

自動車技術と持続可能なモビリティに関する研究

研究代表者 草鹿 仁
(創造理工学部 総合機械工学科 教授)

1. 研究課題

自動車は、人の移動と物流に関わる高い利便性を提供する一方で、大気汚染の悪化、石油の大量消費、ひいては地球温暖化に関わる多量の CO2 排出など環境・エネルギーに関わる極めて深刻な社会問題を招いている。そこで本研究では、各種の環境対応車（低排出ガス車、石油代替燃料車、低燃費車など）と燃料・エネルギーの開発・性能評価、さらに情報技術（自動運転、IOT、AI、Big Data など）を通じてこれらの諸問題の解決方策を追及し、その成果を社会に提示することを目的とする。具体的には、ガソリン車、クリーンディーゼル車、ハイブリッド車、プラグイン・ハイブリッド車、電気自動車、燃料電池車、各種燃料、水素、電気を対象とし、その性能と低環境性や情報技術の活用、環境と安全に関わるヒューマンファクターを含めた技術の調和による効果を評価する。また、実際に環境対応車の製作や性能・走行シミュレーション、自動車用動力システムの開発・評価を行いその有効性を明らかにすることを狙いとする。さらにこれらを通じて 2020 年から 2050 年を見据えた抜本的な CO2 削減のあり方について検討する。

2. 主な研究成果

2.1 急速圧縮膨張装置を用いた副室天然ガス機関の燃焼特性に関する研究

本研究では希薄燃焼に伴う燃焼速度の低下といった欠点を改善する方法として、副室式の燃焼方式に着目した。実験では図 1 に示す急速圧縮膨張装置（以下、RCEM: Rapid Compression and Expansion Machine）と汎用 Computational Fluid Dynamics コードを用いて、副室の容積、噴孔径、噴孔数が熱効率に与える普遍的な影響の解明、および副室噴流中における熱発生分布や温度分布の形成要因を明らかにする。本研究では図 2 に示すようにシリンダーヘッドに窓を設け、ハイスピードカメラにより OH* の撮影も行った。表 1 に実験で用いた副室の諸元を示す。

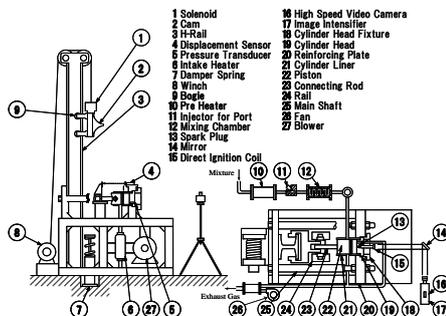


Fig. 1 Schematic of RCEM

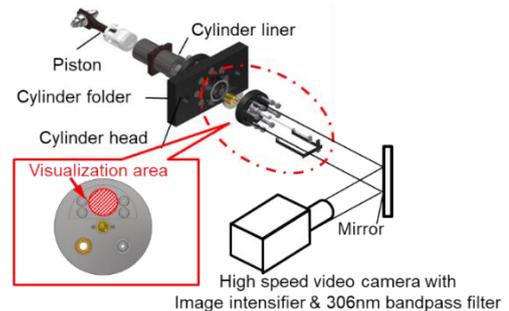


Fig. 2 Disposition and visualization area of photographing setup

Table 1 Specifications of pre-chambers

Label	1	3	5	7	8	12	14	15	16
Volume ratio % ($V_{\text{pre-chamber}}/V_{\text{TDC}}$)	1.00			2.00(BASE)			3.00		
Volume cc	1.56			3.12			4.68		
Area of holes mm ²	10.61		18.85	10.61		18.85	10.61		18.85
Number of holes	4	6	5	4	5	6	5	6	4
Holes diameter mm	1.84	1.50	2.19	1.84	1.64	2.00	1.64	1.50	2.45

2.1.1 副室諸元が筒内圧力・熱発生率に与える影響

図 3 に表 1 中の Label 3・15・1 の副室を用いた実験から得られた筒内圧力履歴と熱発生率履歴を示す。

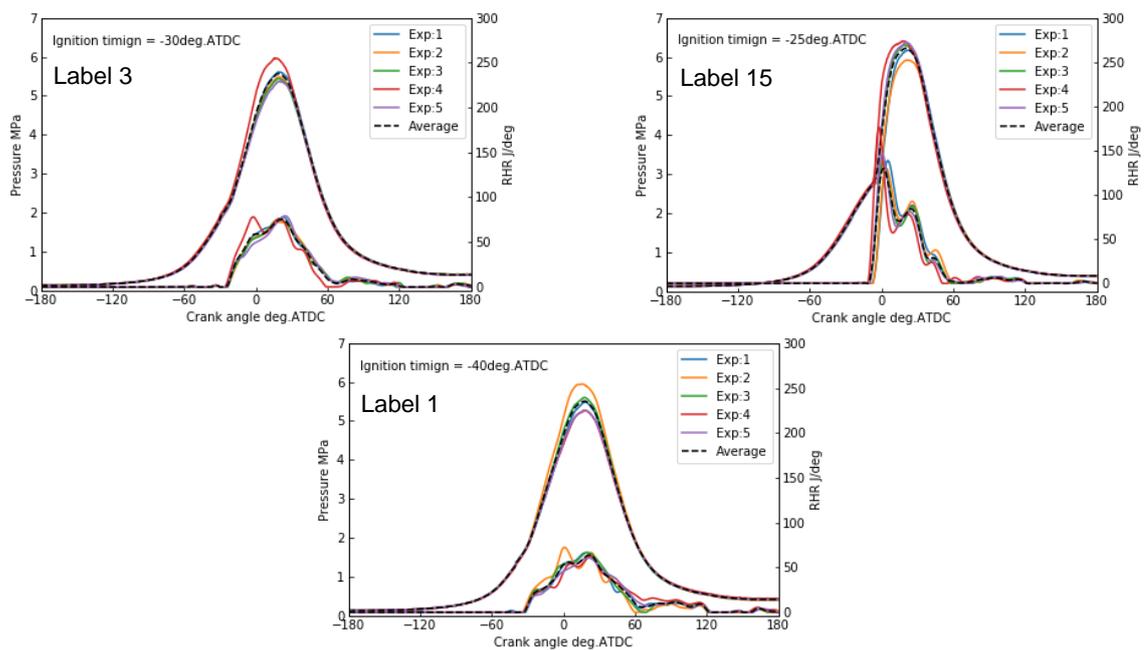


Fig. 3 Comparison of pressure and heat release ratio under different pre-chambers (Left: Label 3 Right: Label 15 Center: Label 1)

図 3 右上の図は図 3 左上の図に対して副室容積を 4.68 cc に変更した際の結果である。副室容積が大きい方が急峻な圧力と熱発生率の立ち上がりとなっており、急峻な燃焼となっている。これは副室容積が大きくなることで副室内に供給される混合気の量が多くなり、副室噴流の運動量が増加するためであると考えられる。また図 3 中央下の図は、図 3 左上の図から孔数を 4、孔径を 1.84 mm に変更した結果である。孔数の少ない方が熱発生率は低くなっていることが分かる。これは孔数が少ないほど主室における燃焼領域が減少したことにより熱発生量が小さくなったためであると考えられる。

2.1.2 副室諸元が熱効率に与える影響

各副室諸元における熱効率を示した図 4 より副室諸元が熱効率に影響を及ぼしていることは明らかであり、特に孔数の多い方が熱効率は高くなることが分かる。一方で噴孔径の大き

い Label 5 では熱効率が非常に低く実験間のばらつきも大きくなっている。図 5 に示す Label 5 の燃焼画像からは 30.28 deg. ATDC 付近で副室噴流の進展が終了し、青色火炎が進行している様子が確認できる。よって副室容積が小さく噴孔径が大きい副室を用いると、副室噴流の運動量が少なく主室の混合気を十分に燃焼することができない。燃焼効率が低くなったと考えられる。また副室噴流が停止した後の燃焼は伝播速度の遅い層流火炎に遷移するために燃焼のばらつきが生じたと推察できる。

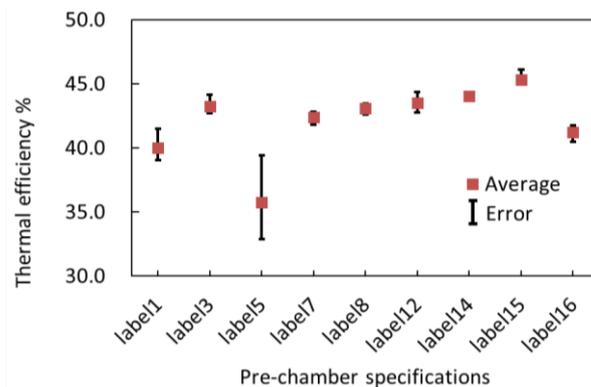


Fig. 4 Comparison of thermal efficiency by pre-chamber specifications

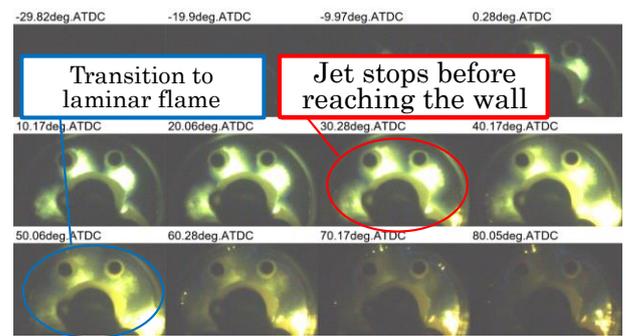


Fig. 5 Combustion images of Label 5

2.1.3 OH*自発光による熱発生分布

図 6 に撮影した -15 ~ -5 deg. ATDC 間の OH* の燃焼画像と自発光強度を示す。

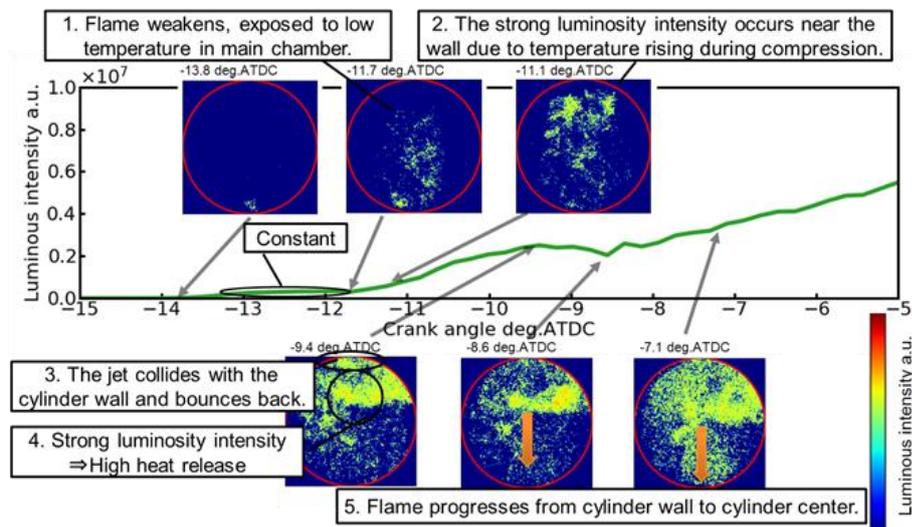


Fig. 6 OH* self-luminous images at some points in time

-11.7 deg. ATDC では主室の低温度にさらされ一時的に火炎が減少していることが確認できる。-11.1 deg. ATDC では圧縮行程で温度が上昇し壁面付近で発光強度が強くなっていることが分かる。-9.4 deg. ATDC においては噴流が壁面に衝突し跳ね返った部分が強く発光していることから、熱発生が高いと推察できる。これらのことから噴流が壁面に到達するまでの期間の熱発生に比べ、壁面付近からの着火及び噴流の跳ね返りによる熱発生の方が高いといえる。

2.1.4 シミュレーションモデル

表 2 にシミュレーションモデル諸元を示す。また図 7 に示すように燃焼室の形状は副室連絡孔 1 個分をセクターメッシュとし、解適合格子(Adaptive Mesh Refinement、以下 AMR)と呼ばれる、温度・速度などの変化量に対してメッシュが小さくなるグリッドコントロールを用いた。GRI-Mech3.0 には OH* の生成及び失活過程を含んだ素反応スキームを組み込んだ。

CFD code	CONVERGE
Turbulence	RNG k-ε model
Chemical reaction scheme	GRI-Mech3.0 including OH* reactions
Combustion model	G-equation & Detailed chemical kinetics model (SAGE)
Heat transfer	Law-of-the-wall (Launder-Spalding)
Grid control	AMR

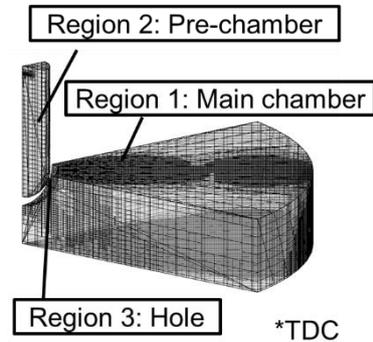


Fig. 7 Surface shape of combustion chamber

2.1.5 計算結果の検証

筒内圧力と熱発生率の計算結果と実験結果を図 8 に示す。実験結果は図 5 の OH* 自発光を測定した結果である。

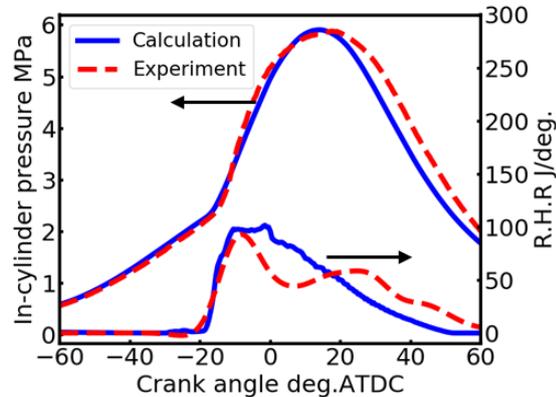


Fig. 8 Comparison of pressure and heat release ratio of calculation result and experiment result

筒内圧力・熱発生率ともに立ち上がり部分を概ね再現できていることが分かる。さらに OH* 自発光を撮影した画像と計算から求めた OH* 自発光強度画像を図 9 に示す。-12.1 deg. ATDC においては計算結果の方が実験よりも早く副室噴流が進展しているが、-10.0 deg. ATDC においては壁面付近で発光強度が強くなるのが再現できている。よって計算において副室噴流の挙動を再現できていることが示唆された。

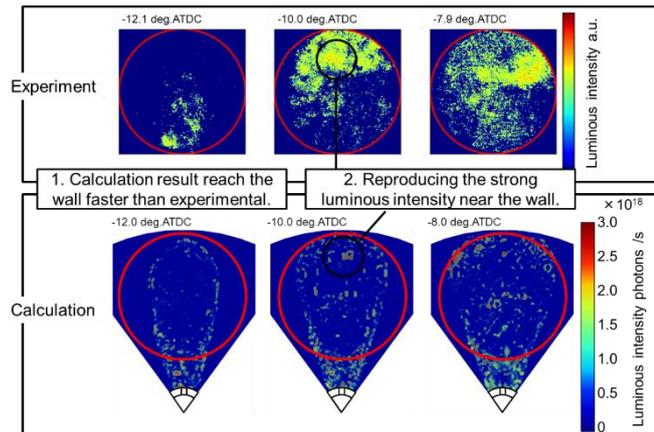


Fig. 9 Comparison of OH* self-luminous intensity images of calculation result and experimental result

2.1.6 副室噴流中における熱発生・温度・乱流エネルギーの分布

図 10 に連絡孔方向の断面における副室噴流中 OH*自発光・熱発生・温度・乱流エネルギー分布を示す。

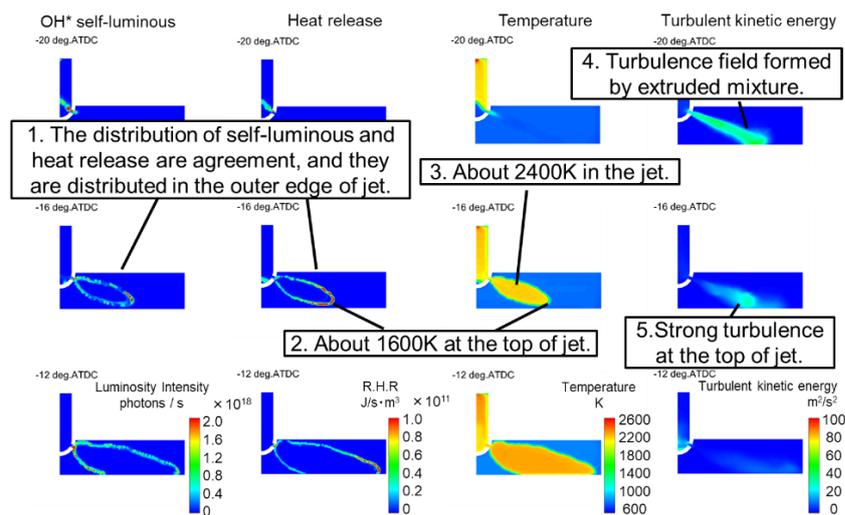


Fig. 10 Comparison of OH* self-luminous intensity images of calculation result and experimental result

図より OH*自発光分布と熱発生分布は概ね一致している。また副室噴流先端は約 1600 K、内部は約 2400 K の温度場となっている。乱流エネルギーは火炎が副室から噴出する前に押し出された混合気により強くなっている。その後乱流場は消失するが副室噴流先端において強い乱流となっている。よって副室噴流先端は強い乱流場及び約 1600 K の温度場であり、熱発生が高くなっていることが示唆された。

3. 共同研究者

田那村 正志 (草鹿研究室・修士)

中井 慎太郎 (草鹿研究室・学士)

4. 研究業績

自動車技術会 2019 春季大会、No.143、アッシュ堆積・輸送に関する研究(第 3 報)- ファンデルワールス力を考慮したアッシュ輸送モデルの構築-、大橋禪、森本溪、園田俊介、福間隆雄、草鹿仁、北村高明、松野真由美、木下幸一、2019 年 5 月、自動車技術会学術講演会前刷周 S29、p.31-36

自動車技術会 2019 春季大会、No.141、アッシュ堆積・輸送に関する研究(第 4 報) -アッシュ輸送の観察およびアッシュ堆積形態の詳細解析-、松野真由美、北村高明、森本溪、草鹿仁、福間隆雄、木下幸一、2019 年 5 月、自動車技術会学術講演会前刷集 S29、p.20-25

自動車技術会 2018 年秋季大会、No.173、ガソリンエンジン搭載車両の冷間始動時における三元触媒の浄化性能向上に関する研究、曾根遼太、巖燮陽、井上遼哉、草鹿仁、梅沢克則、近藤康弘、2018 年 10 月

SAE/JSAE Small Engine Technology Conference、SAE Technical Paper 2018-32-0066、A Numerical Study on Correlation of Chemiluminescent Specifics and Heat Release Distributions Using Large Eddy Simulation、Beini Zhou、Takayuki Adachi、Jin Kusaka、Tetsuya Aizawa、2018 年 10 月、SAE

日本機械学会論文集、Vol.84 No.867、予混合 CO 成分がディーゼル予混合圧縮着火燃焼に及ぼす影響、山口恭平、永塚勇斗、草鹿仁、大聖泰弘、鈴木央一、2018 年 11 月、日本機械学会

ASME 2018 Internal Combustion Engine Fall Technical Conference、ASME ICEF 2018-9653、Effect of Fuel Injection Timing during Negative Valve Overlap Period on a GDI-HCCI Engine、Sok Ratnak、Jin Kusaka、Yasuhiro Daisho、Kei Yoshimura、Kenjiro Nakama、2018 年 11 月、ASME

20th Asia Pacific Automotive Engineering Conference、SAE Technical Paper 2019-01-1409、0D/1D Turbulent Combustion Model Assessment from an Ultra-Lean Spark Ignition Engine、Sok Ratnak、Kyohei Yamaguchi、Jin kusaka、2019 年 3 月、SAE

自動車技術会 2018 年春季大会、284、詳細な素反応過程を考慮した LES によるディーゼル噴霧燃焼の当量比分布と熱発生解析、足立隆幸、周蓓霓、草鹿仁、相澤哲哉、2018 年 5 月、自動車技術会 2018 年秋季大会学術講演会講演予稿集

第 15 回日本熱電学会学術講演会、チュートリアル講演、排熱発電実用化への要素技術開発の取り組み～材料、モジュール、コンバータ、次世代エンジンへの搭載シミュレーション～、飯田努、茂木隆秀、横田圭祐、草鹿仁、大聖泰弘、井上遼、向後保雄、麻原寛之、笹展幸、土田博文、泉靖彦、吉村佳、2018 年 9 月、第 15 回日本熱電学会学術講演会(TSJ2018)予稿集、p.37-41

自動車技術会 2018 年秋季大会、204、天然ガス-デュアルフェューエルエンジンの燃焼特性に関する数値解析-、井手口悟士、草鹿仁、石井義範、安立利明、波多野健二、2018 年 10 月、自動車技術会 2018 年秋季大会学術講演会講演予稿集

自動車技術会 2018 年秋季大会、310、詳細な素反応過程を考慮した LES によるディーゼル噴霧における当量比分布の時間的および空間的解析、山田祥太郎、周蓓霓、足立隆幸、草鹿仁、相澤哲哉、2018 年 10 月、自動車技術会 2018 年秋季大会学術講演会講演予稿集

自動車技術会 2018 年秋季大会、311、詳細な素反応過程を考慮した LES によるディーゼル噴霧の熱発生過程に関する数値解析、足立隆幸、周蓓霓、山田祥太郎、草鹿仁、相澤哲哉、

5. 研究活動の課題と展望

運輸交通問題改善には、機械工学をはじめ、電気工学、運輸交通システム、環境工学、情報通信技術等にわたる幅広い分野における研究が必要とされる。今後はパワートレイン変革への備えも意識し、トータルモデリングの方法を思索しながらも、当面求められる効率向上及び、排出ガスのクリーン化を目指し、有効な技術の具体的な評価を行うことで、運輸交通分野のCO₂を2020年で30%、2030年で50%、2050年で70~80%の削減を実現する方策を提示したい。