

## ■特集／FEATURE■

—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」の成果／Results of Research in SIP Innovative Combustion Technology—

## SIP「革新的燃焼技術」ガソリン燃焼チームの研究成果

## —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—

## Research and Development on Super Lean Burn Combustion for High Efficiency SI Engines

飯田 訓正<sup>1\*</sup>・横森 剛<sup>2</sup>・津江 光洋<sup>3</sup>・北川 敏明<sup>4</sup>・小酒 英範<sup>5</sup>・三好 明<sup>6</sup>・森吉 泰生<sup>7</sup>

IIDA, Norimasa<sup>1\*</sup>, YOKOMORI, Takeshi<sup>2</sup>, TSUE, Mitsuhiro<sup>3</sup>, KITAGAWA, Toshiaki<sup>4</sup>, KOSAKA, Hidenori<sup>5</sup>, MIYOSHI, Akira<sup>6</sup>, and MORIYOSHI, Yasuo<sup>7</sup>

<sup>1</sup> 慶應義塾大学 大学院理工学研究科 〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1  
Keio University, Graduate School of Science and Technology, 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522, Japan

<sup>2</sup> 慶應義塾大学 理工学部 〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1  
Keio University, Department of Mechanical Engineering, 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522, Japan

<sup>3</sup> 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1  
University of Tokyo, Graduate School of Engineering, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

<sup>4</sup> 九州大学大学院工学研究院 〒819-0395 福岡市西区元岡 744  
Kyushu University, Faculty of Engineering, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

<sup>5</sup> 東京工業大学工学院 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 石川台 6 号館  
Tokyo Institute of Technology, School of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Ishikawadai 6th Building 2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan

<sup>6</sup> 広島大学大学院工学研究科 〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1  
Hiroshima University, Graduate School of Engineering, 1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima 739-8527, Japan

<sup>7</sup> 千葉大学大学院工学研究院 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33  
Chiba University, Graduate School & Faculty of engineering, 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8522, Japan

**Abstract:** The "Innovative Combustion Technology" program, a national project is established under the Cabinet Office, Government of Japan as a part of the "Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP)". The "Gasoline Combustion Team" is one of teams of the "Innovative Combustion Technology" program.

The "Gasoline Combustion Team" is comprised of Keio University as a Leader university and 29 universities as a Cluster university. Upon agreement with the Japan Science and Technology Agency (JST), we have been conducting the research on the "Super-Lean Burn for Gasoline Engines" with a support of the Research Association of Automotive Internal Combustion Engines (AICE) under the strong industry, academia and government collaboration.

This paper introduces both scientific and technological approaches to innovative combustion technologies to realize the "Super-Lean Low Temperature Combustion", targeting a thermal efficiency of 50%.

**Key Words:** SI engine, Combustion, Super-Lean Burn, Tumble, Super-Igniter

## 1. 緒言

## 1.1. 研究開発の背景と位置づけ

従来、乗用車用ガソリンエンジンは、理論空燃比で断熱圧縮した混合気を着火・燃焼させてきた。この燃焼は燃焼

期間が短い一方、燃焼ガスの温度はおよそ 2600 K になる。そのため、燃焼ガスの熱エネルギーが燃焼室壁面から逃げることで生じる冷却損失は、熱収支の 30 % をも占める。そこで SIP 燃焼のガソリン燃焼チームでは、これまでにない「超希薄燃焼」にて燃焼温度を 2000 K まで低減し、熱損失を大幅に低減させることで相対的に熱効率 50 % を実現することとした (図 1)。

\* Corresponding author. E-mail: iida@sd.keio.ac.jp

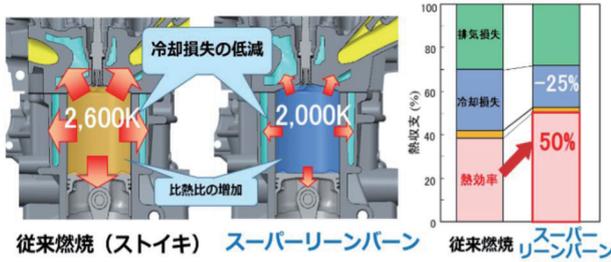


図1 スーパーリーンバーンによる低温燃焼の実現.

スーパーリーンバーン・SIエンジンの運転条件として、供給混合気の空気過剰率 ( $\lambda = 2.0$  超), タンブル流動で生成するプラグ近傍での平均流速・乱れ強さ ( $u = 20 \sim 50$  m/s,  $u' = 5$  m/s) を目標設定した。

1.2. ガソリンエンジン熱効率向上の技術シナリオ

超希薄燃焼がこれまで世界で実現されなかったのは、燃焼させること自体の難しさにある。希薄化すると、燃焼期間が増大し、また、サイクル毎に燃焼が起こったり起こらなかったりと不安定になり、エンジンとして作動不可能であった(図2)。

そこで同チームでは、以下の個々の課題を達成し、さらにこれらを統合することで、エンジンでの超希薄燃焼を実現させることに挑んだ(図3)。

- ①超希薄かつ超均質なガソリン空気混合気を導入する。
- ②吸気行程にて燃焼室内に強いタンブル流動を形成する。
- ③電極付近の流動が 25 m/s となる条件下でも火炎核を安定

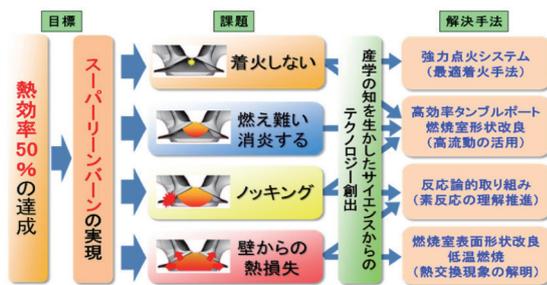


図2 スーパーリーンバーン実現の課題と解決手法.

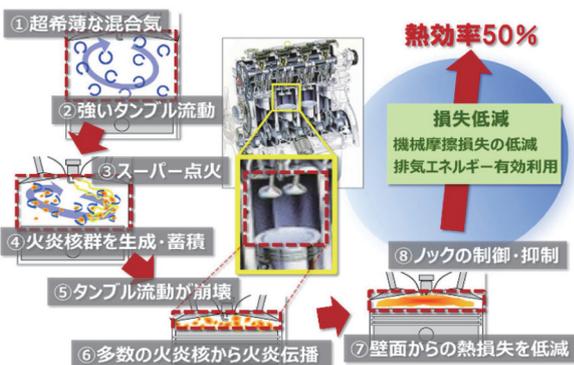


図3 スーパーリーンバーンエンジンの構想.

- して形成できるスーパー点火装置を開発する。
- ④タンブル流動の崩壊と火炎核の多点形成に基づき、安定した火炎伝播を実現する。
- ⑤低温燃焼により、燃焼室壁面から受ける冷却損失を低減する。
- ⑥燃焼の素反応に関する科学的解明とモデル構築により、ノッキング発生を抑制・制御する。

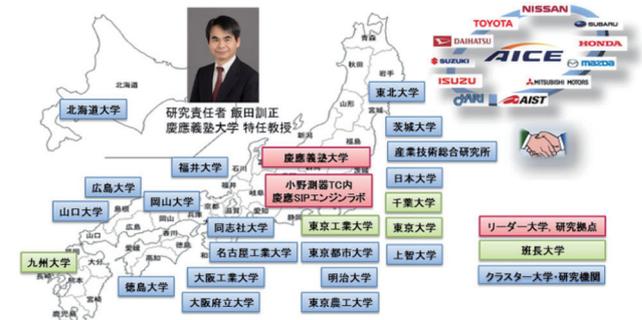
1.3. 研究開発と体制

以上を達成するべく、リーダー大学および全国の28のクラスター大学で5つの班(着火向上班, 火炎伝播促進班, 冷却損失低減班, 燃料・ノック抑制班, モデル/ばらつき縮減班)を編成し、基礎的な解析とエンジン実験を相互連携させる研究を進めた(図4)。

また、これを実現するために、チーム共用のSIP単気筒メタルエンジン, SIP可視化エンジン, 最新鋭のレーザ計測装置を揃え世界最先端の実験研究を可能とする拠点を(株)小野測器 横浜テクニカルセンター(横浜市緑区)内に整備し、産学工学の壁を越えてアイデア検証や熱効率の実証を行った(図5)。

1.4. 効率向上シナリオのサイエンスへの落とし込み

前項の研究構想を実現するためには、内燃機関工学や乱流燃焼科学に跨がる多様な研究者が深く連携しなくてはな



日本の知恵を結集し、世界を牽引する要素技術を創出 1) モデルの提供, 2) 熱効率向上のアイデア, 3) DBの構築により産業界の発展に貢献

図4 ガソリン燃焼チーム22大学28クラスター.



図5 ガソリン燃焼チーム研究拠点の構築.

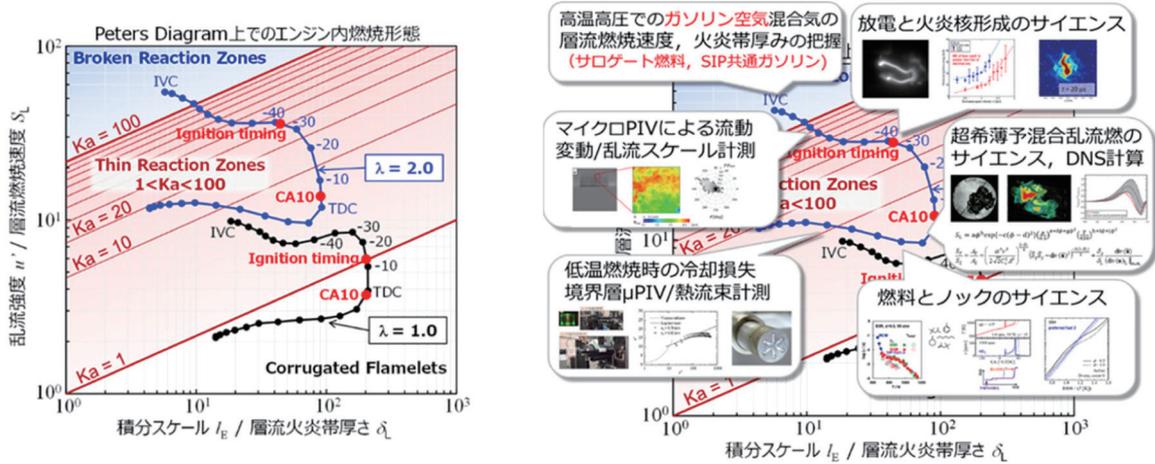


図 6 左：エンジン燃焼の構想を Peters Diagram (乱流燃焼状態図) に表示. 右：スーパーリーンバーン技術課題とサイエンスへの落とし込み.

らない. そのための工夫として, エンジンの設計要件・運転条件と, 乱流燃焼の物理量が結びつくよう, エンジン燃焼の構想を「Peters Diagram (乱流燃焼状態図)」に表し[1], あらゆる分野の研究者が共通基盤に立って議論できるようにした. 併せて, 層流と乱流の燃焼速度, 火炎帯厚み, 乱流の強度とスケール, 火花放電挙動と着火メカニズム, 低温燃焼ガスと壁面間の境界層構造と冷却損失の関係, 燃料とノッキング発生の関係など, エンジン乱流燃焼現象の系統的なサイエンスへの落とし込みを行うとともに(図 6) [2], 計測技術の開発, 機構の解明, モデル化を徹底した. ガソリン燃焼チームの研究者は SIP 共通ガソリンおよび共通サロゲート燃料を使用することで, 研究連携にて構築したデータベースの有用性・有効性を担保した. 燃料の組成および素反応機構は WEB サイトに公開した[3]. 物理モデルの構築および共通燃料の導入は, 日本のプロジェクトでは例のない取組であり, その意義は大きい.

こうして得た研究成果の一部を, 以下に記載する.

**a) 超希薄条件でも着火可能な火花点火システムおよび燃焼制御の研究開発**

- ・ 20 ~ 50 m/s という高流動場における, 火花放電挙動および着火メカニズムを解明[4]. これにより, 超希薄条件下でも, 確実に着火に至る放電パターンを見出し, 安定した燃焼を実現.
- ・ タンブル流が導入された Broken Reaction Zone の乱流燃焼形態を DNS 解析. これに基づき, 燃焼期間の短縮および等容度の向上を実現[5].

**b) 冷却損失を低減するための研究開発**

- ・ 壁面近傍の熱伝達メカニズムを境界層計測[6]や DNS 解析で解明. その制御手法を見出し, 冷損低減のコンセプトを創出. 冷却損失の低減と燃焼速度の促進を両立できる, 新規の遮熱技術である層状水蒸気遮熱[7]を開発. 低温燃焼の効果に加えて冷却損失を半減.

**c) 高圧縮比でもノックを抑制する研究開発**

- ・ 高圧縮比, 高過給かつ超希薄燃焼条件でのノックメカニ

ズムを化学反応論的アプローチにて解析, ノック抑制コンセプトを創出[8].

**d) 現象のモデル化・予測技術に関する研究**

- ・ 上記 (a)~(c) で得られた知見を体系化, エンジン開発に役立つ物理モデルの構築.

**2. エンジン熱効率 50 % の達成状況**

図 7 に SIP ガソリン燃焼チームと損失低減チームとの研究連携により達成した正味熱効率の 5 年間の推移を示す. 熱効率はガソリン燃焼チームの SIP 共通単気筒エンジンにて検証されたものであり, 積み上げ棒グラフの「茶色部分」がチーム達成成分を示している. チームの各研究班から提案された「燃焼サイエンスに基づく新規アイデア」により, プロジェクトの終盤に熱効率は飛躍的に向上した.

それらは以下のとおりである.

**1. 超希薄燃焼の進化 (慶応大・東工大) (図 8, 図 9)**

「スーパー点火装置 + 傘型電極プラグ + タンブル流のサイクル変動削減」⇒ λ 2.0 超の低温燃焼 + 高速燃焼の実現

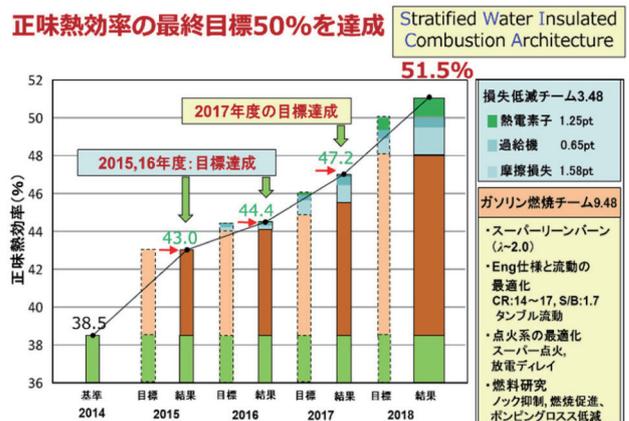


図 7 正味熱効率の達成状況.

・点火装置の強化と制御      ・タンブル流動の強化

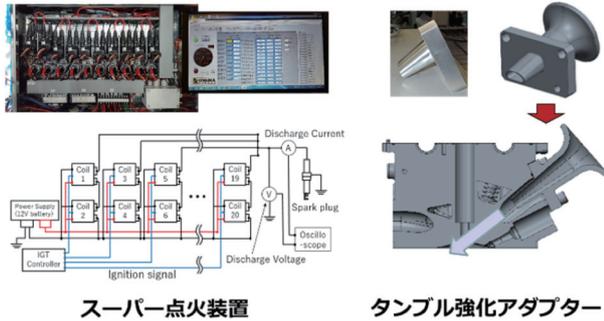


図8 超希薄燃焼を実現するための要素技術.

- ⇒  $\lambda$  2.0 超の希薄予混合気のノック抑制
- 6. ナノ秒パルス放電着火 (東北大)
  - ⇒ 着火と燃焼促進, 安定化
- 7. その他のアイデア検証
  - ・ ツインタンブル成層化 (千葉大)
  - ・ 誘電体バリア放電着火 (産総研)

これらの成果を統合した結果, 世界未踏であった正味熱効率 51.5% を実証することができた. 以下にガソリン研究チーム各班の主な成果について紹介する.

3. 着火向上に係る研究

3.1. 着火向上の概要

着火向上では, 現状レベルを大幅に超えた希薄燃焼と大量 EGR を導入した条件でも着火可能な点火システムの構築を目標として, 先端計測と数値計算手法を利用した超希薄, 高流動場, 高希釈混合気中における火花点火機構の詳細説明およびそれらの結果に基づく点火モデルの構築を実施した. 東京大学は, 静止場中および乱流場における火花点火挙動の把握および GT-Power 用点火モデル (一次元モデル) の構築を実施し, 日本大学は, 流動場における放電挙動の把握を担当した. 岡山大学は主として実機の筒内雰囲気中における放電および点火挙動の計測および HINOCA 用点火モデル (三次元モデル) の構築を行い, 東京工業大学は DNS による乱流中における初期火炎核の成長挙動の解明および筒内流動場計測および OH などの化学種濃度分布の可視化を実施した.

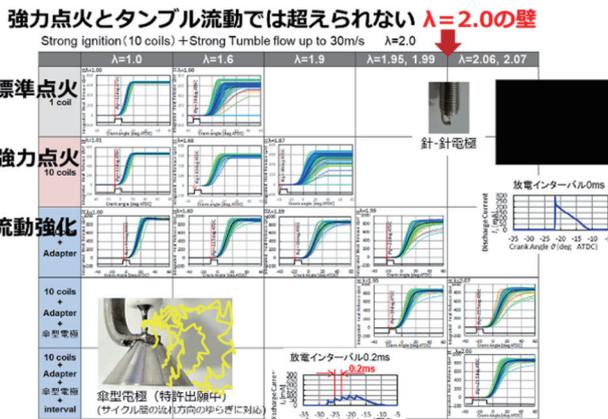


図9 「スーパー点火装置+傘型電極プラグ+タンブル流のサイクル変動削減」による「 $\lambda$  2.0 超 (スーパーリーン) の安定燃焼の実現」.

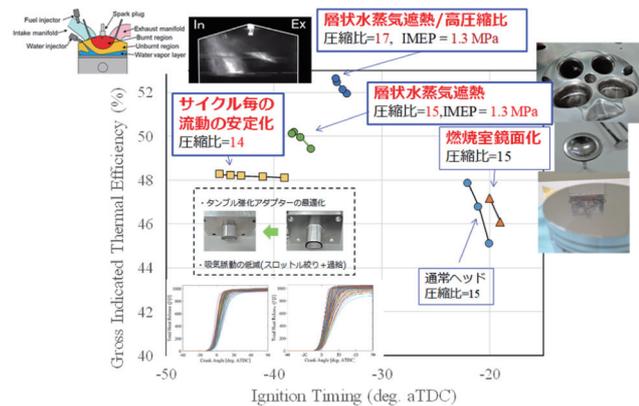


図10 ガソリン燃焼チームの熱効率向上アイデアを SIP 単気筒エンジンにて検証, 圧縮比 17 にて層状水蒸気遮熱を導入, 図示熱効率 (グロス値) 52% 超えをマーク.

2. 層状水蒸気遮熱 SWICA の導入 (東工大) (図 10)
  - 「SWICA + 鏡面化」⇒ 「冷損低減・ノック抑制」
3. 超微細乱流促進体 (農工大)
  - ⇒ 冷却損失の低減, ノック抑制
4. 冷炎直前の摂動スパイク印加 (広島大)
  - ⇒ ノック抑制
5. 次世代燃料研究 (燃料ノック班)

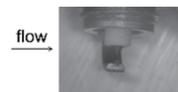


図11 放電路延伸挙動 (3500 fps).

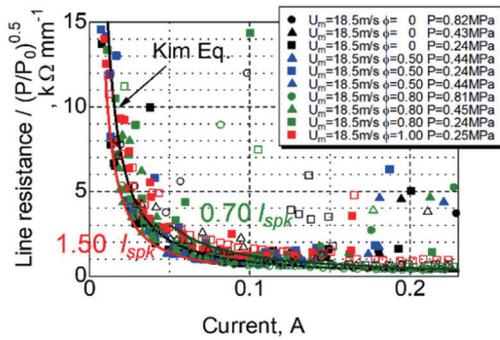


図 12 放電線抵抗の電流依存性.

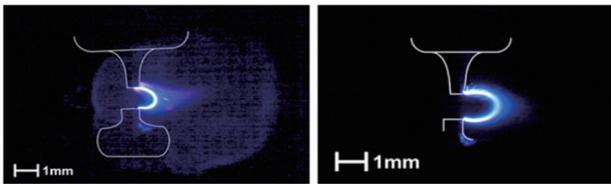


図 13 放電路と火炎核の同時可視化.

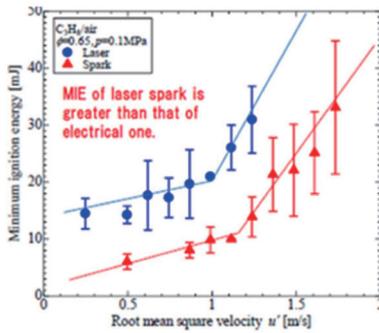


図 14 乱流強度と最小点火エネルギーの関係.

図 11 は圧力容器とオリフィスで流動を制御する小型風洞を用いて、流動場 (流速 18.5 m/s) における放電挙動を高速度カメラで撮影した結果である。放電路が周囲流の下流方向に延伸する様子が示されており、条件によっては放電路の短絡あるいは再放電の挙動も観察された。

放電路の撮影画像から計測される放電路長と電極間の電圧電流値から放電路の線抵抗を算出し、様々な条件における線抵抗と電流値の関係を示したものを図 12 に示す[9]. 得られたデータは Kim らの提唱した延伸した放電路の電流と電圧の関係とよく一致しており、Kim の実験式が後述の点火モデルに適用可能であることが確認できた。

図 13 は、急速圧縮膨脹装置を用いて、当量比 0.8 と 0.6 の混合気における放電路と点火直後の初期火炎核を同時に可視化した結果である[10]. 左図に示すように当量比 0.8 の場合、放電直後に電極間近傍で火炎核が形成されており、時間経過とともに放電路の延伸とは関係なく、火炎核が成長していることがわかる。一方、より希薄な当量比 0.6 の場合、放電開始からある程度時間が経過したところで、延伸した放電路の周囲から初期火炎核が発生している。このことから希薄混合気においては放電路の延伸挙動が初期火

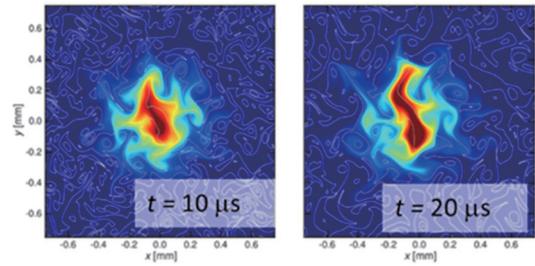


図 15 乱流場における火炎核成長挙動 (DNS 計算).

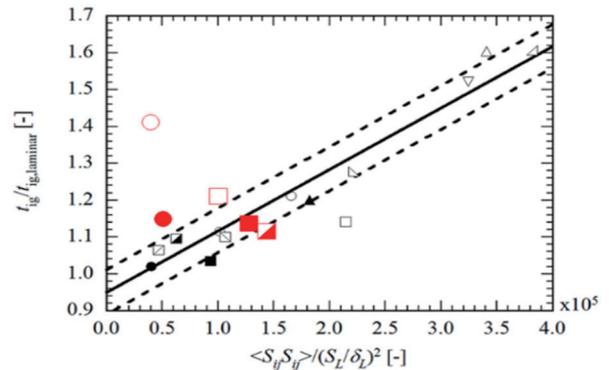


図 16 ひずみ速度と点火遅れ時間の関係.

炎核発生位置に影響を及ぼしていることが考えられる。

図 14 は、定容容器内に設置されたプロペラにより形成された一様流の存在しない乱流場においてプロパン空気混合気の火花点火実験を実施した結果である[11]. 乱流強度の増加とともに最小点火エネルギーが上昇し、その上昇傾向はある乱流強度を超えると顕著になっており、これは Shy らの実験結果と同様である。Shy ら[12]によると、乱流強度が小さい領域では乱流強度の増加とともに熱損失が増大するために最小点火エネルギーが上昇すると考察している。一方、乱流強度が大きい領域は、turbulent-distributed region であり、強い乱れが火炎核の成長に影響を与えていると結論付けている。本実験においても初期火炎核のシュリーレン撮影結果から、乱流場では局所的な消炎が発生していることが観察されている。

図 15 は二次元 DNS による乱流場におけるガソリンサロゲート燃料と空気混合気の火炎核成長挙動の計算結果である[13]. 図から、着火源近傍の局所的な乱流特性が火炎核成長に大きな影響を及ぼしていることがわかる。図 16 は、着火遅れ時間と火炎核に作用するひずみ速度の関係を 3 種類の燃料について整理したものである。この結果は、乱流中での着火遅れ時間は、火炎核に作用するひずみ速度によって整理することが可能であり、この関係は燃料種に依存しないことを示している。

### 3.3. 点火モデル

前節に記載した実験および解析結果に基づき、超希薄高流動場における火花点火挙動を予測するための点火モデルを構築した。同モデルは SparkCIMM [14]や Lucchini モデル

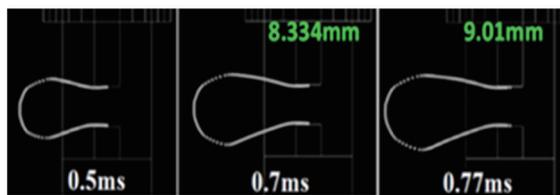


図 17 放電パーセル法による放電路予測結果.

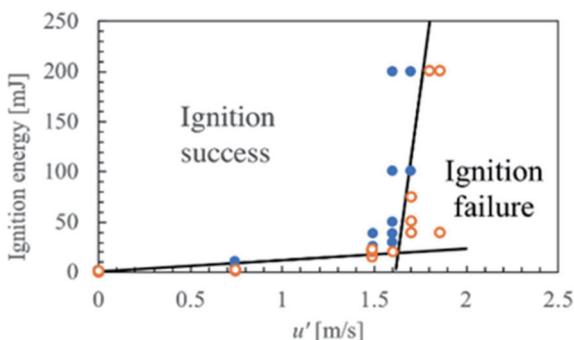


図 18 乱流強度と最小点火エネルギーの関係.

[15]をベースにしたものであり、電気回路モデル、放電パーセルモデルおよび火炎伝播モデルから構成される。電気回路モデルでは、電極間の電圧が、放電路長、電流および圧力の関係式 (Kim の式) で表されており、本式の妥当性は図 12 により確認されている。放電パーセルモデルでは放電路を  $N$  個のパーセルで表現し、隣接するパーセルに相互作用があるとして、 $N$  個のパーセルに対する連立微分方程式を解く手法とパーセルが流動に追従するとして放電路の延伸を記述する手法を用いている。図 17 に放電パーセル法による計算結果の一例[16]を示す。放電路が流動によって延伸している様子が捉えられており、その挙動は図 11 のような実験結果と定性的に一致している。一次元点火モデルの火炎伝播モデルは火炎核の成長が乱流燃焼速度と放電プラズマの膨張により記述されたものであり、火炎径と乱流スケールが考慮された乱流燃焼モデルが使用されており、火炎核の寸法が臨界直径に達するまでの時間として定義された点火遅れを予測した。また、三次元点火モデルでは、CAE チームの堀が火炎核生成から火炎伝播への遷移を考慮した Chen らの手法[17]に基づき火炎伝播モデルを構築した [18]。図 18 は、三次元点火モデルにより計算された乱流強度と最小点火エネルギーの関係を示したものである。図から本点火モデルは、乱流強度がある値を超えると最小点火エネルギーが急激に増大する傾向を定性的に予測できていることが確認された。(文責：津江)

#### 4. 火炎伝播促進に係る研究

火炎伝播促進班は、超希薄高 EGR 下での燃焼速度低下を克服する高強度筒内流動・乱流による燃焼促進手法とそのような条件下での燃焼モデルの確立を目的とし、乱流燃

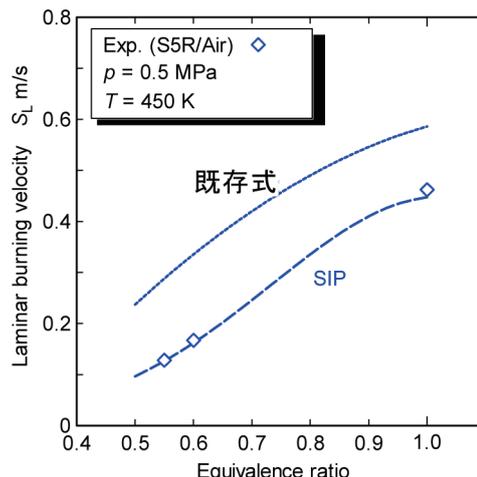


図 19 Experimental formula of laminar burning velocity.

焼特性の把握、燃焼学的な理解に基づく燃焼モデルの構築および燃焼促進手法の検討を行った。この班の研究開発は、乱流火炎解析に必要な層流燃焼速度など層流火炎の解析、高流動場での乱流火炎の解析、乱流燃焼モデル構築、燃焼促進手法の提案の 4 つに大別される。以下に、これらについての特筆すべき成果を示す。

#### 4.1. 層流燃焼速度

層流火炎の燃焼速度について、大阪府立大学は火炎への浮力の影響が大きくなる希薄混合気について微小重力下での測定を行い、当量比 0.55 という従来にない希薄域までのサロゲートガソリンのデータを取得した[19]。また、山口大学は高圧での測定のためダブルカーネル法を構築した[20]。

これらの測定結果は、ガソリン詳細反応機構の検証にも用いられた [21]。計測結果と詳細反応機構による計算値から、サロゲートガソリンの超希薄域を含む当量比 0.55 ~ 1.0、圧力 0.1 ~ 0.5 MPa、温度 360 ~ 450 K における層流燃焼速度の高精度実験式を構築した[22]。図 19 に示すように、既存の層流燃焼速度式[23]よりも高精度であり、筒内燃焼の一次元解析[24]や HINOCA [25]の三次元解析での予測精度向上に貢献している。さらに、EGR 時の層流燃焼速度を断熱火炎温度による整理が有用であることを示した[26]。

#### 4.2. 乱流火炎の特性

乱流火炎について、Peters の乱流燃焼ダイアグラム[27]による火炎構造の議論に基づき、九州大学では定容燃焼装置と単気筒エンジンによる実験から、東京工業大学と徳島大学は直接数値計算から、さらに、東京工業大学は可視化エンジンにより、乱流火炎特性を明らかにした。

定容燃焼装置による球状伝播乱流火炎の解析では、乱れの強さのみでなく、乱れの空間スケールが火炎伝播に及ぼす影響を明らかにした[28]。これは、乱れの空間スケールの制御により、燃焼を促進できる可能性を示唆する。さら

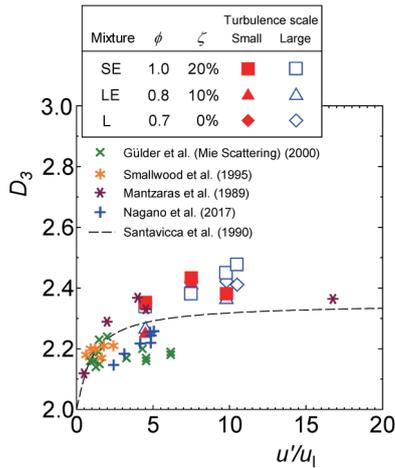


図 20 Fractal dimension of turbulent flame front.

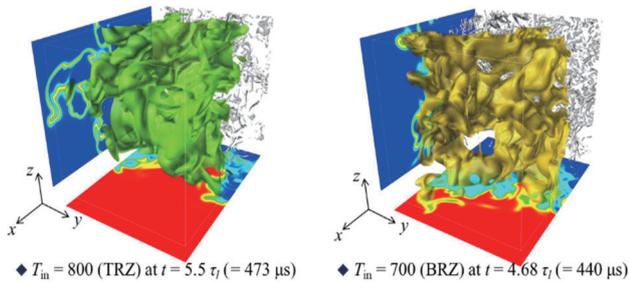


図 21 Turbulent flame by DNS.

に、乱流燃焼速度には火炎面積が支配的因子であるとの考えに基づき、図 20 に示すように火炎面のフラクタル特性を得た[29].

一様等方性乱流中を伝播する予混合火炎の三次元直接数値シミュレーションでは、図 21 に示す結果から、Thin reaction zones に位置する条件では乱れにより燃焼が促進されているものの、より高 Karlovitz 数となる Broken reaction zones に位置する条件では逆に乱流燃焼速度が従来の値よりも小さく、局所消炎の痕跡を確認した。いずれの条件においても、火炎構造は統計的にも層流火炎と大きく異なっており、極めて複雑な火炎内部構造を有することを明らかにした。また、図 22 に示すタンブル流と着火を模擬した対流を伴う密閉空間一様等方性乱流中を伝播する予混合火炎の計算から、主要な火炎から分離された高温領域が燃焼反応を停止し一時的な消炎過程に入るが、圧力上昇等により再び燃焼反応が活発化する傾向を示すなど、着火から火炎伝播の遷移機構を明らかにした[30]. これらの結果から乱流燃焼速度や各種条件付き統計量を取得し、乱流燃焼モデル構築・検証に用いた。

さらに、エンジン燃焼条件における燃料の希薄化が火炎構造に与える影響を明らかにするために、ホルムアルデヒドと OH ラジカルの同時 Planar Laser Induced fluorescence 可視化手法を確立し、当量比 1.0, 0.8, 0.6 において計測を行った。図 23 に示すように、希薄条件では火炎面が湾曲して

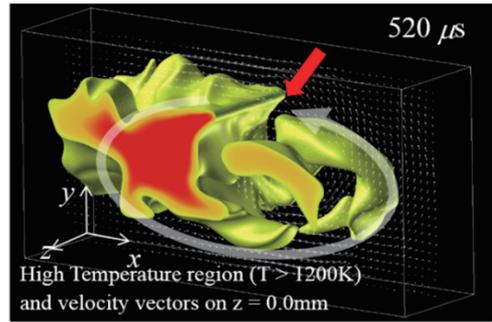


図 22 Turbulent flame through tumble flow in a chamber.

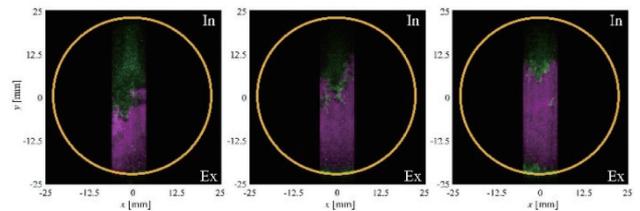


図 23 HCHO and OH PLIF images.

入り組み火炎面積の増大による大域的乱流燃焼速度の増大が予測されること、希薄化に伴い OH とホルムアルデヒドの蛍光分布の重なり幅が拡大しており、局所的な火炎構造の変化が生じている可能性があることを示した[31].

### 4.3. 乱流燃焼モデル

乱流モデルについて、東京工業大学と徳島大学は、Fractal dynamic sub-grid scale 燃焼モデルを、国産唯一のモデルとして開発した[32].

$$\frac{S_T}{S_L} = \left( \frac{\alpha^4 v^3}{2\sqrt{2} C_s^2 \Delta^6} \right)^{\frac{2-D_3}{4}} (\tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij} - \text{div}(\tilde{\mathbf{u}})^2)^{\frac{-3(2-D_3)}{8}} + \frac{\delta_\Delta}{\delta_L} \frac{\text{div}(\tilde{\mathbf{u}})}{(\text{div}(\mathbf{u}_L))|_{G=G_0}} \quad (1)$$

ここで、 $\alpha$  はインナーカットオフスケール  $\epsilon_{in}$  とコルモゴロフスケールの比である。本モデルにおけるその他の記号は、いずれも一般の意味を有する。また、 $\delta_\Delta$  は、火炎面における流速から定義される、フィルター操作を施した層流火炎厚さに相当する物理量である。本モデルは既存の SGS 燃焼モデルよりも高精度であり、図 24 に示すように、直接数値シミュレーションの結果ともよく一致している。さらに、格子幅自己認識型 Fractal dynamic sub-grid scale 燃焼モデルを提案した[33]. また、モデルで用いている式 (2) に示すインナーカットオフスケール  $\epsilon_{in}$  の妥当性を直接数値シミュレーションの結果を用いて検証し、超希薄高 EGR エンジンのような高強度乱流場を対象とした Large Eddy Simulation において本モデルの適用可能性を示した[32,34].

$$\alpha = \frac{\epsilon_{in}}{\eta} = 8 \exp(C \delta_F / D) \quad (2)$$

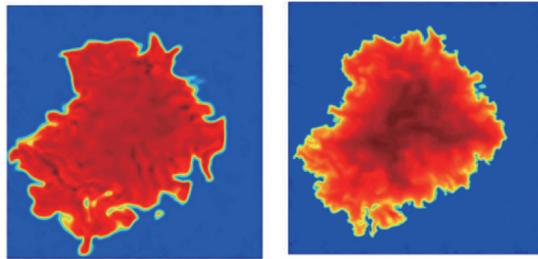


図 24 Comparison of FDSGS model and DNS.

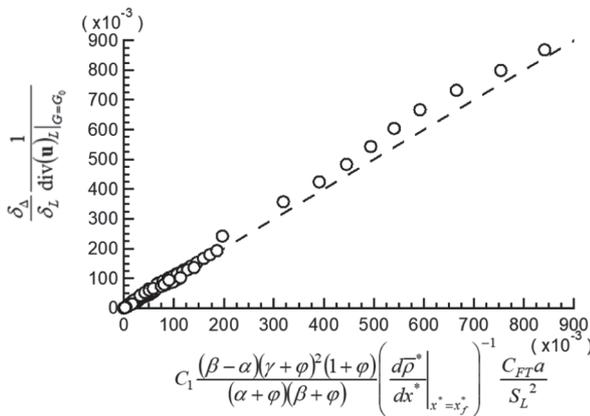


図 25 Comparison of model with detailed kinetics model. Horizontal axis is values predicted by our model, and vertical axis is true values obtained based on CHEMKIN results.

あわせて, Fractal dynamic sub-grid scale 燃焼モデルの式 (1) 右辺第 2 項の膨張の効果に基づく補正項のモデル化を行った[35]. これにより, 図 25 に示すように, ガソリン予混合火炎の乱流燃焼速度の高い精度での予測が可能となった.

4.4. 燃焼促進手法

燃焼促進について, 九州大学は, 吸気管軸方向の流れを加速するだけでなく, 吸気管軸周りに旋回流を与えて筒内流動を強化することにより, 燃焼促進を図る手法を提案した[36].

産業技術総合研究所は, 図 26 に示すように, 筒内に誘電体バリア放電を形成することでエンジン燃焼を促進できることを世界で初めて示した[37]. (文責: 北川)

5. 冷却損失低減に係る研究

エンジン内壁面熱伝達機構の解明に関する研究, エンジン冷却損失低減技術の開発に関する研究, エンジン冷却損失評価技術の開発に関する研究, および HINOCA 壁面熱伝達モデルの開発に関する研究を実施した. 得られた主な成果を以下にまとめる.

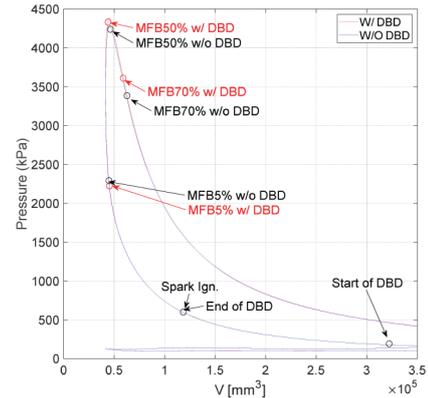


図 26 P-V diagram with dielectric barrier discharge.

5.1. 壁面熱伝達機構に関する研究

エンジン内壁面境界層構造について, ピストン頂面上の流速分布を  $\mu$  PIV で計測し明らかにした[38]. 得られた流速分布の一例 (機関回転数: 2000 rpm) を図 27 に示す. これから明らかなように, エンジン内の壁面境界層は十分に発達した乱流でも, 層流でもないことがわかる. 従来のエンジン燃焼室内壁面熱伝達モデルは, 発達乱流を仮定しており, 今回得られた結果は, 従来モデルを根本的に見直す必要があることを示しており, 今後の熱伝達モデル開発の方向性を決める重要なものである.

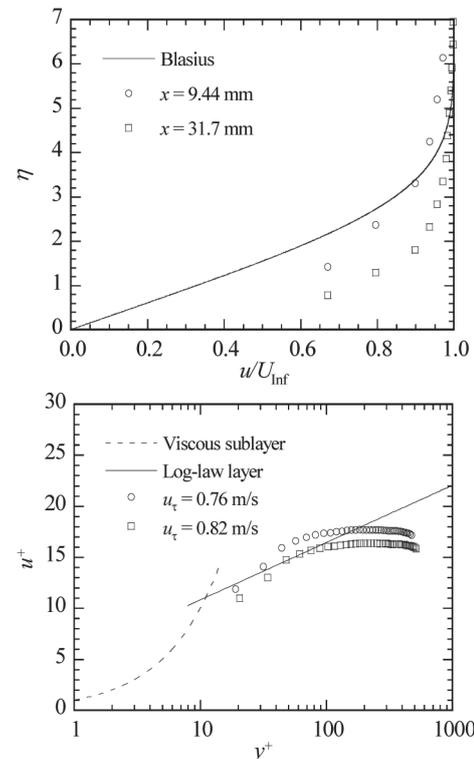


図 27 Velocity profile in the boundary layer on the piston top surface at 2000 rpm.

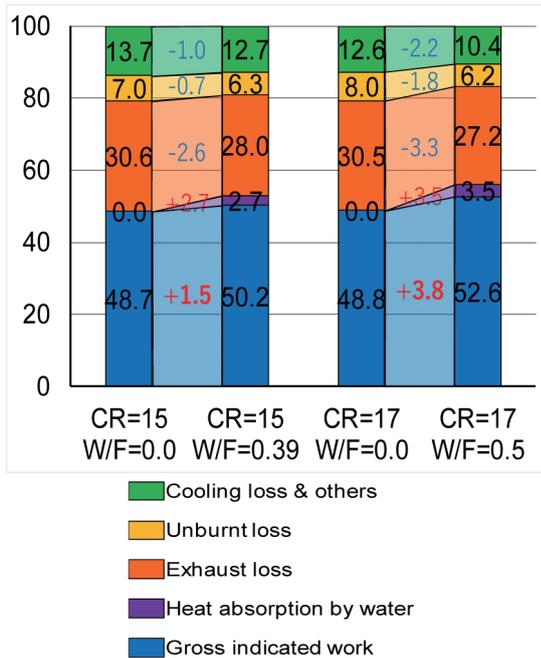


図 28 Improvement of thermal efficiency by water injection in super-lean burn.

5.2. 冷却損失低減技術の開発

冷却損失低減技術として、壁面微小乱流促進体による壁面熱伝達制御技術と筒内水噴射による温度成層化技術を開発した。このうち、筒内水噴射技術[39]については、超希薄燃焼の高負荷条件におけるノック抑制と冷損低減のために、圧縮行程前半で点火前にピストン頂面に向けて水噴射を行うことで、壁面近傍に低温水蒸気層を形成する。この技術を圧縮比 17、空気過剰率 1.9 の超希薄燃焼に適用することにより、グロス図示熱効率 52.6% を達成した (図 28)。

5.3. 冷却損失評価技術の開発

エンジンの冷却損失を定量評価するには、燃焼室内壁面熱流束を高精度に計測する必要がある。さらに燃焼室内熱流束は不均一な分布を有するため冷損評価には燃焼室内計測点の拡大が求められる。また、燃焼室内の複雑な流動場が壁面熱伝達に与える影響を解明するには、流れ場の空間・時間スケールと同程度のスケールで熱流束計測が求められる。以上の要求を満たす熱流束センサはなく、新たに熱流束センサを開発した。

薄膜型熱電対による同軸型熱流束センサは従来から存在するセンサであるが、膜厚さや材質をエンジン計測用に最適化し、信号増幅率のノイズ対策も含めた高精度化を行った[40]。その結果、図 29 に示すように、全行程における壁面熱流束計測による冷損定量評価が可能となり、希薄燃焼により膨張行程中の熱流束が大きく低減することを明らかにした。エンジン内熱流束計測の測定領域の拡大を目指し、柔軟なポリイミドを基板とし、LCR 回路共振周波数の電磁結合による無線計測が可能な表面温度センサを新たに開発した (図 30) [41]。室温から 200 °C の範囲で壁面表面温度の

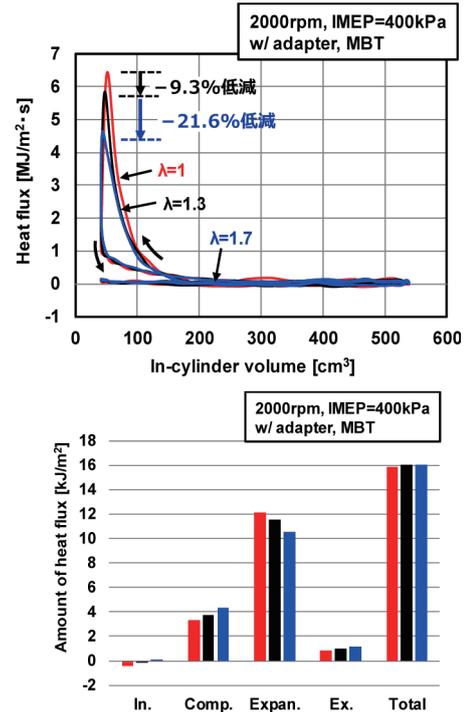


図 29 Reduction of heat flux on the chamber wall by super-lean burn.

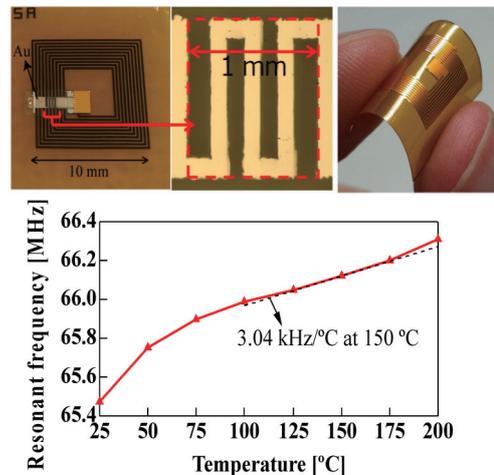


図 30 Flexible and wireless heat flux sensor.

計測が可能である。今後、計測精度と耐久性が向上すれば可視化エンジンの石英シリンダ内壁面にセンサを設置することで筒内燃焼可視化と壁面温度計測の同時計測も可能となるであろう。

エンジン内壁面熱伝達は、燃焼室内流動に強く影響されるが、これまでの熱流束センサは流動場の変動スケールと同レベルの空間分解能を有していなかった、そこで、図 31 に示す、φ 0.9 mm 内に 3 点の測定点を有する熱流束センサを開発した[42]。本センサは、白金抵抗型センサであり通電による自己検定機能を有する。

同図には当該センサを共用単気筒エンジンに適用し熱流束の 3 点同時計測を行い、それぞれの計測値に対する相互

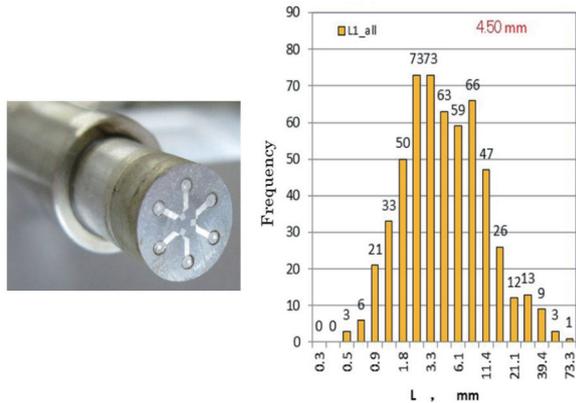


図 31 Multi-point heat flux sensor and the measured scale of heat flux fluctuation.

相関と自己相関解析により得られた熱流束変動空間スケールの頻度分布も示す。これにより従来計測では得られなかった熱流束の変動空間スケールが数 mm 程度であることを明らかにした。さらに、同センサを用いてスーパーリーンバーンにおける壁面熱流束を計測し、そのサイクル変動を熱流束時系列データの重ね書きと出現値の頻度の等値図で表現する新たな方法を提案し、これによりサイクル平均された熱流束の時間変化と、1 サイクルの熱流束の時間変化の違いを明らかにした。

今後、このセンサによる熱流束計測と  $\mu$  PIV 計測との同時計測により、流動変動と熱流束の関係を明らかにすることで、エンジン内壁面熱伝達の機構解明が進むと期待される。

#### 5.4. HINOCA 用熱伝達モデルの開発

HINOCA-LES 用の熱伝達モデルとして、解析的壁関数モデル[43]とマルチタイムスケールモデル[44]を開発し、HINOCA に実装した。これにより、図 32 に示すように熱伝達の解析精度を向上した[45]。(文責：小酒)

### 6. 燃料およびノック抑制に係る研究

燃料・ノック抑制班の目的は、燃焼の基本要素である化学反応・輸送現象とその相互作用の理解をもとに、ノッキングの現象解明とその抑制法の提案を行うことである。その過程で得られた成果[46-59]を以下にまとめる。

#### 6.1. ガソリンサロゲート混合物と反応機構

本研究では、ガソリンの燃焼特性を模擬できるサロゲート混合燃料を提案した。この混合燃料は5つの炭化水素(イソオクタン・ヘプタン・トルエン・メチルシクロヘキサン・ジイソブチレン)からなり、日本市場のハイオクおよびレギュラーガソリンに対応する混合物(S5H および S5R)を提案した[46]。その意義は、将来にわたって再現可能な試験研究用燃料であることと、詳細燃焼反応機構が構築可能であることにある。

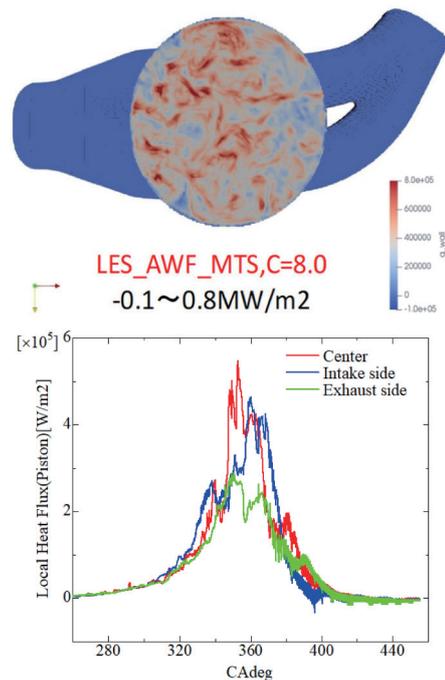


図 32 Heat flux distribution on the chamber wall and history of heat flux on the piston top surface calculated by HINOCA.

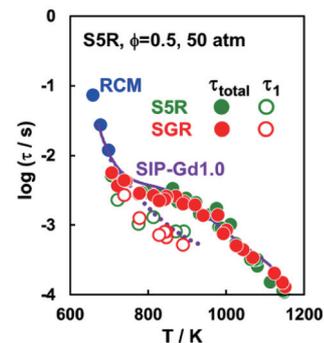


図 33 Ignition delay times of SIP gasoline surrogate (S5R) and SIP common gasoline (SGR) compared with detailed kinetic model calculation.

詳細反応機構[46]は多くのクラスター大学の研究者の協力により得られた基礎燃焼特性データに対して検証を行った。成分炭化水素およびサロゲート混合物の着火遅れ時間は衝撃波管[47, 48]および急速圧縮機 (RCM) [49, 50]によって計測された。さらに衝撃波管と RCM を用いて、サロゲート混合物 S5H および S5R と対応する共通ガソリン(市場ガソリン)の着火遅れ時間を比較し、サロゲートとしての妥当性を検証した。その結果を図 33 に示す。またマイクロフローリアクターにより冷炎における化学種濃度の計測[51, 52]との比較が行われ、火炎伝播班の協力により層流火炎伝播速度の計測[53]が行われた(図 34)。さらにこれを基に簡略化反応機構[54]の構築、1D ノックモデル[55, 56]が構築された。構築された詳細・簡略化反応機構は本研究プロジェクトにおけるノック抑制法の開発・検証に利用されただけでなく、将来の技術開発にも利用されることになる。

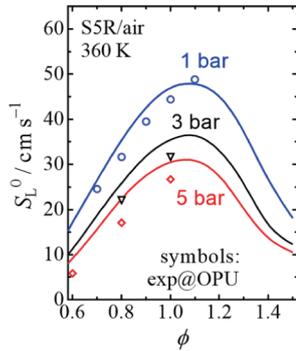


図 34 Laminar burning velocities of gasoline surrogate (S5R) / air mixtures. Symbols denote experimental data obtained at Osaka Prefectural University [k14] and lines denote kinetic modeling.

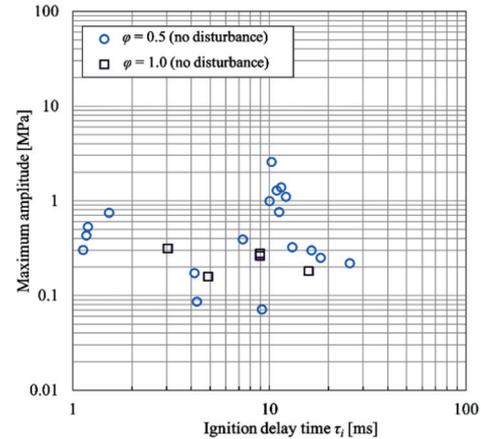


図 36 Measured maximum knock intensity of S5R (gasoline surrogate) / air mixture in SRCM at 3.3 MPa. Especially large amplitude was observed at 10-ms ignition delay time for equivalence ratio = 0.5 mixture.

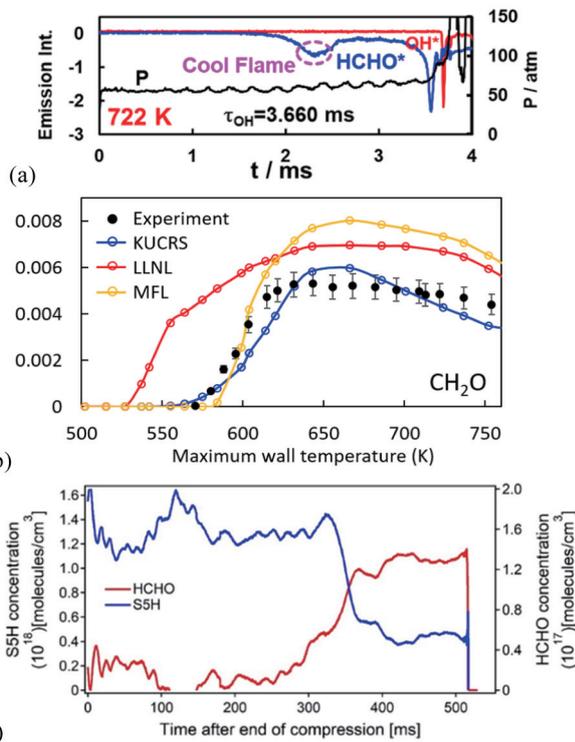


図 35 Experimental observations of cool flames (a) in a shock tube with UV emission, (b) in a micro-flow reactor with TOF mass spectrometry, and (c) in a rapid compression machine with infrared absorption.

また蓄積された多くの検証データはエンジン燃焼研究データベースとして利用される。

自着火現象の研究過程で、自着火の重要な特徴が冷炎に強く関連していることがわかってきた。従来の化学反応機構は必ずしも実測の冷炎を十分に予測・再現することを念頭に置いていない。本研究の後半においては冷炎現象を精密に測定することと、これを反応機構で再現することを重視することとした。その過程で得られた冷炎の計測結果を図 35 に示す。これらの研究結果と反応機構の検証は、後に述べる自着火抑制やノック抑制コンセプトに生かされている。

### 6.2. ノック振動と圧縮性流体力学

ノック現象は、自着火などの化学反応機構だけでなく、それが輸送現象・流体力学と複雑な相互作用をした結果である。本研究では詳細化学反応機構を取り込んだ次元圧縮性直接数値計算 (1D-DNS) [57] と超急速圧縮機 (SRCM) [58] および可視化単気筒エンジン[59]によりノック現象の観測と解明を試みた。

図 36 は SRCM で計測されたノック振動の強度を着火遅れ時間に対してプロットしたものである。当量比 0.5 において 10 ms 付近で特異的なピークが観測され、燃料の着火遅れ時間の負温度係数領域との関係を強く示唆している。同様な結果は 1D-DNS によっても得られておりノック強度の解明に重要な示唆を与えた。1D-DNS により温度勾配を与えた場合のノック強度の変化を図 37 に示す。着火遅れ時間の温度依存性と空間温度分布の関係によって大きなノック強度の変化がみられることがわかる。これらは燃料特性を利用したノック振動の低減の可能性を強く示唆している。

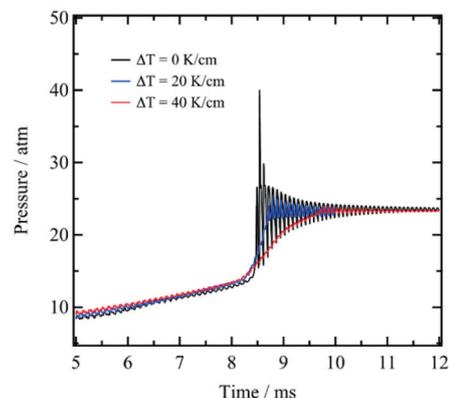
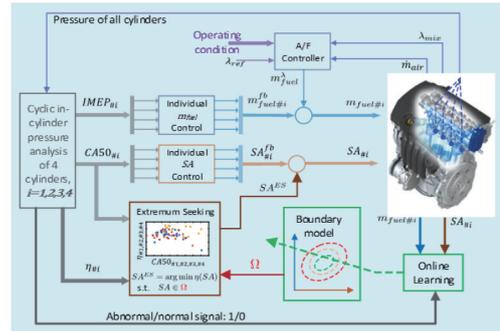


図 37 Pressure profiles observed in the one-dimensional direct Navier-Stokes calculation 1D-DNS with detailed chemical kinetics.

### 6.3. ノック抑制手法の提案

一次元直接数値流体計算・SRCM による実験などからの示唆, および化学反応機構を用いた探索からいくつかのノック抑制のコンセプトが提案された. 上の結果は温度や濃度の空間分布の制御によるノック強度低減の可能性を示唆している. さらに化学反応機構を用いた探索では, パルスの印加による自着火抑制・混合気の常圧での強制低温酸化による自着火抑制などの可能性が示唆された. さらに最終年度には燃料のオクタン感度との関係などの議論が行われた. 今後の技術開発に生かされるものと考えている. (文責: 三好)



## 7. モデル構築 / ばらつき縮減に係る研究

モデル班は2016年度より, ばらつき縮減班は2015年10月より設置され, SIPの目標である正味熱効率50%を検証するための零次元リーンバーンガソリンエンジンシミュレータ(統合モデル)の構築, およびエンジン燃焼のサイクル変動をオンボード制御する試みをチーム横断にて取り組んだ.

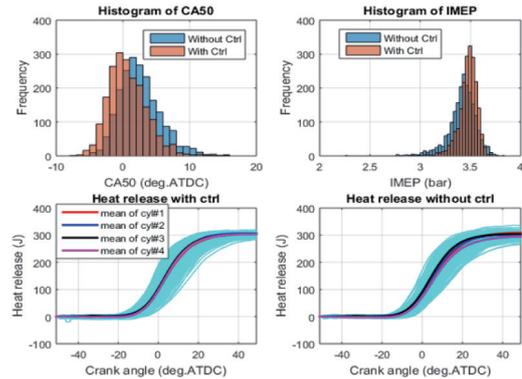


図39 多変数制御によるバラツキ抑制制御法開発と検証.

### 7.1. モデル構築

モデル班ではガソリン燃焼チームに留まらず, 損失低減・制御の両チームとの連携を推進し, 過給機, フリクションモデルの構築とエンジンシミュレータへの統合を進めた(図38).

千葉大学はモデル班の班長を務めるとともに, 熱損失モデルを東京工業大学とともに構築した[60]. 強いタンブル流が存在するときのリーン混合気の点火モデルは東京大学[61], 火炎伝播モデルは早稲田大学[62], ノック予測モデルは大阪工業大学[63], そして過給機および摩擦損失モデルは損失低減チームが, 各サブモデルを担当した.

最終的にサブモデルの構築を担当する各クラスター大学から提供されたサブモデルをベースモデルに統合し, 統合モデルの精度向上を進め, 熱効率の検証シミュレーション

を遂行した.

### 7.2. ばらつき縮減班

「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」という研究プロジェクトの枠組の中で, 横断的かつ数理的な見地とシステム制御の視点からオンボード制御によるバラツキ抑制と効率向上の潜在的可能性を追究することによって, プロジェクト全体の目標であるエンジン高効率化に貢献することを目的とした. 開発するオンボード制御アルゴリズムについては, エンジン過渡制御ベンチにおける検証を行うことによって研究成果のサイエンス性のみではなく, 産業基盤技術推進に寄与することを狙っている.

上智大学では, 量産4気筒エンジンのベースECUに外付けのECUをバイパスさせて実機での制御手法開発に取り組んだ. バラツキやリーンバーンモードにおける境界特性などについての実験解析結果をもとに, 単一制御指標によるサイクリック燃焼バラツキの抑制制御手法を構築した. 図39に示すように, 気筒間の相互干渉に起因するバラツキとサイクル変動を同時に考慮すべく, 気筒毎制御による燃焼バラツキ抑制効果を向上させるための多変数制御によるバラツキ抑制制御法を提案した. 具体的には点火時期と燃料噴射量を気筒毎にリアルタイムで決定することによって, 燃焼位相のバラツキとIMEPの出力バラツキを抑制する制御アルゴリズムを開発した[64].

千葉大学は, 超希薄燃焼運転時に燃焼期間後半の熱発生率が低下(燃焼効率が低下)することが, 出力のサイクル変

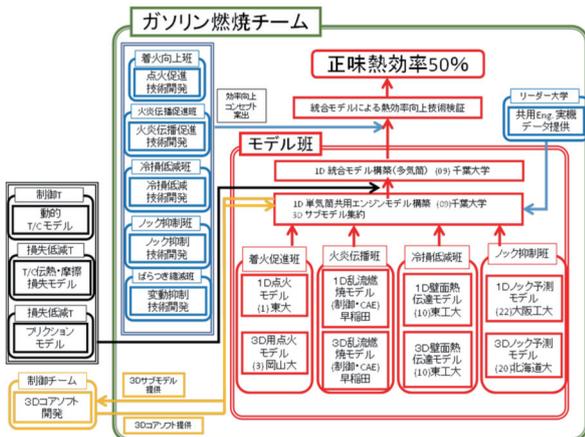


図38 モデル班の位置づけ.

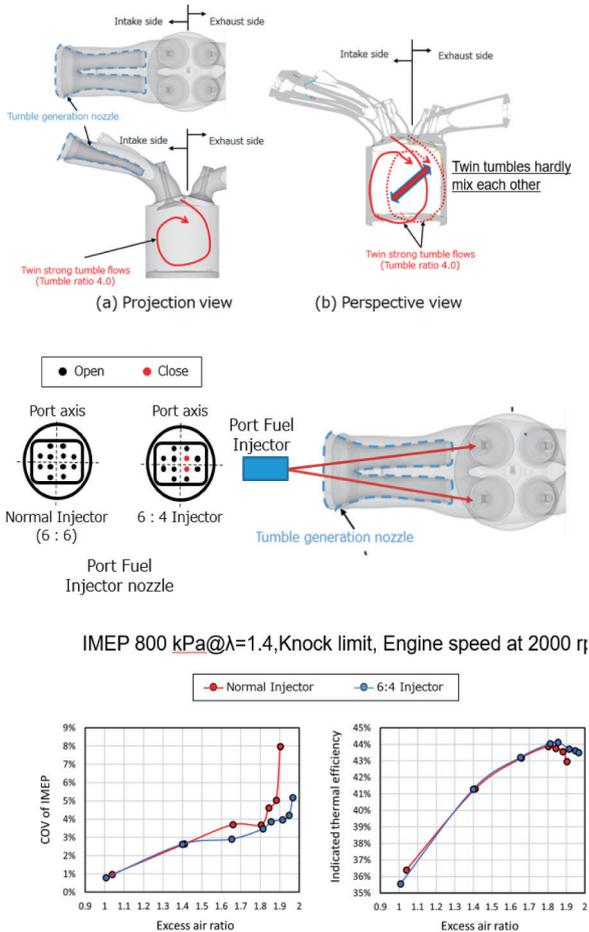


図 40 縦方向混合気弱成層サイクル変動抑制によるリーン限界拡大と熱効率向上の結果。

動をもたらす主要因の一つであることを明らかにした。この対策として、図 40 に示すように 2 つの吸気ポートからわずかに空気過剰率の異なる混合気を強いタンブル流を使って給気するコンセプトを提案し、実験的に実証した。安定燃焼のリーン限界が広がると共に熱効率も向上した[65]。

以上の成果は、SIP の各要素技術で得られた知見を実機で実用化するために役立つ手法であり、サイエンスをエンジニアリングに生かすインターフェースのような役割を担っている。(文責：森吉)

8. 結言

今回の世界最高峰の熱効率値は、インサイドアウトなアプローチ、すなわち従来のエンジン開発の延長線であるミニマムローカルから脱して、超希薄燃焼の原理をサイエンスから解析・解明し、その知見に基づきエンジン実験による燃焼技術を探求したことに依る。このことは、長い歴史を持つ当該分野の研究開発に対する新たなアプローチの存在と、そのポテンシャルを明確に示した。また、本活動を通して、産学での議論が進み、相互で何を求めているの

か、何を研究しているのかの理解が進んだ。産学による本音の議論は、双方の人材育成にも繋がっている。

CO<sub>2</sub> の削減は、高効率エンジンが市場に投入され使用されて初めて実現する。超希薄燃焼を採用した高効率エンジンの早期の製品化を期待する。SIP 燃焼が生んだ産産学連携と技術がスパイラルアップし、双方が将来に渡っても維持・発展するものと信じている。

謝辞

本研究開発は内閣府 総合科学技術・イノベーション会議による事業として行われた。研究開発期間は 2014 年度から 2018 年度。PD (プログラムディレクター) は、杉山雅則 (トヨタ自動車株式会社)。国立研究開発法人 科学技術振興機構 (JST) が管理法人としてプロジェクト・マネジメントを行った。自動車用内燃機関技術研究組合には SIP 共通エンジンの設計製作、研究の安全推進にご支援・協力をいただいた。(株) 小野測器にはガソリン燃焼チーム研究拠点の運用にご支援をいただいた。謝意を表す。

References

- 菅田健志, 李世竣, 横森 剛, 飯田訓正, 乱流燃焼ダイアグラムを用いたスーパーリーンバーン SI エンジンにおける燃焼形態の検討, 自動車技術会論文集, Vol.48, No.4: 801-806 (2017).
- 丸田 薫, 中村 寿, スーパーリーンバーン SI エンジンにおける着火～火炎伝播遷移, 一エンジン燃焼と燃焼基礎研究一, 自動車技術, Vol.72 No.4: 20184222 (2018 年 4 月).
- <http://sip.st.keio.ac.jp/>
- Nakaya, S., Tsue, M., Ignition characteristics of laser breakdown and electrical, 6th Laser Ignition Conference, LIC7-1 (2018).
- Saito, N., Minamoto, Y., Yenerdag, B., Shimura, M., Tanahashi, M., Effects of turbulence on ignition of methane-air and n-heptane-air fully premixed mixtures, Combustion Science and Technology, Vol.190, No.3: 451-469 (2018).
- Shimura, M., Yoshida, S., Osawa, K., Minamoto, Y., Yokomori, T., Iwamoto, K., Tanahashi, M., Kosaka, H., Micro particle image velocimetry investigation of near-wall behaviors of tumble enhanced flow in an internal combustion engine, International Journal of Engine Research, First Published 28 May (2018).
- 大倉優一, 長澤 剛, 山田涼太, 佐藤 進, 小酒英範, スーパーリーンバーン SI エンジンにおける筒内水噴射による熱効率向上に関する研究, 第 29 回内燃機関シンポジウム: No.13 (2018).
- 三好 明, 低温酸化反応の怪, 第 55 回燃焼シンポジウム: B323 (2017).

9. 今村, 文, 岩田, 秋濱, 自動車技術会 2018 秋季大会学術講演会 : 147 (2018).
10. 渡邊, 河原, 富田, 第 28 回内燃機関シンポジウム : 21 (2017).
11. 小林, 石川, 吉村, 中谷, 津江, 第 55 回燃焼シンポジウム : C321 (2017).
12. Shy, S. S., Liu, C. C. and Shih, W. T., *Combust Flame* 157: 341-350 (2010).
13. Saito, N., Minamoto, Y., Yenerdag, B., Shimura, M. and Tanahashi, M., *Comb. Sci. Tec.* 190(3): 452-470 (2018).
14. Dahms, R. N., Drake, M. C., Fansler, T. D., Kuo, T.-W. and Peters, N., *Combust Flame* 158 (11): 2229-2244 (2011).
15. Lucchini, T., et al., *SAE Technical Paper*: 2013-01-1087 (2013).
16. 河原, 藤岡, 富田, 第 54 回燃焼シンポジウム : D344 (2016).
17. Chen, Z. and Ju, Y., *Combustion Theory and Modelling*, 11 (3): 427-453 (2007).
18. 堀, 第 56 回燃焼シンポジウム : E322 (2018).
19. Maeda, Y., Doi, S., Kataoka, H. and Segawa, D., *The Japan Society of Microgravity Application Conference* 30 (JASMAC-30): 31A09 (2018).
20. Seo, T., Kaneko, H., Mikami, M., *Proceedings of the Symposium (Japanese) on Combustion*: D133 (2018).
21. Miyoshi, A., and Sakai, Y., *Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan* (in Japanese) 48: 1021-1026 (2017).
22. [https://www.jst.go.jp/sip/dl/k01/sympoend/01g\\_07.pdf](https://www.jst.go.jp/sip/dl/k01/sympoend/01g_07.pdf)
23. Metghalchi, M. and Keck, J.C., *Combust. Flame* 48: 191-210 (1982).
24. <https://www.jst.go.jp/sip/dl/k01/sympoend/004-3.pdf>
25. [https://www.jst.go.jp/sip/dl/k01/sympoend/03c\\_05.pdf](https://www.jst.go.jp/sip/dl/k01/sympoend/03c_05.pdf)
26. Doi, S., Uesaka, H., Matsui, R., Matsuura, M., Okazaki, R., Kataoka, H. and Segawa, D., *Proc. The 11th Asia-Pacific Conference on Combustion (ASPACC2017)*: 476 (2017).
27. Peters, N., *Turbulent Combustion*, Cambridge University Press (2000).
28. 永野幸秀, 森田理喜, 福田洋介, 野小生晃, 北川敏明, 第 27 回内燃機関シンポジウム講演予稿集, 11 (2016).
29. 永野幸秀, 乾正樹, 西山令, 堀切義紘, 森田理喜, 北川敏明, 第 29 回内燃機関シンポジウム講演予稿集, 43 (2018).
30. 小長光貴裕, 源 勇氣, 志村祐康, 店橋 護, 第 56 回燃焼シンポジウム講演論文集 (2018).
31. 諸貫達哉, Kumar Siddhartha, 志村祐康, 源 勇氣, 横森 剛, 店橋 護, 第 56 回燃焼シンポジウム講演論文集 (2018).
32. Hiraoka, K., Minamoto, Y., Shimura, M., Naka, Y., Fukushima, N., Tanahashi, M., *Comb. Sci. Technol.*, 188, 9: 1472-1495 (2016).
33. Hiraoka, K., Naka, Y., Shimura, M., Minamoto, Y., Fukushima, N., Tanahashi, M., Miyachi, T., *Flow Turbul. Combust.* 97, 4: 1147-1164 (2016).
34. Nakagama, K., Konagamitsu, T., Minamoto, Y., Shimura, M., Tanahashi, M., *Proceedings of 12th Asia-Pacific Conference on Combustion* (2019) to be presented.
35. 力武 翔, 名田 讓, 木戸口 善行, 店橋 護, 双曲線関数を用いた層流予混合火炎の火炎特性の予測, 第 55 回燃焼シンポジウム講演論文集 : D134 (2017).
36. 北川敏明, 藤崎泰弘「内燃機関の吸気構造」特願 2019-008606 (2019 年 1 月).
37. 高橋栄一, 永野幸秀, 八木敦史, 清水航, 北川敏明, 第 29 回内燃機関シンポジウム, No.44 (2018).
38. Shimura, Y., Yoshida, S., Osawa, K., Minamoto, Y., Yokomori, T., Iwamoto, K., Tanahashi, M., and Kosaka, H., *International Journal of Engine Research* (2018) in press, doi: 10.1177/1468087418774710.
39. 大倉優一, 長澤 剛, 山田涼太, 佐藤 進, 小酒英範, スーパーリーンバーン SI エンジンにおける筒内水噴射による熱効率向上に関する研究, 第 29 回内燃機関シンポジウム, No.13: 1-10 (2018 年 11 月 26-28 日).
40. 石井大二郎, 三原雄司, 横森 剛, 飯田訓正, タンブル流動及び希薄燃焼が SI エンジンの局所壁面熱流束に与える影響, 自動車技術会 2017 年春季大会学術講演会, No.39-17: 20175193 (2017 年 5 月 24-26 日).
41. Lee, M., Morimoto, K., and Suzuki, Y., *15th Int. Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2015)*: (2015).
42. 出島一仁, 中別府修, 中村優斗, 土屋智洋, 長坂圭輔, エンジン内壁面の熱流束を測定する金属基板 MEMS センサの開発, 日本機械学会論文集, 84 巻, 858 号 : 17-00414 (2018).
43. Sakamoto, T., Kuwata, Y. and Suga, K.: *Proc. The 29th International Symposium on Transport Phenomena*, Honolulu: 1-8 (2018).
44. Hattori, H. and Tsutsui, K.: *Int. J. Adv. Eng. Sci. Appl. Math.*, Vol. 11: 1-11 (2019).
45. 尾形陽一, 大木純一, 宮井大輝, 溝淵泰寛, 草鹿 仁, エンジン冷却損失解析に向けた壁面乱流熱流束モデルの比較, 自動車技術会 2019 春季大会学術講演会 : 20195424 (2019).
46. 三好 明, 酒井康行, 自動車技術会論文集 48(5): 1021-1026 (2017).
47. Murai, R., Tachino, H., Takahashi, K., *37th Int. Symp. Combust.*, WIP poster, Dublin, Ireland, July 29-Aug. 3 (2018).
48. Tachino, H., Murai, R., Takahashi, K., *37th Int. Symp. Combust.*, WIP poster, Dublin, Ireland, July 29-Aug. 3 (2018).

49. 成毛政貴, 吉田翔一, 和知祐亮, 田中光太郎, 金野満, 自動車技術会論文集, 48(6): 1193-1199 (2017).
50. Tanaka, K., Akishima, K., Sekita, M., Tonokura, K., Konno, M., *Appl. Phys. B*, 123: 219 (2017).
51. Tatsumi, R., Nakamura, H., Hasegawa, S., Tezuka, T., Maruta, K., *Proc. 26th Int. Colloq. Dynamics of Explosions and Reactive Systems*: paper ID 920 (2017).
52. Grajetzki, P., Nakamura, H., Tezuka, T., Hasegawa, S., Maruta, K., *Fuel*, 245: 429-437 (2019).
53. Uesaka, H., Matsui, R., Doi, S., Matsuura, M., Kataoka, H., Segawa, D., *9th Int. Conf. on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems (COMODIA2017)*, B312, Okayama Japan, July 25-28 (2017).
54. 酒井康行, 三好 明, 第 28 回内燃機関シンポジウム, 20178019, 12月6-8日(2017).
55. 桑原一成, 自動車技術会論文集, 49(6): 1143-1149 (2018).
56. 桑原一成, 自動車技術会論文集, 50(2): 340-346 (2018).
57. Terashima, H., Matsugi, A., Koshi, M., *Combust. Flame*, 184: 324-334 (2017).
58. Honda, K., Miyauchi, Y., Usami, Y., Toyoda, R., Yoshida, K., Saito, M., Iijima, A., Tanabe, M., *SAE Paper*: 2017-32-0118 (2017).
59. Iijima, A., Izako, T., Ishikawa, T., Yamashita, T., Takahata, S., Kudo, H., Shimizu, K., Tanabe, M., Shoji, H., *SAE Int. J. Engines*, 10(5): 2616-2623 (2017).
60. 清家章仁, 窪山達也, 森吉泰生, 自動車技術会関東支部講演会 F3-4 (2019).
61. 中谷, 津江, 未発表, SIP 成果報告資料.
62. Sok, R., Yamaguchi, K. and Kusaka, J., *Asia-Pacific Automotive Engineering Conference*: SAE Paper 2019-01-1409 (2019).
63. 桑原一成, 自動車技術会秋期大会, No. 20186223 (2018).
64. Zhang, Y., Shen, T., *Proceedings of the 5th IFAC Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling*, Po.1: 326-330, Changchun, China, September 20-22 (2018).
65. Moriyoshi, Y., Kuboyama, T., Kaneko, M., Yamada, T. and Sato, H., *SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting*: SAE paper 2018-01-1664, Heidelberg, Germany, Oct 17-20 (2018).