

論文・解説

27

ロータリエンジンの燃焼予測技術開発

Analysis Technology of Combustion Model in a Rotary Engine

中島 聖*1
Akira Nakashima
植木 信也*4
Shinya Ueki

尹 正 虎*2
Jyong-Ho Yun
香川 良二*5
Ryoji Kagawa

本郷 均*3
Hitoshi Hongou
横畑 英明*6
Hideaki Yokohata

要約

ロータリエンジンは、シンプルな構造であるため、軽量、コンパクト、高出力といった特性をもったエンジンであるが、扁平な燃焼室かつ膨張行程中に強い流れが生じるなど、一般的なレシプロエンジンにはない極めて独特な流動パターンをとる複雑さもあわせもっている。ロータリエンジンの更なる図示熱効率改善のためには、これら独特な現象を明らかにする必要がある。そこで、現象を把握可能なシミュレーション技術を構築することを目的として、燃焼室内 PIV (Particle Image Velocimetry) 可視化計測結果との検証、スキッシュ流の改善による燃焼パターンの再現を行った。その結果、特徴的な燃焼パターンの高精度な予測を可能とする解析技術を構築することができた。そして、本解析技術及び実機を用いて、現在開発中の次期ロータリエンジンにおける熱効率改善の方向性を確認した。

Summary

A Wankel rotary engine, due to its simple structure, is characteristically compact and light-weight and has high power density. Meanwhile, it has complexity that ordinary reciprocating engines do not have, such as a squish flow at an expansion stroke in its flat narrow combustion chamber. To further improve indicated thermal efficiency of the rotary engine, it is necessary to better investigate its combustion mechanism and the detail of the flow. Therefore, Mazda has developed a simulation technique for making an accurate prediction of combustion, an effective tool for analyzing such combustion pattern. Applying this technique, Mazda has confirmed the potential for improved thermal efficiency in the next generation rotary engine which is currently under development.

1. はじめに

近年の化石燃料の枯渇や地球温暖化防止から、内燃機関への燃費改善のニーズは日増しに強くなってきている。CO₂ 削減要求は、ロータリエンジン（以下、RE）に対しても例外ではなく、熱効率改善を短期間で必達しなければならない。しかしながら、RE は燃焼室が扁平で、かつ膨張行程中に強い流れが生じるなど極めて独特であるため、レシプロエンジンと比べ流動パターンが大きく異なり、RE 独特な現象を理解した上で燃焼阻害要因を明らかにしなければ熱効率改善は実現できない。そのためには、シミュレーションによる検

討が必須であるが、RE における燃焼解析事例はほとんどない。

そこで、本稿では、ガソリン RE の熱効率改善を目的とした燃焼解析による予測技術⁽¹⁾を構築し、本予測技術を用いて燃焼改善による熱効率改善の方向性⁽²⁾を確認した。

2. ロータリエンジンの構造及び特徴

2.1 構造及び名称

RE は、Fig. 1 に示すように、ハウジングとロータとの間で燃焼室が形成される。回転方向に対してトレ

*1, 3, 6 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

*2, 4, 5 パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.

ーリング（以下、T）側にある点火プラグを T プラグ、リーディング（以下、L）側にある点火プラグを L プラグとよぶ。また、ロータの T 側の端を T 端、L 側の端を L 端とよび、リセスの T 側の位置をリセス T 端、リセスの L 側の位置をリセス L 端と定義する。

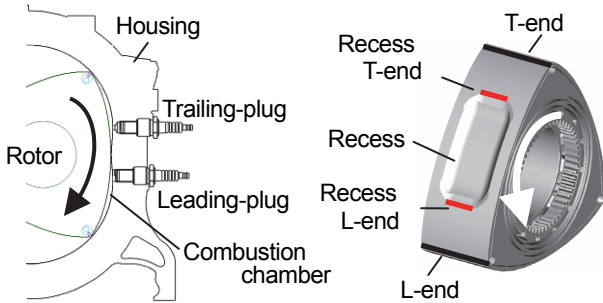


Fig. 1 Terminology of RE

2.2 流動パターンにおける特徴

Fig. 2 に圧縮・膨張行程における一般的なレシプロエンジン及び RE の流動解析による燃焼室内体積平均ガス流速の一例を示す。なお RE は、行程時間がレシプロエンジンと比べ 1.5 倍長い為、それぞれの出力軸における上死点後の角度 (deg.ATDC) を横軸としている。レシプロエンジンは上死点 (TDC) において燃焼室内ガスの圧縮による減衰でガス流速が最小となるのに対して、RE は、TDC でガス流速が最大となる。これは、ロータが回転していくと、燃焼室内は L 側が膨張、T 側が圧縮していくため、T 側から L 側への流れが強くなるためであると考えられる。

以上のことから、本論文の目的である燃焼を予測するためには、まず燃焼室内の流れ場を予測する必要がある。

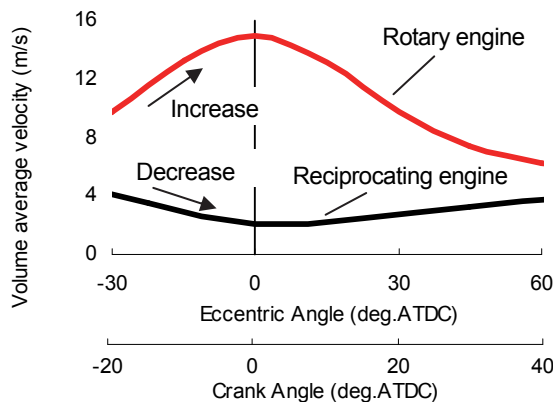


Fig. 2 Volume Average Velocity in Combustion Chamber of Rotary Engine and Reciprocating Engine

2.3 燃焼パターンにおける特徴

Fig. 3 にレシプロエンジンと RE における同一点火時期での熱発生率の例を示す。RE は、レシプロエンジ

ンに対して、主燃焼ピーク後に二つ目の燃焼ピーク（二段燃焼）が発生する点が特徴的である。この二段燃焼は、膨張行程中に燃焼室 T 側の未燃混合気が押し出されることによる燃焼であること⁽³⁾が分かっており、冷却損失及び排気損失を増大させる一因となっていると考えられる。

以上のことから、RE の熱効率予測を行うためには、特徴的な熱発生パターンである二段燃焼を高精度に予測する必要がある。

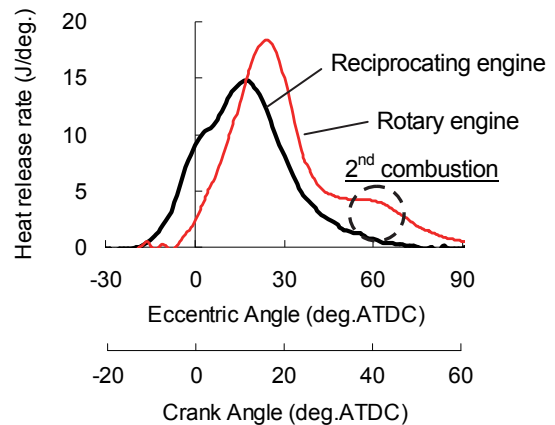


Fig. 3 Heat Release Rate of Rotary Engine and Reciprocating Engine at Same Ignition Timing

3. 解析手法

3.1 解析モデル

RE の燃焼計算には、汎用熱流体解析プログラム STAR-CD を使い、燃焼モデルには、乱流の影響による火炎面の状態を火炎面密度で定義し、その輸送方程式を解くことで火炎進行を表現する総括反応モデル ECFM-3Z を使用した。

3.2 ロータリ移動境界プログラム

RE の燃焼室容積変化はトロコイド関数で表現される。CFD (Computational Fluid Dynamics) による解析を行うには、解析対象となる空間をメッシュで分割する必要があるが、RE 特有の燃焼室形状変化に対応した自動メッシュ作成ツールはほとんどない。そこで、独自に自由度の高いロータリ移動境界プログラムを開発し、RE 特有の形状変化を再現した。

開発したロータリ移動境界プログラムは、Fig. 4 に示すように燃焼室内を周方向に数個のセグメントに分け、その領域ごとにそれぞれ独立にメッシュの追加・削除を行うことで RE 特有の燃焼室形状変化を再現した。また、壁面 1 層目のレイヤ厚さを任意に指定できるようにすることで、詳細な流動パターンを再現可能な解像度を確保できるようにしている。

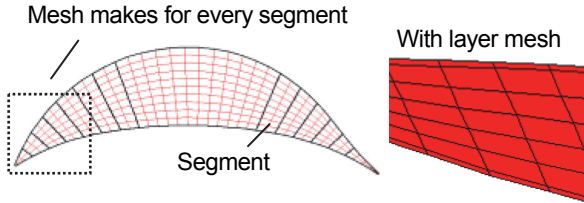


Fig. 4 Calculation Model of RE Movement

4. シミュレーションによる予測技術

4.1 燃焼室内流動解析技術⁽¹⁾

(1) 計測及び解析条件

比較対象とした PIV 可視化計測結果は、千葉大学大学院とマツダとの共同研究で計測した結果⁽⁴⁾を用いた。可視化エンジンは、マツダ RX-8 に搭載している 13B 型 RE (654cc×2) をベースとし、計測は全負荷条件 (1500rpm WOT) で行っている。これに対して、解析では、同条件におけるメッシュサイズ、乱流モデルといった解析パラメータを変更した解析を行い、流れ場を計測結果と対比する。そして、その中から最適な解析パラメータを選定し、RE 用流動解析技術を構築する。

(2) メッシュサイズの影響

-240deg.ATDC における PIV 可視化計測結果を Fig. 5(a)に、平均メッシュサイズを 1mm, 2mm, 4mm と 3 仕様変更した際の流動解析結果を Fig. 5(b)に示す。乱流モデルは、Standard k-ε 乱流モデルを使用した。

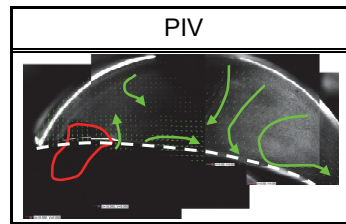
-240deg.ATDC は、ポート開口部が閉まる前 6deg であり、面積は約 25%しか開いていない状態である。PIV 可視化計測結果では、ポートからのガス流入による流れより容積変化による影響が大きくなっており、ロータにガスが押されることでポート入口付近に流れが生じていることが分かる。これに対して、解析結果は、メッシュサイズ 2mm 以上では、メッシュサイズに関係なく大きな時計回りの渦を形成しており、細かな流れを再現できていない。メッシュサイズを 1mm まで小さくすると、L 側の反時計回りの流れについては再現できていないが、ポート閉後の燃焼室内流動に影響を及ぼすポート入口付近に関しては、PIV 可視化計測結果と同様に流れ場を再現できている。

(3) 乱流モデルの影響

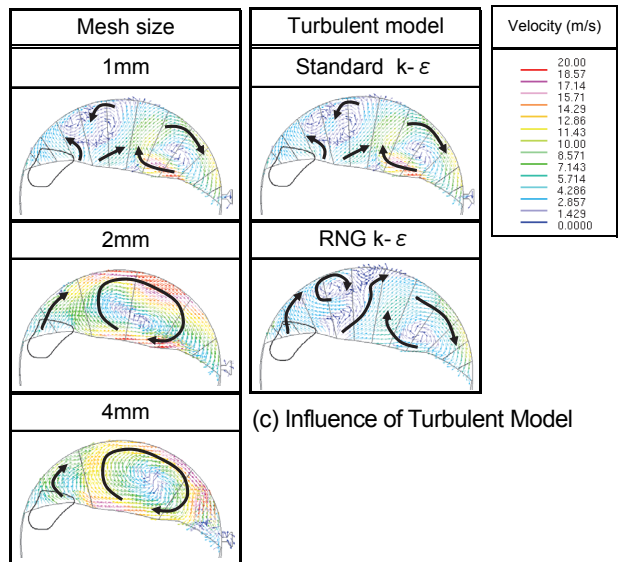
Fig. 5(c) に高レイノルズ数型 k-ε 乱流モデルの中で、Standard, RNG と 2 つの乱流モデルを変更した際の流動解析比較結果を示す。メッシュサイズは 1mm とした。剥離流れや旋回流に対して精度が良いとされる RNG k-ε 乱流モデルを使用した場合、L 側の反時計回りの渦を再現できておらず、また、Standard k-ε 乱流

モデルに比べてポート入口付近の流れについても可視化計測結果から離れる結果となった。これは、レシプロエンジンのバルブ上面での剥離流れのように、複雑な流れ場を形成しづらい構造である RE では、Standard k-ε モデルを使用した方が流れ場の再現性を確保できるということがいえる。

以上のことから、本論文で行った解析パラメータの中では、メッシュサイズ 1mm, 乱流モデルは Standard k-ε 乱流モデルを用いた条件で最も可視化計測結果を再現できることが分かった。



(a) PIV Measurement



(b) Influence of Mesh Size

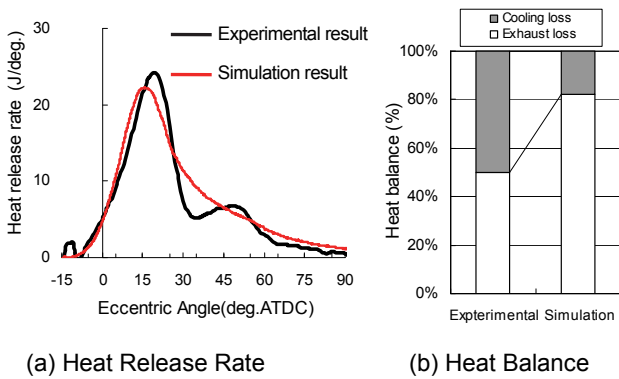
(c) Influence of Turbulent Model

Fig. 5 Comparison of Flow Pattern in Rotor Center Section at -240deg. ATDC

4.2 燃焼パターン予測解析技術

(1) 流動解析手法による流れ場での燃焼解析予測精度

前節において構築した流動解析手法を用いて均一予混合燃焼解析を行った。Fig. 6 に、熱発生率及び熱分配における冷却損失と排気損失の割合の実験結果と解析結果を比較した結果を示す。特徴的な熱発生率のカーブである二段燃焼を解析では再現できておらず、また、損失に占める冷却損失と排気損失の割合が予測できていないことから、予測精度が悪いことが分かる。



(a) Heat Release Rate (b) Heat Balance

Fig. 6 Comparison of Heat Release Rate and Heat Balance between Measured Results and Calculated Results

解析において、30deg.ATDC 以降、緩慢燃焼になっている要因の推測を行った。Fig. 7 に実機で二段燃焼が発生している区間で熱発生率が最も低い 30deg.ATDC と、その後熱発生率が上昇し始める 40deg.ATDC におけるセンター断面の流速ベクトル図を示す。二段燃焼の開始タイミングでは、リセス T 端の極小なエリアから発生するスキッシュ流 (T スキッシュ流) により火炎伝ば面が L 側へ後退していき、燃焼速度が低下し緩慢燃焼を引き起こしている。このことから、現状の解析結果では、T スキッシュ流が弱いため、火炎伝ば面の後退すなわち燃焼速度の低下が弱くなり燃焼が持続してしまっただと考えられる。

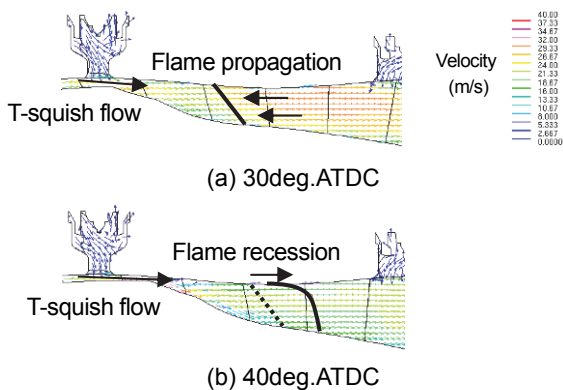


Fig. 7 Flow Pattern in Rotor Center Section

そのため、T スキッシュ流速の妥当性について確認を行った。Fig. 8(a) に、スキッシュ流速ピーク時の断面平均流速の理論値と現状の解析値との比較結果を示す。理論値は、赤線で示し、リセス T 端を境に燃焼室を 2 つの領域に分け、それぞれの容積変化から流速を算出した。現状の解析結果では、理論流速に対して、約 20%低い値となっており、T スキッシュ流が弱いことが分かる。これは、Fig. 8(b1)に示すように、構築した流動解析手法では、周方向に 5 層のメッシュを等間

隔に配置していたため、極小なエリアであるリセス T 端において、主流を再現できるメッシュ数の不足による数値粘性の影響及び壁面 1 層目厚さが大きいことによる壁関数の影響が強くなったためであると考えられる。

以上のことから、二段燃焼を再現できていない要因は、T スキッシュ流速が弱いことによる主燃焼ピーク後の火炎面後退を再現できていない、すなわち極小なエリアであるリセス T 端のメッシュに要因があることが分かった。そのため、Fig. 8(a)及び(b2)に示すように、主流メッシュサイズ及び壁面 1 層目厚さの調整を行うことで、T スキッシュ流速を理論流速まで改善した。

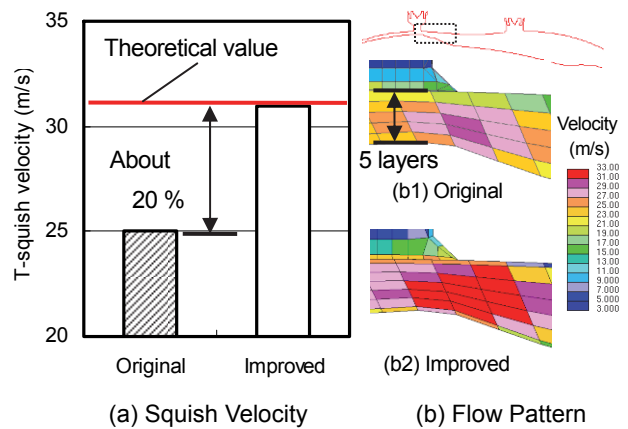


Fig. 8 Comparison of Peak Squish Velocity between Original Results and Improved Results

(2) T スキッシュ流速選定による燃焼改善結果

Fig. 9 に T スキッシュ流速を改善したメッシュを使用した場合の熱発生率及び熱分配を示す。

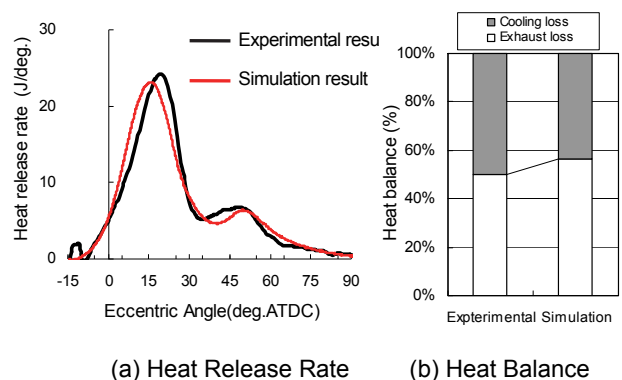


Fig. 9 Comparison of Heat release Rate and Heat Balance between Measured Results and Improvement Calculated Results

T スキッシュ流速の改善を行うことで、緩慢燃焼となっていた主燃焼ピーク後の燃焼速度が低下し、二段燃焼を明確に再現できていることが分かる。また、損失に占める冷却損失と排気損失の割合においても実機

と同等まで改善していることが分かる。これは、熱発生パターンの高精度化により排気損失予測精度が改善したためと考えられる。更に、これまでは火炎面に対して適正な壁面 1 層目厚さではなかったため、Fig. 10 に示すように、熱流束を小さく見積もっていたが、壁面 1 層目厚さの調整により、壁関数による境界層近似の精度が上がり、冷却損失予測精度が改善したためである。

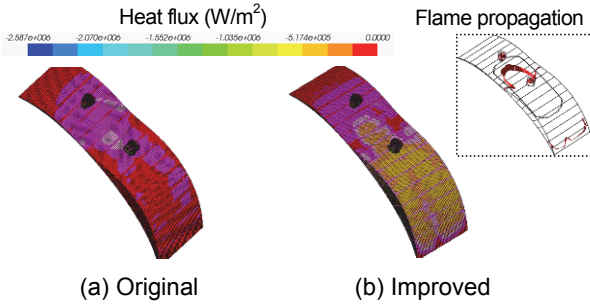


Fig. 10 Heat Flux on Combustion Chamber Wall at 30deg.ATDC

以上の改善技術により、RE 独特な燃焼パターンの高精度な燃焼予測を行うことが可能となった。

5. シミュレーションによる燃焼改善検討⁽²⁾

構築した予測技術を用いて、L 側空間における乱流生成による燃焼改善の検討を行った。

5.1 ロータリエンジンのSV 推移

Fig. 11 に、各出力軸角度に対する回転方向におけるロータ中心から T 側と L 側に容積を分けた場合のそれぞれの表面積 (Surface) と容積 (Volume) の比 (以下、S/V) を示す。

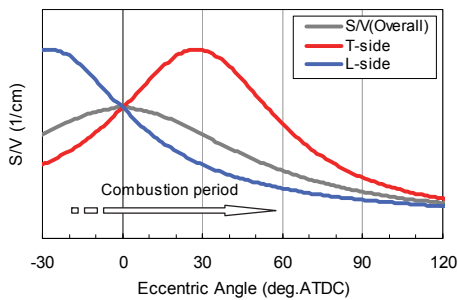


Fig. 11 Surface Volume Ratio in Combustion Chamber

T 側は、燃焼期間中 S/V が大きく、30deg.ATDC まで増加するのに対し、L 側は逆に燃焼期間中 S/V が小さく、減少傾向にある。これは、構造上、L 側は膨張し続け、反対に T 側は圧縮されるためであり、その結果、L 側は、冷却損失低減検討のためには有利な空間

と考えられる。

5.2 シミュレーションによる燃焼促進効果の検証

S/V による関係から、冷却損失低減には L 側空間での燃焼は有利である。しかしながら、L 側空間での燃焼は、乱流エネルギーが弱く⁽²⁾緩慢燃焼となるため、燃焼を促進させる必要がある。そのため、構築した予測技術を用いて、燃焼形態の変更を検討した。

Fig. 12 に L 側燃焼の促進化を図り、なおかつ冷却損失低減のため壁面から離れた空間に乱流を形成する目的で、部分負荷条件における乱流生成翼 (Vortex Generator, 以下 VG) を用いた机上検討結果を示す。VG 先端の L 側の空間に強い乱流が形成されており、目的とする乱流生成が可能であることが分かる。

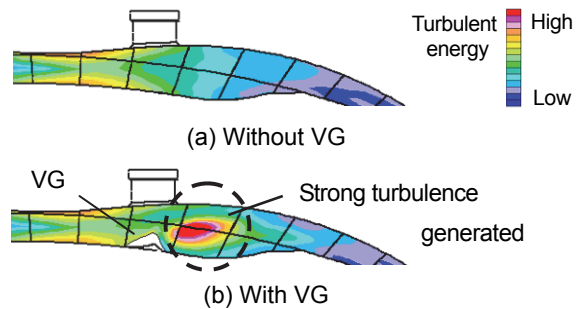


Fig. 12 Turbulent Energy with and without VG at 10deg. ATDC

次に、同一運転条件における燃焼解析を行った。Fig. 13, 14 に、火炎面位置、熱流束の結果の例を示す。VG による L 側乱流生成が L 側燃焼を大きく促進させ、更に、空間上で乱流を形成することで、冷却損失がほとんど悪化していないことが分かる。

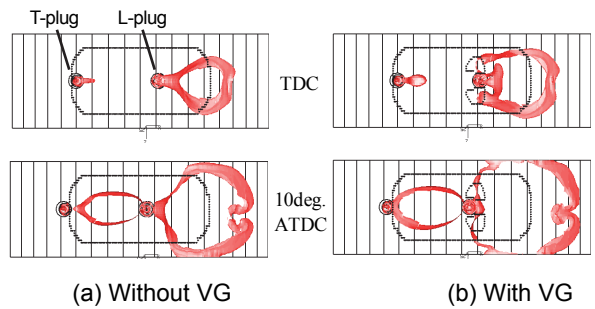


Fig. 13 Flame Propagation View from Normal Direction of Rotor

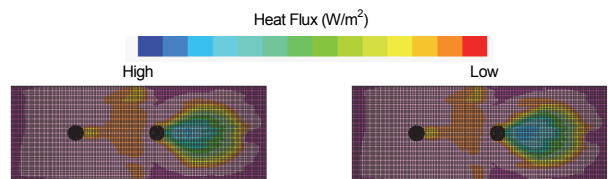


Fig. 14 Heat Flux View from Normal Direction of Rotor at TDC

5.3 実機による燃焼促進効果の検証

以上の効果を検証するため、実機を用いた計測を行った。机上検討と同一運転条件での VG 有無による実機での熱発生率を Fig. 15 に示す。VG を装着することにより、机上検討結果と同様に、-5deg.ATDC 付近から燃焼が促進されていることが分かる。

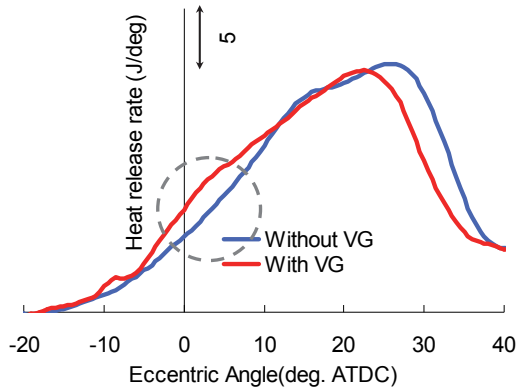


Fig. 15 Bench Engine Test Result on Heat Release Rate with and without VG

更に、VG 有無による燃焼の違いを明らかにする目的で、可視化エンジンを用いた燃焼観察⁽⁵⁾を行った。可視化結果を Fig. 16 に示す。VG ありの場合、なしに比べ輝度が高くなっており、L 側空間で燃焼が活発に行われていることが分かる。

また、実機テストによる熱分配解析結果から、VG を装着することにより冷却損失割合を約 3%低減できることが明らかになった。

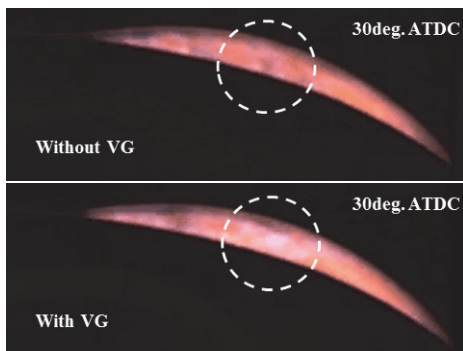


Fig. 16 Visualized Combustion with and without VG in L-side

6. おわりに

机上でガソリン RE を対象とした燃焼予測技術の構築を行い、構築した予測技術を用いて燃焼改善による熱効率改善の方向性を確認した。その結果、以下の知見を得た。

(1) 平均メッシュサイズ 1mm, 乱流モデルは、Standard k-ε 乱流モデルを用いれば、RE 独特な流れ場を再現可能である。

(2) 燃焼パターンの予測には、主燃焼ピーク後の火炎面後退を再現することが重要であり、T スキッシュ流速の予測精度の改善を行うことで、二段燃焼を再現できた。

(3) L 側空間に VG で乱流を生成させることで、燃焼を促進させつつ、冷却損失低減が可能であることが机上及び実機において確認できた。

次期ガソリン RE 開発では、各種損失の中で特に冷却損失の改善を目的に開発を行っている。現在、本文で述べた L 側空間の燃焼促進による熱効率改善の考え方を適用することで、熱効率を大幅に改善できることを確認している。この事実に基づき、ガソリン RE の開発を加速している。

参考文献

- (1) 中島ほか：ロータリエンジンにおける詳細素反応を用いた流動・燃焼解析技術の構築，第 23 回内燃機関シンポジウム講演論文集，B1-05 (2012)
- (2) Yun, J. et al.: Understanding of The Combustion Characteristics of Rotary Engine through Combustion Analysis, Proceedings JSME of The 8th CO-MODIA, No.12-201, pp.585-590 (2012)
- (3) 奥井ほか：ロータリエンジンの火炎伝ばに及ぼす点火プラグ配置の影響，マツダ技報，No.27, pp.142-147 (2009)
- (4) 森吉ほか：ロータリエンジンのサイクル変動に注目したガス流動場の解析，第 20 回内燃機関シンポジウム講演論文集，20090078 (2009)
- (5) Jaber N. et al.: Amelioration of Combustion of Hydrogen Rotary Engine, International Journal of Automotive Engineering, Vol.3, No.3, pp.81-88 (2012)

■ 著 者 ■



中島 聖



尹 正 虎



本郷 均



植木 信也



香川 良二



横畑 英明