平成３１年１月１６日

科学技術振興機構（ＪＳＴ）
慶應義塾大学
京都大学
東京大学
早稲田大学

ガソリンエンジンおよびディーゼルエンジンともに正味最高熱効率５０％超を「産産学学連携」で達成
～燃焼、摩擦、ターボ過給、熱電変換の技術で環境にやさしい内燃機関へ～

ポイント

- 乗用車用のガソリンエンジンおよびディーゼルエンジンともに、正味最高熱効率５０％を上回る研究成果を得ることに成功した。
- この高い熱効率は、超希薄燃焼（ガソリン）と高速空間燃焼（ディーゼル）という燃焼技術と、両エンジン共通の損失低減技術をそれぞれ統合した結果得られたものである。
- これらの成果は、複数の企業と大学が連携する「産産学学連携」で得られたものであり、プロジェクト終了後もこの体制を持続させる取り組みを、産学が開始している。

内閣府 総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（ＳＩＰ）「革新的燃焼技術」（プログラムディレクター：杉山 雅則（トヨタ自動車株式会社））（管理法人：国立研究開発法人 科学技術振興機構（ＪＳＴ）【理事長　濵口 道成】）において、慶應義塾大学の飯田 訓正　特任教授、京都大学の石山 拓二　教授、早稲田大学の大聖 泰弘　特任研究教授らは、乗用車用のガソリンエンジンおよびディーゼルエンジンともに、正味最高熱効率[注1]５０％を上回ることに成功しました。

現在市場に出ている乗用車のエンジンの熱効率は４０％程度です。本プロジェクトは、過去４０年間かけて自動車企業が１０％ほど向上させた熱効率を、５年間という短期間でさらに１０％引き上げるという野心的な目標を掲げていました。

本プロジェクトでは、ガソリンエンジンについては、超希薄燃焼（スーパーリーンバーン）[注2]、ディーゼルエンジンについては、高速空間燃焼の実現に成功しました。さらに両エンジンに共通する損失低減のための研究開発によって、機械摩擦損失の低減技術、ターボ過給システムの効率向上技術、および熱電変換システムの効率向上技術を開発しました。これらの技術を統合した結果、ガソリンエンジンでは５１．５％、ディーゼルエンジンでは５０．１％の正味最高熱効率を得ることができました。

このほか、本プロジェクトでは、東京大学の金子 成彦　教授らにより、自動車エンジンの３次元燃焼解析ソフトウェア「ＨＩＮＯＣＡ（火神）」、ＰＭ（粒子状物質）生成のモデル「ＲＹＵＣＡ（粒神）」、および自動車エンジン燃焼のモデルベース制御システム「ＲＡＩＣＡ（雷神）」の構築にも成功しています。

今回の成果は、今後数十年間は主流と予測されている内燃機関を搭載した自動車による環境負荷を低減し、世界の二酸化炭素（CO_2）排出量の削減に貢献するものです。さらに、燃焼分野の基礎科学を発展させると同時に、日本の産業競争力の強化をもたらすものです。

これらの研究成果は、「産産学学連携体制」[注3]を構築し機能させることによって、オールジャパンのアカデミアの基礎研究力を引き出し成し遂げられました。この体制は、本プロジェクトが終了した後も持続するよう、産学の取り組みが開始しています。

上記の詳細は、２０１９年１月２８日開催のＳＩＰ革新的燃焼技術の最終公開シンポジウムで発表されます。

本成果は、以下の事業・研究開発課題によって得られました。
戦略的イノベーション創造プログラム（ＳＩＰ）「革新的燃焼技術」
プログラムディレクター（ＰＤ）：杉山 雅則（トヨタ自動車株式会社）
研究開発期間：平成２６年１０月～平成３１年３月

研究開発課題「高効率ガソリンエンジンのためのスーパーリーンバーン研究開発」
研究責任者：飯田 訓正（慶應義塾大学 大学院理工学研究科　特任教授）

研究開発課題「乗用車用ディーゼルエンジンにおける高度燃焼制御」
研究責任者：石山 拓二（京都大学 大学院エネルギー科学研究科　教授）

研究開発課題「革新的燃焼技術を具現化するモデリングと制御」
研究責任者：金子 成彦（東京大学 大学院工学系研究科　教授）

研究開発課題「排気エネルギーの有効利用と機械摩擦損失の低減に関する研究開発」
研究責任者：大聖 泰弘（早稲田大学 研究院次世代自動車研究機構　特任研究教授）

上記研究開発課題では、乗用車用のガソリンエンジンおよびディーゼルエンジンの熱効率向上のための研究開発に取り組んでいます。

＜研究の背景と経緯＞

自動車の電動化が進む中で、２０４０年でもハイブリッド車やプラグイン・ハイブリッド車も含めて、世界の全自動車保有台数の約８９％は、内燃機関が搭載されると予測されています。従って、世界のCO_2排出量を減らすためには、内燃機関の熱効率向上は不可欠です。これまで、日本を始めとする世界各国の自動車会社が、内燃機関の熱効率向上技術の開発に取り組んできました。しかし技術の成熟化に伴いその飛躍的な進展はますます難しくなっており、１９７０年代に３０％だった熱効率は、４０年以上をかけても４０％に到達する程度でした。

乗用車用エンジンの熱効率のさらなる向上が難しくなっている背景には、エンジンの燃焼現象が極めて複雑かつ高速で、空気量、燃料量、燃焼のタイミングなどコントロールするパラメーターが膨大なことにあります。

エンジンは、ピストンの動きに合わせて急激な化学反応と発熱が起こり、それによって生じる圧力がピストンに作用し大きな動力を生み出すという仕組みになっています。さらに、このような燃焼が、１秒間に何十回も間欠的に起こっています。エンジンとして成立させるには、これらを安定して起こし続けなくてはなりません。

熱効率をさらに向上させるには、燃焼過程で動力に変換されないで捨てられているエネルギー損失[注1)]を極限まで低減できる新しい燃焼コンセプトを創出し、さらにその燃焼過程をこれまで以上に高度に制御することで、そのコンセプトを実現する必要があります。

そのためには、熱の移動、流体の挙動、物質の移動、化学反応、およびこれらの相互作用で高速に進行する燃焼現象を科学的に解明し、その基礎的知見に基づく技術開発が重要です。

燃焼過程だけではありません。エネルギー損失を低減するには、高速に動くエンジンの仕組み上どうしても発生する、摩擦によって失われるエネルギーを減らす技術、および排気として放出されるエネルギーを有効利用するターボ過給や熱電発電といった技術の開発

も必要です。
　熱効率向上は、これらの知見を統合することで初めて成し遂げられる、複合的な科学技術の粋と言えます。

＜研究の内容＞
　上記のような背景により、戦略的イノベーション創造プログラム（ＳＩＰ）「革新的燃焼技術」では、機械工学やエンジン工学のみならず、燃焼科学、伝熱科学、反応化学、流体力学、トライボロジー[注4)]、高分子化学、計算科学など、多種多様な分野にまたがる大学・公的研究機関（以下、大学等）に属する研究者が結集して、熱効率向上のための研究開発を行ってきました。
　また、ＪＳＴとの連携協定に基づき、自動車用内燃機関技術研究組合（ＡＩＣＥ）[注5)]が、研究費を受けない支援者の立場で参画し、大学等に対し、産業界のニーズの提示、実験装置の提供、安全確保の支援、また実機検証の支援などを行ってきました。
　このような産産学学連携の体制構築と運営の成功により、以下のような研究成果を得て、さらにこれらの成果を、排気の温度・流量や燃焼によって発生する圧力などの条件を一致させ、かつ相乗効果や背反も考慮して統合することによって、ガソリンエンジンでは５１．５％、ディーゼルエンジンでは５０．１％の正味最高熱効率を達成することができました。

１．ガソリン燃焼の高効率化に関する研究開発
　（１）　研究実施者：ガソリン燃焼チーム（研究責任者：飯田 訓正　慶應義塾大学 大学院理工学研究科　特任教授）
　（２）　研究開発概要
　　①　燃焼コンセプト：「超希薄燃焼（スーパーリーンバーン）」
　　②　コンセプト実現のための課題：従来の点火技術だと着火しにくい。大きな放電エネルギーを与えて部分的に着火させても、火炎が伝播するときと消炎し伝播しないときの変動が大きく、燃焼が安定しない。
　　③　実施内容と成果：超希薄燃焼場に強力なタンブル流（縦渦）を導入した、高乱流・希薄燃焼の現象を解明。その結果に基づき、安定着火を可能とする点火技術を開発。これにより、エネルギー損失の低い低温燃焼となる超希薄燃焼を実現し、熱効率向上の実証に成功。

２．ディーゼル燃焼の高効率化に関する研究開発
　（１）　研究実施者：ディーゼル燃焼チーム（研究責任者：石山 拓二　京都大学 大学院エネルギー科学研究科　教授）
　（２）　研究開発概要
　　①　燃焼コンセプト：「高速空間燃焼」
　　②　コンセプト実現のための課題：エンジン燃焼室の壁近くでの火炎の滞留や後燃え[注6)]によって、エネルギー損失（冷却損失）が生じたり燃焼エネルギーの仕事への変換効率が低くなったりする。
　　③　実施内容と成果：燃料噴霧の発達や燃料濃度の分布に関する詳細な解析と実験

により、燃料噴射の在り方と火炎形成の関係を解明。また、後燃えの要因を特定。その結果に基づき、燃料噴霧が空気を巻き込みながら最適に分散する、燃料噴射技術を開発。これにより、火炎が壁から離れて配置され、かつ後燃えを低減する高速空間燃焼を実現し、熱効率向上の実証に成功。

３．損失低減に関する研究（ガソリン燃焼とディーゼル燃焼の両方に共通）

研究実施者：損失低減チーム（研究責任者：大聖 泰弘　早稲田大学 研究院次世代自動車研究機構　特任研究教授）

３－１．　機械摩擦損失の低減に関する研究

（１）研究実施者：機械摩擦損失低減グループ（リーダー：三原 雄司　東京都市大学 工学部機械工学科　教授）

（２）研究開発概要：固体潤滑剤と軟質金属から構成される高耐久の低摩擦層およびその表面改質技術の開発などにより、エンジンの摺動表面に低摩擦機能を付与し、機械摩擦損失の５５．５％低減を実証。

３－２．　排気エネルギー有効利用に関する研究（ターボ過給の高効率化）

（１）研究実施者：ターボ過給ワーキンググループ（リーダー：宮川 和芳　早稲田大学 理工学術院 基幹理工学部　教授）

（２）研究開発概要：流体解析に基づき翼列、流路を新たに設計するとともに、伝熱と軸受での摩擦を考慮したターボ過給機システムを構築。市販ターボ過給の効率を１０ポイント以上上回る、最大６９％程度の効率値を実証。

３－３．　排気エネルギー有効利用に関する研究（熱電変換システムの高効率化）

（１）研究実施者：熱電変換ワーキンググループ（リーダー：飯田 努　東京理科大学 基礎工学部 材料工学科　教授）

（２）研究開発概要：発電温度域を中低温に拡大できる、新たな素子およびモジュールを開発。排気熱との熱交換システムを含めて、最大１．３％程度の熱効率相当の性能があることを実証。

＜今後の展開＞

上記の成果に対して産業界が寄せる期待は大きく、ＡＩＣＥを構成する各自動車会社では、エンジンの計測技術や機能予測技術、また設計改善の方向付けなど、活用が始まっています。本プロジェクトで得た、乱流燃焼のメカニズム、壁面近傍の熱流体の挙動、ノッキングが起こる仕組みなどの基礎的な最先端の知見や技術などは、各社に競争領域の開発研究や設計に取り込まれ、乗用車としての性能開発、信頼性・耐久性や、製品としての量産性などを確保する方策と合わせて検討され、製品化に結びつきます。

また、各成果をさらに発展させるための産産学学連携による研究開発を、本プロジェクト終了から間をおかずに開始・持続できるようにする、産学での検討も進んでいます。

さらに注目すべきは、本プロジェクトで構築したモデルやソフトウェアがもたらす、産学双方における研究開発に資する効果です。本プロジェクトでは、得られた知見を、実験

式や物理式で表現されるモデルやソフトウェアの形式にまとめることを重視してきました。これによって各成果が明確になり、大学等での次の研究開発で継承されやすくなります。その結果、エンジン工学に限らない基礎から応用にわたる幅広い学問分野への発展が期待されていると同時に、自動車産業のみならず、燃焼や流体を扱う広い産業分野に、経験と勘を超えたサイエンスベースの先進的なものづくりであるモデルベース開発（ＭＢＤ）[注7]をもたらすことが大いに期待されています。

＜その他の成果＞

本プロジェクトでは、上記の他に以下のような成果も得ています。

（１） 自動車エンジンの３次元燃焼解析ソフトウェア「ＨＩＮＯＣＡ（火神）」の構築

自動車エンジンの開発では、コンピューターを援用した高度な設計、ＣＡＥ（Ｃｏｍｐｕｔｅｒ Ａｉｄｅｄ Ｅｎｇｉｎｅｅｒｉｎｇ）が一般的になってきています。本プロジェクトでは、先進的な流動・燃焼場を高精度に解析できる、科学的にも実用的にも優れた燃焼解析ソフトウェア「ＨＩＮＯＣＡ（火神）」を開発しました。ＨＩＮＯＣＡには、複雑な流動、超希薄燃焼、またＰＭ（粒子状物質）生成などの現象を物理および化学に基づき捉えモデル化したＲＹＵＣＡ（粒神）など、本プロジェクトによる最先端の知見が導入されています。これらは、宇宙航空研究開発機構（ＪＡＸＡ）による航空宇宙分野で培ってきた計算科学技術を取り入れたこと、さらに、従来にないオールジャパンの産産学学連携により、乱流燃焼、熱伝導、反応性流体、数値解析などを対象とする多岐にわたる科学技術力を結集させたことによって実現したものです。

（研究実施者：草鹿 仁（早稲田大学 理工学術院 創造理工学部　教授）、溝渕 泰寛（ＪＡＸＡ 航空技術部門　主幹研究開発員）、店橋 護（東京工業大学 工学院　教授）、秋濱 一弘（日本大学 生産工学部　教授）ほか）

http://www.jst.go.jp/sip/event/k01_hinoca/index.html

（２） 自動車エンジン燃焼のモデルベース制御システム「ＲＡＩＣＡ（雷神）」の構築

実際に路上を走行する自動車は、常に回転数やトルクを変化させている、すなわち過渡状態にあります。また、エンジンの経年劣化による性能の変化もあります。高い熱効率を生む燃焼状態を維持するには、これらの環境変化に左右されないようにしなくてはなりません。本プロジェクトでは、過渡状態や外乱のある環境においても、目指す理想的な燃焼を保持することができる新たな制御システム「ＲＡＩＣＡ（雷神）」を構築しました。

（研究実施者：金子 成彦（東京大学 大学院工学系研究科　教授）、山崎 由大（同准教授）ほか）

http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/scc/

これらの成果は、２０１９年１月２８日に東京大学 安田講堂にて開催される、ＳＩＰ「革新的燃焼技術」最終公開シンポジウムで発表します。お申込みおよび詳細については、以下をご確認ください。

ＵＲＬ：https://www.jst.go.jp/sip/event/k01/20190128/index.html

＜参考図＞

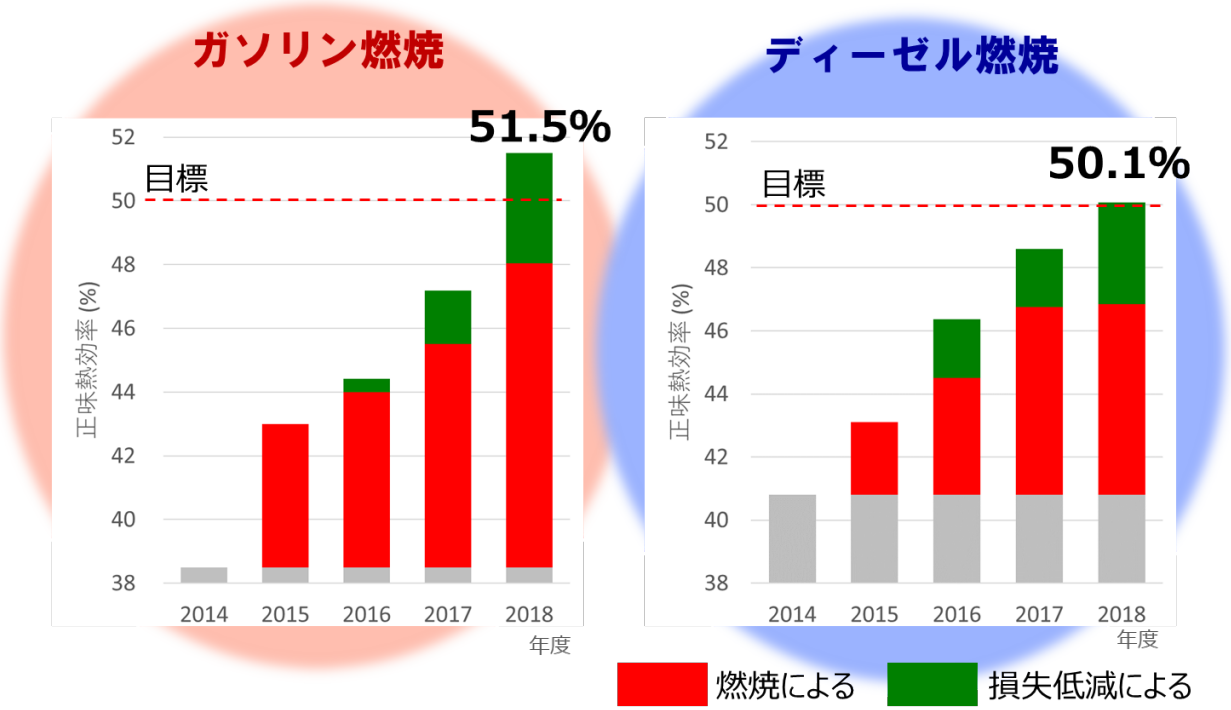

図１　正味最高熱効率５０％超達成の推移

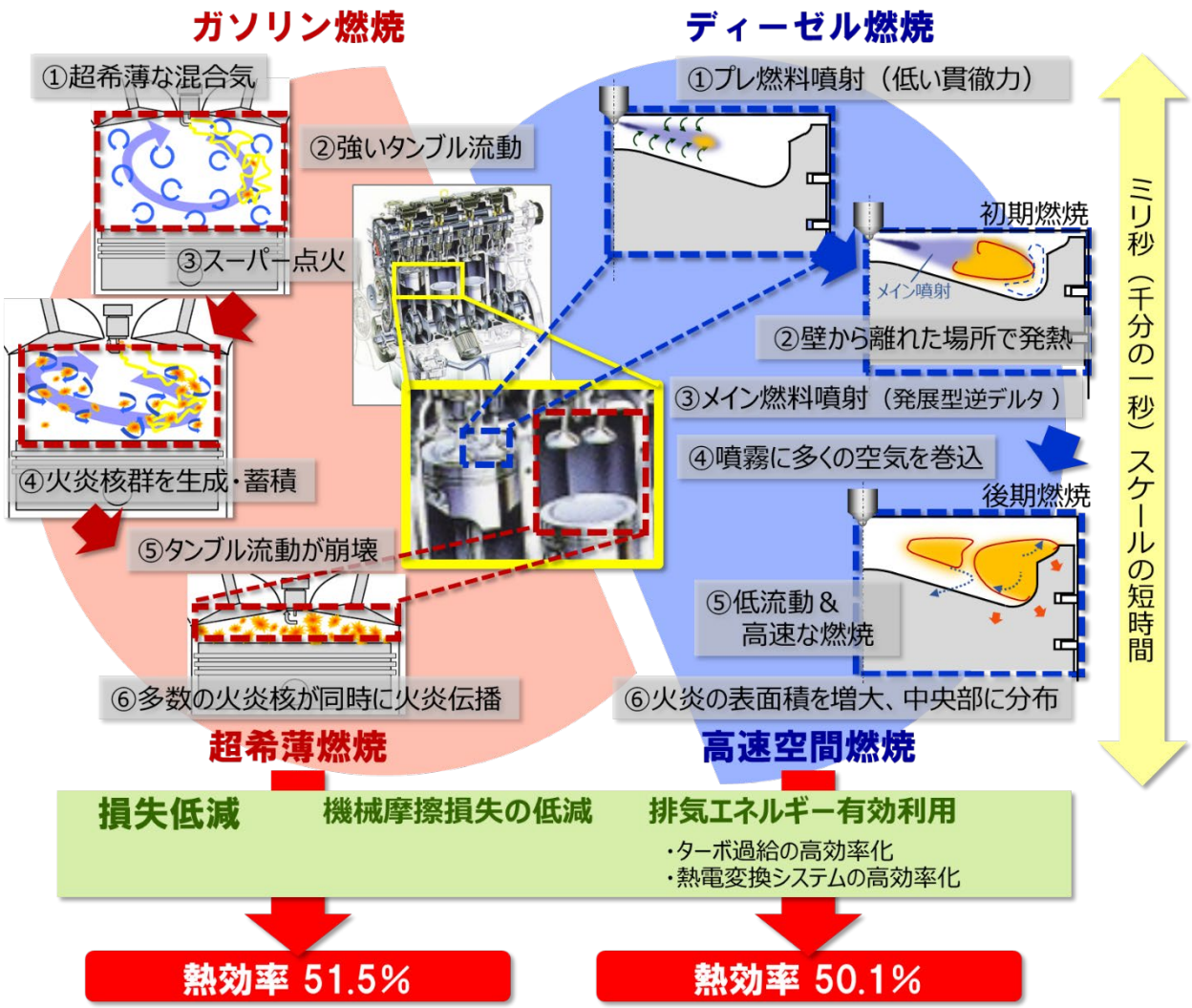

図２　正味最高熱効率５０％超を達成した技術の概要

○　ガソリン燃焼の「超希薄燃焼」の仕組み（上左）：強いタンブル流動（縦渦）を導入した、超希薄な混合気[注8)]をピストンで圧縮し、微細な渦群を生成させる（①、②）。そこに適切な間隔をあけて複数回、強力な放電エネルギーを与えるスーパー点火を行うと（③）、タンブル流に追従して放電路が伸長するとともに、未燃ガスに放電エネルギーが分散的に供給され、燃焼室内にいくつもの火炎核が生成・蓄積される（④）。ピストンによって混合気が最も圧縮されると、タンブル流動が崩壊する（⑤）。圧縮による圧力・温度の上昇に伴って、多数の火炎核が同時に火炎伝播を開始・加速すると考えられる急速燃焼となり（⑥）、安定した超希薄燃焼が実現できた。

○　ディーゼル燃焼の「高速空間燃焼」の仕組み（上右）：燃料噴射を、４回に分けて量を最適に配分する多段噴射とする。前半に貫徹力の低いプレ噴射を行い、壁から離れた場所に火炎が発生するようにする（①）。次いでメイン噴射を行うと、プレ噴射による高温を受けて、壁から離れたところに火炎が発生する。火炎と壁の間には十分距離があるため、冷却損失が抑えられる（②）。メイン噴射は噴射量を徐々に減らす（「発展型逆デルタ噴射」と名付けた）ようにすることで（③）、霧状になった燃料が多くの空気を巻

き込みながら進むようになる（④）。これによって低流動かつ高速な燃焼となり（⑤）、従来燃焼に比して表面積の多い火炎が燃焼室の中央部に位置（⑥）する、高速空間燃焼が実現できた。

○ 成果の統合（下中央）：上記の成果と、損失低減の成果を統合し、５０％を上回る正味最高熱効率を達成することができた。

＜用語解説＞

注１）正味熱効率とエネルギー損失

実際のエンジンでは以下のようなエネルギー損失が発生し、燃料が持つエネルギーを仕事に変換できていない部分がある。

- 冷却損失（燃焼ガスの熱エネルギーが、それより低温の燃焼室の壁を通じて外部に放出されることによって失われるエネルギー損失）
- 排気損失（燃焼ガスの熱エネルギーが、排出されるガスとともに失われるエネルギー損失）
- 機械摩擦損失（エンジンの摺動部分の摩擦によって失われるエネルギー損失）など

正味熱効率とは、これらの損失を差し引き、燃料が持つ全エネルギーをエンジンの有効仕事に変換できた割合をいう。

注２）超希薄燃焼（スーパーリーンバーン）

理論空燃比（ストイキオメトリー）よりも燃料濃度を半分以下にした燃焼。
単位質量あたりの燃料を完全燃焼させるために必要な空気の最小質量は、燃料ごとに理論的に決まっている。このときの空気質量を燃料質量で割った比を、理論空燃比（ストイキオメトリー）という。当プロジェクトでは、理論空燃比よりも燃料の濃度が半分以下の混合気での燃焼を、「超希薄燃焼」とした。なお、既存のガソリンエンジンでは、安定した燃焼を実現するために理論空燃比に近い値で燃焼させているのが一般的である。

注３）産産学学連携体制

１つの企業と１つの大学あるいは研究室でなされる「産学連携」と異なり、複数の企業が競争領域前の協調領域において連携し、また複数の大学・研究室も連携し、さらにこれらが相互に有機的に連携する体制を意味する。本プロジェクトで、目指す連携の在り方として名付けたものである。

注４）トライボロジー

潤滑、摩擦、摩耗、焼付きなど、相対運動をしながら相互に作用を及ぼし合う２つの表面、およびこれに関連する諸問題と実際の応用に関する科学と技術。

注５）自動車用内燃機関技術研究組合（ＡＩＣＥ）

日本の自動車メーカー９社と２団体で構成され、世界的に関心の高まる内燃機関の環境性能に対して合同で研究を加速していくことを目的に２０１４年に発足した技術研究組合。

各企業で共通な研究課題について、産学官が連携して基礎・応用研究を実施し、その成果を活用して各企業での開発を加速させる活動をしている。
ホームページＵＲＬ：http://www.aice.or.jp/

注６）後燃え
　燃料噴射を終えてピストンが膨張行程に入っている際に、未燃燃料が燃え続く現象。後燃えが長期にわたると、熱効率の低下の原因となる。また、すすの酸化が進まずＰＭ（粒子状物質）排出が増えるため、環境負荷の面でも問題となる。噴射圧力を高め噴射時期を早めると後燃えを低減できるが、燃焼が急激になり、ＮＯｘの排出および燃焼による騒音が悪化するという背反があるため、高度な後燃え制御が必要となっている。

注７）モデルベース開発（ＭＢＤ）
　ものづくりにおいて、数値シミュレーションを活用して開発する手法のこと。製品が持つ多種多様な機能がどう発揮されるかを、ものを試作せずにコンピューターで精緻に確認できるため、開発を高効率化することができるため、国内外の先端企業が取り入れつつある。今後、基礎的な現象解明や物理といった科学に基づく最先端の高度モデルを導入することによって、さらに発展させることが望まれている。

注８）混合気
　噴射されて気体になった燃料あるいは噴霧されて霧状になった燃料と、空気が混ざり合ってできている気体のこと。

＜お問い合わせ先＞

＜ガソリン燃焼の研究に関すること＞
飯田 訓正（イイダ ノリマサ）
　慶應義塾大学 大学院理工学研究科　特任教授
　〒223-8522 横浜市港北区日吉３－１４－１
　http://sip.st.keio.ac.jp/

＜ディーゼル燃焼の研究に関すること＞
石山 拓二（イシヤマ タクジ）
　京都大学 大学院エネルギー科学研究科　教授
　〒606-8501 京都市左京区吉田本町

＜ＨＩＮＯＣＡ、ＲＡＩＣＡおよびＲＹＵＣＡの研究に関すること＞
金子 成彦（カネコ シゲヒコ）
　東京大学 大学院工学系研究科　教授
　〒113-8656 東京都文京区本郷７－３－１

＜損失低減の研究に関すること＞
大聖 泰弘（ダイショウ ヤスヒロ）
早稲田大学 研究院次世代自動車研究機構　特任研究教授
〒169-8555 東京都新宿区大久保３－４－１

＜うち、機械摩擦損失の低減の研究に関すること＞
三原 雄司（ミハラ ユウジ）
東京都市大学 工学部機械工学科　教授
〒158-8557 東京都世田谷区玉堤１－２８－１

＜うち、ターボ過給の高効率化の研究に関すること＞
宮川 和芳（ミヤガワ カズヨシ）
早稲田大学 理工学術院 基幹理工学部　教授
〒169-8555 東京都新宿区大久保３－４－１

＜うち、熱電変換システムの高効率化の研究に関すること＞
飯田 努（イイダ ツトム）
東京理科大学 基礎工学部　教授
〒125-8585 東京都葛飾区新宿６－３－１

＜ＳＩＰ事業に関すること＞
内閣府 政策統括官（科学技術・イノベーション担当）付　参事官（課題実施担当）付
〒100-8914 東京都千代田区永田町１－６－１
https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/

＜プロジェクト運営に関すること＞
科学技術振興機構 イノベーション拠点推進部
〒102-0076 東京都千代田区五番町７ Ｋ’ｓ五番町
http://www.jst.go.jp/sip/k01.html

＜報道担当＞
科学技術振興機構 広報課
〒102-8666 東京都千代田区四番町５番地３

慶應義塾 広報室
〒108-8345 東京都港区三田２－１５－４５

京都大学 総務部 広報課 国際広報室
〒606-8501 京都市左京区吉田本町

東京大学 工学部・大学院工学系研究科 広報室
〒113-8656 東京都文京区本郷７－３－１

早稲田大学 広報室 広報課
〒169-8050 東京都新宿区戸塚町１－１０４