

〔論 文〕

# エンジンの燃焼に及ぼす放射性セラミックス 触媒による励起作用の影響

渡邊 孝司\*

## Effects of Excitation Phenomenon by a Radioactive Ceramics Catalyst on Engine Combustion

Takashi WATANABE

### Abstract

It is known that introducing an electric field, magnetic field, radiation, etc. to the flame advances the combustion characteristics of engines and boilers in such ways as increasing the size of the flame, shortening the combustion period, increasing combustion efficiency and reducing emissions. This study examines the results of previous experimental research on excitation of reformed fuel with the goal of finding practical effects of these combustion phenomena in terms of increasing fuel consumption, as well as the reduction of emissions and environmental load. Irradiation of the reformed fuel was achieved by passing it through gaps in a radioactive ceramic item containing Radium, Thorium etc. Results indicate that engine combustion improved due to a large amount of OH·CH radicals, which were generated in the field of combustion.

**Key Words** : excitation phenomenon, combustion, engine, boiler, reformed fuel, OH·CH radicals, radiation, fuel catalyst

### 1. まえがき

第一次（1973）と第二次（1979）の相次ぐオイルショックにより、当時石油系燃料の高騰が段階的に続き自動車用燃料のガソリン、軽油等の燃料消費率の低減が強く要求されていた。当時、久留米工業大学の内燃機関研究室にベンチャー企業から持ち込まれたセラミックをガソリン機関とディーゼル機関の燃料改質に試用したところ、数パーセントの燃費と排気ガス低減、特にディーゼル機関の排気黒煙の大幅な低減が見られ、その原因究明をすることにした。

「励起作用」とは原子や分子の再外殻にある電子が外部からの電場、磁場や放射線などのエネルギーによって、高エネルギーの軌道へ移行して、その後、安定状態に戻るが、このとき光、電子やイオンなどを放出することを言う。したがって、放射性希土類鉱石を用いて燃料を改質する方式は、励起作用の一つである。

以来、24年間に亘って実用化支援をする傍ら、燃費低減の原因について研究<sup>(1)・(11)</sup>を実施してきた。本技術の応用改質器は約10年前から国内外で徐々に認知され、大型トラックはもとより2006年と2007年にNEDO18、19年度第一次エネルギー使用合理化支援事業の補助金申請が承認され、12隻の大型フェリーに採択された。さらに、本応用改質器は平成20～23年度に国土交通省の「内航運行効率化・高度化調査事業」、「離島航路効率化・利便性調査事業」や「海上交通低炭素化促進事業」にも採択され72隻余の船舶に補助金が給付された。このような技術の発明<sup>(3)・(5)</sup>に基づく国内外の販売実績と開発技術に際して、平成23年度発明協会関東地方発明表彰、発明奨励賞「セラミックの放射による内燃機関の性能改良」（2011）を受賞することができた。筆者らはセラミックスを用いた空気触媒による励起作用については、すでに「エンジンの燃焼に及ぼす空気負イオンによる励起作用の影響<sup>(12)</sup>」を公表しているが、ここでは必要に応じて空気触媒と燃料触媒の励起作用について比較記述する。

したがって、本技術の発明、開発、実用化に至る25年間のまとめとして、内燃機関や外燃機関の燃焼における励起現象として捉え、実車台上試験を実施して効果を確認し、その原因について過去の実験結果、燃料着火性試験と噴霧燃焼火炎可視化実験結果を基に考察をしたので報告する。

\*久留米工業大学名誉教授  
平成26年12月15日受理

## 2. 燃焼に及ぼす励起作用

### 2.1 励起作用の歴史と概要

火炎が導電性をもっていることは公知の事実であり、シリンダ内の火炎速度の検出にはイオン電流が利用されており、本技術の火炎速度の検出<sup>(5)(6)</sup>にも応用した。燃焼に及ぼす励起作用については、火炎に電場を与えると火炎形状が変化して燃焼速度も上昇することは、1924年以降88年間に亘り多くの研究者によって観察、報告されてきたが、原理については未だ完全に解明されていない。燃焼に及ぼす励起作用の歴史と研究の概要を表1に示す。これらの研究の中で先駆的な研究者は Malinowski et al.<sup>(13)</sup>で、1924年に同心円管内の燃焼速度が電場の付与により増加することを示している。以来、Guenault et al.<sup>(14)(15)</sup>、Calocate et al.<sup>(16)</sup>、や Kono et al.<sup>(17)</sup>が、電場により予混合火炎の燃焼速度や噴流予混合火炎の安定性を向上させた例を報告している。

また、国内では1976年に Asakawa<sup>(18)</sup>が「火炎に電場を与えると燃焼が促進する。」と *Nature* に発表し、この効果は “Asakawa Effect” と呼ばれて当時、世界中に名をとどろかして有名である。さらに、浅川<sup>(19)</sup>は1987年に“浅川効果”の現象をより解明し燃焼の場に電場をかけると火炎形状が変わり、燃焼速度も変化することを観察し、また、燃焼、熱伝達、蒸発促進や植物の成長促進への応用についても詳述している。最近では1998年に Fujita et al.<sup>(20)</sup>が燃焼の場に磁場を付与することにより火炎への酸素供給が増大し、全燃焼に要する時間が短縮することを示した。燃焼に及ぼす励起作用は、ほとんどが電場と磁場の影響であり、ロシア、欧州と日本においての研究の概要はほぼ類似の現象である。すなわち、燃焼の場に電場や磁場を付与することにより、燃焼速度の増加、火炎面積の増加、予混合火炎の安定性の向上、燃焼の促進、熱伝達の促進、酸素供給の増大や燃焼時間の短縮などが確認されている。

ただし、燃焼の励起作用に放射性セラミックを用いた例は、著者の知る限り著者が1992年に発表<sup>(1)</sup>したのが最初である。著者は1992年に放射性元素を含むセラミックを内燃機関の空気または燃料に接触させることにより、燃費率と排気ガスの低減の可能性を実証し、このような現象を「燃焼における励起作用<sup>(6)</sup>」と名付け、吸入空気に供するものを「空気触媒」、および燃料に供するものを「燃料触媒」と名付けた。以来、25年間に亘り開発、研究を実施して実用化に成功し、NEDO や国土交通省からも補助金の認定を得て社会貢献をするとともに、国内外で省エネ商品として広く認知されている。

Table 1 Overview of Research and History of Excitation Effects on Combustion

年代	研究者名	研究の概要
1924	Malinowski <sup>(13)</sup>	電場により予混合火炎の燃焼速度が増加する。
1931 1932	Guenault et al. <sup>(14)(15)</sup>	燃焼速度の向上は電場の付与により火炎面積が増加し、これが見掛けの燃焼速度を増加させる。
1951	Calocate et al. <sup>(16)</sup>	磁場の付与により噴流予混合火炎の安定性を向上できる。
1971	Kono et al. <sup>(17)</sup>	電場により煤粒子の生成を制御できる可能性がある。
1976	Asakawa <sup>(18)</sup>	火炎に電場を与えると燃焼が促進する。(Asakawa Effects)
1987	浅川勇吉 <sup>(19)</sup>	燃焼の場に電場をかけると火炎形状が変わり、燃焼速度も変化することが観察された。燃焼、熱伝達、蒸発促進への応用について詳述。
1998	Fujita et al. <sup>(20)</sup>	磁場の付与により火炎への酸素供給が増大し、全燃焼に要する時間が短縮される。
2003	渡邊孝司 <sup>(6)</sup>	放射性元素を含むセラミックを内燃機関の空気または燃料に接触させることにより、燃費率と排気ガスの低減の可能性を実証し、このような現象を励起現象と名付けた。

## 3. 励起作用の分類

燃焼に及ぼす励起作用の研究の歴史は電場や磁場について研究がほとんどであるが、他を含めた燃焼に及ぼす励起作用の分類を表2に示す。

### 3.1 遠赤外線

遠赤外線はセラミックス等を燃料タンクに投入して遠赤効果による燃焼の活性化と謳った商品は現在でもあるが、著者の知る限り、その効能は期待できないと思われる。その理由として遠赤外線のエネルギーが0.12eV ( $\lambda=10\mu\text{m}$ ) と小さいことと、熱そのものを連続的に吸収しない限りエネルギーを放射できないことである。

また、著者は過去に放射性希土類元素を含むセラミックスとそのバインダーであるセラミックスの両者を燃料タンク

Table 2 Classification of Excitation Phenomenon

名 称	方 式	特 色	エネルギー
電場・磁場	電場・電磁石、永久磁石（浅川効果）	火炎に電場・磁場を与えると燃焼速度が増加	
遠赤外線	セラミック、各種鉱石類による電磁波効果	特定の放射体と波長で高効率加熱	0.12eV* ( $\lambda = 10\mu\text{m}$ )
石英斑岩	トルマリン	圧電（ピエゾ）効果と焦電（パイロ、ピロ）効果によるマイナスイオンの発生	2-10eV（静的） 両効果が作用すると100万 eV
希土類鉱石	トリウム、ウラン含有天然鉱石（セラミック）	放射線 $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\beta$ 線放出に伴うマイナスイオン発生および燃料改質 マイナス空気イオンおよび燃焼時におけるOH <sup>-</sup> 基**の発生	4.32eV（C-H結合の切断エネルギー） 5.23eV（OH基のエネルギー）
超音波	超音波発振回路	電氣的に振動子を超音波で振動させて対象物にエネルギーを与えてミクロンサイズの微細粒状化が可能	

\* 1 eV =  $1.602 \times 10^{-19}$  J    \*\* C（炭素）-H（水素）分子結合を切断するエネルギーは4.32eV、OH基のもつエネルギーは5.23eV

に浸漬して実車走行とエンジンベンチ試験を行って、後者のセラミックスのみでは燃費の向上と排気エミッションの低減は得られなかった経験がある。したがって、遠赤外線効果は全く無いとはいえないが、あるとしても微々たるものと解釈できる。

### 3.2 石英斑岩

石英斑岩（トルマリン）はピエゾ・パイロ効果による空気負イオン放出効果で、静的な状態では2～10eVと低い分極電圧であるが、衝撃と温度付加により約100万倍の分極電圧が生じて空気負イオンが大量に放出される。このトルマリン粉末を含有する耐熱塗料をエンジンのシリンダ・シリンダヘッドや排気管に塗布することにより、空気負イオンが吸入空気に付加されて燃焼時に励起作用を与える。この技術<sup>(9)(10)</sup>は最近、船用エンジンで実用化されている。

### 3.3 希土類鉱石

希土類鉱石はトリウム、ウランの微弱レベル放射能元素を含む天然鉱石をセラミックスとブレンドしたものを吸入空気に放射することにより、放射線の $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 線が空気に作用して空気負イオン化を促進するものである。この作用は前述の石英斑岩と同じように空気負イオン発生のため、混合気形成の促進と燃焼時のOH・CHラジカル（基）形成による燃焼速度を増加させ、燃焼時間を短縮して燃焼の促進化に寄与するものと思われる。空気負イオンの付加により燃焼時間の短縮現象<sup>(6)(7)</sup>は実証済みである。

### 3.4 超音波

超音波は超音波発振回路を用いて電氣的に超音波を発振させ、燃料をミクロンサイズに微粒化させて混合気形成を促進することにより燃焼を改善する方法であるが、5～10%の燃費改善の効果が認められた。しかし、加速時のように一度に多量の混合気を要するときに応答性の遅れと、またガソリンエンジンに用いた場合に、ガソリン粒子同士の衝突時の発熱により自発火する可能性があり、実用性は無いものと判断される。

空気負イオンを用いた石英斑岩や希土類天然鉱石などを用いた燃焼における励起作用は、電場、磁場と同様の現象を生じることは明らかであり、燃焼時において共通の化学作用が発生しているものと予想され、今後もこの現象の解明が課題である。

## 4. イオン化作用

最も単純な原子である水素、燃焼対象物の炭素、燃焼に不可欠な酸素及び酸素とともに空気を組成する窒素について、外部からのエネルギー付加によるイオン化現象の例<sup>(12)</sup>がある。イオン化する前の原子は原子核内の陽子とその外殻を回る電子の数が同じで、陽子は正の電荷を、電子は負の電荷を有して通常は中立状態で安定している。この状態で外部から何らかのエネルギーが付加されると陽子の数は変化せず、最外殻の電子数が1～4個増加または減少することによっ



て各々負イオン (negative ion) や正イオン (positive ion) が発生すると学術的には定義されている。そのイオンの増減の個数に対して各々 2, 3, 4 価の負あるいは正イオンと呼ばれる。

水素はイオン化すると正イオンになり易く、窒素と酸素は負イオンになり易く、炭素は負イオンにも正イオンの両者にもなり易いが、結果としてどちらにもなりにくい特徴を有する。

なお、商業用として用いられている「マイナスイオン」、「プラズマクラスターイオン」や「ナノイー」は厳密には「負の空気イオン (negative air ion)」で学術用語の「負イオン」とは異なり、空気中の原子や分子がマイナスの電荷をもっている。逆に大気中に何らかのエネルギーが作用すると、気体の分子からマイナスの電荷をもった電子が放出されると「プラスイオン (正の空気イオン), (positive air ion)」が生じる。

したがって、その電子が他の分子に飛び込んだ時に「負イオン」が発生すると言われている。しかしながら、負イオンの正体、即ち、どんな物質から成るのかが確定されていない。また、正イオンと負イオンは不安定なので寿命は短く、数秒以内に元の中立状態に戻るものと考えられている。これらのイオン発生による励起作用として水破壊 (レナード) 方式、コロナ・パルス放電方式や放射線物質方式等がある。このイオン化作用の内燃機関等への応用例は希土類元素による空気触媒<sup>(12)</sup>である。

## 5. OH 基および CH 基の生成メカニズム

燃焼火炎の反応帯では電子的に励起された中間生成物が一時的に形成されるが、特に OH 基と CH 基は励起状態で生成され、OH 基は早い状態から生成され燃焼反応の支配的要因を果たして燃焼促進などの重要な役割を負っている<sup>(21)</sup>。また、OH 基は寿命が長く、燃焼中に広く分布する特性<sup>(22)</sup>を有すると言われている。OH 基と CH 基の炭化水素の燃焼中における励起状態を式 (1) と式 (2) に示す。



式(1), (2)の反応速度は各々 CH 基と O<sub>2</sub>分子および C<sub>2</sub>基と OH 基の積に比例するから燃焼促進に寄与することになる。本研究においてはセラミックスの励起作用により燃焼時に OH 基や CH 基の生成が増加することにより燃焼が促進したものと推測している。

セラミックス燃料触媒 (IPT) に極微量に含まれる希土類鉱石のトリウム (ThO<sub>2</sub>)、ウラン (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) から放射される α 線、β 線と γ 線による燃焼のメカニズムについて考えてみる。IPT は希土類元素から組成されるセラミックス触媒で、極微量に含まれるトリウムとウランが主な励起作用をなしている。これらのセラミックスから放出される荷電粒子の α 線、β 線および電磁波の γ 線は、全ての物質にイオン化を引き起こし得るエネルギーを備えており、これらが燃料に作用して燃焼を促進させているものと想定されるが、ただし、荷電粒子の α 線についてはイオン化に対しては最も強力であるが、紙 1 枚でも大幅に減衰する特性があるので空気触媒としての利用度は高いが、IPT のように管体中に入れると遮蔽効果により燃料改質への効果は期待できない。したがって、電磁波で透過率の高い γ 線が燃料改質効果に対する影響が主であると判断される。

これらの燃料改質における OH 基の生成メカニズムを模式化したものを図 1 に示す。燃焼の場合において微量の過酸化物が、燃焼速度を大きくすることは公知の事実であるが、内燃機関のように急激な爆発的燃焼の場合には、過酸化物の代表的な主成分は OH 基と CH 基である。炭化水素 (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>) は通常、燃焼時に熱分解を受けて C と H に分解し、O<sub>2</sub> との酸化により H<sub>2</sub>O と CO<sub>2</sub> になるが、当然ながら 100% の完全燃焼はあり得ない。したがって、熱分解時に OH, CH 基を可能な限り多く形成し、燃焼効率を上げて燃焼時間を短縮することにより、等容度を増して熱効率を上昇することが、結果として燃費低減につながる。

したがって、図 1 に示すように β 線と γ 線が微量でも照射されると式(1)に示すように燃料の H 原子が遊離し、燃料中に大気圧下で 10<sup>-3</sup> mol ほど溶解している O<sub>2</sub> が酸化剤として作用し、遊離した H と反応して OH 基が生成される。この燃料中に溶解している O<sub>2</sub> の存在に関しては、放射改質した燃料を数日間放置すると改質効果がなくなるという経験からも、このメカニズムが立証できる。なお、当然ながら OH 基の生成は燃料中に溶解している O<sub>2</sub> のみならず、燃焼室内の空気中の O<sub>2</sub> との反応も考慮される。

この現象として燃料中に溶解している微量の空気の酸素原子 (O) がイオン化を起こして燃料の水素原子 (H) と結合して OH 基となり、これが燃焼を活性化すると想定される。なお、この場合、逆に水素原子 (H) がイオン化して酸素原子 (O) と結合して OH 基を生成することも考えられる。このような OH, CH 基発生による燃焼促進現象は

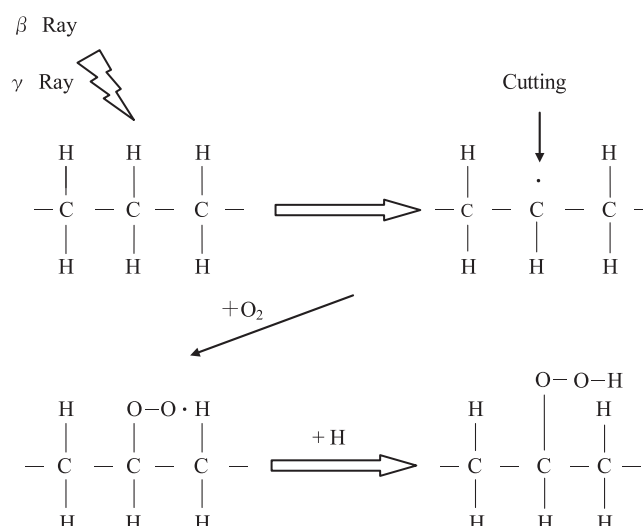


Fig. 1 OH, CH Radicals Generation Mechanism

燃焼工学において認められている。ただし、これらの現象は現代の測定技術によって実証することは困難であるが、本研究室でガソリンエンジンによる火炎速度測定結果によればセラミックス触媒を用いることにより、空気触媒<sup>(12)</sup>（IPS）使用時と同様に火炎速度が10～15%短縮して排気ガスエミッションと燃料消費率が低減することが確認された。したがって、セラミックス触媒を用いるとOH基の発生により燃焼が急速になって燃焼時間を短縮し、その結果、燃焼効率が向上して燃焼後期に発生する黒煙（スモーク）とパティキュレート（DPM）を著しく低減し、また排気エミッションと燃料消費率の低減を招くものと考察される。

## 6. 空気触媒と燃料触媒における励起作用

本技術の励起作用は希土類鉱石のトリウム（ThO<sub>2</sub>）、ウラン（U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>）の微弱レベル放射能元素を含む天然鉱石をSiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>などのセラミックスとブレンドしたものを用いており、その組成と放射レベルを表3、4に示す。この微粉末をステンレス薄板に糊付けした可撓性シートを空気触媒（IPS）といい、これをエンジンの吸気管内に円筒形にして設置して用いる。この空気負イオンによるエンジンへの励起作用については、すでに公表済みである<sup>(12)</sup>。また、微粉末を直径5mmの粒状成形後に約1600Kで焼成したものを管体に詰めて、燃料パイプ間に設置して用いるものを通過式燃料触媒（IPT、FC-400）と称し、これらの外観を図2に示す。

Table 3 Material Composition of Rare Earth Ore

Substance	Content (wt%)	Substance	Content (wt%)	Substance	Content (wt%)
F	0.67	CaO	0.38	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	0.48
Na <sub>2</sub> O	0.40	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.61	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.3
MgO	0.087	Kr	0.020	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.0	Pb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.019	Cd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.21
SiO <sub>2</sub>	64.0	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.22	PbO	0.042
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	5.2	ZrO <sub>2</sub>	0.71	ThO <sub>2</sub>	0.77
SO <sub>3</sub>	0.014	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.6	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	0.020
K <sub>2</sub> O	3.5	GeO <sub>2</sub>	3.4		

Table 4 Radioactivity of Rare Earth Ore

Substance	<sup>232</sup> Th ( <sup>228</sup> Ra)	<sup>238</sup> U ( <sup>226</sup> Ra)
Radioactivity (Bq/g)	38.6 ± 0.4	5.1 ± 0.2

### 6.1 空気触媒と燃料触媒の線量当量と安全性

空気触媒についての線量の詳細についてはすでに報告<sup>(12)</sup>しているが、ここでは通過式燃料触媒の線量当量との比較として参考までに図3に示す。なお、空気触媒についてはIPSを円筒形に丸めたもの（図3左上）と丸めないフラット



Fig. 2 Passing Fuel Catalyst (IPT: FC-400 etc.)

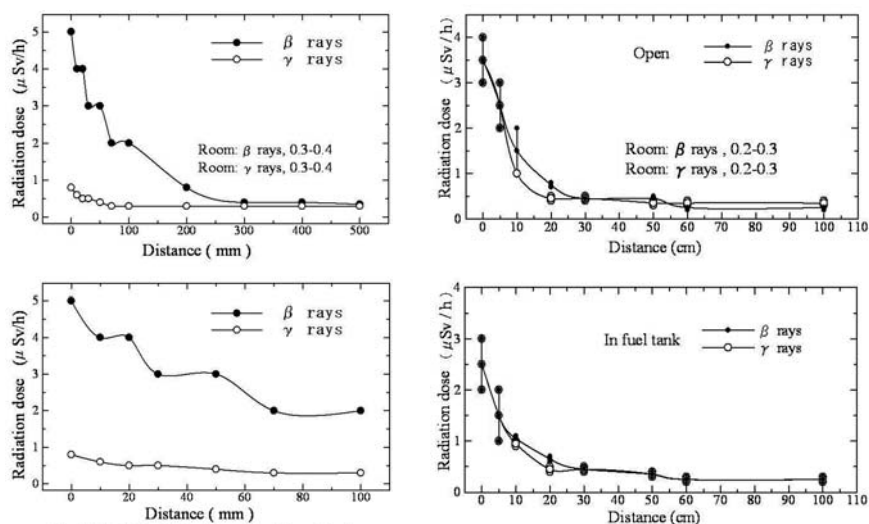
Fig. Effect of Radiation Dose of Ion Power Sheet  
Vertical Direction to Flat Center (180×260)

Fig. Effect of Radiation Dose of FC-400 on Distance

Fig. 3 Radiation Dose of Air and Fuel Catalyst

状（図3左下）にして測定した。これらの測定値は密閉した無風状態の部屋（ $4 \times 7 \times 3$  mH）で測定し、線量当量は3分間の平均値とした。その結果、FC-400の直接接触空間線量率は $\beta$ 、 $\gamma$ 線とも室内空間線量率の約10数倍であるが、60cm 離れると同様に室内空間線量率と同一レベルに下降する。FC-400を燃料タンク内に挿入した場合（タンク外壁に設置）の空間線量率は、直接接触と比べて $\beta$ 、 $\gamma$ 線とも1～2  $\mu\text{Sv/h}$  減少して室内空間線量率0.05～0.06の約10倍で、距離60cm 以上離れると室内空間線量率に減少する。

通過式燃料触媒は希土類鉱石を主成分としており、図3に示したように放射線の最大線量当量は表面上で $\beta$ 線と $\gamma$ 線は共に3～4  $\mu\text{Sv/h}$ であり、仮にIPTを皮膚に1年間密着したとすると $0.004\text{mSv/h} \times 24\text{h} \times 365 = 34.8\text{mSv/y}$ の吸収線量となり、国際放射線保護委員会(ICRP)の定める職業人年間許容線量基準レベルの50mSv/y 以下となる。したがって、通過式燃料触媒から60cm 離れると $\beta$ 線と $\gamma$ 線は室内と同一レベルの0.3～0.4  $\mu\text{Sv/h}$  以下となり、実用上は問題ない。一般的に $\mu\text{Sv/h}$  線量レベルの放射線を被爆しても健康に異常をきたす恐れは、ほとんどない<sup>(24), (25)</sup>と言われている。

## 7. 燃料触媒による改質燃料の燃焼への影響

空気触媒と燃料触媒の燃焼への影響については、これまでにASTM 蒸留試験、ガスクロマトグラフィー、火炎伝播速度測定、ベンチ性能試験及び実車走行試験など数多くの実証試験を実施して、その効果の確認を試みたが、燃料触媒については、ASTM 蒸留試験、火炎伝播速度測定、ガスクロマトグラフィー、燃料着火性試験、単室定容燃焼装置を用いた火炎の可視化分析やベンチ性能試験を実施して、燃料改質による励起作用の決定的な解明<sup>(22)</sup>を空気触媒と比較して実施した。

## 7.1 空気触媒と燃料触媒による火炎伝播速度比較測定

空気触媒と燃料触媒は、両者とも燃焼時間を短縮する効果が燃焼改善に寄与しているものと推測されるので、両触媒を側弁式ガソリン機関<sup>(12)</sup>（ホンダ G80）に用いて火炎ギャップ法により、点火プラグからの距離における燃焼火炎伝播速度を基礎燃料と比較計測した。その結果を図 4 に示すが、このグラフから明らかに負イオン発生により初期、中期と後期とも火炎速度が通常運転時より約 9～20% 上昇していることが理解できる。

空気イオンの負イオン化による燃料微粒子との吸着作用は、混合気燃焼過程において微小粒子（数 $\mu\text{m}$  以下）である燃料粒子を吸着しやすくして、かつ、正イオンよりも負イオンの吸着速度が速くなることは周知の事実である。したがって、燃料粒子の拡散速度と移動が大きくなるために点火、または自発火後の初期、中期火炎速度が速くなり、急激な燃焼へ移行する。さらに、燃料の熱分解時の OH ラジカル類（負イオン）生成が、より燃焼を活性化させているものと考えられる。

即ち、最大燃焼圧力がより上死点近くに移行する（等容度が高くなる）ため、ピストン行程による仕事量が相対的に上昇して燃焼を改善するものと考察される。また、燃焼火炎伝播速度と最大燃焼圧力の上昇によって燃焼効率は高くなり、不完全燃焼や未燃焼ガスの発生が抑制され、これらに起因する CO、HC および黒煙などのエミッションが 20～50% 程度急減し、当然ながら燃料消費率も 10～15% 低減することを確認<sup>(2)</sup>している。なお、燃料触媒についても同様の計測を実施したが、ほぼ近似の結果が得られた。

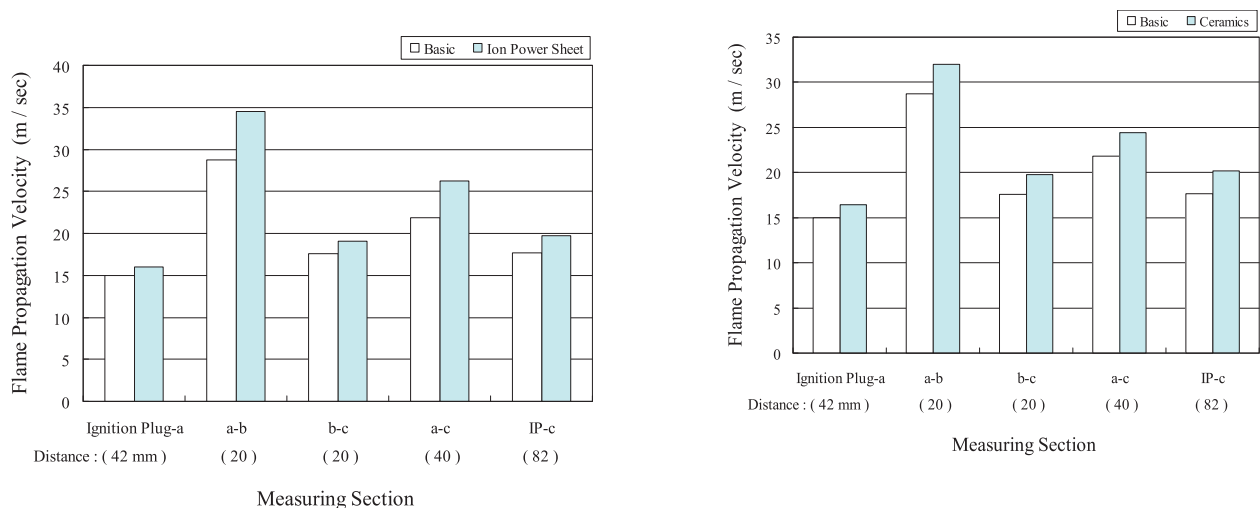


Fig. 4 Flame Propagations Velocity by Air & Fuel Catalyst

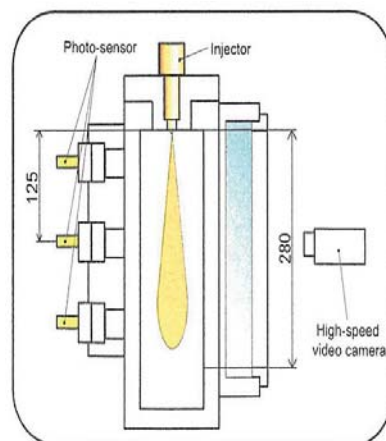


Fig. 5 Single-Chamber Constant Volume Combustion Device

## 7.2 燃料触媒を用いた改質燃料の燃料着火性試験

燃料触媒による改質燃料の特性を確認するため、国際燃焼期間会議（CIMAC）と英国エネルギー学会で公認されている燃料着火性の標準試験装置（FIA-100）を用いて JIS 2 号軽油と改質燃料の着火性比較試験を実施した。この実験条件は軽油を即時で実施しているが、改質軽油に際しては 1, 2, 3 日とセラミックス燃料触媒を浸漬したとき、燃料



Table 5 Ignition Combustion Characteristic Test Result of Reformed Diesel Fuel by FIA-100

試験項目		Control Fuel	Reformed Fuel	Progress Rate %
着火遅れ (ID)	dP = 0.2bar msec	10.40	10.35	<b>0.48</b>
燃焼終了 (EC)	msec	21.75	20.85	<b>4.14</b>
全燃焼期間 (EMC)	dP = 1.0bar msec	16.35	16.40	-0.31
主燃焼期間 (MCP)	dP = 1.0bar msec	4.78	4.65	<b>2.72</b>
FIA セタン価 (FIA CN)	dP = 1.0bar	47.8	47.8	0.0
ROHR Index	J/msec	215.8	214.3	-0.70
ROHR 最大時間	msec	13.6	13.9	<b>2.21</b>
後燃え期間 (ABP)	msec	5.40	4.45	<b>17.6</b>

容器を大気開放にしたままで実施しており、これでは軽油の低沸点成分が蒸発しており正確な比較は不可能であるが、この試験結果を表5に示す。

改質燃料の着火性について主要な項目を JIS 2 号軽油と比較すると、着火遅れ (ID) は JIS 2 号軽油の 10.40msec に対し改質燃料が 10.35msec と 0.48% の短縮で、燃焼終了 (EC) は同様に 21.75 と 20.85msec で 4.14% の短縮、全燃焼期間 (EMC) は 16.35 と 16.40msec で 0.31% の延長、主燃焼期間 (MCP) は 4.78 と 4.65msec で 2.72% の短縮、FIA セタン価 (FIACN) は 47.8 で同一値、熱発生率 (ROHR Index) は 215.8 と 214.3 J/msec で 0.70% の減少、熱発生率 (ROHR) 最大時間は 13.6 と 13.9msec で 2.21% の上昇、最後に後燃え期間 (ABP) は 5.40 と 4.45msec で 17.6% の短縮であった。以上より、着火遅れは改質燃料が 2 号軽油より僅かに 0.48% の短縮であるが、これは改質燃料を大気開放で放置したため低沸点成分の蒸発が影響して少なくなったものと思われる。この低沸点成分の蒸発は全燃焼期間の 0.31% の延長、FIA セタン価の同一値、熱発生率の 0.70% の減少なども少なからず影響したものと思われる。これに反して改質燃料の注目すべき点は、燃焼終了の 4.14% 短縮、主燃焼期間の 2.72% の短縮、熱発生率 (ROHR) 最大時間の 2.21% の延長、さらに後燃え期間の 17.6% の短縮であり、これらの結果から改質燃料が燃焼時間の短縮、熱発生率の最大時間の延長による燃焼改善効果や後燃え期間の短縮による黒煙、PM の発生抑制などによる燃焼効率改善、熱効率上昇や燃費低減に影響を及ぼしていることが立証できる。

したがって、後者のメリットは前者のデメリットと相反しているが、前者の改善率は負もしくは極く僅かで改質燃料管理に課題があったことがその原因と見られ、大局的には後者の改善率の大きさから改質燃料の改善効果が立証されている。

### 7.3 燃料触媒を用いた改質燃料の噴霧燃焼火炎写真<sup>(23)</sup>

燃料着火性試験に引続き図5に示す単室定容燃焼装置を用いた励起作用による改質 A 重油の燃焼火炎の可視化比較分析を実施して、従来以上に燃料改質の励起作用の原因解明により近づくことができた。単室定容燃焼装置は温度 648K (375℃)、雰囲気圧力 1.9MPa、酸素濃度 21%、噴射ノズル 0.20mm 単孔ホール型、燃焼容器内の火炎を噴射から燃焼終了まで高速度ビデオカメラで撮影した。A 重油燃料について放射線物質の浸漬 (21時間) 有りとしについて比較測定した。その観察結果を図6、7に示す。

放射性物質 (セラミックペレット) の浸漬有無について噴射開始時の 0 ms から噴射終了の 22ms と消炎までの 33ms の火炎長さを時系列 (msec) で示した図7により比較すると、噴射してから自己着火するまでの時間は噴射後 2 ms と同じで、9 ms までは火炎長さと先端部の膨らみはほぼ同であるが、10~15ms は浸漬有りが無しと比較して 7.3~21.9 mm (5.2~11.8%) の火炎長と火炎の横方向の膨らみも大きく、燃焼中期の 16ms から噴射終了時の 22ms は同様に 29.2~70.8mm (15.2~42.5%) と最も著しい火炎の成長が認められた。また、燃焼後期の 23~30ms では同様に 19.5~36.5 mm (10.5~19.7%) で次いで火炎成長があり、特に噴射終了後においても火炎成長が著しいことが観察できる。消炎に至る 31~33ms では同様に 48.7~204.8mm (26.3~930.9%) の火炎成長と消炎時に至っても、浸漬有りが無しと比べて最後まで燃焼を促進していることが理解できる。自己着火から消炎に至るまでの全時間については、浸漬有りが無しと比べて平均火炎長さは 9.6mm で同成長率は 12.2% となる。以上から浸漬有りによって噴霧燃焼をより促進していることが理解でき、これは放射線による励起作用が影響していることに、より可能性の高い推定を支持できる。

なお、本可視化分析は高温、高圧中の雰囲気中に単孔ホールノズルを用いて噴射して火炎の成長を可視化したもので、実機関のような予混合燃焼火炎とは異なり拡散燃焼火炎なので火炎の成長を観察するのが目的で燃焼時間を考察するものではない。よって実機関の燃焼においては空気流動を付加した予混合燃焼と拡散燃焼の組み合わせであるので、改質燃料を用いればより燃焼は促進し、燃焼時間が短縮することが予想される。



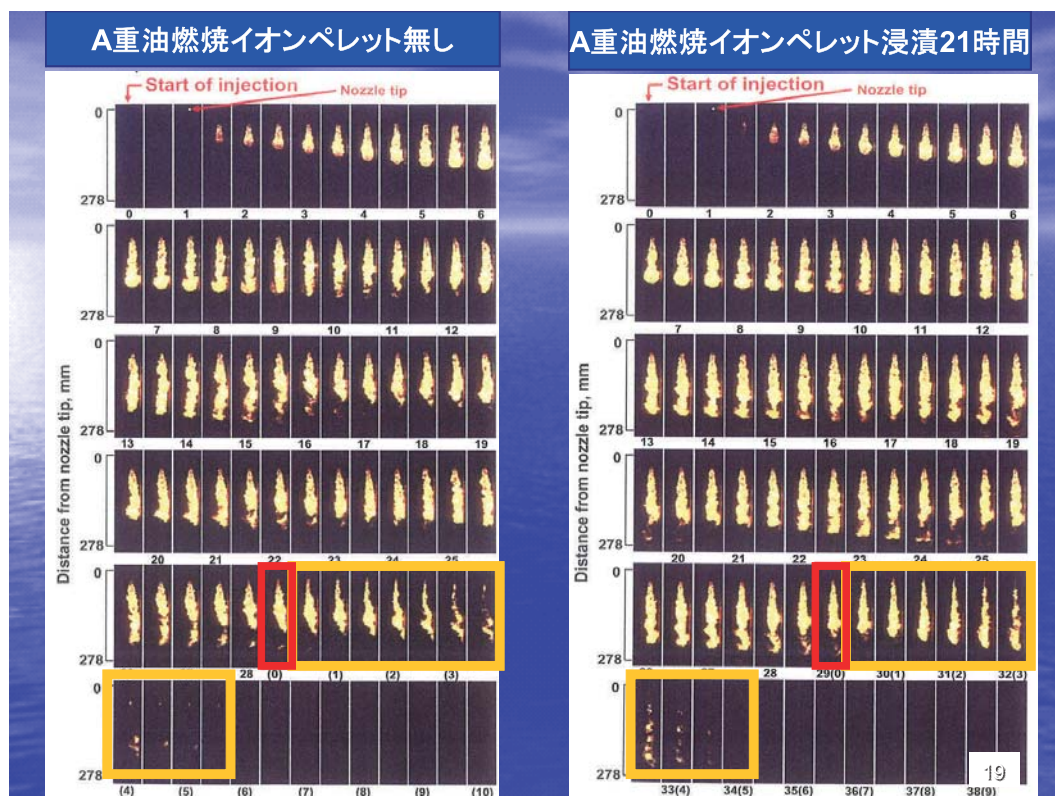


Fig.6 Visualization of Spray Combustion Flame by Reforming the Presence or Absence A-heavy Oil

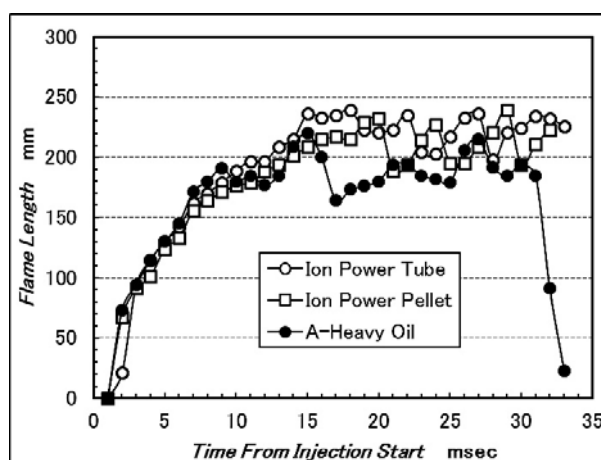


Fig. 7 Flame Length from Injection Start

#### 7.4 燃料触媒を用いた改質燃料の実機燃費試験

燃料改質器の実機性能を確認するため、財団法人日本自動車研究所（JARI）にて出力と燃料消費率についてセラミックス燃料改質有無の比較試験を実施した。供試機関は4ストローク単気筒、 $\phi 108 \times 115$ 、1.054L、 $\epsilon = 16.5$ のDIディーゼルエンジンで燃料はJIS 2号を用いた。その試験結果の1600rpmの出力と燃料消費率を図8、及び1280rpmと1600rpmの部分負荷による出力向上率と燃料消費率の改善率を表6に示す。表6の1600rpmについての表示は、燃料噴射量20mg/st未満は通常走行でほとんど使用されないのので表示範囲外とし、改質前後の近似曲線式を積分して両者の面積を比較して表示した。したがって、セラミックス燃料改質による1280rpmと1600rpmの出力向上率は各々1.13と6.11%で燃費改善率は各々5.28と7.04%を示し、1600rpmでの出力向上率と燃費改善率におけるセラミックス触媒の著しい効果が認められた。

#### 7.5 燃料触媒を用いた改質燃料の実機性能試験

燃料改質器（PT-1400）の有無による排気ガスを含むエンジン性能への影響について、供試エンジンは4ストローク

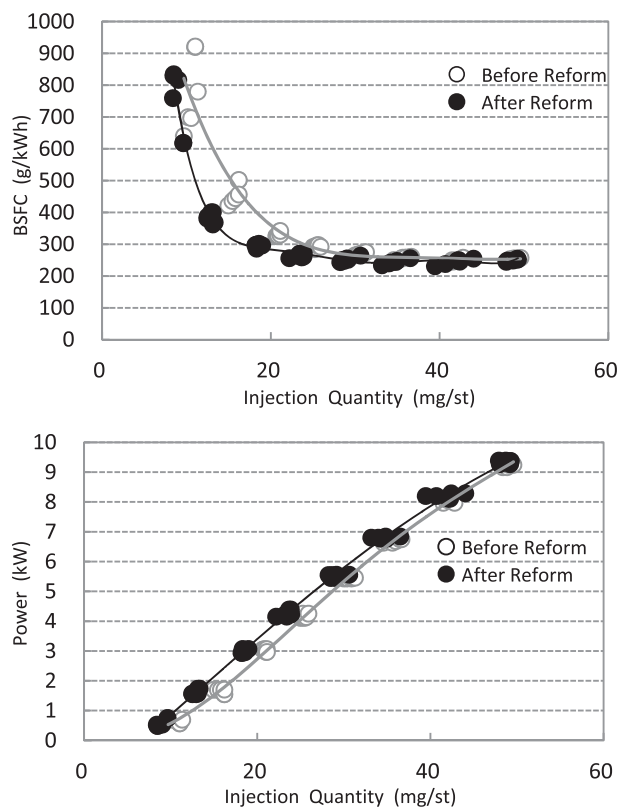


Fig. 8 Output &amp; Specific Fuel Consumption Test at 1600 rpm

Table 6 Rate of Output Improvement and Fuel Economy Improvement at 1280 &amp; 1600 rpm

Engine Speed rpm	Output Improvement Rate %	Fuel Economy Improvement Rate %
1280	1. 13	5. 28
1600	6. 11	7. 04

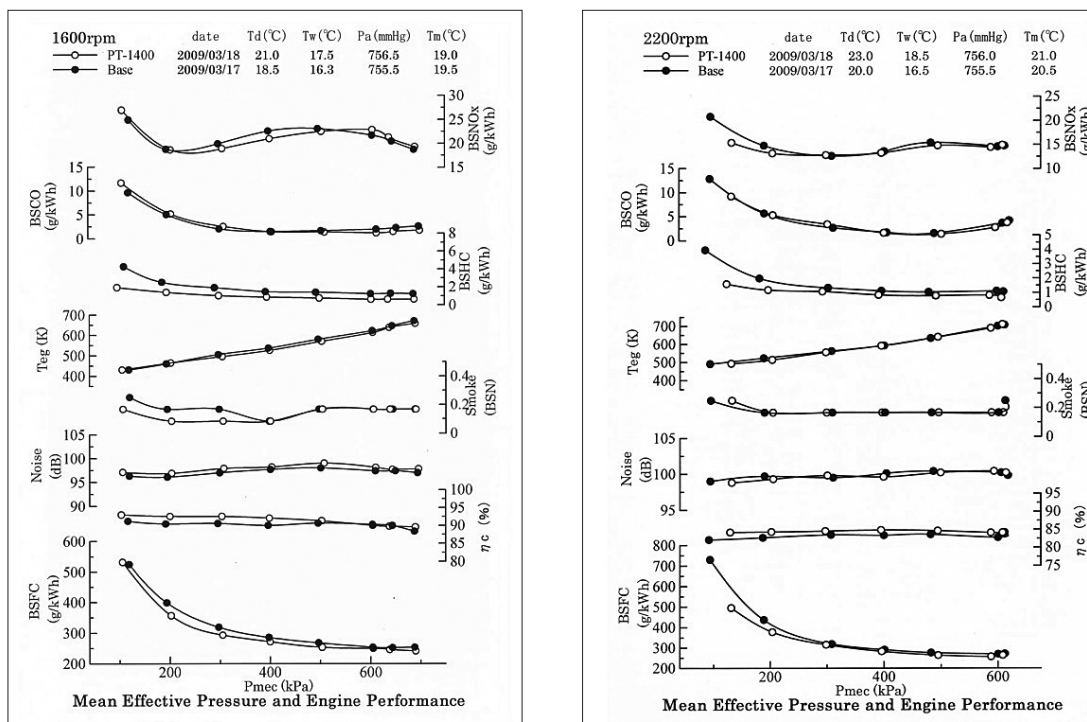


Fig. 9 Engine Performance Test with Reformed Gas Oil at 1600 &amp; 2200 rpm

Table 7 Engine Performance Test with Reformed Gas Oil at 1600 &amp; 2200 rpm

測定条件		基礎（装着前）		装着後	
機関回転速度	rpm	1600	2200	1600	2200
平均燃費率 A*	g/kW・h	325.8	358.8	309.6	332.3
平均燃費率 B*	g/kW・h	291.9	305.0	277.2	291.5
燃費改善率 A*	(%)	—	—	(4.97)	(7.39)
燃費改善率 B*	(%)	—	—	(5.04)	(4.42)
平均 BSHC (低減率)	g/kW・h (%)	1.91 —	1.79 —	0.97 (49.2)	1.00 (44.1)
平均 BSCO (低減率)	g/kW・h (%)	3.33 —	4.06 —	3.19 (4.2)	3.88 (4.4)
平均黒煙濃度 Smoke (低減率)	BSN (%)	0.10 —	0.13 —	0.06 (40.0)	0.11 (20.0)

\*A：低負荷域の100と150kPaを含む値を示す。

\*B：低負荷域の100と150kPaを削除した値を示す。

4気筒、 $\phi 110 \times 106$ , 1.007L,  $\epsilon = 16.3$ のDIディーゼルで、燃料はJIS2号を用い、エンジン回転速度は1600と2200rpmで部分負荷試験を実施した。その結果を図9と表7に示すが、装着前の全負荷域における正味燃費率（BSFC）の平均は1600で309.6g/kWh, 2200rpmで332.3g/kWh, 装着後で同様に325.8と358.8g/kWhを示し、燃料改質による改善率は1600rpmで4.97%, 2200rpmで7.39%となった。ここで、平均燃費率を実車で使用頻度の少ない低負荷域の100と150kPaの値を削除すると、装着前の実用負荷域における正味燃費率（BSFC）の平均は1600で277.2g/kWh, 2200rpmで291.5g/kWh, 装着後で同様に291.9と305.0g/kWhを示し、燃料改質による改善率は1600rpmで5.04%, 2200rpmで4.42%となり、1600rpmの方が改善率は高くなった。この理由は励起作用による燃焼改善効果に加えて燃焼時間の短縮による充填効率（ $\eta_c$ ）が両回転速度とも1～3%高くなったことも考慮される。排気煙濃度（BSN）は平均で示すと装着前の1600rpmで0.10, 2200rpmで0.13に対して、装着後は同様に0.06と0.11を示し、燃料改質による低減率は1600rpmで40.0%, 2200rpmで20.0%となり、1600rpmの方が低減率は高くなった。排気ガスの全負荷域の平均BSHCは装着前の1600rpmで1.91g/kWh, 2200rpmで1.79g/kWhに対して、装着後は同様に0.97と1.00g/kWhを示し、燃料改質による低減率は1600rpmで49.2%, 2200rpmで44.1%となった。また、平均BSCOは装着前の1600rpmで3.33g/kWh, 2200rpmで4.06g/kWhに対して、装着後は同様に3.19と3.88g/kWhを示し、燃料改質による低減率は1600rpmで4.2%, 2200rpmで4.4%となった。以上から1600rpmでの燃費改善率と排気ガス低減率におけるセラミックス触媒の著しい効果が認められた。

## 8. 燃焼における励起現象の考察

石油系燃料の主要な成分は飽和炭化水素（アルカン）であるため「放射線照射による燃料の改質」は下述の「アルカン放射線化学<sup>(26)</sup>」をモデルとして捉えることができる。

- (1) 物質に放射線を放射すると多段階で原子・分子へのエネルギー付与やエネルギー移動が生じる。
- (2) 水溶液や有機物に放射線を当てた場合、物質は吸収したエネルギーにより励起作用やイオン化を起こす。このように付与されたエネルギーは、2次電子、数ナノ秒の寿命を持つラジカル（基）などの活性種、あるいはイオンを介して放射線化学反応を起こす。
- (3) 最初のイオン化・励起作用により高い励起作用の活性種が生成されるが、これらは内部転換や緩和過程により速やかに最低励起状態のラジカルカチオン（正イオン）や最低励起状態により安定した状態へ移る。

火炎速度の向上と燃焼時のOH、CH基の生成が、燃焼時間の短縮に寄与しているものと考察される。

以上により、燃料に放射線が照射されるとイオン化や励起状態が発生し、これらは活性化されているために活性基ができ、燃料の燃焼が促進し易くなるものと考えられる。

## 9. まとめ

- (1) 燃焼火炎が導電性を持ち、火炎に電場、磁場をかけると火炎形状が変化して火炎速度が速くなることは公知の事実



であり、著者はこの現象を励起作用と呼んでいるが、セラミックスによる励起作用は吸入空気と燃料の両者に対して同様に燃焼改善に寄与できることが実験的に明らかとなった。

- (2) セラミックスを用いた燃料触媒による励起作用により、燃焼時に水酸化 (OH)、炭水素 (CH) ラジカルの多量発生による火炎速度の向上により、燃焼を活性化し、燃焼時間の短縮に寄与して燃焼改善に至っているものと考察される。
- (3) このようなラジカル発生が燃焼を促進して火炎成長を促して噴霧燃焼の燃焼時間を短縮させることにより、出力向上、排気ガスと燃費低減に寄与していることを実験的に立証することができた。
- (4) この燃焼促進作用は従来の複数の実証実験に加えて、燃料着火性の標準試験装置 (FIA-100) を用いて軽油改質燃料の着火性比較試験及びA重油の定容燃焼装置で火炎の可視化比較実験により確定的に実証することができた。
- (5) セラミックスの励起作用による燃焼活性化までのプロセスは未解明であるが、これらの励起作用を与えることにより燃焼活性化と火炎速度増加による燃焼時間の短縮が、ピストン行程による仕事量が相対的に上昇して、出力向上、排気ガスと燃費低減に寄与していることを実験で立証することができた。

最後に本研究の解析実験等に惜しめないご協力を賜った、(株)フェニックス、東洋ゴム工業(株)材料研究室、(株)商船三井技術部技術研究所および財団法人日本自動車研究所に深甚の謝意を表する。

### 参考文献

- (1) 渡邊孝司：自動車技術会、日本機械学会共催第10回内燃機関シンポジウム講演論文集、P295、(1992)
- (2) T. Watanabe: Improving the performance of International Combustion Engines Using Radiated Fuel with Ceramic Containing Radium and Thorium, 久留米工業大学知能工学研究所報告、第7号、P61、(1994)
- (3) 渡邊孝司：燃料改質シート及びその製造方法、日本国特許、第3089582号 (2000)
- (4) 渡邊孝司ほか：セラミックの放射による内燃機関の性能改良、日本国特許、第4016289号 (2007)
- (5) T. Watanabe: Fuel-Reforming Sheet and Method of Manufacture Thereof, US Patent 6,200,537 B1 (2001)
- (6) 渡邊孝司：マイナスイオンによる内燃機関の燃焼改善、日本機能性イオン協会記念講演 p15-24 (2003)
- (7) 渡邊孝司ほか：マイナスイオンシートによる内燃機関の省エネと環境負荷低減、日本機能性イオン協会第2回研究発表会、pp7-11 (2003)
- (8) 渡邊孝司ほか：マイナスイオンシート、セラミックペレットを用いたボイラー等の省エネ効果、日本機能性イオン協会第4回研究発表会、pp21-26 (2005)
- (9) 渡邊孝司ほか：マイナスイオンシートによる内燃機関の省エネと環境負荷低減、日本機能性イオン協会懸賞論文、pp1-23、(2008)
- (10) 渡邊孝司ほか共著：内燃機関の燃焼改善におけるマイナスイオンの応用「空気マイナスイオンの科学と応用」、イオン情報センター (丸善)、pp505-521、(2004)
- (11) 渡邊孝司：マイナスイオンによる自動車などの燃費向上研究、第9回韓・日遠赤外線シンポジウム講演集、(社)韓国遠赤外線協会・日本遠赤外線応用研究会、pp131-150、(2003)
- (12) 渡邊孝司：エンジンの燃焼に及ぼす空気負イオンによる励起作用の影響、久留米工業大学研究報告、第36号、P41、(2013)
- (13) A. E. Malinowski: *J. Chimie. Physique* (U.S.S.R), 21, p 469, (1924)
- (14) E. M. Guenault & R. V. Wheeler: *J. Chem. Soc.* 2, p 195, (1931)
- (15) E. M. Guenault & R. V. Wheeler: *J. Chem. Soc.* 2, p 2788, (1932)
- (16) H. F. Calocate & R. N. Pease: *Ind. Engng Chem. Ind.*, Edn. 43, 1, p 2726, (1951)
- (17) M. Kono, K. Imamura, & S. Kumagai: *18th Symp. (Int.) on Combustion*, pp.1167-1174, (1971)
- (18) Yuukichi Asakawa: *Nature*, vol.361, No.1557, pp 220-221, May 20, (1976)
- (19) 浅川勇吉：伝熱研究、26, 101, p134, (1987)
- (20) O. Fujita et al.: *27th Symp. (Int.) on Combustion*, (in print), (1998)
- (21) 小林清志、荒木信幸、牧野 敦共著：「燃焼工学」、理工学社、p52、(1995)
- (22) 水谷幸夫：「燃焼工学」、森北出版、pp197-19、(2002)
- (23) 渡邊孝司：エンジンやボイラーの燃焼における励起現象の一考察、日本機能性イオン協会会報誌、*i-PRESS*, Vol. 21, pp 8-15, (2013)
- (24) 佐藤満彦：「放射能は怖いのか」、文春新書 177, P221、(2001)
- (25) 近藤宗平：「低線量放射線の健康影響」、P143、近畿大学出版局、(2005)
- (26) 日本放射線化学会編「放射線化学のすすめ」、学会出版センター、pp29-33, pp72-73, pp105-108、(2006)