

「産産学学連携」でガソリン燃焼を高効率に

日本の自動車技術の分野では、意外なことに大規模な産学連携の事例がほとんどない。複数の企業や大学がコンソーシアムで活動する欧州との大きな差だ。こうした現状に対する産学共通の危機感を背景に、SIP「革新的燃焼技術」では持続的な産学連携体制の構築を目指して取り組んでいる。「産産」「学学」を含む新たな産学連携体制でガソリンエンジンの最大熱効率50パーセントに挑むのが、研究責任者としてガソリン燃焼チームを率いる慶應義塾大学の飯田訓正特任教授と産業界の立場からプロジェクトに関わるトヨタ自動車の中田浩一郎長だ。

いいだ のりまさ
飯田 訓正

慶應義塾大学
大学院理工学研究科 特任教授

1980年 慶應義塾大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。同年 同大学理工学部助手、85年 専任講師、90年 同助教授を経て、97年より同教授。この間米国ウィスコンシン大学訪問教授、神奈川科学技術アカデミー第2研究室室長などを兼任。2016年より現職。14年よりSIP「革新的燃焼技術」研究課題の「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。



ことは事実です。しかし、温室効果ガス排出量の低減は喫緊の課題となっており、今後さらに研究開発を加速させるべきという議論もあります。短期間で50パーセントを達成するためには、従来とはまったく異なるコンセプトが必要です。その1つが「スーパーリーンバーン(超希薄燃焼)」です。

リーンバーンとは、燃料を希薄な状態で燃焼させる技術だ。ガソリンエンジンでは、通常はガソリン1に対して空気量14.7が、ガソリンと空気とが過不足なく燃焼する混合比(理論空燃比)とされる。理論空燃比付近の燃焼は、自動車の走行性能と燃料消費のバランスが良い。さらに1つの触媒で排出ガス中の炭化水素、一酸化炭素、窒素酸化物を無害化することができる三元触媒は、理論空燃比で最も効果を発揮する。このため、世界の自動車の多くがこの考え方で作られているが、熱効率向上という観点で見るとまだ課題があった。それを解決するのが、超希薄な状態で燃焼させるスーパーリーンバーンだ。

飯田さんはこう説明する。「理論空燃比の燃焼ガスは約2300度と高温で、

シリンダーの壁などから熱が外に逃げてしまうため、エネルギー損失が大きかったのです。空気をたくさん投入すると1700度ぐらいまで下がり、損失を減らすことができます。SIPでは、空気の量を従来の2倍というスーパーリーンバーンにすることによって、熱効率を50パーセントに高めることを目指しています」。

共通の課題を協力して解決 競合各社が産の共同体を設立

今でこそ「50パーセントの目標に着実に近付いている」と手応えを得ている飯田さんだが、自動車メーカーから最初に技術に関する相談を受けた時には、大学でできることはやり尽くされているだろうと考えていた。理論空燃比でガソリンを燃やし三元触媒を備えた高品質なエンジンが、日本だけでなく、欧州、米国、韓国、さらには中国でも大量に生産されているからだ。

日本では自動車技術の研究開発は企業が自前で行うのが一般的だった。特に内燃機関技術を研究している大学は少なく、自動車メーカーとの共同研究の事例も限られていたのである。

中田さんは「欧州などで産学連携が進んでいるのと比較すると、日本では各企業がばらばらに課題の解決に当たっているのが現状です」と話す。例えばドイツではFVVと呼ばれる内燃機関の研究コンソーシアムが1950年代から活動し、自動車メーカーを中心に、自動車部品、研究開発ベンチャーなど150社以上が参画している。FVVは自動車メーカーなどのニーズを受けて大学と共同で基礎・応用研究を行い、これらの成果がフィー

ドバックされ各社の開発に活用されることで、欧州の自動車メーカーはより早くに製品を市場に出すことができる。

この他、欧州では有力な技術コンサルティング会社も多く、日本の自動車メーカーの一部も最近、研究開発を委託している。その傾向が続けば、欧州に日本の技術が流出する懸念もある。

「日本の自動車メーカーも、そこに危機感を持っていました。そこで各企業が

共通に抱える基礎・応用領域の課題を共同で解決することを目的として2014年に自動車用内燃機関技術研究組合(The Research association of Automotive Internal Combustion Engines: 略称AICE(アイス))を設立したのです」と中田さんは説明する。

AICEは、日本の自動車メーカー9社と2団体で構成される技術研究組合で、世界的に関心の高まる内燃機関の環境



なかた こういち

中田 浩一

トヨタ自動車
パワートレーンカンパニー
パワートレーン先行機能開発部 部長

1990年 京都大学工学部卒業。同年トヨタ自動車入社。2サイクルエンジンの燃焼研究開発を経て、点火系開発に従事。2000年頃から熱効率向上の担当として研究を実施。得られた知見を基に、新型エンジンの先行開発に携わる。現在は、さらに燃料研究を進めながら、AICEやSIPに参加。

性能に対して合同で産学連携の基礎・応用領域の研究を実施する。これらの成果を各社において競争領域に活用し、開発を加速していくことが目的だ。現在はSIP「革新的燃焼技術」の管理法人であるJSTと連携協定を締結し、研究の推進、情報発信、研究成果の活用に向けた取り組みなど、広範囲にわたってプログラムを支援している。AICEの燃焼研究委員会の副委員長でもある中田さ

さんは「SIPの公募の時期と、AICEの立ち上げの時期がほぼ一致したこともあり、『何か貢献できるのではないかと考えたのです』とプログラム参加の経緯を話す。

SIPとAICEが連携 産学の英知を結集

SIP「革新的燃焼技術」の研究実施体制の大きな特徴は参加大学の数だ。「ガソリン燃焼チーム」、「ディーゼル燃焼チーム」、「制御チーム」、「損失低減チーム」の4チームに、75大学780人が参加する(図3)。飯田さんが研究責任者を務めるガソリン燃焼チームだけでも、延べ29の研究機関が連携しながら研究を進めている。

その狙いについて、飯田さんは次のように説明する。「スーパーリーンバーンは新しい技術ですから、未解明の現象が

目標達成の鍵を握る「スーパーリーンバーン」

燃料の持つエネルギーを仕事に変換する効率を熱効率と呼ぶ。熱効率の向上は、燃料消費を減らし、二酸化炭素(CO₂)排出量を減らす上で不可欠だ。自動車の電動化が進む一方で、2040年でも全自動車台数の約89パーセントは内燃機関が搭載されると予測されているからだ(図1)。

このような背景もあり、SIP「革新的燃焼技術」は、エンジンの最大熱効率50パーセントの実現および持続的な産学連携体制の構築という目標を掲げている。「ガソリン燃焼チーム」、「ディーゼル燃焼チーム」、「制御チーム」、「損失低減チーム」が互いに成果を受け渡し、チーム間連携で目標達成を目指す。ガソリン燃焼チームの研究責任者である慶應義塾大学大学院理工学研究科の飯田訓正特任教授は、「ガソリンエンジンでは、2018

年9月現在、熱効率を48.6パーセントまで高めることができました。最終年度である今年度中に、50パーセントを達成したいと考えています」と力を込める。

ガソリンエンジンの熱効率は現在40パーセント程度にとどまっている。それを50パーセントに向上させると、大幅な省エネルギー化が実現し、CO₂削減に貢献できるが、それは容易ではない。何しろ、熱効率は1970年代の30パーセントから40年以上をかけて40パーセントまでしか向上していないのである。

プログラムを産業界の視点で支援する「企業支援者」として参加するトヨタ自動車の中田浩一郎部長は次のように語る。

「熱効率を40パーセントまで向上させるのに長い時間がかかった

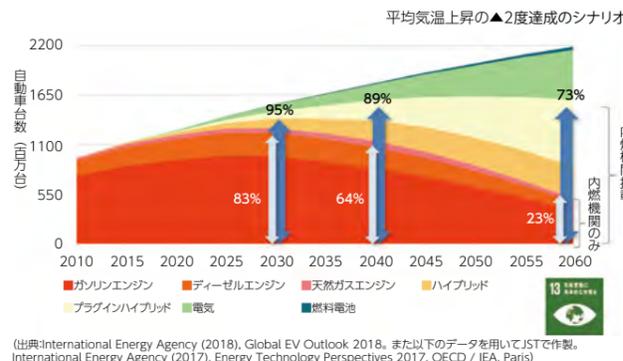


図1 世界将来予測による、自動車保有台数の構成。自動車の電動化が進んでいるが、全体で見ると2040年でも内燃機関は主力となっている。内燃機関の高効率化は、産業競争力強化と温暖化対策に大きな効果がある。



図2 スーパーリーンバーンによる低温燃焼の実現により、エネルギー損失を抑え、熱効率を向上できる。



■図3 SIP「革新的燃焼技術」の研究体制。75大学780人の「学」研究チームに、自動車9社、100人の「産」研究チームが加わった。実機試験ができる4拠点(ラボ)はフル稼働し、小野測器、堀場製作所の2社は、SIP終了後も協力予定だ。

たくさんあります。過去の知見がそのまま適用できないので、どういう現象なのか、何がそれを支配しているのか、科学の視点でしっかりと見直す必要があります。そのためには、エンジンの研究だけでなく、さまざまな分野の研究者の力を借りる必要がありました。1つ1つの現象に対して、さまざまな視点から議論を重ね、新しい知見を積み上げていかなければなりません。

特筆すべきは、全てのチームに対してAICEが連携し、それぞれの支援を行うことだ。中田さんは次のように話す。「AICE 燃焼研究委員会の中には『ガソリン燃焼分科会』、『ディーゼル燃焼・制御分科会』、『CAE・PM分科会』、『排気エネルギー活用分科会』、『摩擦損失低減分科会』があります。それぞれの分科会が、SIPの各チームを支援しています。産と学がそれぞれ知識や経験を持

ち寄り、同じ目標に向け切磋琢磨しているのだ。

所属も立場も異なる多くの研究者が集まるため、マネジメントは容易ではない。このSIP「革新的燃焼技術」全体をまとめる杉山雅則プログラムディレクター(トヨタ自動車 未来創生センター エグゼクティブアドバイザー)のリーダーシップに加え、プログラムを支えたJSTの存在も大きかったと飯田さんは振り返る。「JSTが会議の企画調整、知財戦略の立案、さらに産学間の橋渡しなど、さまざまな支援をしてくれました。これにより、多くの大学が5年にもわたり、団結して研究できました。」

実機試験ができる拠点を整備 研究者の交流の場に

「SIPはまさに『オールジャパン』の産学

連携の研究体制を構築するものです。かけ声だけでなく、本物にするためには、やはり、人と人とのコミュニケーションが重要です」と中田さんは指摘する。

AICEの取り組みは、いわば「産産」の連携といえるが、競合企業同士が集まった共通の課題に取り組むのは日本の自動車産業の歴史でも初めてである。「最初は、各社からやってきた人たちも、『何をやればいいのか』と手探り状態でした。しかし、私も含めて何よりエンジンの燃焼が好きの人たちですから、次第に打ち解け、仲間意識も芽生えてきました」と中田さんは続ける。

それぞれが会社のミッションを背負ってきているという使命感もあるだろう。50パーセントの目標を達成するためには、いつまでに何をしなければならぬかを逆算して行動する習慣も身に付いている。それに対して、「学」の世界では、過去の先達による研究を理解した上で、自分なりの知見を加えて次の世代に渡していくといった性格を持つ。企業の研究開発のスタイルとは異なる点も多い。

飯田さんはこう話す。「研究計画を立てる段階、さまざまな装置を製作する段階、初期のデータが出てきた段階など、さまざまなフェーズで『50パーセント達成のためにどんな提案ができるのか』と常に問いかけながら議論を重ねました。大学の研究者、特に若い人にとってはそのようなことを問われるのは初体験だったと思います。しかし、その中から、革新的なものが生まれるのです。」

さまざまな分野の研究者が持つ専門性が融合することで、エンジンシリンダー内に強い流れ(タンブル流)を作った際の、点火プラグ近傍での流体の挙動に関して新たな知見が得られた。これを基に点火プラグの電極形状を改良するアイデアが生まれ、スーパーリーンパーンの実現に向けて大きく前進した。

「各大学が個別に持っている実験装置は、形状、寸法、性能がそれぞれ異なっているため、ばらばらに実験しては、なかなかキャッチボールもできません。また、精度の高い測定をするには、高性能な計測装置や解析装置も必要です。そこで、SIP「革新的燃焼技術」では、さまざまな大学のメンバーが自由に利用でき



■図4 小野測器の協力により設置されたガソリン燃焼チーム共同研究用拠点。産学の研究者たちが入り混じって研究に取り組み、時に議論する。人材育成の場としても有効に機能した。

る研究拠点をチームごとに整備しました。異なる機関の研究者であっても、同じ燃料を使い、共用のエンジン設備で取ったデータに基づいて、分析や議論ができるのは大きなメリットです」と飯田さん。

各拠点は、それぞれのチームの研究責任者が所属する大学を中心に整備された。特筆すべきは、ガソリン燃焼チームおよびディーゼル燃焼チームの拠点が、それぞれ民間企業である計測機器メーカーの施設内に整備されていることだ。ガソリン燃焼チームの拠点は小野測器横浜テクニカルセンター内に、ディーゼル燃焼チームの拠点は堀場製作所本社・工場内に整備されている(図4)。ここからも、密接な産学連携体制がうかがえる。

構築した大規模連携をいかに維持するのか

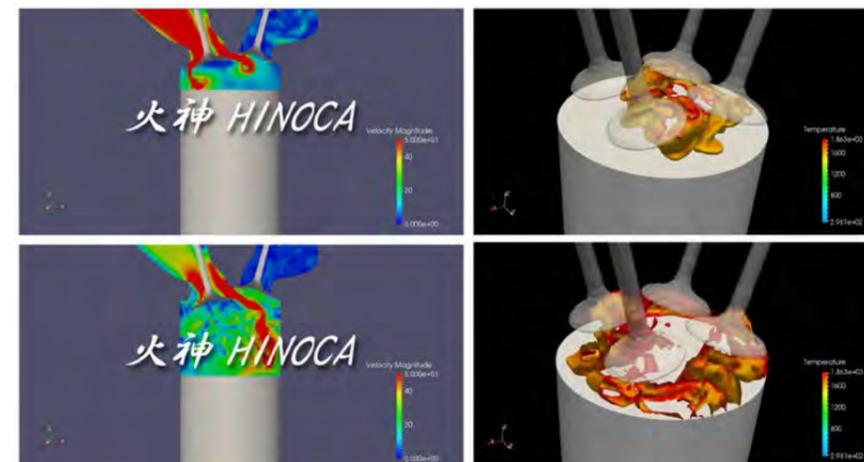
拠点は大学と大学、いわゆる「学学」の交流の場になるとともに、人材育成の場にもなったという。小野測器内にあるガソリン燃焼チームの拠点「SIPエンジンラボ」では、160人以上の博士課程、修士課程の学生が、小野測器の協力により、企業の専門家による安全教育を受けた。作業着を着て、安全帽をかぶり、安全靴を履いて実験するといった基礎的な部分も含めて、学生時代に企業レベルの安全意識に触れることは貴重な体験になったという。

中田さんは次のように話す。「当社からもマネジメントをする人材と研究を進める人材が参加しました。プログラムをどうやって進めていくのか、マネジメントの考え方を伝えていきます。また、社会人

学生としてSIPに参加し博士号を取得した社員もいます。学生は企業におけるミッションに対する意識を学べたでしょう。企業人も学生との交流で気付かされることがあったとも聞いています。同じ目標に向けて一緒に取り組むことで、双方得るものは大きかったと思います。」

「産産学学」の力の結集により、SIP終了後を見据えた新たな成果も生まれている。その1つがガソリン燃焼チームと制御チームとの連携により生まれた自動車エンジンの3次元燃焼解析ソフトウェア「HINOCA(火神)」だ(図5)。

熱効率の目標達成に向けては、エンジン内部の複雑な現象を把握するための高度なシミュレーション技術が不可欠となる。「HINOCA」は宇宙航空研究開発機構(JAXA)が持つ高度な流体解析技術をベースに構築されており、ガソリン燃焼チームが現象解明に基づいて見いだした新しい知見が、制御チームによって現象を再現するモデルとして組



■図5 HINOCAによるシミュレーション結果。左はエンジン内に取り込んだ空気の筒内での流動、排出の様子。赤に近いほど、速度振幅が大きい。右はエンジン内の火炎伝播の様子。赤に近いほど温度が高い。高精度なだけでなく従来のソフトウェアより短時間で計算できる。動画はこちら▶

