

論文・解説

26

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

Effect of Spark-plug Arrangement on Flame Propagation
of Rotary Engine奥井伸宜^{*1} 高橋巧朋^{*2} 香川良二^{*3}

Nobunori Okui Yoshitomo Takahashi Ryoji Kagawa

田端道彦^{*4}

Michihiko Tabata

要約

自動車用エンジンのCO₂排出量削減が叫ばれる中、ロータリエンジンの開発においては、ガソリンのみならず将来の燃料として水素も視野に入れた効率向上に取り組んでいる。ここで重要となるのは、燃料の種類によらないロータリエンジンの本質的燃焼特性の解明である。本研究では、可視化を中心とした取り組みによりロータリエンジンの燃焼特性を明らかにした。更に、燃焼特性を活かした燃焼改善を試み、ロータリエンジン燃焼の高効率化に対して新たな指針を得た。

Summary

Amid calls for CO₂ emissions cut, our development activities of Rotary Engine (RE) are focused on the improvement in thermal efficiency for not only gasoline but hydrogen as a fuel for the future. What is particularly important here is to understand innate combustion characteristics of the RE which is unaffected by fuel components. In this paper, we observe combustion phenomena of RE in depth using an optical RE to clarify its combustion characteristics. Furthermore, based on this observation, we try to improve combustion performance taking advantage of the RE combustion characteristics. In the final chapter, new technical knowledge to improve RE combustion efficiency is described.

1. はじめに

低炭素社会への貢献のため、ロータリエンジン（以下RE）は進化を続けている。2003年に量産化した「RX-8」搭載のRE（RENEISIS）は、サイド排気方式の採用により熱効率とエミッションの大幅な改善を達成⁽¹⁾⁽²⁾した。更に2006年に開発した「RX-8ハイドロジェンRE」は、CO₂を排出しない究極のクリーン性能を実現⁽³⁾した。この車両はREの持つ多種燃料の対応に有利な特性を活かし、燃料の切り替えによる通常ガソリン走行も可能としている。今後、燃料の多様化が予測される中、更なる効率改善を実現するためにはREに備わる燃焼の基本特性に着目する必要がある。REの燃焼室は扁平で、しかも混合気の流動が一方向で非常に強い。このような独特の燃焼環境下で、確実に着火し効率的な火炎伝ばを実現する技術の確立が鍵となる。

本研究では、燃料にガソリンを使用し、REの燃焼室内を高速度撮影することにより火炎伝ば状態を詳細に把握し、REの独特な燃焼特性を明確にした。更に、点火プラグ

配置や数の変更が火炎伝ば特性に及ぼす影響を、燃焼シミュレーション、火炎の高速度撮影、および実機性能評価により明らかにした。

2. 実験装置およびシミュレーション概要

2.1 実機および可視化エンジン

実機REの基本諸元をTable 1、およびFig.1に示す。点火プラグはロータハウジング短軸よりも上側に位置するものを「Tプラグ」、下側に位置するものを「Lプラグ」、またロータ表面に設けた窪みを「リセス」と称する。

燃焼室内の火炎伝ば挙動の観測には、実機同条件で運転が可能な可視化REを用いた。この装置は実機2ロータREをシングルロータ化し、フロントサイドハウジングをサファイアガラスに置き換えることでエンジン内の観察を可能にしたものである。Fig.2に可視化REおよび計測システムを示す。エンジン内の燃焼計測には、カラーハイスピードカメラ（Phantom V7.1、撮影速度；12,000fps）を用い、燃焼火炎の自発光を撮影した。

*1~4 パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.

Table 1 Engine Specifications

Engine Type	13B - MSP
Displacement	0.654L × 2rotor
Compression Ratio	10.0:1
Plug position	L plug ;23mm / T plug ;30mm

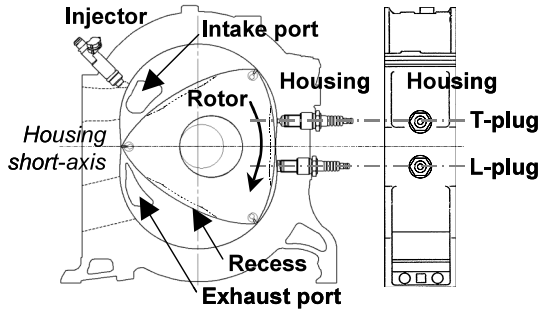


Fig.1 Rotary Engine (RE)

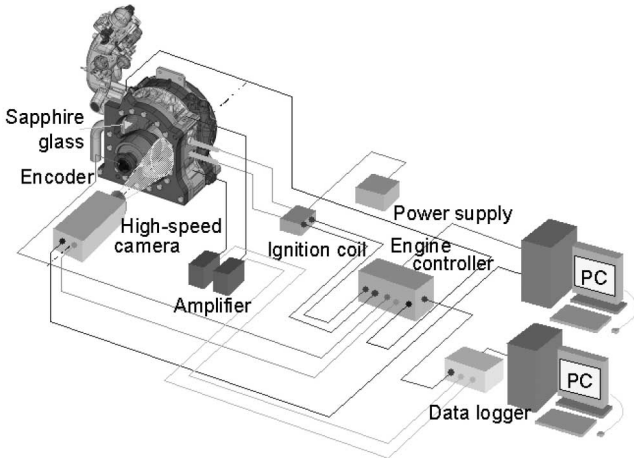


Fig.2 Optical RE & Peripheral Devices

2.2 燃焼シミュレーション

点火プラグ配置や多点点火の検討には、RE用の3次元燃焼シミュレーションを用いた。これはFig.3に示すように各点火プラグから発達する火炎面の挙動に対し、スキッシュ、熱損失およびガス漏れ過程を考慮するものであり、「RE燃焼シミュレーション」⁽⁴⁾をベースとしている。計算にあたっては、可視化により得られる火炎計測情報を基に火炎伝ばモデルの精度向上を図った。

3. REの燃焼過程

実用運転領域の代表点として、回転数1,500rpm、正味平均有効圧力294kPaにおけるREの熱発生をFig.4に示す。各プラグの点火時期は、L側/T側 = 20/15deg. BTDCを基本に、L側T側同時に±10deg.進角/遅角させた計3条件である。この図から、燃焼は大きく2段に分かれていることが分かる。60deg. ATDCまでの前半は点火時期との相関が見られ、これを「主燃焼」、60deg. ATDCからの後半は点

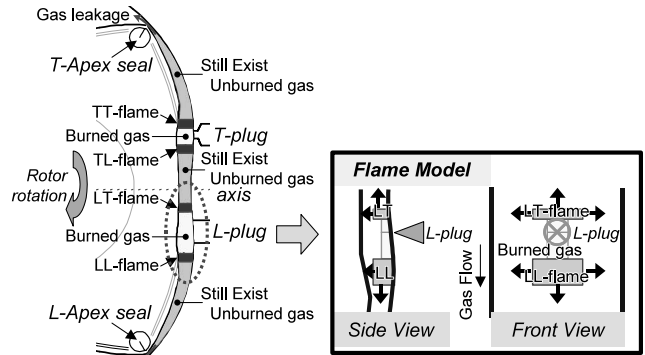


Fig.3 RE-Simulation Model

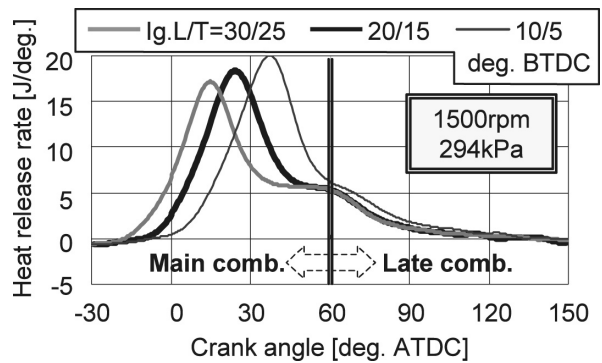


Fig.4 Heat Release Rate of Real RE

火時期によらず同等の傾向を示しており、これを「後期燃焼」とする。このような2段階の燃焼を示すことが、部分負荷領域におけるRE燃焼の特徴である。

ここで、基本点火時期L/T = 20/15deg. BTDCにおける燃焼の可視化結果を時系列画像でFig.5に示す。60deg. ATDCまでの「主燃焼」について、各画像から取得した火炎拡がり（10deg.毎の輪郭）をFig.5の右端図に示す。これより「主燃焼」では、L側T側いずれの点火プラグからの発生火炎もT側方向へは伝ばせず、L側方向へのみ拡がっていることが分かる。このことから、燃焼室内にはT側からL側に向かう非常に強い方向流れが存在するものと考えられる。そこで、CFD (Computation Fluid Dynamics) 計算により、同運転条件における燃焼室内のLプラグ、Tプラグ、および短軸の各位置でのロータハウジング近傍の流速を求めた。Fig.6にT側からL側への流速成分を示す。点火以降、燃焼室内の流速は最大40m/sに達しており、上流への火炎伝ばは困難であることがわかる。次に60deg. ATDC以降の「後期燃焼」について、Fig.5の各画像から火炎の拡がりと輝度を解析した結果をFig.7に示す。上段は「後期燃焼」開始の60deg. ATDC、下段は終了付近の90deg. ATDCである。点火時期はFig.4の実機熱発生と比較できるようにL/T = 30/25および10/5deg. BTDCを加えた。Fig.7左半分を示す火炎の拡がりや右半分を示す輝度から、「後期燃焼」は点火時期によらずほぼ同等であるが、その中でもL/T = 10/5deg. BTDCの燃焼が遅くまで広範囲で持

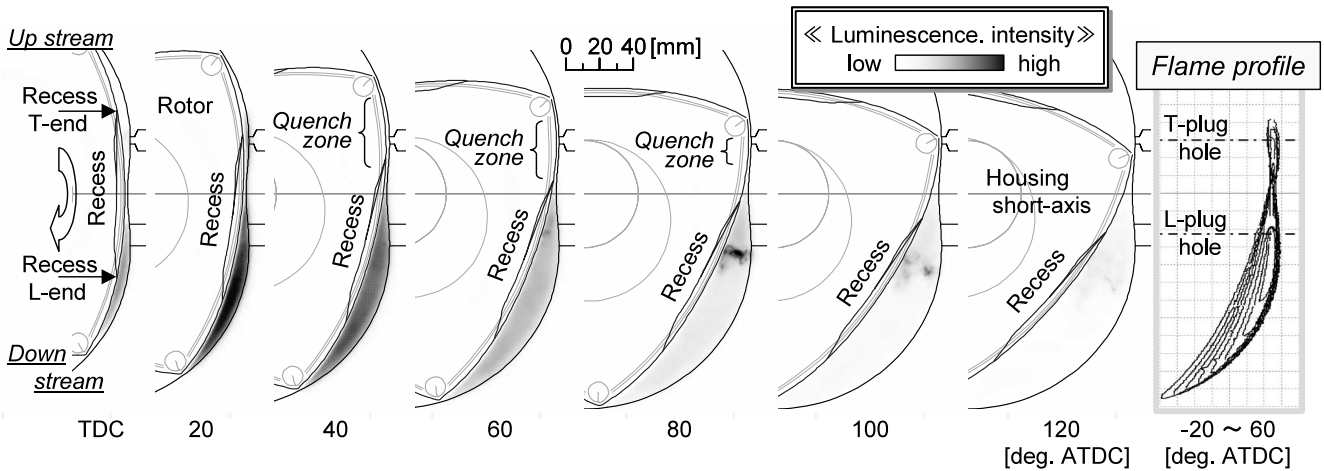


Fig.5 Direct Photographs of Flame Propagation (Optical RE)
 <1,500rpm, 294kPa, Ignition Timings ; L/T = 20/15deg. BTDC>

続していることがわかる。これらはFig.4の実機熱発生生の「後期燃焼」と同傾向であり、両者の相関が確認できた。更にFig.7から「後期燃焼」には短軸から上流のT側空間に火炎が存在しないことが分かる。上流へ火炎が伝ばしないのは、T側空間が縮小することで発生するスキッシュ流に阻まれるためであり、T側空間の混合気はスキッシュ流として時間をかけて短軸下流域に押し出され、燃焼が後期まで持続するものと考えられる。ここで、火炎が伝ばしないT側空間をTクエンチゾーンと称する。

このように、「後期燃焼」はREの構造に起因する現象であるが、REの更なる高効率化を実現するためには、Tクエンチゾーンの混合気を任意のタイミングで燃焼させ、後期燃焼を低減する技術の確立が不可欠である。

4. RE燃焼に及ぼす点火プラグ配置の影響

より高い燃焼効率を実現するため、点火プラグ配置が火炎伝ばに及ぼす影響を、燃焼シミュレーション、燃焼の高速度撮影、および実機性能評価により検討した。

4.1 燃焼シミュレーション予測結果

計算条件は1,500rpm, 294kPaであり、Fig.8に示す「プ

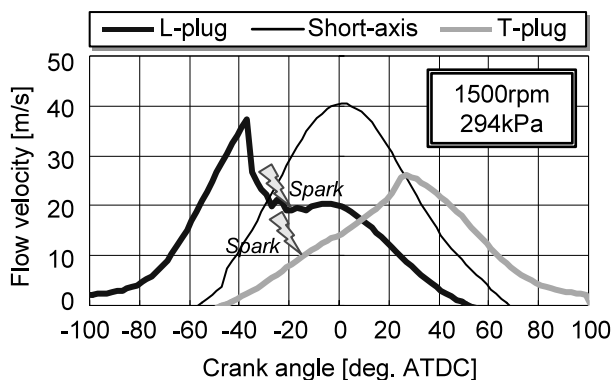


Fig.6 Flow Velocity in Combustion Chamber (CFD)

ラグ位置」および「プラグ本数」をパラメータとした。

まず、2本プラグにおいてLプラグ位置を短軸から下流方向、Tプラグ位置を上流方向に移動させた際の図示平均有効圧力の計算結果をFig.9に示す。ここでは、短軸下流23mmのLプラグと上流30mmのTプラグを組み合わせた基準配置からの改善率で示している。図のように、Lプラグを短軸側に配置し、同時にTプラグを短軸から離すことで効率が大きく改善する傾向が見られた。この結果を基に、2本プラグで高効率化が見込める配置としてLプラグを短軸下流23mm、Tプラグを上流67mm (以下「L23 + T67」配置)とした。次に、点火プラグ本数の影響を調べるために、Fig.10に示す3パターンを検討した。つまり「L23 + T67」を

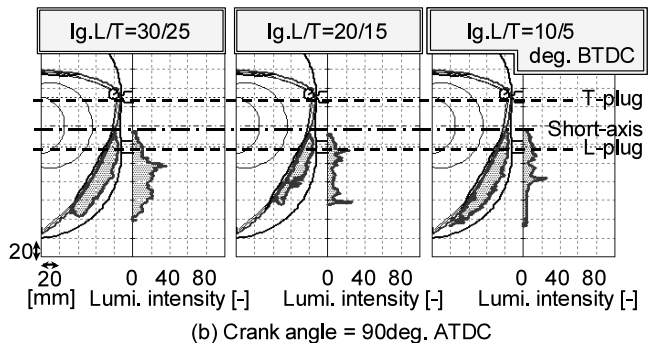
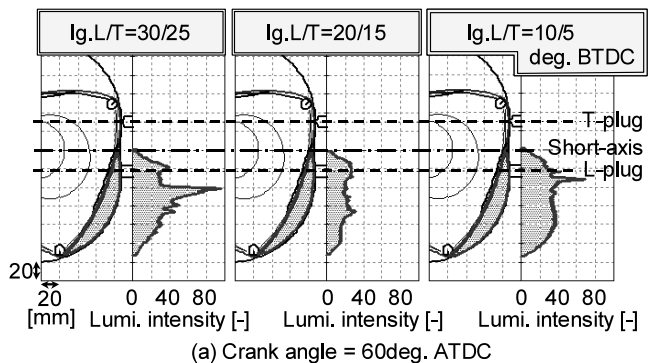


Fig.7 Flame Profile and Luminescence Intensity (Optical RE) <1,500rpm, 294kPa>

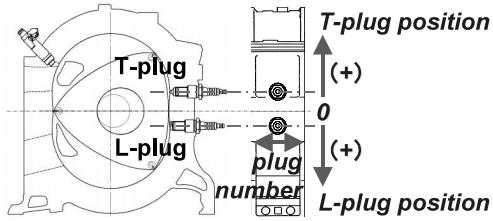


Fig.8 Spark-plug Position

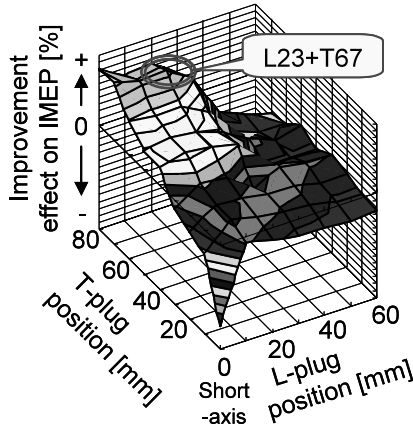


Fig.9 Effect of Spark-plug Positions (RE-Simulation) <1,500rpm, 294kPa, lg.L/T = 20/15deg.BTDC>

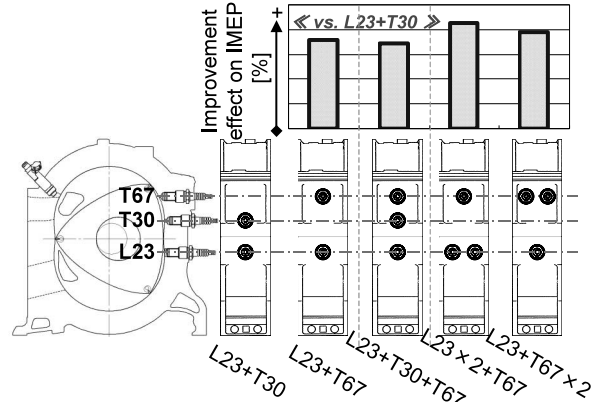


Fig.10 Effect of Spark-plug Arrangement (RE-Simulation) <1,500rpm, 294kPa, lg.L/T = 20/15deg.BTDC>

Table 2 Ignition Timing of Real RE

Plug position	Ignition timing [deg. BTDC]
L23+T30	L23 / T30 = 21 / 11
L23+T67	L23 / T67 = 19 / 12
L23+T30+T67	L23 / T30 / T67 = 19 / 0 / 0
L23 × 2 + T67	L23 × 2 / T67 = 18 / 14

ベースに①短軸上流30mmの位置にTプラグを追加する「L23 + T30 + T67」配置, ②L23プラグをハウジングの幅方向に1本追加する「L23 × 2 + T67」配置, ③T67プラグをハウジングの幅方向に1本追加する「L23 + T67 × 2」配置である。これらの図示平均有効圧力の計算結果を基準配置「L23 + T30」からの改善率でFig.10の上部に示す。「L23 + T67」配置と「L23 + T30 + T67」配置はともに改善を示すが、その差はほぼ同等である。このことから、現状の燃焼室のスケールでは、T側空間において流れ方向にはT67の1本プラグで十分であることが推測される。また、幅方向についてはL23, T67ともに2本化による改善が見られ、特にL23の2本化、つまり「L23 × 2 + T67」配置で最も大きな改善が確認できた。REの燃焼室内において幅方向の流動は非常に弱く、火炎伝ばも遅いため、プラグ追加による強制的な火炎面増加の効果が大きく現れたものと考えられる。

4.2 可視化解析結果

Fig.2に示す可視化REを用い、前節で導いた「L23 + T67」配置、「L23 + T30 + T67」配置および「L23 × 2 + T67」配置による燃焼改善の検証を基準配置である「L23 + T30」との比較で行った。取得した燃焼画像を数値化し火炎位置と輝度で表し、熱発生率とともにFig.11に示す。ここでは、時間変化を示すため横軸に回転角を、縦軸には火炎位置を取り、輝度をグレースケールで表している。縦軸はロータハウジングの短軸を原点としているため、出力軸の回転に伴いロータが移動する表記となる。よって、燃焼室内の位置関係が分かるように、ロータおよびリセスのT端/L端の

軌跡を图中に示した。ここで、Tプラグ火炎の上流側火炎面をTT火炎面、下流側火炎面をTL火炎面とし、Lプラグ火炎についても同様にLT火炎面、LL火炎面と定義する。熱発生率は横軸を共通に上部に示している。

運転条件は計算と同じく1,500rpm, 294kPaである。点火時期は、実機運転で熱効率が最高となるよう選択した。各仕様の点火時期をTable 2に示す。

まず、基準配置「L23 + T30」に注目すると、20deg. ATDC近傍でTL火炎面とLT火炎面とが衝突し、ロータL端にLL火炎面が、リセスT端にTT火炎面が到達している。その狭い空間内で燃焼が進行する際に熱発生はピーク値を示し、その後の30deg. ATDCあたりまで短軸下流50mmを中心とした空間で輝度が高くなっている。このL側空間の活発な燃焼が3章で述べた「主燃焼」である。一方、全行程におよびリセスT端より上流には輝度反応がなく、この空間がクエンチゾーンである。この未燃混合気はT側空間のスキッシュにより下流側に押し出され、60deg. ATDC以降、短軸下流40mmを中心とした空間に高輝度反応が認められる。この燃焼は長期化し、150deg. ATDC付近まで低輝度の拡がり確認できる。これが3章で述べた「後期燃焼」である。

次に、「L23 + T67」配置と基準配置「L23 + T30」を比較する。「L23 + T67」配置の熱発生率は、「主燃焼」において熱発生ピーク時期(30deg. ATDC)が遅れるとともに「後期燃焼」が減少している。火炎からも主燃焼のピーク、つまりL側空間の輝度の高いタイミングが遅れ側に移動していることがわかる。基準配置に見られるように、主燃焼のピークはTL火炎面とLT火炎面の衝突後に生じるが、「L23 +

T67」配置ではT側の点火位置が上流に移動したため、衝突までの期間が長期化したことがピーク遅れの要因と考えられる。また、20deg. ATDCでの短軸上流40mmを中心とした空間では、基準配置で見られなかった燃焼が生じている。これは、基準配置で火炎が進行しなかったクエンチゾーンにあらかじめ火炎を発生させたことで、流動に乗る形で火炎伝ばし、これによりクエンチゾーンが縮小したためである。このため「後期燃焼」、つまり基準配置に見られた60deg. ATDC以降の短軸下流40mmを中心とした空間の火炎は、その輝度と範囲が縮小している。このように、強い一方向の流れ場での燃焼については、Tプラグの上流配置で

「後期燃焼」を低減できることが確認できた。

「L23 + T30 + T67」配置に注目すると、熱発生率は「L23 + T67」配置と同様に「後期燃焼」の減少を示すが、その効果は目減りしている。この仕様ではT30とT67プラグの点火時期が他の仕様のTプラグに比べ約10deg.遅くなっている。T側の2ヶ所の点火が、熱発生初期の急激な上昇による冷却損失の増大をもたらすためと考えられるが、この点火遅延のためT67はより狭い空間で着火することとなり、火炎の成長が阻害され、TL火炎面の下流への伝ばが遅くなっている。また、Fig.6から点火時期の流動はより強くなるのが分かるが、そのためT30のTT火炎面は下流に流され

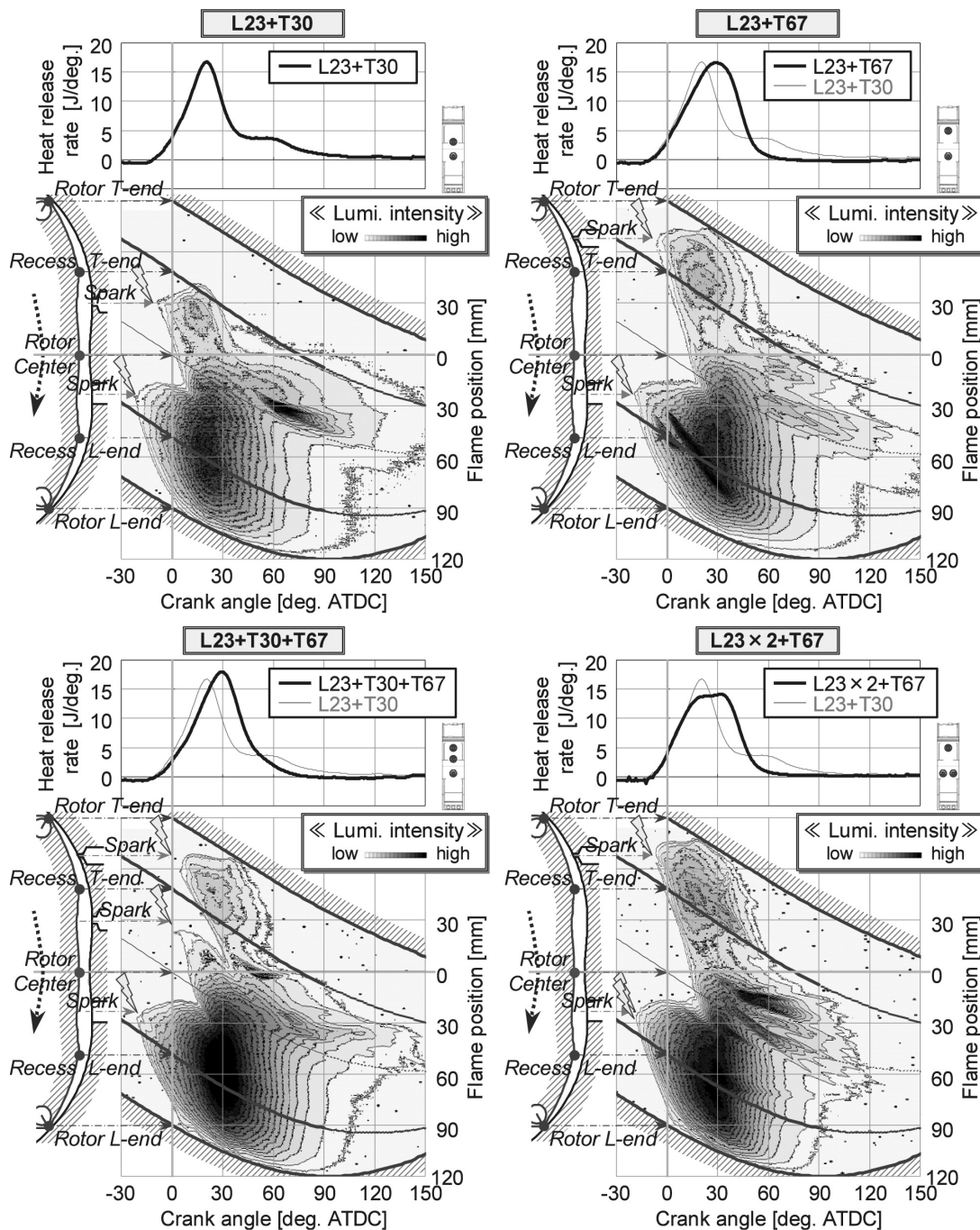


Fig.11 Combustion Characteristics Obtained by Optical RE <1,500rpm , 294kPa , lg.L/T = Torque Best>

ている。これらの理由によりTDCから約30deg.の間、T30とT67の間には火炎が存在しない領域が発生する。これが「L23+T67」配置に比べ「後期燃焼」が若干増加した要因と考えられる。このように、流れ方向のプラグ3本化においてはT側2本の効果を十分に活かすことができず、TプラグはT67プラグ1本の配置で十分であることが確かめられた。

更に、「L23×2+T67」配置に着目すると、熱発生率は立ち上がりで基準配置と同等の傾向を示すが、全体的に台形型となり、「後期燃焼」が低減し、燃焼期間の短縮が達成されていることが分かる。火炎を見ると、Lプラグによる燃焼は30deg. ATDC、短軸下流50mmを中心とした空間で生じ、他の3仕様と比べ領域に大差はないが、その輝度は高い。同じT67プラグを有する「L23+T67」配置に比べ、LL火炎面のL側への伝ばが速いことも確認できる。これらは、Lプラグの2本化でロータ幅方向への火炎面積が増大し、これによる燃焼室内の雰囲気温度上昇が燃焼を促進させたためと考えられる。その効果はT側にも現れており、20deg. ATDC、短軸上流40mmを中心としたTプラグ火炎の輝度が「L23+T67」配置に比べて高まっている。熱発生量の台形型の立ち上がり部分は、このTプラグ火炎の活発な燃焼の現れである。TL火炎面とLT火炎面とが衝突した後の輝度も高く、これもLプラグの2本化の効果と考えられるが、このことが一定期間熱発生の低下を抑え台形型の上底部を形成する要因となっている。そして、4仕様の中で最も早い120deg. ATDC付近で燃焼が終結している。つまり、Tプラグの上流配置による流動を活用したTクエンゾーンの低減、Lプラグ2本化によるTクエンチゾーンも含めた燃焼の促進、これらにより「後期燃焼」を早期に終結させることが確認できた。

4.3 実機性能評価結果

上節のプラグ配置が正味燃料消費率に与える影響を、実機台上試験より確認した。Fig.10の計算結果と同様に、基準配置からの改善率でFig.12に示す。全ての仕様で改善が見られるが、「L23+T67」配置と「L23+T30+T67」配置はほぼ同等で、「L23×2+T67」配置が最も高い改善を示す。このように、実機性能においても燃焼シミュレーションと同様の傾向が得られ、燃焼改善が確実に正味燃料消費率の改善に反映されることが確認できた。

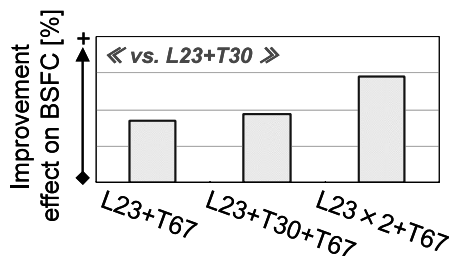


Fig.12 Performance of Real RE
<1,500rpm, 294kPa, lg.L/T = Torque Best>

5. まとめ

ロータリエンジン (RE) の燃焼効率を更に高めるため、実機評価および可視化実験により火炎伝ばの状態を把握し、高効率化が期待できる点火プラグ配置を燃焼シミュレーションを用い検討した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 部分負荷領域で見られるRE特有の「後期燃焼」は、強い一方向流れにより火炎伝ばしない燃焼室T側混合気の燃焼遅れであることが確認できた。
- (2) 一方向流れの上流にTプラグを配置することで、Tクエンチゾーンの未燃混合気をあらかじめ燃焼させることができる。これにより「後期燃焼」が低減する。
- (3) 点火プラグを2本のまま一方向流れの上流にTプラグを移動する場合と、上流にTプラグ追加しプラグを3本とする場合の効率的な差は少ない。流れ方向には2本のプラグで効率的な火炎伝ばが可能である。
- (4) 幅方向の流動は弱いため、Lプラグを追加することで効果的に主燃焼火炎を拡げられる。更にTクエンチゾーンの燃焼活性化も図れ、「後期燃焼」の早期終結が可能となる。

参考文献

- (1) 田島ほか：サイド排気ポート方式ロータリエンジンの概要，マツダ技報，No.21，p.18-23 (2003)
- (2) 植木ほか：新開発ロータリエンジンにおけるアイドル燃費改善とその要素技術，自動車技術会論文集，Vol.36，No.1，p.139-144 (2005)
- (3) 柏木：水素エンジン車の開発，自動車技術，Vol.62，No.11，p.53-57 (2008)
- (4) 長尾ほか：ロータリエンジンの火炎伝ばとノックの解析，マツダ技報，No.4，p.69-78 (1986)

著者



奥井伸宣



高橋巧朋



香川良二



田端道彦