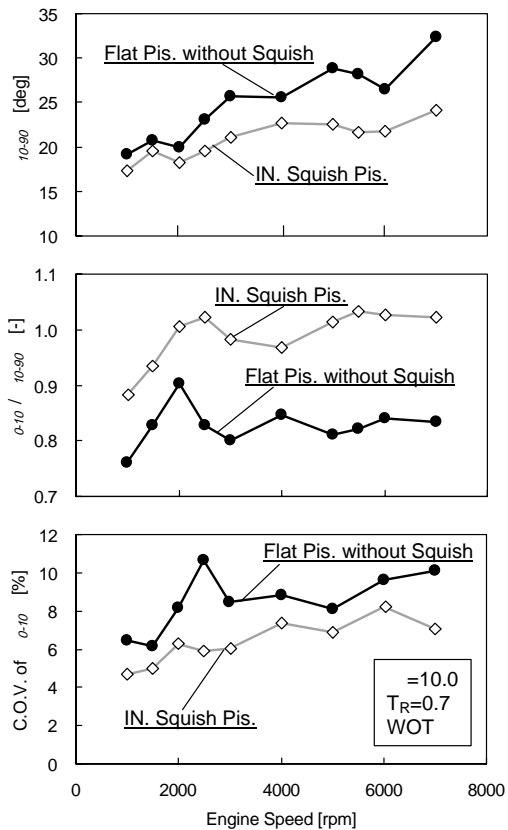


Fig.9 Comparison of Combustion Pattern and Fluctuation

では、結果的に排気側よりにコンパクト化された燃焼室形状と逆スキッシュ流動強化により、燃焼期間($10-90$)を大幅に短縮する。さらに、初期燃焼期間と主燃焼期間の比として定義した燃焼パターン($0-10 / 10-90$)と初期燃焼期間の変動率で定義した着火安定性(C.O.V.of $0-10$)からみても、IN側スキッシュピストンの燃焼パターンはスキッシュ部がない場合に比べ、全回転域で後期燃焼割合が高い後高の燃焼率となる。さらに、初期燃焼率の変動が少

なく着火が安定していることが確認できる。

以上のことから、排気側よりも吸気側にスキッシュ部を確保した場合の方が、点火プラグに向かう圧縮行程のタンブル流の強さ、方向を変えることで着火安定性を確保できる。さらに、吸気側が外周方向へのより強い逆スキッシュ流を形成し後期の熱発生率を実現できたため、ノッキング改善に対して有利な筒内ガス流動特性、燃焼特性であると考えられる。

4. タンブル流動方向と強度の影響

4.1 タンブルとスキッシュ流動方向の関係

Fig.5やFig.7に代表されるように、これまでの結果から、吸気側と排気側ではスキッシュ部の流動特性に違いがあり燃焼が大きく変わることが分かった。この要因として、タンブルとスキッシュ流動の方向の関係が、吸気側と排気側で相反していることが挙げられる。スキッシュ部を燃焼室ペントルーフに沿わせた場合、盛り上がったピストン形状によりタンブル流動自体への影響が大きくなる。そこで、ここでは一般的なスキッシュ部として、フラットに近い形状のピストンを用い、ピストンに沿うスキッシュ部により形成される逆スキッシュとタンブル流動の関係について、火炎伝ばの可視化と流動数値シミュレーションにより調べた。

Fig.10は、圧縮はじめのタンブル流動を初期値として、タンブル比を変化させた場合の膨張行程 (ATDC10deg) における吸気側と排気側の逆スキッシュ流動を比較した結果である。また、Fig.11は計算結果から得られたタンブル比と逆スキッシュ流速の関係を示す。吸気側の流動は、タンブルと逆スキッシュ流動方向が一致する場合、逆に、排気側の流動はタンブルと逆スキッシュ流動が相反する場合である。タンブルと逆スキッシュ流動方向が一致した場合には、膨張行程でも残存するタンブル流動により、逆スキッシュ流動が加速されるため、タンブル比を強めると逆スキッシュ流が強くなる。逆に流動方向が相反する場合には、膨張行程でのタンブル流動により逆スキッシュ流動が抑制されることから、タンブル比を低減することで逆スキッシュ流を強化できることが分かる。これは、ペントルーフに沿うスキッシュ流動を形成するIN側スキッシュピストンの場合とタンブルと逆スキッシュ流動方向の関係が一致しており、タンブル流動をトラップし弱めた場合に逆スキッシュ流動が強くなる現象と一致している。

Fig.12は火炎伝ば経路におよぼすタンブル比の影響を調べるために火炎面積割合と火炎重心位置の関係を示したものである。タンブル流が強くなると火炎伝ば初期から大きく排気側へ流されるため、火炎伝ば後期において吸気側の火炎成長が大きく遅れる。したがって、火炎伝ばの均一性の観点からは、タンブル流が弱い方が燃焼期間トータルで偏心が少なくなるため、相対的に後期燃焼割合が改善された燃焼パターンとなるものと考えられる。

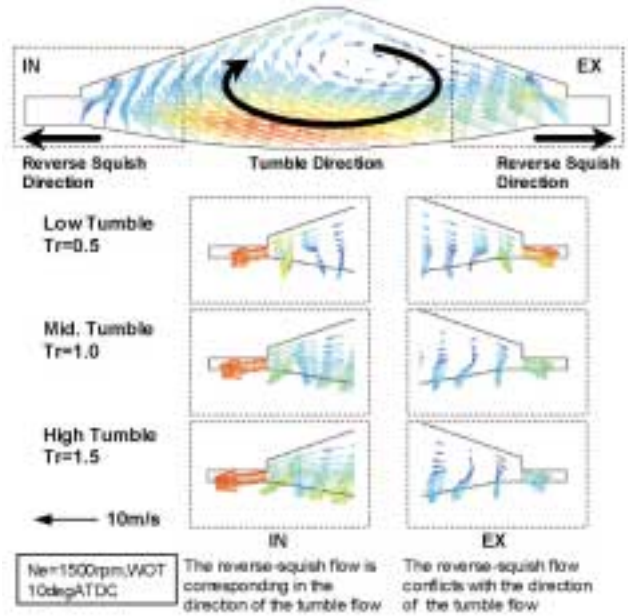


Fig.10 Effect of Tumble Ratio on Reverse Squish Flow Pattern

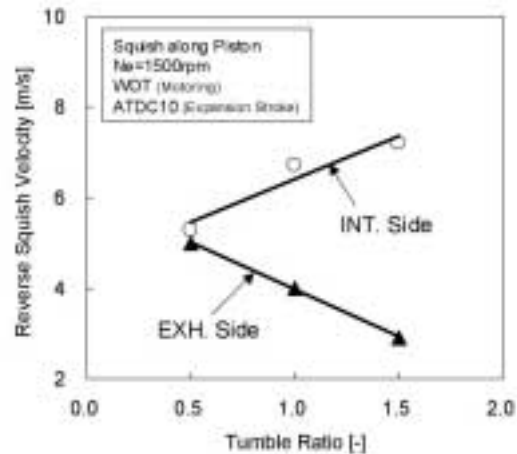


Fig.11 Effect of Tumble Ratio on Velocity at Squish Entrance

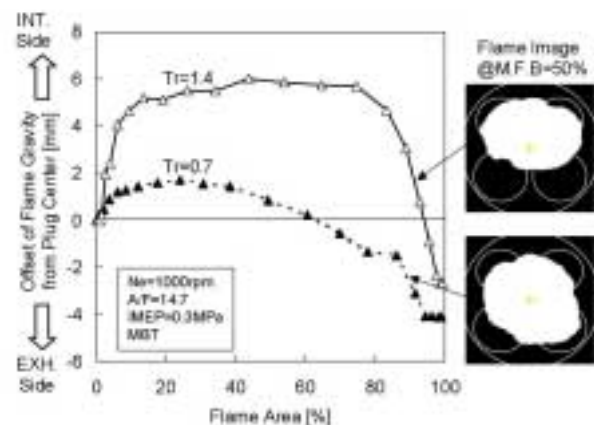


Fig.12 Effect of Tumble Ratio on Flame Propagation

4.2 燃焼パターンにおよぼすタムブル比の影響

Fig.13は、実機エンジンを用い、燃焼期間、燃焼パターン ($\theta_{0-10} / \theta_{10-90}$) と初期燃焼変動におよぼすタムブル比の影響を、ピストンに沿うスキッシュ形状、ペントルーフに沿うスキッシュ形状 (IN側スキッシュピストン) およびスキッシュ部がない場合と比較した結果を示す。IN側スキッシュピストンはバルブリセスを設置した場合としない場合の両方を図に示してある。ペントルーフに沿うスキッシュ形状の場合、バルブリセスを設置することにより逆スキッシュ流動の効果が弱められるために、燃焼期間が長くなり、初期燃焼期間と主燃焼期間の比も減少する傾向にあるが、タムブル比に対する両者の傾向は一致している。燃焼期間はスキッシュなしと比較して短縮する。初期燃焼期間と主燃焼期間の比は、タムブル比を低減することで高くなり、タムブル比が0.8近くで最大となる。これは、ペントルーフに沿うIN側スキッシュピストンの場合、タムブルと逆スキッシュ流動の方向が相反しているため、タムブル流動を低減することで逆スキッシュ流が強くなるためである。さらに、タムブル流動を低減すると燃焼期間が長くなり、相対的に後期燃焼割合が減少した燃焼パターンとなる。

これに対して、ピストンに沿うスキッシュの場合には、スキッシュ部がない場合と比較して、燃焼期間は一律に短くなり、燃焼パターンが最大となるタムブル比は0.9とペントルーフに沿う場合と比較して 高くなること分かる。これは、ピストンに沿うIN側スキッシュでは、タムブルと逆スキッシュ流動の方向が一致しており、タムブル流動を強めることで逆スキッシュ流動が強化されるためである。タムブル流動を強めた場合、Fig.12に示すように火炎が大きく排気側に偏心することにより後半の燃焼割合が相対的に低下する。

いずれの場合も、初期燃焼の変動はタムブル比を増加させることで、増加する傾向にある。タムブル流動を強めると点火プラグ周りの流動が強くなり、初期火炎核の形成が不安定になるためである。また、IN側スキッシュピストンの初期燃焼変動が低いのは、Fig.8に示したように、タムブル流の方向を換えることによりプラグ周りの流速を低減することで初期燃焼変動を低減するためである。

5 . 全開燃焼性能改善効果

Fig.14に、タムブル比を変化させた場合のピストンに沿うスキッシュ形状、ペントルーフに沿うスキッシュ形状 (IN側スキッシュピストン) のノッキング限界 (MBTからの点火進角のアドバンス量) を示す。タムブル比に対するノックの改善は、Fig.13の後高の燃焼率が最大値を示すタムブル比とほぼ一致する。ペントルーフに沿うスキッシュ形状、ピストンに沿うスキッシュ形状、いずれの場合もタ

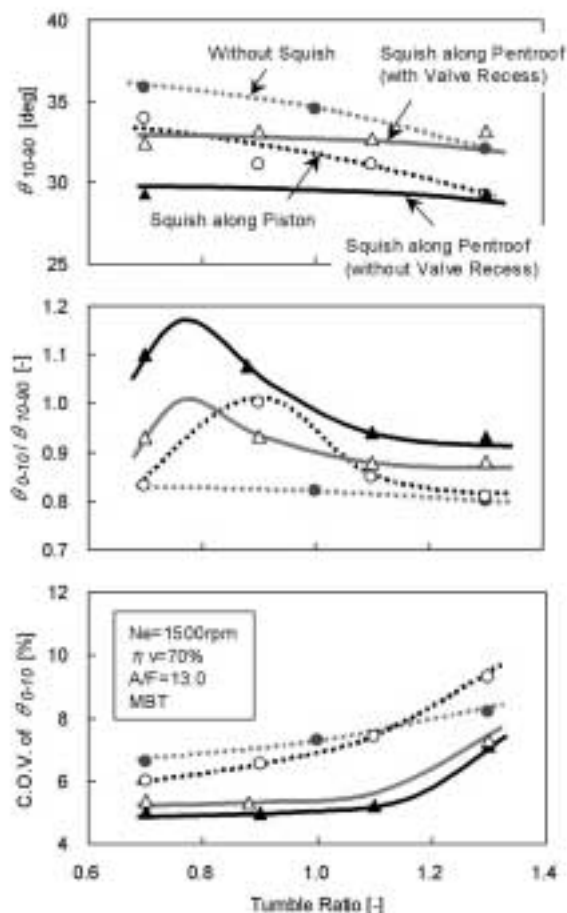


Fig.13 Effect of Tumble Ratio on Combustion Pattern and Fluctuation

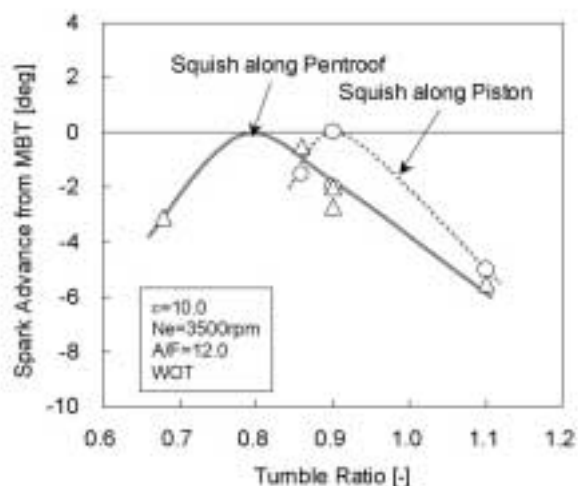


Fig.14 Effect of Tumble Ratio on Spark Advance from MBT

ムブルと逆スキッシュ流動方向を考慮して、タムブル比を適切に設定することで、強い逆スキッシュ流を形成し、後期燃焼割合を増加させることにより、ノッキング限界を大きく改善できること分かる。

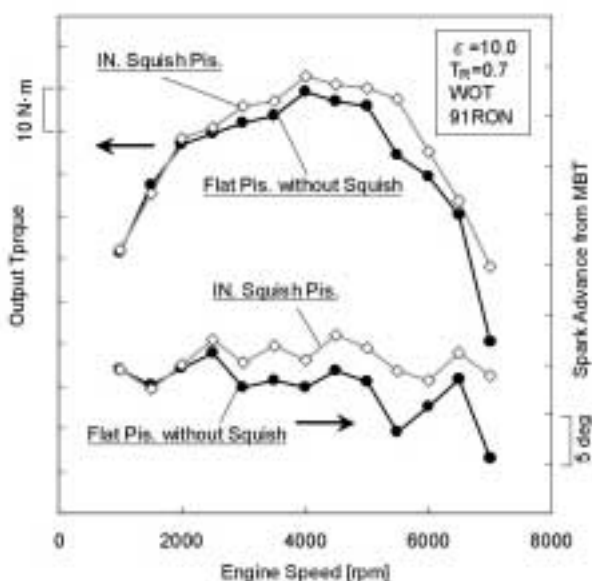


Fig.15 Improvement of Full Load Engine Performance

Fig.15は、一例として、ペントルーフに沿うスキッシュ形状（IN側スキッシュピストン）の場合のノッキング限界とトルク特性を示す。逆スキッシュ流動による後期の熱発生率と初期燃焼変動の抑制により、ほぼ全域でノッキング限界を改善し、トルクが向上する効果があることが分かった。

6. まとめ

逆スキッシュ流動を活用した後期の燃焼パターンによるノッキング改善を目的に、実機エンジンでの筒内ガス流動（タンブル流動、スキッシュ流動）、火炎伝ばや燃焼パターンの計測を行った。種々の燃焼室形状に対して、タンブルと逆スキッシュ流動方向との関係、タンブル比の影響やノッキング改善効果を調べた結果、以下のことが明らかになった。

- (1) タンブルと逆スキッシュ流動方向が一致した場合には、タンブル流動を強化することで逆スキッシュ流は強くなる。逆に、流動方向が相反する場合には、逆スキッシュ流を強めるためには、タンブル流動を抑制する必要がある。
- (2) 燃焼室ペントルーフに沿うスキッシュ流動では、吸気側にスキッシュ部を設け、タンブル流動を抑制することで、逆スキッシュ流動を強化できるため、低いタンブル比で後期燃焼割合が最大となる。また、タンブル比の低減により、初期燃焼変動も抑制できる。
- (3) ピストンに沿うスキッシュ流動の場合、燃焼室ペントルーフに沿うスキッシュ流動と比較して、相対的に高いタンブル比で後期燃焼割合が最大となる。また、タンブル流を強めることで燃焼期間が短縮できる。
- (4) 燃焼室形状の違いによるタンブルと逆スキッシュ流動

の方向性を考慮することで、逆スキッシュ流動による後期燃焼の加速効果を有効に活用できるタンブル比を選定することができ、全回転領域に渡りノッキングを改善し、トルクを向上することができる。

参考文献

- (1) 中島 他：ノッキング抑制に有効な燃焼パターンの解析，日産技報，Vol.18，p.3-12（1982）
- (2) T.Ueda et al.：Effects of squish area shape on knocking in a four-valve spark-ignition engine，SAE Paper，No.1999-01-1494，p.1-6（1999）
- (3) H.Miyagawa et al.：Numerical analysis of the effects of squish geometry on a newly developed 4-valve gasoline engine，The 4th International Symposium COMODIA 98，p.227-232（1998）
- (4) M.Fujimoto et al.：Effect of swirl rate on mixture formation in a spark ignition engine based on laser 2-D visualization techniques，SAE Paper，No.931905，p.1-12（1993）
- (5) K.Kuwahara et al.：Optimization of in-cylinder flow and mixing for a center-spark four-valve engine employing the concept of barrel-stratification，SAE Paper，No.940986，p.1-12（1994）

著者



田端道彦



藤本昌彦



岩井浩平