

# 内燃機関の熱効率向上に向けた先進着火技術

## — レーザー着火によるガスエンジンの高度化実証研究 —

高橋 栄一<sup>1\*</sup>、小島 宏一<sup>2</sup>、古谷 博秀<sup>2</sup>

近年の非在来型天然ガス資源開発の拡大に伴い、コジェネレーション等に用いられる天然ガスエンジンが注目されている。その導入普及の促進のためにはさらなる熱効率の向上が重要であり、そのためには過給を組み合わせた燃焼の希薄化が必須である。しかし、従来から用いられているスパークプラグでは、この高圧で希薄な予混合気への着火は困難になりつつある。その様な状況のなか、産総研においてこれまで取り組まれてきた代替着火技術としてのレーザー着火研究を紹介する。レーザー着火によるガスエンジンの希薄安定動作限界の拡大、過給下での安定着火、並びに多点レーザー着火による熱効率の向上の実証研究について解説し、レーザー着火技術の今後の可能性も含めて論じる。

**キーワード:** 天然ガス、希薄燃焼、高過給、レーザー着火、熱効率、コジェネレーション

### Advanced ignition technology for the achievement of high thermal efficiency of internal combustion engine

– A demonstration of laser ignition in natural gas engines –

Eiichi TAKAHASHI<sup>1\*</sup>, Hirokazu KOJIMA<sup>2</sup> and Hirohide FURUTANI<sup>2</sup>

Natural gas engines have been attracting a lot of attention recently due to the development of unconventional natural gas sources. Achieving lean burn with supercharging is necessary to attain high thermal efficiency. Conventional spark plugs face difficulties with ignition because of the high pressure and lean air/fuel mixture. This paper describes studies on laser spark ignition which has been investigated at AIST as an alternative method for the achievement of stable ignition under such conditions. The extension of lean limit and improvement in thermal efficiency are demonstrated, and the possibilities of advanced laser ignition are also discussed.

**Keywords:** Natural gas, lean-burn, supercharging, laser ignition, thermal efficiency, cogeneration

#### 1 はじめに

近年の採掘技術の進展によりシェールガス、コールベッドメタン、メタンハイドレート等の非在来型の天然ガス資源の開発が世界的に急速に進められている。非在来型のガス田を含めた世界の天然ガスの埋蔵量は200年以上に達し、それらは世界各地に分布している<sup>[1][2]</sup>。また、天然ガスは石油等の一般的な液体燃料と比較して、分子中の水素の比率が炭素に対して高く(メタン H:C = 4:1、ガソリン H:C ~ 2:1)、単位発熱量当たりの二酸化炭素放出が少ないクリーンな燃料でもある。さらに、硫黄分が極めて少ないことから排気ガス規制が近年急速に進んでいる船舶用エンジンの燃料としても注目されている<sup>[3]</sup>。したがって、今後エネルギー資源としての天然ガスはますます重要にな

ると予想される。

天然ガスはコジェネレーション(熱電併給、Combined Heat and Power)の燃料としても用いられる。コジェネレーションとは燃料から電気だけではなく熱など2種類以上のエネルギーを利用する形態で、総合的なエネルギー利用効率が高い利点を有する。しかし、2014年に発表された米国エネルギー効率経済協議会(American Council for an Energy-Efficient Economy, ACEEE)から発表された、世界のエネルギー効率に関する調査報告によると、日本はビルの省エネが遅れており、中でもコジェネレーションの導入量が少ないと指摘された<sup>[4]</sup>。

コジェネレーションには燃料電池やガスタービンを用いるものなどさまざまなタイプがあるが、特にガスエンジンを用

1 産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門 〒305-8564 つくば市並木1-2-1 つくば東、2 産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 〒963-0298 郡山市待池台2-2-9

1. Research Institute for Energy Conservation, AIST Tsukuba East, 1-2-1 Namiki, Tsukuba 305-8564, Japan \* E-mail: eiichi-takahashi@aist.go.jp, 2. Fukushima Renewable Energy Institute, AIST 2-2-9 Machiikedai, Koriyama 963-0298, Japan

Original manuscript received December 1, 2014, Revisions received May 11, 2015, Accepted May 18, 2015

いたコジェネレーションは家庭用の小規模なものから事業者用の大規模なものまで含め設置件数が最も多く、発電効率に関しても最新型のガスエンジンの熱効率は 50 %LHV に迫る。これは、希薄燃焼やミラーサイクル等の技術を総合的に用いた結果である<sup>[5]</sup>。

コジェネレーションは電気と熱の両方を利用できるため、総合的なエネルギー利用効率は高いが、現状では熱需要が多い用途に適している。しかし、一般には利便性の高い電気の需要が多く、今後の導入を促進するためには発電の熱効率を高めることが重要な要素の一つである。

## 2 天然ガスエンジンの課題

### 2.1 エンジンの熱効率と技術開発の方向性

ガスエンジンコジェネレーションの導入普及のためには発電の熱効率を高めることが必要である。エンジンが実現しうる最大の熱効率はもちろん熱力学よりカルノーサイクルの効率となる。ガスエンジン等に用いられる実際のレシプロエンジンは不可逆機関であり、よりその動作に近いオットーサイクルを用いて熱効率の振る舞いが説明される。オットーサイクルでは、ピストンが一番圧縮した時に燃料が燃え、ピストンが一番膨張した時に排気が行われると近似している。オットーサイクルにおける熱効率は圧縮比を  $\varepsilon$ 、定圧比熱  $C_p$  と定積比熱  $C_v$  の比率である比熱比を  $\kappa (=C_p/C_v)$  とすると

$$\eta_{th} = 1 - \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{\kappa-1}$$

と表される。この熱効率の式を図1のグラフに表す。図からわかるように、基本的に圧縮比  $\varepsilon$ 、比熱比  $\kappa$  が高いほど熱効率が高くなることわかる。

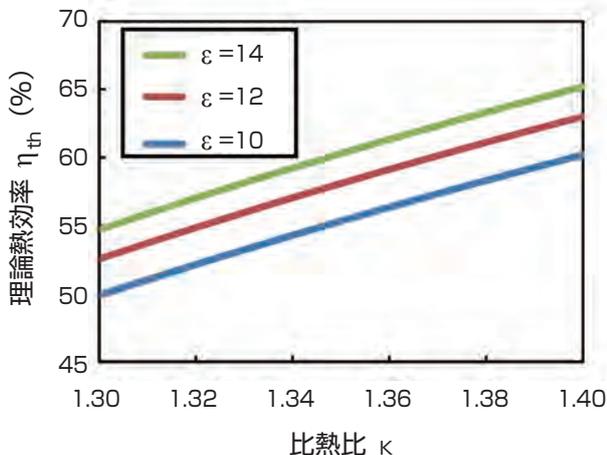


図1 オットーサイクルの比熱比と理論熱効率の関係

圧縮比  $\varepsilon$  に関して、天然ガスは異常燃焼を生じにくい燃料ではあるが、実際は圧縮比を高くし過ぎると、異常燃焼を生じたり、熱損失が大きくなったりするため 14 程度の値に制限される。

一方、比熱比  $\kappa$  は、分子がそれぞれ固有の値を有する。空気を構成する窒素分子、酸素分子はともに 2 原子分子であるため、並進の 3 自由度に加え回転の 2 自由度を有し、室温付近では  $\kappa \sim 1.4$  となる。一方、メタンを含む燃料分子は多原子分子であるためより多くの自由度を有するため 1.3 程度となる。したがって、燃料と空気から構成される予混合気の比熱比はその混合比によって決まり、燃料が薄いほど比熱比を高くすることができる。さらに、比熱比には温度依存性があり、高温において分子の他の自由度へのエネルギー分配が可能になることから比熱比は低下する。したがって、燃焼温度を下げることも比熱比を高く保つために効果的である。

このように、熱効率を高めるために、希薄燃焼、あるいは排気ガスを再び吸気から導入し、酸素濃度を減らし燃焼温度を低下させる EGR (Exhaust Gas Recirculation) 等が用いられる。しかし、そのまま希薄燃焼を行えばサイクル当たりの燃料の導入量を減らすことになり、出力は低下してしまう。必要な出力を得るために、エンジンを大型化すると機械損失等の増大が懸念されるため、通常、空気をシリンダーに送り込む過給が併せて行われる。近年のエンジンにおける圧縮直後の圧力は高いもので 10 MPa (およそ 100 気圧) に迫る。図 2 に近年のガスエンジンに用いられる燃料の当量比と正味出力の関係を示す。当量比  $\phi$  が 1 の時 (ストイキ) に燃料分子と空気中の酸素がすべて反応する化学量論比の混合比となる。当量比を下げる希薄化を

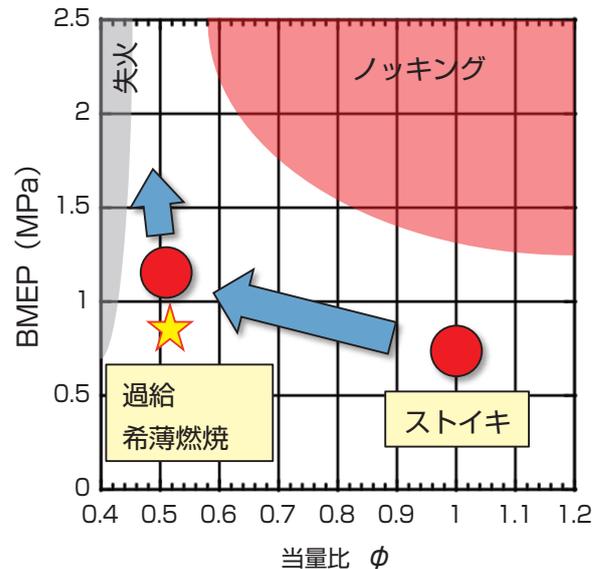


図2 正味出力と予混合気の当量比で表した技術トレンド

進めるとともに、過給を併せて行いエンジンの正味出力を増大させることが技術的な方向性である。正味出力を高めるとノッキングを引き起こしやすくなる一方、希薄化は失火につながる。この、失火とノッキングの間をいかにして進むかが課題であり、着火装置は非常に高い圧力で、希薄で着火しにくくなった予混合気に対しても安定な着火を実現する必要がある。

## 2.2 従来の着火法の問題点：スパークプラグ

前述のように、着火装置の重要性が高まるなか、今日広く用いられているスパークプラグによるエンジンの点火法は100年以上前に発明された方法である。スパークプラグでは、高電圧電極と接地電極間に放電プラズマを形成させることによって、着火を実現している。希薄燃焼の実現に向けてさらなるスパークプラグ放電の改良も行われている。しかし、特にガスエンジンの近年の高過給、希薄燃焼に向かった技術的な方向性の中で、スパークプラグという着火装置に限界が見え始めているとも考えられる<sup>[6]</sup>。

スパークプラグにおける放電プラズマの形成では電極間の電界で加速された電子が雪崩のように数を増やす必要がある。気体中の電子は周囲の中性分子の中の平均自由行程のなかで加速されることで、エネルギーを得る。電子の衝突によりイオン化が生じる。基本的に、数密度が高くなると平均自由行程も短くなることから、十分なイオン化を起こすだけのエネルギーを電子に与えるためには平均自由行程の減少に応じて電界強度を高める必要がある。言い換えれば、放電現象は $E/N$  ( $E$ : 電界強度、 $N$ : 数密度) によってスケールされる。このことは、今後のエンジンの高過給化を考えると、過給圧が高まればそれに伴い放電電圧も高くする必要があるので都合が悪い。それは、必要放電電圧の増大は点火システムを構成するさまざまな部分で絶縁耐力等の問題を引き起こすだけでなく、点火プラグ

そのものの寿命を短くする懸念がある。

## 2.3 代替先進着火技術：レーザー着火

一方、パルスレーザーを着火に用いる研究が海外をはじめ<sup>[6][7]</sup>、旧機械技術研究所時代から産総研で行われてきた。図3に従来のスパークプラグにより着火するエンジンと、このスパークプラグをレーザーブレイクダウンにより代替したレーザー着火エンジンの構成を示す。

このレーザーブレイクダウン着火では、パルスレーザーを、凸レンズを用いて集光し、予混合気を誘電破壊(レーザーブレイクダウン) させることで、プラズマを形成し、着火させる。両者ともに予混合気中に高温のプラズマを形成して着火をもたらしている点においては類似性があるが、そのプラズマ形成機構に大きな違いがあるため、将来のエンジンにおける技術開発の方向性に対して有用性に大きな違いが現れる。

レーザーを集光することによって形成するプラズマの形成機構は図4に示すように、大きく2段階を経る。

まず、集光された高強度レーザー光は、分子の多光子電離を引き起こす。これによって、初期電子がレーザーの集光スポット中に形成される。続いてそれらの初期電子は逆制動放射過程によってレーザーエネルギーを効率的に吸収する<sup>[8]</sup>。これらのプロセスは基本的に数密度が高いほど進むため、高過給エンジンであったほうがレーザーブレイクダウンは容易となる。たびたび、レーザー着火はどこまで高密度化しても着火できるのか?という問いを受けるが、例えば空気よりも100倍以上密度の高い水中でもレーザーブレイクダウンは容易に形成できるが、水中での放電形成には高電圧を要することからも、エンジンの過給圧増大に対しては全く問題がないことがわかる。図5にレーザー着火とスパークプラグ放電による着火における火炎核成長の様子を高速度カメラで計測した様子を示す。上段のレーザー

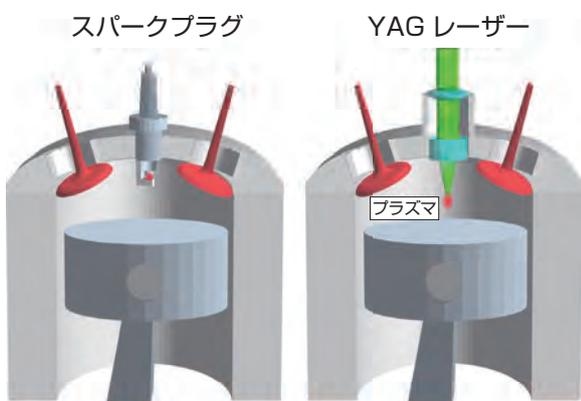


図3 レシプロエンジンにおけるスパークプラグ着火とレーザー着火の比較

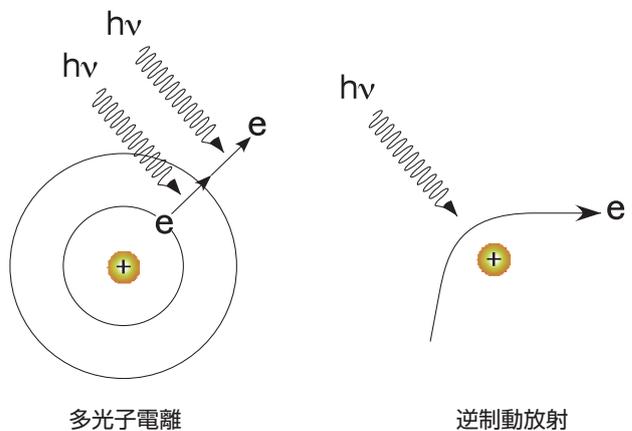


図4 レーザーブレイクダウン形成過程

着火では、最初にドーナツ型の渦が形成され、これが速やかに燃え広がっている。一方、下段のスパーク着火では火炎はなかなか燃え広がっていないことがわかる。これは、電極への熱損失が大きいためである。

レーザーブレイクダウンを用いた着火ではさらに渦流動が形成されこれが保炎構造となる利点を有する。これは、通常のスパークプラグには見られない着火促進機構である。

### 3 レーザー着火エンジンを実用化するためのシナリオ

レーザー着火ガスエンジンが実用化するためには、本着火法の技術的な優位性を示すこと、特に過給を行った高圧状態において着火特性に優れていること、並びにレーザー着火を行った場合の熱効率の向上を示す必要がある。それによって、前にも示したガスエンジンの技術開発の方向性である高過給希薄化のトレンドなかで、従来のスパークプラグに替わる有力な代替着火技術であるかどうか判断できる。また、熱効率の改善ポイント数から削減できる燃料費を見積もることができ、したがって、この先進着火技

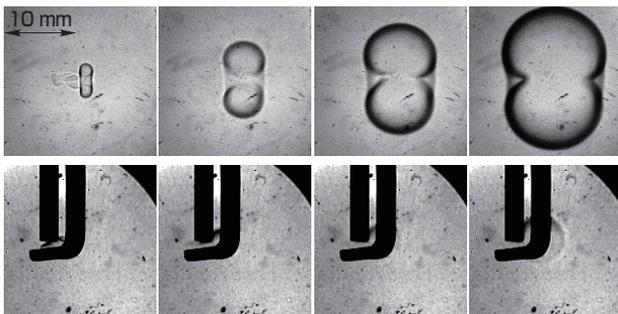


図5 レーザー着火とスパークプラグ放電による着火の火炎核成長の様子

術への投資が回収できるか否かの評価が可能となる。

一方、レーザー装置の小型化、安定化および低コスト化の見通しもレーザー着火法の導入普及には重要な要素である。レーザーの長期安定性は、コジェネレーションは何か月にも渡って連続で運転することから必要不可欠である。コジェネレーション用等のガスエンジンは大型であるため、レーザー装置導入にかかるコストが高額であっても燃料費の削減で回収できる可能性が高いが、低コスト化できれば導入普及の促進に寄与することが期待できる。

図6にこれまで産総研で行われてきたレーザー着火技術、ガスエンジン技術、およびレーザー技術の進展がどのように構成されて今後の過給希薄燃焼ガスエンジンの着火技術として実用化される見通しを表す図を示す。以下の章ではそれぞれの個別技術の説明、実証実験の詳細について述べる。

### 3.1 着火用小型レーザーデバイスの開発

産総研ではレーザー着火研究を旧機械技術研究所の時代から進めていた。紫外レーザーを用いた光化学過程を用いる着火法<sup>[9][10]</sup>や今回の中心的な技術であるレーザーを集光して形成したブレイクダウンによる着火も行われてきた<sup>[11][12]</sup>。産総研にてレーザー着火のスパークプラグに比べた基本的な優位性が示されたが、レーザー装置そのものに実用化に向けて、いくつかのイノベーションが必要とされていた。それは、レーザーは精密機器なため、不安定で耐久性に劣り、高価であるという懸念である。そのような装置をエンジンの着火に用いるためには、発振効率の向上、並びに連続発振回数の増大が不可欠であった。連続発振回数に関して、この課題は、レーザーの励起に用いられてきたフラッシュランプをレーザーダイオードに置き換えるこ

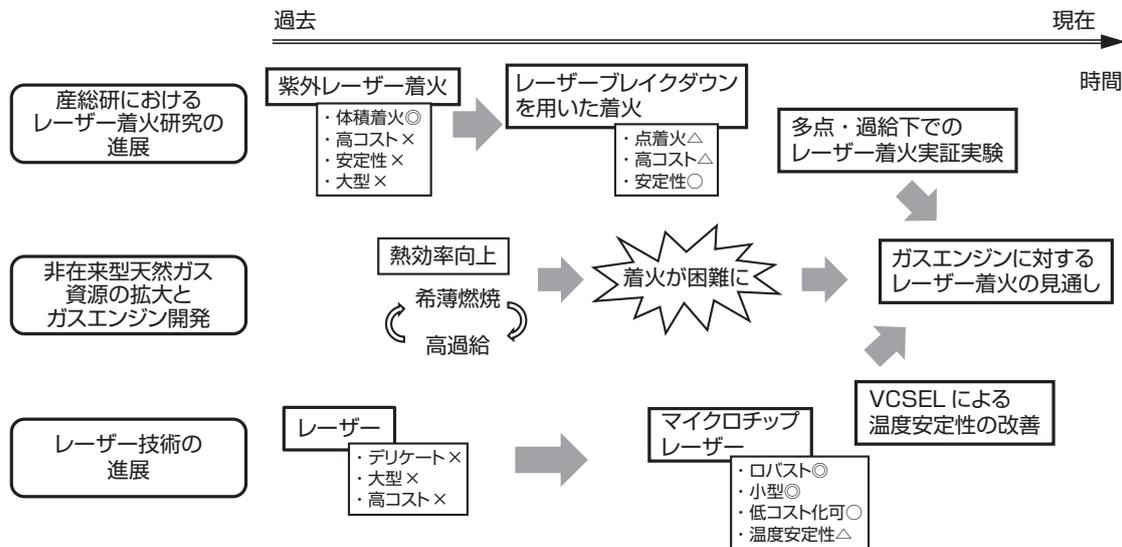


図6 レーザー着火ガスエンジンの実用化に向けた各技術の時間的進展を示す構成スキーム

とによって解決された。発振効率も1%以下であったものが数10%にも到達している。

次に重要な長期安定性とコストに関しては、光学素子を一体化することによって解決への道筋がつけられた<sup>[13][14]</sup>。レーザー媒質は結晶成長させたものを用いていたが、焼結させて形成するセラミックであっても粒界が光散乱を生じない程に緻密化させることによってレーザー媒質として使用可能なことが示された。さらに分子科学研究所の平<sup>たいら</sup>等らはレーザー媒質とジャイアントパルス形成のためのQスイッチ用過飽和吸収体、ミラーを一体化したマイクロチップレーザーを製作した。図7にそのマイクロチップレーザーを示す。スパークプラグと比べても全く遜色のない大きさが実現されている。このような、小型化、一体化というイノベーションが実現されて、レーザー着火に注目が集まることとなった。



図7 マイクロチップレーザー<sup>[14]</sup>

表1 供試エンジンの諸元

ベースエンジン	NFD170
エンジンタイプ	4ストローク
ボア×ストローク (mm)	102×105
排気量 (cc)	857
圧縮比	12,14
燃料	メタン
回転数 (rpm)	1200
点火時期	MBT
スワール比	2.15~2.45
耐圧 (気圧)	80

### 3.2 高過給ガスエンジンにおけるレーザー着火の優位性の実証

ガスエンジンの高過給希薄化が進む中で、レーザー着火の導入を促すためにはスパークプラグに比した優位性を実証する必要があった。ここでは、産総研と三井造船との共同研究の中で行われた実証実験の結果を紹介する。

図8に本実証実験に用いたガスエンジンのレイアウトを示す。ディーゼルエンジンを改造したガスエンジンを用い、コンプレッサーからの圧縮空気を導入して過給実験を実施した。供試エンジンの諸元を表1に示す。

エンジンの耐圧力は80気圧であったため、吸気圧力は最大で1.8気圧程度を用いた。図9はその実証実験の主な結果である、当量比に対する図示出力（機械損失を含まない出力）である。横軸が燃料の当量比を表し、左側に行くにしたがって希薄な燃料を用いていることに相当する。縦

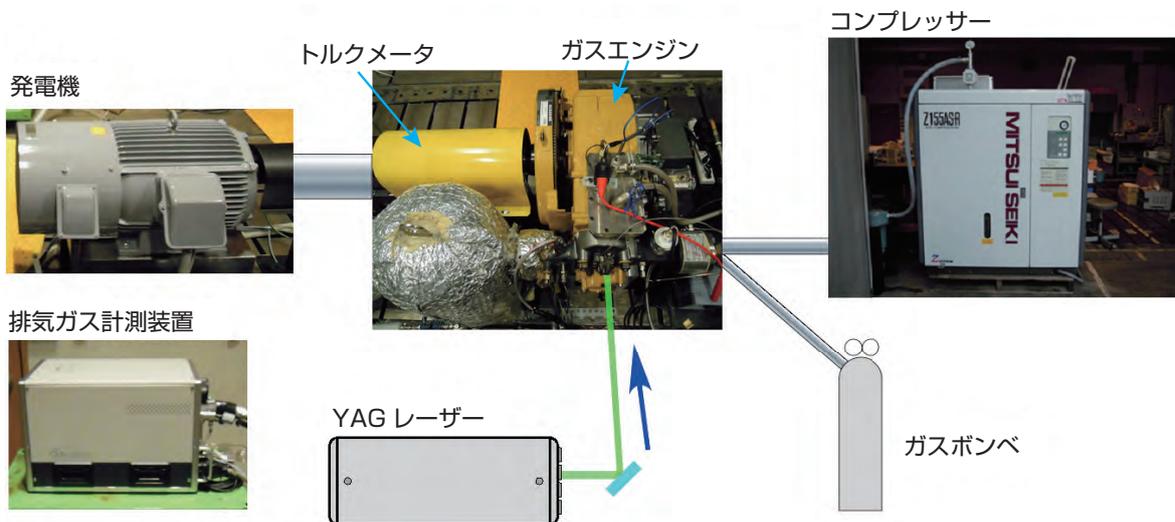


図8 ガスエンジン実証実験レイアウト

軸はエンジンからの出力を表している。図9の四角で表される点がスパークプラグによる結果、丸がレーザーによる着火を示している。まず、無過給状態を表す白抜きの点に着目すると、レーザー着火はプラグ着火に比べてより希薄な当量比0.6以下の領域でも高い出力を保っていることがわかる。次に過給を実施すると、赤の四角で表されるスパークプラグによる実験点は急速に右側にシフトしていることがわかる。これは、過給した状態ではスパークプラグを用いて希薄予混合気に着火ができなくなったことを表している。

一方、レーザー着火は過給した状態でも安定な着火を実現し、用いたシステムでの限界となる過給圧1.8気圧でも安定な着火ができることが示された。

### 3.3 レーザー多点着火によるガスエンジンの熱効率向上の実証

さらなるレーザー着火による熱効率の改善を実証するために、同じガスエンジンを用いて、レーザーによる2点着火による効果を検証した。2点レーザー着火による効果として、図10は出力変動、および図11に熱効率に対する結果を示す。図10では横軸の当量比において、スパークプラグを用いた着火では、当量比が0.63以下では着火が不安定となる結果、出力変動を表すCOV of IMEPが急速に増大している。赤で示すレーザー着火を用いることで、希薄域にまで安定運転領域が広がっている。さらに、レーザーを2点で着火することにより安定領域を拡大することができた。

同様な改善効果は熱効率でも見られる。図11の図示熱

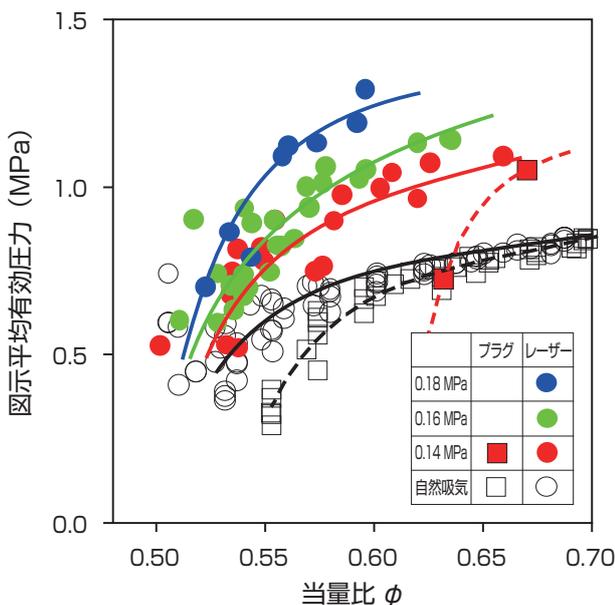


図9 過給条件における当量比と図示平均有効圧力

効率(機械損失を含まない効率)の当量比依存性を見ると、スパークプラグ着火でも希薄化が進むにつれて熱効率が增大しているが、当量比0.63程度で着火の不安定化に伴い、熱効率も急激に低下した。一方、レーザー着火を用いた場合には、より希薄化を進めることができるため、熱効率を改善できることを示した。スパークプラグを用いても安定に着火できる当量比0.7よりも濃い予混合気においてもレーザー着火がスパークプラグよりも高い熱効率を実現している理由は電極への熱損失の有無に起因する初期火炎核の形成速度にある。一方、火炎核が形成されてから筒内全体が燃焼する時間には差は見られなかった。さらに、2点レーザー着火では、1点着火よりも火炎面積が増えているため、火炎核形成後の燃焼時間も短縮され、結果として熱効率の向上につながった。

### 3.4 導入普及に向けた先進レーザー着火法の探求

今後、レーザー着火技術が導入普及するために必要な技術について、図12に示す。比較的大型なガスエンジンへの導入を目指すとしても、レーザー装置のコスト低減が依然として最重要課題になると考えられる。ガスエンジンのサイズはさまざまであり、また各気筒にレーザーを配置

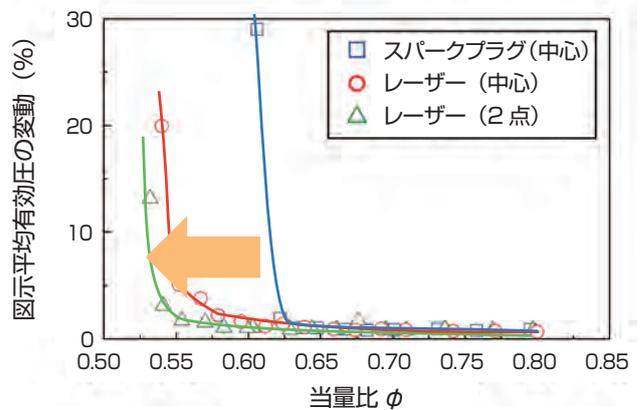


図10 図示平均有効圧力変動の着火法依存性

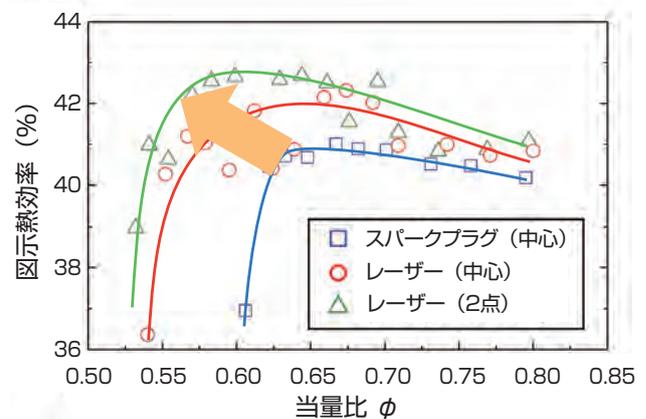


図11 多点レーザー着火による図示熱効率の向上

するか、あるいは分配できるかによってコストは大きく異なるが、概ね現状の数百万円から何桁も下がることが求められる。前述のマイクロチップセラミックレーザーは大量生産に適しており、レーザー着火ガスエンジンのマーケットが立ち上がればレーザー装置の価格が飛躍的に下がり、レーザー着火の導入、普及が相乗効果的に促進される可能性があるが、やはり着火用レーザー装置への要求仕様をいかに下げるか、特にエネルギーへの要求を下げて、レーザーのコストを下げ、耐久性を上げることが重要となる。また、レーザー着火を用いた希薄限界をさらに拡大することも必要である。それらのためには基礎に立ち返り、再びブレイクダウンプロセスに関して検討する。

レーザーブレイクダウンプロセスは前述したように、多光子吸収とそれに続く逆制動放射によるエネルギー吸収によって引き起こされるが、多光子吸収過程はレーザー光の集光強度  $I$  の累乗の関数であるため、ブレイクダウンの形成は集光強度に強く依存する。マイクロチップレーザーでは、過飽和吸収体による Q スイッチ動作で出力されたジャイアントパルスのパルス幅がサブナノ秒と短いため、尖頭値が高くなる。着火に必要なエネルギーはマルチパルスを入射することによって得ている。一方、一般的なナノ秒のパルス幅を有するレーザーではパルスエネルギーは着火に十分な数十 mJ を容易に得られる反面、多光子吸収の制限から、レーザーエネルギーの利用効率は高くない。ここでは、それら問題の解決につながることを期待した先進的なレーザー着火技術に向けた基礎的な取り組みを紹介する。

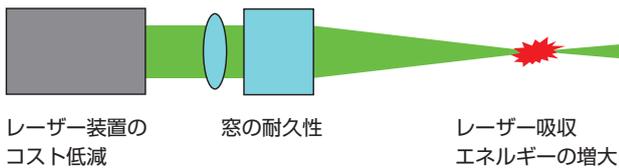


図12 レーザー着火技術の発展に必要な技術

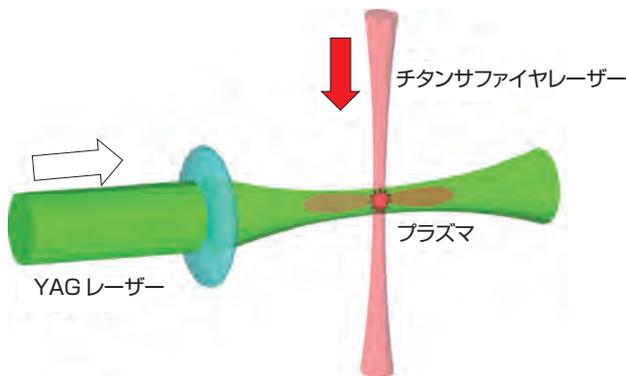


図13 初期電子を供給したYAGレーザーのブレイクダウン過程

レーザーブレイクダウン過程における多光子吸収過程と逆制動過程を分離するため、初期電子を任意の時間空間に供給しその影響の評価を行った。初期電子の供給のためにはフェムト秒のパルス幅を発生できるチタンサファイヤ (TiS) レーザーを用いた。用いたフェムト秒レーザーはパルス幅が極めて短い(今回は 150 fs) ためパルスエネルギーが 100  $\mu$ J 程度でも尖頭値は 1 GW に達し、集光することによって着火は引き起こさない微小ブレイクダウンを引き起こすことができる。このフェムト秒レーザーを YAG レーザーに交差させて入射することで影響をみた。図 13 にその実験配置を示す。YAG レーザーをレンズで集光する軸上にチタンサファイヤ (TiS) レーザーを交差させて入射している。

すると、図 14 に示した YAG レーザーの入射エネルギーに対する吸収エネルギーの結果からわかるように、YAG レーザーだけでは今回の実験では 35 mJ 程度の入射エネルギーがないとブレイクダウンを形成できなかったものが、初期電子さえ供給すればレーザーのエネルギーを効果的に吸収させることができることがわかる。TiS レーザーと YAG レーザーを同時に照射した実験では、観測された左端の数ミリジュールのエネルギーであっても着火させることができた<sup>[15]</sup>。

さらに、図 15 にそのブレイクダウン過程の高速度カメラを用いた計測を示す。時間は左から右に 5 ナノ秒間隔で撮像されている。左端の画像に YAG レーザーの集光付近のビームを、その中心に TiS レーザーで初期電子を供給した。ブレイクダウンを生じない強度の YAG レーザーであっても

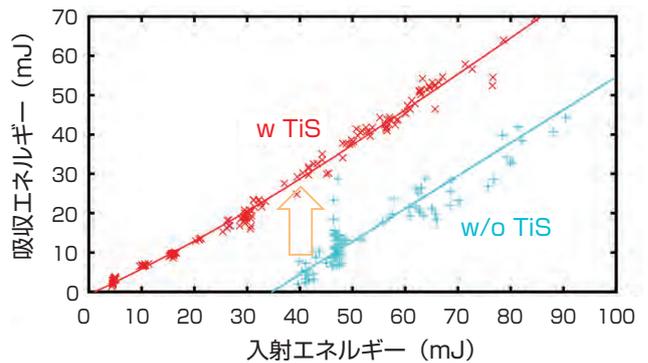


図14 YAGレーザーの入射エネルギーに対する吸収エネルギーのTiSレーザーの有無による影響



図15 初期電子供給ブレイクダウン過程

フェムト秒レーザーによりわずかに電離ポイントを生成することでそこを起点にしてブレイクダウンが始まっている。さらに、前後に電離波が伝搬していることがわかる。電離波の伝搬速度はおおよそ  $10^5$  m/s と評価された<sup>[16]</sup>。

この様に、ナノ秒レーザーによるレーザー着火は初期電子を供給することで飛躍的に必要エネルギーを低下させることが可能であることがわかった。TiS 無しの YAG レーザーによるブレイクダウンが始まるしきい値エネルギーを超えても吸収エネルギーが TiS を用いた場合の線に収束していないことは、言い換えれば、このように効率的にレーザーエネルギーをプラズマに吸収させなければ多くのレーザーエネルギーが吸収されずに失われるため、希薄限界が制限されている可能性が高い。もちろん非常に複雑なフェムト秒レーザーを実エンジンの着火に用いることは現実的ではないので、簡易に初期電子の供給法を考案する必要がある。可能性としては短波長に変換したレーザー光を組み合わせる方法等を想定している。

また、図 12 に示したレーザー着火技術の発展に必要な技術の一つとしての窓の耐久性に関する検討も不可欠である。産総研のこれまでの研究ではあまり見られていないが、窓にすすやデポジットが蓄積して光の透過率が減少してしまう例が報告されている。一方、そのすすを比較的高いパワー密度のレーザー光を導入することによって焼き切るセルフクリーニング効果を示した実験、あるいは窓の温度を高く保つことで防ぐ実験結果も報告されている。この窓の曇りに関しては燃料の組成やエンジンオイルの影響が考えられるが、形成機構やその抑制方法が確立しているとは言い難いため、系統的な研究を行う必要があると考えられる。

この論文ではガスエンジンに対する着火法としてレーザー着火の可能性について論じたが、同じ内燃機関として自動車がある。自動車の市場は極めて大きく導入された場合のインパクトは極めて大きい。レーザー装置に求められるコスト、サイズ、安定性への要求もより高い。近年、励起用レーザーに環境温度によって発振波長の変化が小さい VCSEL を用いた可能性が示された<sup>[17]</sup>。したがって、コージェネレーション等のガスエンジンにおいてレーザー着火法が導入されることで、次第にコストが低下し、また別の市場が開拓されることで徐々に普及していくことを期待したい。

#### 4 まとめ

レーザー着火は超高压状態での着火の優位性から、天然ガスを燃料とする過給希薄燃焼ガスエンジンにおいて非常に有望な着火法である。これまでのレーザー装置そのものに関する小型化、高安定化に関するイノベーションもその実現性を後押ししている。そのような状況の中で産総研

では過給ガスエンジンにおけるレーザー着火のスパークプラグ着火に対する優位性、多点レーザー着火による熱効率の向上を実証してきた。レーザー着火が今後飛躍的に導入されるためには依然としてレーザー装置のコストが重要となることは明らかであり、その低減のために、単純にパルスレーザー光を集光するのではなく、レーザーブレイクダウン、着火プロセスといった基礎に立ち返った新たな可能性に関する研究も進めていく計画である。

#### 参考文献

- [1] BP Statistical Review of World Energy June 2013: [http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/statistical-review/statistical\\_review\\_of\\_world\\_energy\\_2013.pdf](http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/statistical-review/statistical_review_of_world_energy_2013.pdf), Accessed 2014-12-01.
- [2] IEA, Golden Rules for a Golden Age of Gas, 2012: [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2012\\_GoldenRulesReport.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2012_GoldenRulesReport.pdf), Accessed 2014-12-01.
- [3] International Maritime Organization: <http://www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Default.aspx>, Accessed 2014-12-01.
- [4] R. Young, S. Hayes, M. Kelly, S. Vaidyanathan, S. Kwatra, R. Cluett and G. Herndon: The 2014 International Energy Efficiency Scorecard, American Council for an Energy-Efficient Economy, July 2014 Report Number E1402, (2014).
- [5] 一般財団法人コージェネレーション・エネルギー高度利用センター: [www.ace.or.jp/](http://www.ace.or.jp/), 閲覧日2014-12-01.
- [6] G. Herdin, J. Klausner, E. Wintner, M. Weinrotter, J. Graf and K. Iskra: Laser ignition – a new concept to use and increase the potentials of gas engines, ICEF2005-1352, 673-681, ASME, (2005).
- [7] J. Dale, P. Smy and R. Clements: Laser ignited internal combustion engine - an experimental study, *SAE Technical Paper* 780329, (1978).
- [8] L. J. Radziemski and D. A. Cremers (eds.): *Laser-Induced Plasmas and Applications*, Marcel Dekker, Inc., New York (1989).
- [9] H. Furutani, F. Liu, N. Iki, J. Hama and S. Takahashi: Observation of flat-ignition of  $H_2-O_2-O_3$  mixtures with excimer laser, *archivum combustionis*, 20 (1-2), 13-18 (2000).
- [10] T. Saito, S. Miura, H. Furutani, S. Takahashi and J. Hama: The effect of surplus O radicals on the ignition of a  $CH_4$ -air mixture, 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA2001-1073 (2001).
- [11] 齊藤 剛, 三浦 聡, 古谷 博秀, 高橋 三餘, 濱 純: 急速に圧縮されたメタン・空気予混合気のArFエキシマレーザーによる着火に関する研究 (熱工学, 内燃機関, 動力など), *日本機械学会論文集B編*, 69 (680), 1009-1016 (2003).
- [12] 齊藤 剛, 古谷 博秀, 高橋 三餘: レーザーブレイクダウンを応用した最小点火エネルギー計測に対するレーザーパルス幅の影響 (熱工学, 内燃機関, 動力など), *日本機械学会論文集B編*, 73 (727), 887-893 (2007).
- [13] H. Sakai, H. Kan and T. Taira: >1 MW peak power single-mode high-brightness passively Q-switched  $Nd^{3+}$ : YAG microchip laser, *Optics Express*, 16 (24), 19891-19899 (2008).
- [14] N. Pavel, M. Tsunekane and T. Taira: Composite, all-ceramics, high-peak power  $Nd:YAG/Cr^{4+}:YAG$  monolithic micro-laser with multiple-beam output for engine ignition, *Optics Express*, 19 (10), 9378-9384 (2011).
- [15] H. Kojima, E. Takahashi and H. Furutani: Breakdown plasma and vortex flow control for laser ignition using

a combination of nano- and femto-second lasers, *Optics Express*, 22 (101), A90-A98 (2014).

- [16] H. Furutani, K. Kawana, N. Shimomura, M. Nishioka and E. Takahashi: Influence of preliminary electron feeding on breakdown of air by laser, *Proc. ASSP 2009*, -MB20 (2009).
- [17] K. Iga: Surface-emitting laser – its birth and generation of new optoelectronics field, *IEEE. J. Select. Topics in Quant. Elec.*, 6 (6), 1201-1215 (2000).

## 執筆者略歴

高橋 栄一（たかはし えいいち）

1994年筑波大学大学院博士課程物理学研究科修了。博士（物理学）。1994年電子技術総合研究所入所。レーザー核融合に関する研究に従事。2009年よりレーザー着火に関する研究を始めた。レーザー着火を含めたプラズマによる内燃機関の熱効率向上技術に取り組んでいる。この論文における多点レーザー着火による熱効率の向上、およびレーザーブレイクダウンプロセスに関する基礎研究を実施した。



小島 宏一（こじま ひろかず）

2012年9月京都大学大学院エネルギー科学研究科博士課程修了。2012年10月産総研ボスドク、2013年4月産総研に入所。専門はエンジン燃焼であり、現在は燃焼研究を核とした水素キャリアの高効率製造・利用に関する研究に取り組んでいる。この論文においてはYAGレーザーとTiSレーザーの組み合わせによるブレイクダウンについて検討した。



古谷 博秀（ふるたに ひろひで）

1992年、筑波大学大学院博士課程を修了後、産総研の前身である工業技術院機械技術研究所に入所。これ以来、レーザーによる着火燃焼制御技術の研究に携わってきた。主にレーザーを使う側の燃焼の研究に力を注いできた。今後、レーザー着火の技術が世に出るためには、これまでやってきた燃焼とレーザーの発展の両方が両輪となり進んでいく必要があると考えている。この論文において、特に過給エンジンにおけるレーザー着火の優位性に関する実証実験を実施した。



## 査読者との議論

### 議論1 全体

コメント（矢部 彰：新エネルギー・産業技術総合開発機構）

過給、かつ、希薄燃焼が今後のガスエンジンの技術動向である点を示し、それに対して、既存のガスエンジン用スパークプラグよりも、過給希薄燃焼領域の着火を可能にできるという点で、レーザー着火の可能性を示し、実験的にも着火特性・図示出力を向上できることを実証できた点で、また、レーザー着火の有効性・特性を広く体系的に記述できている点で、さらには、課題に対するソリューション提供をしている点で、シンセシオロジーにふさわしい論文であると評価できる。

コメント（新納 弘之：産業技術総合研究所）

この研究は、レーザー着火技術の内燃機関の熱効率向上に適用す

ることにより、スパークプラグを代替するレーザー着火研究の新たな展開を目指す構成学的な取り組みであり、シンセシオロジー論文にふさわしい研究である。また、その技術的内容の水準は高い。

### 議論2 研究推進の時系列な整理

コメント（新納 弘之）

各節において個々の技術課題について詳しくかつわかりやすく記述されていますが、研究を進められた時系列展開の中では、萌芽の段階から各種の技術・設備、他分野専門家（人材）等々が加わり、大きく発展してきた経緯があると思います。そこで、ブレイクスルーやセレンディビティーも加えて、過去～現在～将来にわたる構成学的な「構成方法」をスキームにして図示していただければ、読者の理解を大きく助けることになると思います。ご検討ください。

回答（高橋 栄一）

ご指示いただいたように、過去から現在に至る技術の進展を表す構成方法に関する図6を示しました。ガスエンジンの課題に対して、産総研の取り組みとレーザー技術の進展がブレイクスルーをもたらしたことをご理解いただければと思います。

### 議論3 熱効率の着火法依存性

コメント（矢部 彰）

スパークプラグの希薄燃焼用の改良は今後も研究されるであろうし、どこまでの希薄燃焼を実現できるかは、今後の研究に依存するところであり、熱損失が少ないであろうこと、渦流による保炎機構が有効であることが、レーザー着火がスパークプラグ着火に対して技術的にどこまで優位に働くかは定量的には推定できないと思われる。

この論文の論理展開上、以下の点に対するメカニズム説明を入れることが望ましいと思われます。図11において、当量比0.7以上の所では、スパークプラグ、レーザー、2点レーザーとも図示熱効率は同じ線になるのではないかと。差が出る可能性があるのならば、その理由・メカニズムが記述されるべきでしょう。また、2点着火の方が1点着火より効率が上がる理由も、定性的でも良いので同様に記述されることが必要です。

回答（高橋 栄一）

ご指摘の通り、希薄予混合気に対してスパークプラグ着火を改善する研究も行われており、近年では、気流により放電を弧の形にさせることによって、レーザー点火と同様に電極からの熱損失を防ぎ、着火性能を向上させた結果も報告されております。しかし、今後のガスエンジンにおける過給圧力増加に対しまして、レーザー点火とスパークプラグの性能においては論文中に示しました通り、形成方法が物理的に異なるため、レーザー着火には確かな優位性があるものと思われま

す。図11におきまして当量比が0.7以上の濃い予混合気においてはスパークプラグとレーザーが漸近するのではないかとこのことですが、我々が燃焼質量割合の時間変化を調べたところ、当量比が0.8であっても初期火炎核の形成が、レーザー着火の方がスパークプラグよりも早く、その結果が熱効率の差につながっていると考えております。一方、レーザー点火の2点と1点の差においては、幾何学的に2点と1点の点火では火炎面の面積が2倍になることから、初期火炎核の形成時間に引き続く火炎伝播時間における燃焼時間短縮効果が熱効率の差をもたらしたと考えております。それらメカニズムの説明をこの論文に追記いたしました。

### 議論4 レーザー着火技術研究の発展

コメント（新納 弘之）

レーザー着火技術研究が今後大きく発展するために必要な周辺技術や研究分野について考察を行ってください。上記議論2でのシナリ

オと比較して、現状技術とのギャップとそのギャップを埋めるための今後の研究課題をもう少し詳しく記載してください。また、この内容を図表で整理されるとよりわかりやすくなると思います。

回答（高橋 栄一）

レーザー着火技術が今後大きく発展するために必要なことは、やはりレーザー装置のコストの低減と考えられます。図12を加え、研究課題について明示するとともに、基礎に立ち返って着火プロセスを考察し、レーザーエネルギー吸収率を飛躍的に増大させるブレイクダウンプロセスについて示しました。

#### 議論5 レーザー着火技術の普及拡大

コメント（新納 弘之）

レーザー着火が今後飛躍的に導入されるためには、レーザー装置

のコストが重要であるとの指摘ですが、そのコストがどの程度になれば、どの内燃機関システムに普及するのか、その見込みを記述してください。また、そのほかに普及するための課題はありませんでしょうか。あれば、同様に議論してください。

回答（高橋 栄一）

コストに関しまして、コジェネレーションのガスエンジンもさまざまであり、また各気筒に1台ずつレーザーを設置するのか、あるいはレーザー光を分割するのかが大きく異なるので一概には言えませんが、現状の数百万円から数十万、あるいは数万の桁に下がることが一つの目安と思われます。自動車に導入するためには数千円の桁とも言われております。また、その他の普及に向けた課題としてはレーザー入射窓に曇りが生じる場合があることへの対処が課題と考えられます。コストの目安、窓の耐久性に関しまして議論を加えました。