

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

不活性ガス希釈下におけるレーザー着火式内燃機関の運転特性

Gasoline Engine Performance with Laser-induced Breakdown Ignition under Inert Gas Dilution Condition

柳澤 健一郎¹・齊藤 剛^{2*}・古谷 博秀³YANAGISAWA, Kenichirou¹, SAITO, Takeshi^{2*}, and FURUTANI, Hirohide³

¹ 明星大学 大学院 理工学研究科 機械工学専攻 〒191-8506 東京都日野市程久保 2-1-1
Graduate School of Mechanical Engineering, Meisei University, 2-1-1 Hodokubo, Hino, Tokyo, 191-8506, Japan

² 明星大学 理工学部 総合理工学科 機械工学系 〒191-8506 東京都日野市程久保 2-1-1
Department of Mechanical Engineering, Meisei University, 2-1-1 Hodokubo, Hino, Tokyo, 191-8506, Japan

³ 独立行政法人産業技術総合研究所 新燃料自動車技術研究センター 〒305-8564 茨城県つくば市並木 1-2
Research Center for New Fuels and Vehicle Technology, AIST 1-2 Namiki, Tukuba, Ibaraki, 305-8564, Japan

2014年1月17日受付; 2014年6月10日受理/Received 17 January, 2014; Accepted 10 June, 2014

Abstract : An internal combustion engine with laser breakdown ignition was operated under inert gas and exhaust gas dilution, and the influence of increased dilution rate on engine performance and emissions was clarified. As a result of this experiment, operating range was expanded in proportion to specific heat ratio of inert gas and exhaust gas. And at high dilution rates, the gasoline engine operation was more stable with laser-induced breakdown ignition than with conventional spark ignition, since the IMEP was higher and the COV_{IMEP} was lower with laser ignition.

Key Words : Laser Ignition, Breakdown, Spark Ignition Engine, EGR, Inert Gas Dilution

1. 緒言

現在、ガソリンエンジンには化石燃料の枯渇や地球温暖化のため、高効率化と低排出化が求められており、様々な観点から研究が行われている[1]。このような背景の中、カーボンニュートラルであるバイオ燃料の使用や、排気ガス再循環 (EGR) といった省エネ技術が試みられてはいるが、発熱量の低下や燃焼速度の低下により運転可能領域が狭くなる場合がある。これには点火による問題が大きいが、点火装置であるスパークプラグはガソリンエンジン誕生以来その基本的構造に変化がなく、ガソリンエンジンのさらなる高効率化と低排出化を実現するためには、点火技術の革新が求められる。

上述の問題に対して、従来のスパークプラグを用いるものでは、火花点火の着火核にマイクロ波を照射し非平衡プラズマを生成し着火を支援する手法[2-3]などが行われている。また、火花点火に代わる着火方法としては、体積的な燃焼ができるプラズマジェット着火[4]や、低温プラズマを

用いて熱損失を低減できる高速パルス低温プラズマ着火[5]などの着火方法が検討されている。

これらに対し本報で着目したレーザーブレイクダウン着火は、レーザー光を集光することで焦点雰囲気からプラズマを発生させる着火方法であり[6]、光学系の設定によって燃焼室の任意の位置に非接触で多点の着火可能な点が大きく異なる[7]。さらにレーザーブレイクダウン着火は非接触で点火を行えるためプラグ電極や燃焼室壁面への熱損失を低減でき、高エネルギー投入下で問題になるプラグ電極の耐久性を考慮する必要がない。また高圧下では、従来のプラグではプラズマ形成のための電界破壊により高い電圧を要するのに対して、レーザーブレイクダウン着火では、着火に必要なエネルギーが減少する[8]ため、ガソリンエンジンの点火方法として原理的な利点がある。レーザーブレイクダウン着火では生成される着火核にも違いがあり、生成された着火核がレーザー光照射側へ広がる独特の形状を持ち[9]、未燃混合気へ熱とラジカルの供給を行えるため濃度差の大きくなる条件においても安定した着火が期待できる。昨今では様々なレーザーブレイクダウン着火の研究成果が報告されており[10-12]、実際の内燃機関への適用を視野に

* Corresponding author. E-mail: tsaito@me.meisei-u.ac.jp

入れたスパークプラグと変わらないサイズの高輝度パルスレーザーの開発・研究[13-14]も進められてきた。レーザーブレイクダウン着火に関する研究報告の多くは定容容器を用いたものや、急速圧縮膨張装置を用いた1サイクルのみの燃焼であるが、実際のエンジン燃焼は強い乱れ場の中で行われる上にサイクル間の影響も加わるため複雑な要因が関係し合う燃焼である。そのため内燃機関にレーザーブレイクダウン着火を適用した場合の効果を明らかにするためには実機によるエンジン運転実験が重要である。

これまでに我々は、実際にレーザーブレイクダウン着火を内燃機関に適用するシステムを構築し[15]、燃料希薄状態での運転や、バイオ燃料を用いた場合での運転を行いレーザーブレイクダウン着火の及ぼす影響について研究を行ってきた。本報では希薄燃焼と異なりストイキでの運転においてNO_x低減効果のあるEGRに着目し、レーザー着火式内燃機関をEGR状態で運転した際の出力特性ならびに排気特性を火花点火の場合と比較することによって、レーザーブレイクダウン着火が及ぼすエンジン性能への効果を明らかにする。なお、EGRに用いられる排気ガスは、サイクル毎の燃焼状態により構成成分が複雑に変化するため、混合ガス成分の変化に対してEGRの効果を詳細に把握することは難しい。そこで排気ガスだけではなく不活性ガスであるN₂、CO₂での吸気希釈運転も行った。

2. 実験装置および実験方法

2.1. 実験装置

本研究で使用したエンジンシステムを Fig.1 に示す。使用したエンジンは富士重工業株式会社製ロビンエンジン EH30-DS (291 cc, 定格出力 5.1 kW) である。オリジナルの燃料供給方式はキャブレターだが、当量比の制御を行えるようにインジェクターに変更した。希釈率の制御は、希釈ガス供給用の配管途中に設けたバルブの開度を変更することで行った。レーザーは New Wave Research 社製 Tempest-10 (レーザーパルス幅: 5 ns, 発振波長: 532 nm, 最大エネルギー: 100 mJ, ビーム径 6 mm) を用いた。レーザーブレイクダウン着火でエンジンを運転する場合の点火制御は、クランクシャフトに取り付けられたロータリーエンコーダーからの角度信号を演算処理することで、本実験では任意のクランク角でレーザーのランプ信号を1回出力し行なった。また本装置をレーザーブレイクダウン着火で運転する場合には、スパークプラグから自作したオプティカルプラグに変更した。本研究で使用したオプティカルプラグの概略図を Fig.2 に示す。オプティカルプラグをエンジンに取り付けるねじ部はスパークプラグと同じであり、エンジンを加工することなく換装できるようにした。オプティカルプラグの内部にはレーザー光を集光するための凸レンズと、凸レンズを火炎から保護するためのサファイアガラスが設置してあり、任意の焦点距離の凸レンズに変更することで着火位置の制御が可能である。さらにオプティカルプ

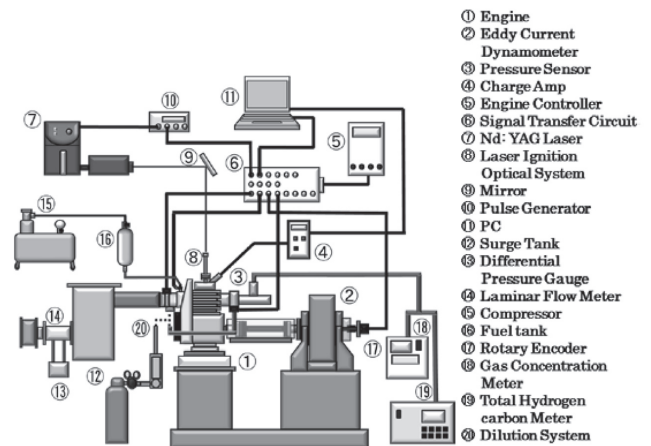


Fig.1 Laser-induced breakdown ignition engine system.

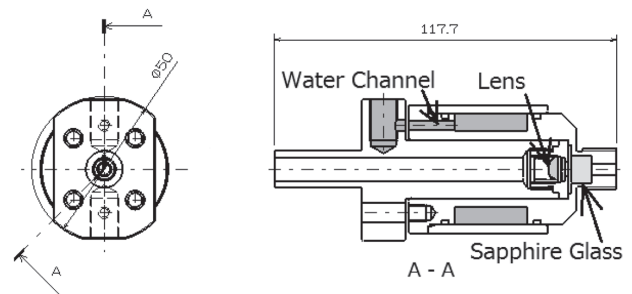


Fig.2 Optical plug.

ラグの周囲には水冷を行うこともできるように加工を施した。

2.2. 実験方法

本実験では希釈率を増加させた際のレーザーブレイクダウン着火が及ぼすエンジン性能への影響を明らかにするため、吸気管に設置された希釈ガス流入口よりN₂、CO₂または排気ガスを吸気に混合し希釈率を変化させた場合の筒内圧力と排気中NO_xおよびTHC濃度を計測した。実験条件を Table 1 に示す。着火方法にはレーザーブレイクダウン着火と火花点火の2種類を使用し、それぞれの投入エネルギーを、レーザーブレイクダウン着火ではレンズおよびサファイアガラスを傷つけないために1パルスあたり20 mJに設定し、火花点火ではスパークプラグの定格である60 mJに設定した。なおレーザーブレイクダウン着火のほうが火花点火と比べて投入エネルギーは小さいが、十分に着火可能なエネルギー量であり、本実験条件におけるレーザーのピーク出力は4 MWであるのに対して火花点火の出力は数10 W～数100 Wのオーダーであり、単位時間当たりの投入エネルギー量はレーザーブレイクダウン着火のほうが大きい。レーザーブレイクダウン着火の場合のレンズの焦点距離はピストン上死点における燃焼室中心になるようf=30 mmを使用した。当量比は $\phi=1.0$ に固定し、燃料にはレギュラーガソリンを使用した。希釈率は0%から20

Table 1 Experimental conditions.

| Ignition | Laser Breakdown Ignition | Spark Ignition |
|-------------------------|--|----------------|
| Input energy | 20mJ/pulse | 60mJ |
| Focal length | f = 30mm | - |
| Equivalent ratio | 1.0 | |
| Fuel | Gasoline | |
| Dilution gas | N ₂ , CO ₂ , Exhaust gas | |
| Dilution rate | 0, 5, 10, 15, 20% | |
| Engine speed | 1180rpm | |
| Ignition timing | -50, -41, -32, -23, -14, -5, 4ATDCdeg | |
| Throttle opening | 100% | |
| Acquisition data | 512cycle | |
| Intake manifold heating | 100°C | |

%まで5%刻みの5条件に変化させて運転を行った。なお希釈率は流量計の弁およびEGRバルブの開度変化による新気の吸入空気量の変化量から算出した。回転数は、本実験で使用したレーザーの発振限界周波数が10 Hzであるので1200 rpmにすべきではあるが、エンジンの運転不安定な条件において回転数の急激な変動が発振器に負荷をかけてしまう可能性があることを考慮し、若干回転数を下げて1180 rpm固定で行った。レーザーブレイクダウン着火には火花点火に比べて着火時期の早期化があるため、着火時期も-50 ATDCdegから4 ATDCdegの間で9 deg刻みの7条件に変化し行った。スロットル開度は全開で固定した。本研究室で過去に行われていた実験との比較を行うため吸気管は100°Cに加熱した。取得データ数は、各実験の1条件につき512サイクル分を取得し平均値を採用データとした。

3. 実験結果および考察

3.1. 圧力および熱発生率

希釈率の増加による燃焼状態の変化を明らかにするため、Fig.3に筒内圧力および熱発生率の履歴を示す。ここでは希釈条件および希釈率の代表としてN₂の実験結果における、希釈率が0%、10%、20%の結果を(a), (b), (c)それぞれに示す。まず希釈率0%の筒内圧力履歴を見ると、レーザーブレイクダウン着火、火花点火ともに点火時期-23 ATDCdegで最大値をとり点火時期が進角側から遅角側に向かうにつれて低下しており、圧力の立ち上がりの傾きも遅角に向かうほど緩慢であった。またすべての点火時期でレーザーブレイクダウン着火の方が火花点火に比べて立ち上がり時期が早かった。次にその熱発生率を見ると、レーザーブレイクダウン着火、火花点火ともに点火時期-23 ATDCdegでは立ち上がりの傾きが大きくその最大値も大きく、鋭角なピークをとったのち、ほぼ直線を取りながら急激に低下していく傾向が見られる。この傾向は、通常燃

焼のピーク付近でノッキングしたことにより急激に熱発生率が増加し、その後急激に低下したためだと考えられる。筒内圧力履歴にはノッキングの傾向が見られないが、正常燃焼での圧力のピーク付近でノッキングが発生したことや、図中の圧力履歴が複数サイクルを平均化したデータであるためノッキングの特徴である高周波の圧力変動が除かれてしまったことが原因であると考えられる。点火時期-14 ATDCdegになると筒内圧力の最大値が低下したことで熱発生率の最大値も低下した。特に火花点火の熱発生率はレーザーブレイクダウン着火の熱発生率と比べて、ピーク付近での急激な増加が見られなくなり、ピーク後の減少も緩やかだった。これは、同一の点火時期においてレーザーブレイクダウン着火の方が火花点火より圧力の立ち上がり早いことにより、末端ガスの到達温度が上がるためノッキング強度が大きくなったと考えられる。点火時期がさらに遅角側に向かうと、熱発生率の立ち上がりの傾きがより小さく、燃焼期間も長いことから燃焼が緩慢になっていった。点火時期-5 ATDCdeg以降の熱発生率の履歴はピークを中心に左右対称に近い形であり異常な増加が見られず、立ち上がりの傾きと最大値はさらに小さくなった。次に希釈率10%の図を見ると、希釈率10%の筒内圧力および熱発生率は、同一点火時期での最大値が希釈率0%と比べて全て低下していた。また、立ち上がりの傾きや燃焼期間は0%に比べて小さくなり燃焼期間も長くなっていった。そのため、点火時期は-50 ATDCdegでも運転可能でありノッキングの影響もほとんど見られなくなった。この傾向は遅角側に向かうほど顕著になったが、これは燃料流量の低下により燃焼速度が低下したためだと考えられる。希釈率20%の条件では、希釈率0%および10%と同様に、圧力および熱発生率ともにレーザーブレイクダウン着火の方が火花点火よりも最大値および立ち上がりの傾きが大きかった。また点火時期-41 ATDCdegでは圧力履歴、熱発生率ともにレーザーブレイクダウン着火における傾き、および最大値が火花点火に比べて大きく、火花点火に比べ早く燃焼が進んでいた。点火時期が遅角側に向かうにつれてレーザーブレイクダウン着火の立ち上がりの傾きと最大値も低下していくため、進角側の条件に比べて着火方法による差が小さくなっていった。

希釈する不活性ガスの違いによる圧力と熱発生率への影響を明らかにするためFig.4にCO₂、EGR希釈での希釈率10%、20%における圧力および熱発生率を示す。なおCO₂の条件では運転が不安定なため希釈率20%での運転が行えなかったことから10%のみを示した。まずCO₂希釈率10%ではN₂の場合と同様にレーザーブレイクダウン着火の方が火花点火より圧力および熱発生率の立ち上がり早く傾きも大きくなった。また同様に圧力の最大値は点火方法によらず、点火時期が遅角側の条件ほど小さい。N₂希釈と比較すると同一点火時期、同一点火方法ならばCO₂希釈の方が圧力の立ち上がり時期が遅く傾きが小さいこと、また燃焼期間が長いことが分かる。さらに、熱発生率

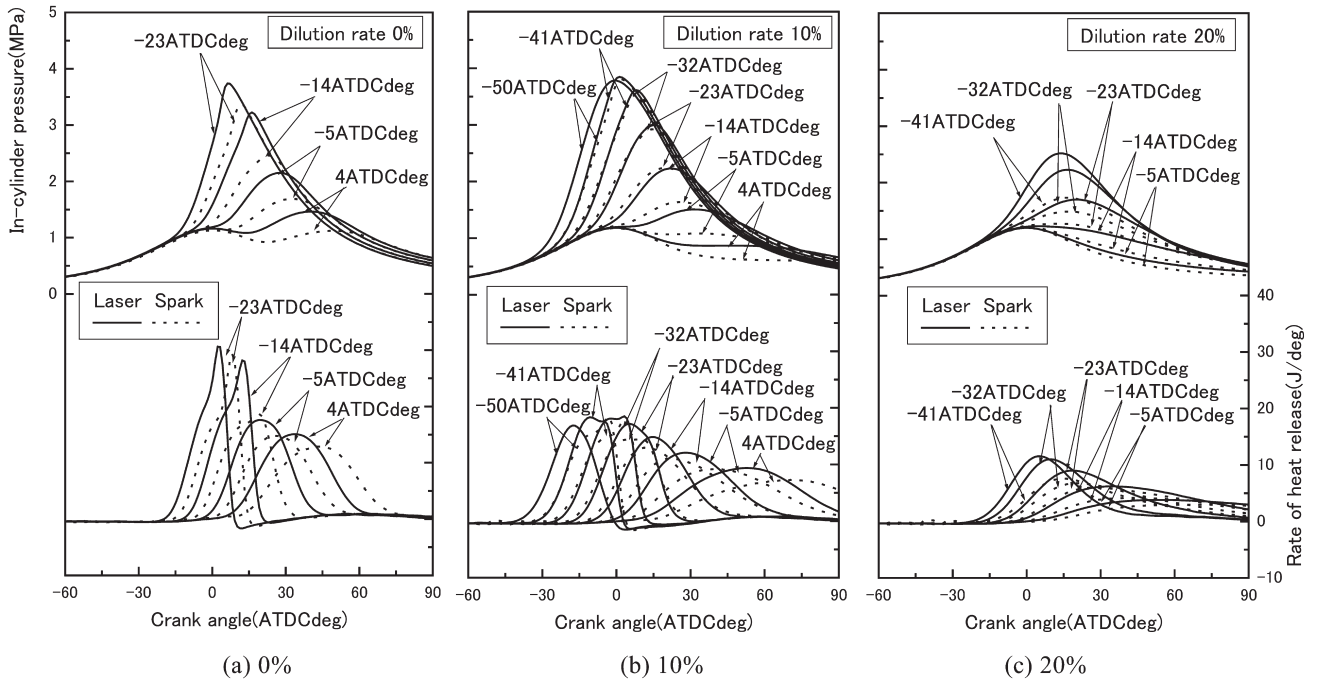


Fig.3 In-cylinder pressure & Rate of heat release of N_2 dilution.

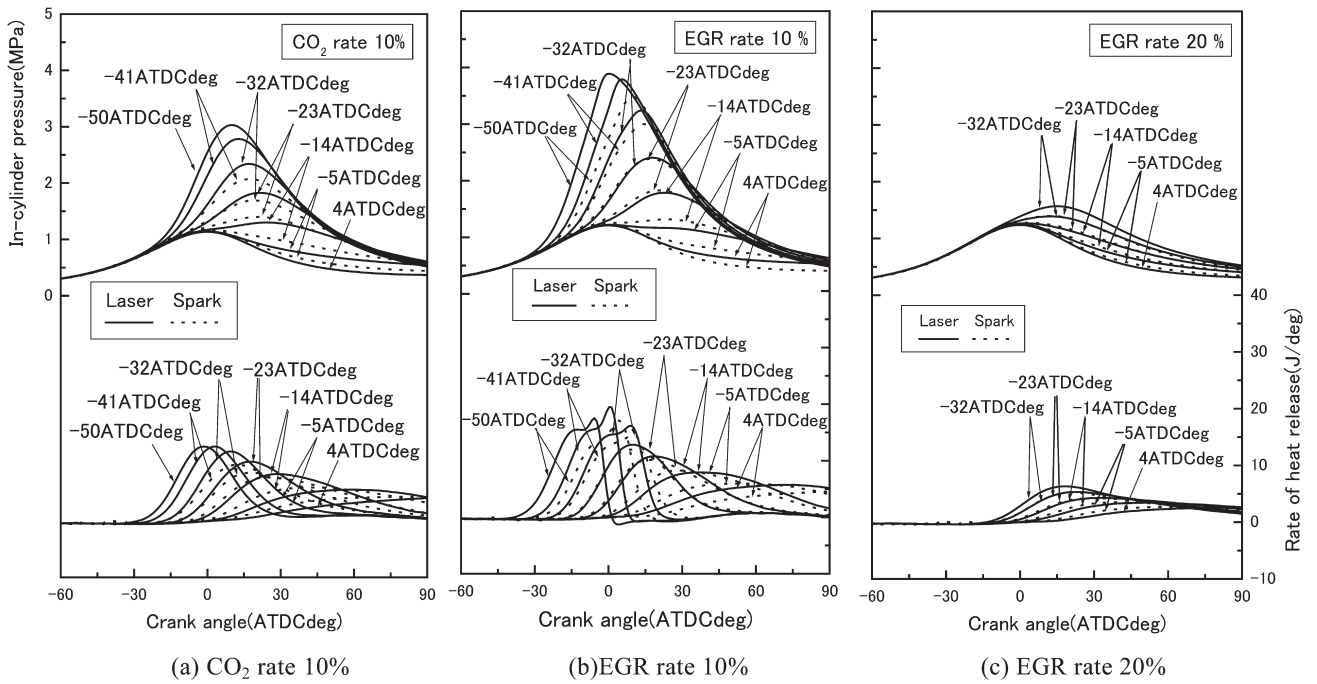
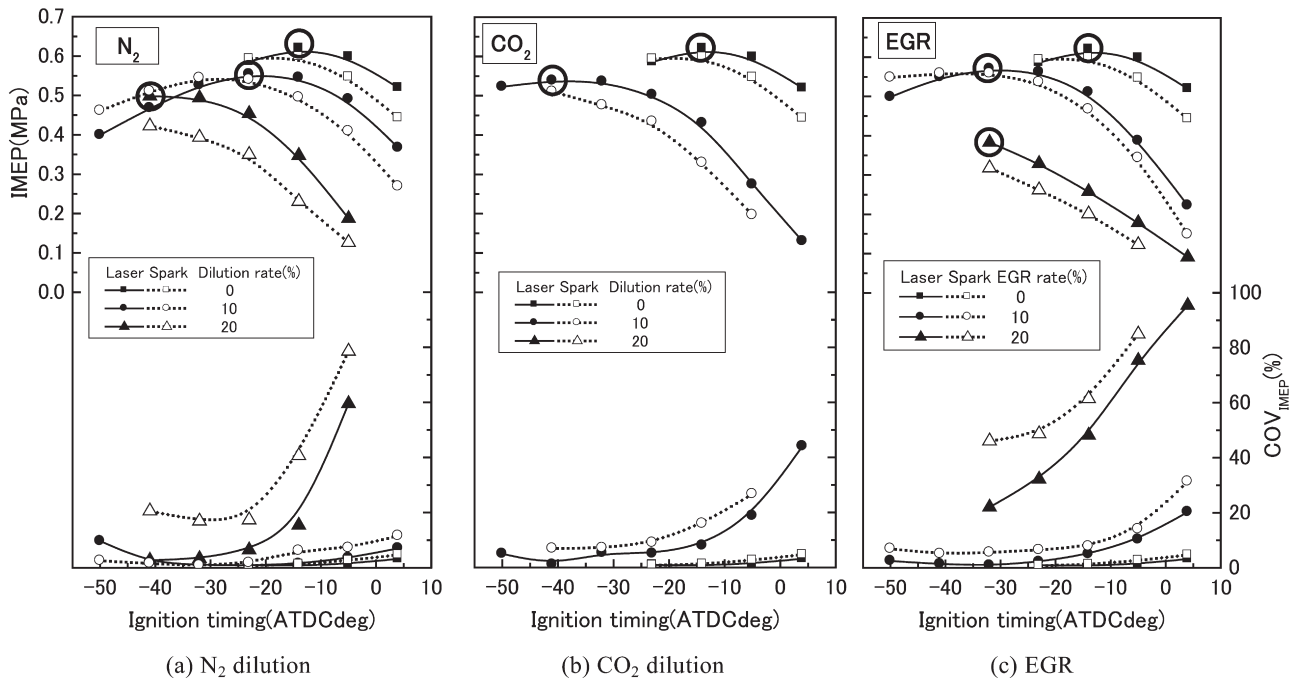


Fig.4 In-cylinder pressure & Rate of heat release of CO_2 & EGR dilution.

において点火時期 -41 ATDCdeg および -32 ATDCdeg に注目すると, N_2 希釈の場合に見られたノッキングの傾向が CO_2 希釈の場合には見られなかった. 次に EGR 率 10% の図を見ると, 圧力および熱発生率の立ち上がり時期, 傾きの傾向は N_2 , CO_2 と同様だが, 同一点火時期かつ同一点火方法の場合には傾きの大きさおよび最大値が N_2 より小さく, CO_2 よりも大きい. EGR 率が 20% に増加すると, N_2 希釈で希釈率を増加させた場合と同様に同一点火時期における

圧力と熱発生率の立ち上がりの傾きおよび最大値が小さくなり, その傾きおよび最大値は同一点火時期の N_2 希釈と比べて小さくなった.

ここで, 希釈ガスによる筒内圧力および熱発生率の違いを明らかにするためシリンダ内吸気ガスの比熱比について考える. シリンダ内吸気ガスの比熱比は, シリンダ内が $70^\circ C$, 105 kPa と仮定すると希釈率 0% の時 1.351 であり, 希釈率が 10% に増加すると N_2 は 1.355, EGR は 1.352 と増

Fig.5 IMEP & COV_{IMEP}.

加していくのに対して CO_2 は 1.340 と減少していく。よって同一点火時期同一点火方法で圧力および熱発生率の傾きおよび最大値が N_2 , EGR, CO_2 の順で大きいのは希釈ガスの比熱比によるものであると考えられる。

以上より希釈媒体によらず、レーザーブレイクダウン着火の方が火花点火に比べ筒内圧力の最大値が高く、かつ立ち上がり早いこと、希釈率が増加するにつれて筒内圧力の最大値は小さく、立ち上がりは遅くなり、燃焼状態が緩慢になることを確認した。また筒内圧力および熱発生率は希釈ガスの比熱比によって整理でき、比熱比が大きいほど立ち上がりの傾きおよびその最大値が大きくなることを確認した。

3.2. エンジン出力

着火方法の違いがエンジン性能に及ぼす影響を明らかにするために、 N_2 , CO_2 , EGR の IMEP およびその COV_{IMEP} を Fig.5(a), (b), (c) に示す。図中には希釈率 0%, 10%, 20% の実験結果を代表として表示した。また各図中の希釈率 0% の条件には同一の結果が示されており、各希釈率におけるレーザーブレイクダウン着火での IMEP 最大値 (IMEP_{MAX}) は丸で囲った。

N_2 希釈での IMEP を見ると、0% 希釈時では、点火時期 -23 ATDCdeg を除くすべての条件でレーザーブレイクダウン着火の方が火花点火よりも高かった。レーザーブレイクダウン着火での IMEP_{MAX} は点火時期 -14 ATDCdeg における 0.62 MPa で、火花点火の IMEP_{MAX} である 0.60 MPa (@ -14 ATDCdeg) より 3% 高かった。さらに遅角側ではレーザーブレイクダウン着火と火花点火の IMEP の差は大きく

なっていた。希釈率 10% の IMEP_{MAX} は、レーザーブレイクダウン着火では 0.55 MPa (@ -23 ATDCdeg) をとり、火花点火では 0.54 MPa (@ -32 ATDCdeg) であり、どちらも希釈率 0% の時よりも小さく、最適点火時期が進角側に推移したが、レーザーブレイクダウン着火の方が進角側への移動量が小さかった。これはともに不活性ガスの増加や燃料流量の減少により燃焼速度が低くなり最適点火時期が進角化した。レーザーブレイクダウン着火の方が火花点火に比べて圧力の立ち上がり早く最適点火時期がその分だけ遅角側にあることを表している。希釈率 20% では IMEP_{MAX} がさらに進角側に推移し、IMEP の分布はもはや遅角側に向かうほど低下する傾向のみになった。次に N_2 希釈での COV_{IMEP} に着目すると、希釈率 0% での COV_{IMEP} は、レーザーブレイクダウン着火では点火時期 -14 ATDCdeg、火花点火では点火時期 -23 ATDCdeg で最低値を取り、点火時期が遅角側に向かうほど大きな値であった。この傾向は希釈率 10% での COV_{IMEP} でも変わらず、着火方法の違いによる差もあまり見られなかった。さらに希釈率が高い 20% の条件では、火花点火を用いた場合、COV_{IMEP} の最低値が 16.9% であり不安定な運転状態である。それに対しレーザーブレイクダウン着火の COV_{IMEP} は希釈率 10% に比べて高くなっているが、最低値は 2.7% であり火花点火に比べて安定した出力を得られていることが分かる。

CO_2 希釈では、希釈率 10% まで運転可能であった。IMEP_{MAX} はレーザーブレイクダウン着火において 0.54 MPa (@ -41 ATDCdeg) であり、 N_2 の同一希釈率と比べると IMEP_{MAX} が低下しピークが進角側に推移した。 CO_2 での

COV_{IMEP} は 1 条件を除きレーザーブレイクダウン着火の方が火花点火に比べて値が低く, 安定した出力であった. CO₂ 希釈の COV_{IMEP} を N₂ 希釈の場合と比較すると, CO₂ 希釈の方が全体的に高い値であり出力が不安定だった.

最後に EGR の希釈条件において IMEP を見ると, EGR 率 10 % での最大値は, レーザーブレイクダウン着火の 0.57 MPa (@ -23 ATDCdeg) だった. IMEP_{MAX} は希釈ガスによって大きな差が見られないが, その最適点火時期は N₂ と CO₂ の間にあり, 全体的な傾向も同様に N₂ と CO₂ の間に推移した. EGR 率が 20 % に増加するともはやピークを持たず右下がりの直線のように見える. COV_{IMEP} はすべての条件でレーザーブレイクダウン着火の方が火花点火に比べて値が低かった. したがって, 吸気希釈によるエンジンの出力および出力の変動も比熱比によって整理することができ, EGR における IMEP とその変動の大きさは, 比熱比の計算値と同様に N₂ と CO₂ の中間であることを確認した.

以上よりレーザーブレイクダウン着火の IMEP の分布曲線は, 火花点火のそれより遅角側に移動した位置にあり, これはレーザーブレイクダウン着火における圧力の立ち上がりが早いため, 最適点火時期が遅角化した結果であることがわかった. 特に高希釈側ではその効果が大きく, レーザーブレイクダウン着火の方が高出力になることがわかった. また, エンジンの出力には希釈ガスの比熱比が大きく関係しており, 比熱比が大きいほど高希釈率での IMEP が高く COV_{IMEP} が低い. そして, EGR の比熱比は N₂ よりも小さく CO₂ よりも大きいので出力にも同様の傾向がみられることが分かった.

3.3. 燃焼開始時期の決定

前節までにレーザーブレイクダウン着火の方が火花点火よりも圧力の立ち上がりが早く, その結果, レーザーブレイクダウン着火における IMEP の分布は希釈ガスや希釈率に依らず, 火花点火に比べて遅角側に移動することを明らかにした. しかし上述のことが着火方法の違いにのみ依存するのであれば, それはエンジン燃焼の初期のみに差が現

れるだけであり, 火炎伝播に依存するエンジン燃焼の大部分の差は無いはずである. そこで, まず熱発生率より 1 サイクルごとに質量燃焼割合 (MFB: Mass Fraction Burned) を求めた. Fig.6 に N₂ 希釈率 10 % でのレーザーブレイクダウン着火と火花点火それぞれの MFB (@ -23 ATDCdeg) を示す. MFB は点火から MFB が 10 % に達するまでに, 点火方法および点火時期に依存しながら加速的に増加し, 10 % から 50 % 付近の期間で直線的に増え, その後変化量が小さくなり 100 % に至るといふ S 字の曲線を描く. Heywood [16]によると, 点火から MFB が 10 % に到達するまでの期間を $\Delta\theta_d$ とし, 着火核から火炎の成長期間であるとしている. また MFB が 10 % から 90 % の期間を $\Delta\theta_b$ とし, 火炎成長期を過ぎ, 火炎伝播による燃焼が終了するまでの期間であるとしている. また, $\Delta\theta_b$ における火炎伝播を表す直線部分を延長し仮想的な燃焼の開始時期を定めている. 本実験は燃焼開始時期を τ_i と定義し, MFB が 20 % から 40 % までの期間において最小二乗法を用いて, 近似直線を求めその x 切片とした. 点火時期から τ_i までの間隔が着火遅れ時間とも定義できる. レーザーブレイクダウン着火と火花点火の違いは着火核形成の部分であり, 燃焼割合への影響は火炎核形成期間に現れると考えられる. 図からはレーザーブレイクダウン着火の方が火花点火に比べて τ_i が早いことが確認できる. これはレーザーにより生成されたプラズマのエネルギー密度が非常に高くスパークプラグや壁面から離れた空間中に着火することで大きな着火核が形成されることに由来する. 着火核が大きくなると燃焼初期において, 燃焼割合が急激に増加するため圧力および熱発生率の立ち上がり早くなったように見える. これによりレーザーブレイクダウン着火の方が火花点火に比べ筒内圧力, 熱発生率がともに最大値が大きくなり, 燃焼期間が短くなったと考えられる.

3.4. τ_i と IMEP の関係

燃焼開始時期と IMEP の関係を把握するため, 代表として N₂ 希釈率 0 %, 10 %, 20 % におけるサイクル毎の τ_i とそのサイクルにおける IMEP をそれぞれ Fig.7(a), (b), (c) に示す. 希釈率 0 % の図を見ると, 火花点火の IMEP 分布の中にレーザーブレイクダウンの IMEP 分布が偏在していた. また同一点火時期の結果は, レーザーブレイクダウン着火の方が火花点火に比べて遅角側に分布していた. これはレーザーブレイクダウン着火の方が火花点火に比べて急激に着火核が成長し圧力の立ち上がりが早いためである. またどちらの分布もそのピークになる時期はほとんど一致しており, 任意の τ_i における IMEP の値は同程度であるため MFB 10 % 以降では着火方法の違いによる燃焼状態にほとんど違いはないことを示している. その中でも特に IMEP_{MAX} 近傍ではレーザーブレイクダウン着火の方において IMEP が高いサイクルが多くまた, τ_i の変動も小さくなっていった. 次に希釈率 10 % の図を見ると, 0 % と比較して同一点火方法, かつ同一点火時期の分布が, 遅角側および

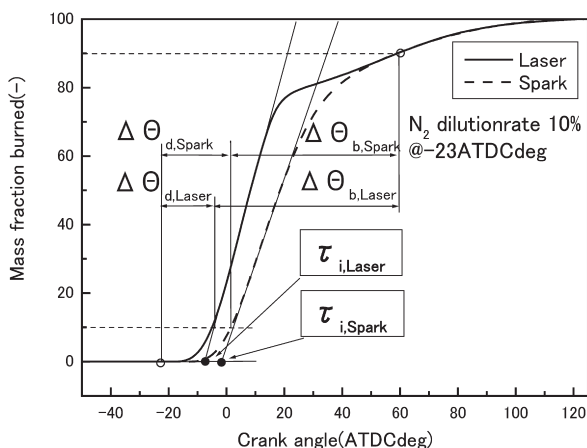
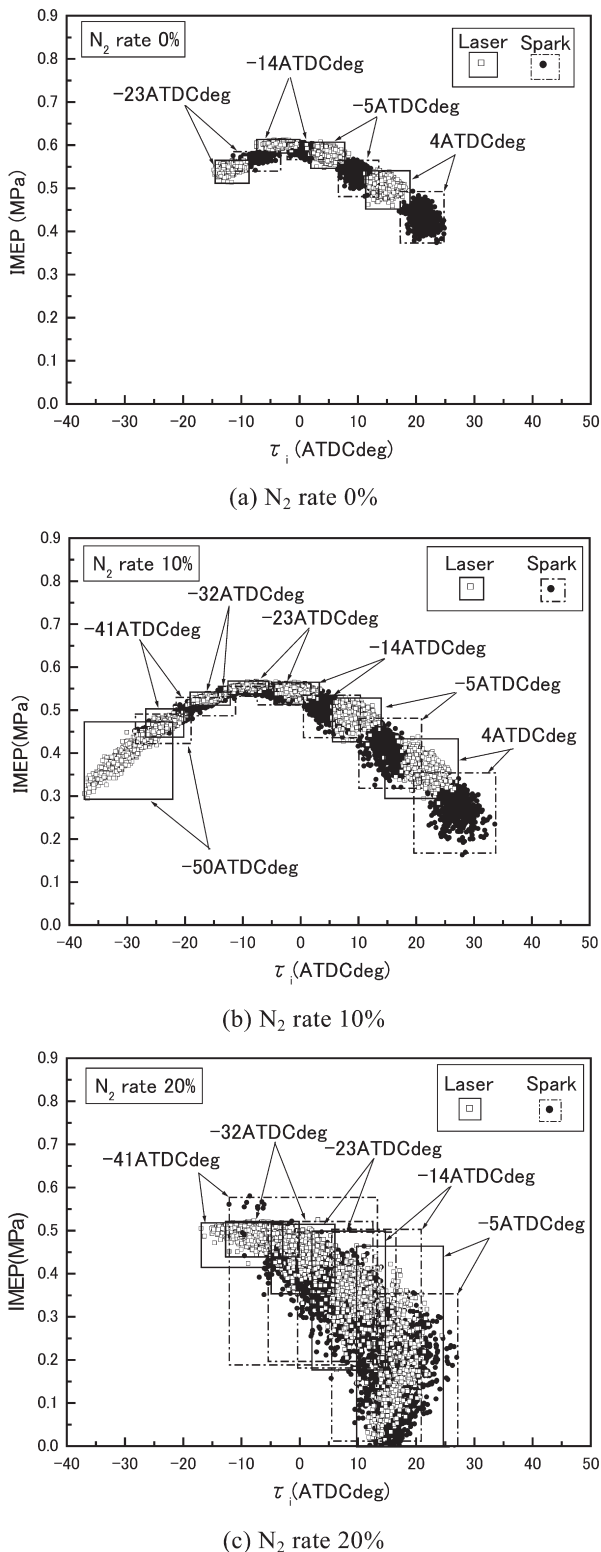


Fig.6 Definition of τ_i .

Fig.7 Relationship between τ_i and IMEP.

低 IMEP 側に推移している。これは希釈率の増加による着火遅れの増加と出力の低下によるものと考えられる。またプロットの分布を見ると、進角側ではレーザーブレイクダウン着火の分布は火花点火に比べてわずかに高 IMEP 側に幅が狭く分布しており差が小さいが、遅角側に

向かうにつれて火花点火では低 IMEP 側へ分布が広がっているように見える。次に希釈率 20% の図を見ると、同一点火方法および同一点火時期での遅角側かつ低 IMEP 側への推移がさらに大きくなり、燃焼状態の悪化により出力、燃焼状態ともに不安定になっていることが考えられる。本希釈率では着火方法によらず点火進角 -50 ATDCdeg および 4 ATDCdeg の条件では運転不安定のため実験が行えず、特に点火進角 -5 ATDCdeg の条件ではどちらの着火方法でも IMEP が 0 MPa のプロットが存在しており失火が発生していると思われる。また、 $IMEP_{MAX}$ 近傍での IMEP の幅は火花点火に比べてレーザーブレイクダウン着火の方が狭かった。

以上より、レーザーブレイクダウン着火と火花点火の IMEP 分布は燃焼開始時期で整理でき、レーザーブレイクダウン着火の方が、 $IMEP_{MAX}$ 近傍では IMEP が高いサイクルが多く燃焼開始時期の変動も小さかった。

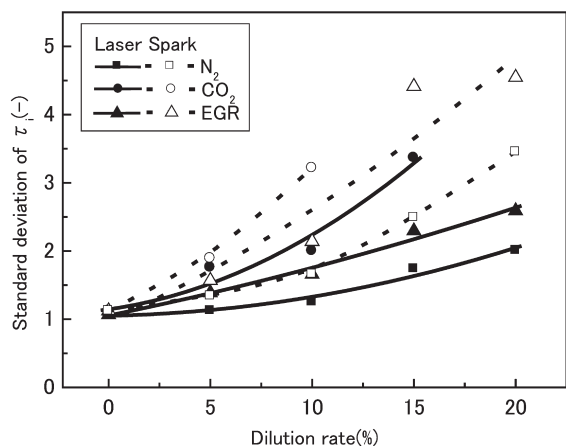
3.5. τ_i 標準偏差

τ_i に対する IMEP の分布は、ガソリンエンジンの理論上基本的には上に凸の形状になる。本実験では希釈率の増加に従って分布する τ_i の範囲が変化していた。この τ_i の位置がより進角側にありその変動も小さくなれば、IMEP 分布のピーク近傍から遅角側でその平均値は大きくなるはずである。そこで τ_i の変動の大きさを把握するため、 $IMEP_{MAX}$ における τ_i の標準偏差を Fig.8 に示す。図中縦軸は τ_i の標準偏差を、横軸には希釈率が示されている。まず、 N_2 におけるレーザーブレイクダウン着火の標準偏差は火花点火に比べて値が小さくなった。着火方法による τ_i の標準偏差の差は、希釈率 0% ではほんのわずかな差であるが、希釈率が増加することで差が大きくなった。この傾向は CO_2 および EGR の条件においても同様であり、同一の点火方法で比較すると N_2 , EGR, CO_2 の順に標準偏差が大きくなっていった。この燃焼開始時期の標準偏差は EGR の場合、EGR 率 0% ではレーザーブレイクダウン着火の方が火花点火より 5.2% 小さく、EGR 率 20% では 2 倍以上小さくなった。燃焼開始時期の変動、すなわち着火遅れ時間の変動が小さいということは最適点火時期における出力の向上や、燃焼が不安定になる高希釈率において出力を安定化できることを意味している。

以上よりレーザーブレイクダウン着火を内燃機関に用いることで、火花点火より着火遅れ時間の変動を低減することができ出力の向上および安定化ができることが分かった。

3.6. 燃焼排出物の排気濃度

不活性ガスを用いた吸気希釈による燃焼排出物の排気濃度への影響を明らかにするため、各希釈率における $IMEP_{MAX}$ での NO_x と THC の排気濃度計測結果を Fig.9 に示す。図より NO_x 濃度は着火方法に依らず希釈率が増加すると低下していき、希釈率が 20% まで増加すると 0%

Fig.8 Standard deviation of τ_1 at $IMEP_{MAX}$.

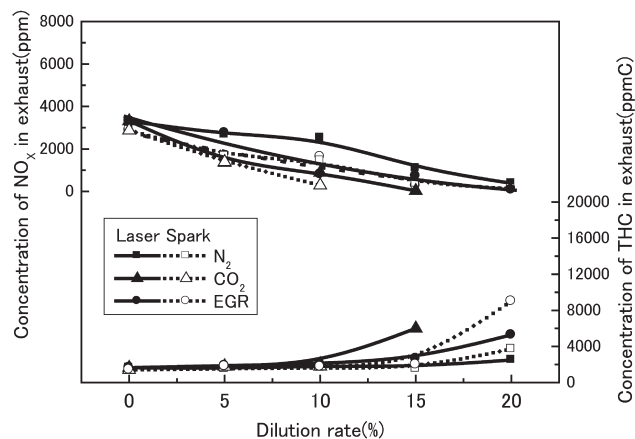
に比べて濃度が 10 分の 1 程度に減少した。希釈率 0 % においてはレーザーブレイクダウン着火の方が火花点火よりも NO_x 濃度が高くなった。これは本実験条件で生成される NO_x が筒内到達温度に依存するサーマル NO_x であり、希釈率 0 % における $IMEP_{MAX}$ が着火方法によらず点火時期 -14 ATDCdeg であるため、レーザーブレイクダウン着火の方が火花点火より燃焼開始時期が早くなり最終到達温度が上昇し NO_x 濃度が高くなったと考えられる。希釈率が 5 % に増加すると希釈ガスに依らず NO_x は低下し、着火方法による差が大きくなった。希釈率 10 % 以降では NO_x 濃度の低下がさらに進み、それぞれの希釈ガスにおける CO_2 は運転限界である希釈率 15 %、 N_2 および EGR は希釈率 20 % で最低値をとった。

次に THC 濃度は、着火方法および希釈ガスによらず希釈率 0 % から 10 % の範囲ではほぼ変化がないが、希釈率が 15 % 以上になると増加した。THC 濃度の増加は比熱比が小さい CO_2 が最も低希釈率の 15 % で見られ、20 % では EGR、 N_2 希釈ともに増加しその値は N_2 と比べて比熱比の小さい EGR の方が高い。これは COV_{IMEP} の結果からも分かるように希釈率が増加することによって比熱比の低い混合気ほどサイクル間の燃焼状態が安定せず、燃料の未燃分が計測されたためだと考えられる。

以上よりレーザーブレイクダウン着火は火花点火に比べて NO_x 排気濃度低減効果の期待できる高希釈率領域で THC 濃度が低いため燃焼が安定していること。また排気中 NO_x および THC 濃度においても、希釈ガスの比熱比で整理でき、比熱比が小さいほど低希釈率で排気中 NO_x 濃度を低減ができるが排気中 THC 濃度が増加することを確認した。

4. 結言

レーザー着火式内燃機関を不活性ガスで希釈し運転させ、筒内圧や熱発生率、 $IMEP$ 、 COV_{IMEP} を点火方法と比較することで以下の知見を得た。

Fig.9 Concentration of NO_x & THC.

- ・吸気希釈による運転は N_2 での希釈が、高希釈率でも $IMEP$ が高く COV_{IMEP} が低くなった。 CO_2 希釈は運転範囲が狭く、EGR は N_2 希釈と CO_2 希釈の間であり、その違いは吸気の比熱比で整理できる。
- ・レーザーブレイクダウン着火には火花点火と比べて圧力の立ち上がりが早く、排気 NO_x 濃度の低減が可能な高希釈率の遅角側においても $IMEP$ が大きく COV_{IMEP} が低いいため運転可能範囲を拡大できる。
- ・レーザーブレイクダウン着火には火花点火と比べて着火遅れ時間の変動を低減するため、最適点火時期における出力が向上する。

謝辞

本研究には、富士重工業株式会社 金子誠氏のご助力とご助言を頂いた。ここに付記して深甚なる謝意を表する。

References

1. Shimazaki, Y., Maeda, Y., *Journal of Society of Automotive Engineers of Japan*. (in Japanese) vol.66:18-27(2012).
2. Watanabe, M., Hotta, E., Tanoue, K., Ushimaru, K., Kuboyama, T., and Moriyoshi, Y., *Japan Plasma Fusion Research*. (in Japanese) vol.89 No.4:229-233 (2013).
3. Ikeda, Y., Nishiyama, A., *Japan Plasma Fusion Research*. (in Japanese) vol.89 No.4: 234-237 (2013).
4. Murase, E., Handa, K., and Hotta, K., *JSME Trans. B*. (in Japanese) 71: 316-321 (2005).
5. Shiraiishi, T., Urushihara, T., *Journal of the Combustion Society of Japan*. (in Japanese) Vol.51 NO.155: 31-39 (2009).
6. J, D, Dale., and A, K, Oppenheim., *SAE Technical Paper Series*. 810146: (1981).
7. T, X, Phuoc., *Combustion and Flame* 122: 508-510(2000).
8. H, Kopecek., E, Wintner., R, Pischinger., G, R, Herdin., and J, Klausner., *ASME paper*: 2000-ICE-316: 1-9 (2000).

9. M, H, Morsy, S, H, Chung., *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 29:1613-1619 (2002).
10. Nakayama, T., Kawahara, N., Tomita, E., and Ikeda, Y., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 74: 1633-1640 (2008).
11. Hayashi, J., Sawanaka, Y., Nakatsuka, N., Okada, T., Akamatsu, F., Seo, T., and Hori, T., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 76: 2242-2248 (2012).
12. Seo, T., Hisatomi, Y., and Mikami, M., *Journal of the Combustion Society of Japan.* (in Japanese) 55: 67-72 (2009).
13. Furui, K., Hayashi, J., Okada, T., Nakatsuka, N., Taira, T., Hori, T., and Akamatsu, F., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 78: 119-129 (2012).
14. Taira, T., Tsunekane, M., Fujikawa, T., Ebina, M., Akihama, K., Inohara, T., Ando, A., Kido, N., and Kanehara, K., *Journal of the Combustion Society of Japan.* (in Japanese) 51: 288-294 (2009).
15. Saito, T., Furutani, H., *Journal of the Combustion Society of Japan.* (in Japanese) Vol.51 No.158: 281-287 (2009).
16. J.E, Heywood., *Combustion Process Characterization, Internal Combustion Engine Fundamentals*, New York, McGraw-Hill: 389-340(1988).