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、および副室諸元が 未燃炭化水素排出量へ与える影響について解明する。本研究では図 2 に示すようにアクリル シリンダーヘッドを用いることで、ハイスピードカメラにより自発光撮影も行った。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

Label	1	2	3	4	5	6	7	8
Volume cc	1.56		3.12			4.68		
Area of holes mm ²	10.61 10.61		.61	18.85	10.61		18.85	
Number of holes	4	6	4	5	6	5	6	4
Holes diameter mm	1.84	1.50	1.84	1.64	2.00	1.64	1.50	2.45
Jet strength G	1.17	1.18	2.35	2.36	1.32	3.54	3.53	1.99

Table 1 Specifications of pre-chambers

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Label2、5、7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 2 Right: Label 7 Center: Label 5)

Label 1 と Label 7 を比較すると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、副 室の容積が小さい条件においては、容積が大きい条件ほどではないものの、副室からの既燃 ガス噴流による燃焼の促進に伴い燃焼後半における熱発生が大きくなっていることが見て取 れる。しかし、全域に燃焼は緩慢であることから、熱損失の増大や、定容燃焼からより離れる ことによる熱効率の減少が示唆される。

2.1.2 副室諸元が熱効率に与える影響

図4より熱効率が高いほど排出ガス中のTHC濃度が低減していることが確認できる。これは、 熱効率が高い条件において、より燃焼が促進されたことで未燃領域が低減されたために排出され るTHCの量も抑制されたことが示唆される。

さらに各副室諸元の噴流速度と図示熱効率の関係を図5に示す。図5より噴流の速度と図示 熱効率の間には有意な相関見られなかった。これは、現状の燃焼室構造において、副室噴流の速度 の増加が熱効率に対して負の影響を与える可能性を示している。



% 46 44 42 40 40 38 36 0 10 20 30 40 Burned gas jet velocity m/s

Fig. 4 Relationship between burned gas jet velocity and indicated thermal efficiency

Fig. 5 Relationship between indicated thermal efficiency and concentration of THC

2.1.3 自発光撮影による既燃ガス噴流輝度と図示熱効率の関係

図 6 に各副室諸元における自発光撮影画像を、図 7 に既燃ガス噴流輝度と図示熱効率の関係を示す。



Fig. 6 Self-luminous image in each pre-chamber specifications



Fig. 7 Relationship between indicated thermal efficiency and burned gas jet brightness

図 6 より、副室諸元の違いによって、主室内の既燃ガス噴流輝度に差異が生じていることが 分かる。これは、副室の容積などの違いにより、主室へ流入する既燃ガス量などが各副室諸元 によって異なることで、燃焼への影響が現れているものであると推測される。また図 7 より 既燃ガス噴流の輝度と図示熱効率は正の相関関係を示すことが明らかとなった。これより副 室式エンジンの燃焼特性を解明するために、既燃ガス噴流の輝度がひとつの指標となること が示唆された。

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。また、燃焼形態が未燃炭化水素へ与える影響をより詳細に検討するため、ピストン クレビス領域についても計算メッシュに実装した。また層流燃焼速度モデルについては、 CHEMKINパッケージのPREMIXより算出された層流燃焼速度を基に係数の決定を行なった。

Table 2 Sim	ulation models	Region 2: Pre-chamber
CFD code	CONVERGE	Region 1: Main chamber
Turbulence	RNG k-ε model	*TDC
Laminar flame	Gulder	
Turbulent flame	Peters	
Chemical reaction scheme	GRI-Mech3.0	
Combustion model	G-equation	
Heat transfer	Law-of-the-wall (Launder-Spalding)	Region 3: Hole Piston Clevis region
Grid control	AMR	Fig. 8 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。



Fig. 9 Comparison of pressure and heat release ratio of calculation result and experiment result

図 8 より、計算結果は全域で実験における圧力波形と概ね一致しており、作成したモデルの 妥当性が示された。実験値の熱発生率に関しては、圧力波形より投入した燃料の組成等を用 いて燃焼割合から計算を行ったものであるが、3D-CFD では化学平衡計算から算出されたも のであるため差異が生じているものの、熱発生率の立ち上がりについては再現されている。 また、無次元噴流強度が大きい条件においては、筒内圧力の最大値と燃焼初期における熱発 生率の最大値が大きいだけでなく、立ち上がりも急峻となっていることが分かる。

2.1.6 副室噴流による乱流変動成分と筒内温度への影響

図 9 に主室内の指定した点における乱流変動成分の時間変動と図 10 に連絡孔方向の断面 における主室内の温度分布を示す。図 10 においては、どちらの副室諸元においても、副室に 噴流が噴出を始めてから 10 deg.経過した時刻に設定している。



Fig. 9 Relationship between burned gas jet velocity and indicated thermal efficiency



図9より特に無次元噴流強度が大きい Label 6 および Label 7 において乱流変動成分u"が大 きくなっている。また,他の副室緒元においても無次元噴流強度が大きい副室緒元ほど、u[']が 大きいことは明らかである。これより、無次元噴流強度は乱流燃焼速度に正の相関を与える ものであると考えられる。また、図10より無次元噴流強度が大きい条件において、ピストン の上面付近に温度の高い領域が形成されていることが分かる。これは、噴流の速度が大きく なり、既燃ガスの温度が高いままピストンに衝突していることが原因であると考えられる。 これに加え、無次元噴流強度が大きい条件ほど、副室噴流がシリンダライナに到達するまで の時間も短いことから、上述のピストン上面付近に高温の領域が形成されることと合わせて 熱損失が増大する原因となることが考えられる。

3. 共同研究者

中塚 万穂子(草鹿研究室・修士) 前田 和輝(草鹿研究室・修士) 高橋 佑馬(草鹿研究室・学士)

4. 研究業績

- (1) 自動車技術会 2019 年秋季学術講演会、6014、Cu 活性点及び Bronsted 酸点上の反応を 考慮した Cu-chabazite SCR 触媒の高温域での反応性解析とモデリング、塚本 佳久、福 間 隆雄、草鹿 仁、2019 年 10 月、
- (2) 自動車技術会 2019 年秋季学術講演会、6099、気体燃料と軽油の二元燃料を適用した圧縮 着火機関の燃焼室形状最適化による気体燃料の未燃排出低減、山口 恭平、草鹿 仁、2019 年10月
- (3) 自動車技術会 2019 年秋季学術講演会、6134、Diesel Particulate Filter の Soot 強制再生
 におけるシミュレーション精度の向上、辻元 大輔、福間 隆雄、草鹿 仁、2019 年 10 月
- (4) SAE 2019 Thermal Management System Symposium、Waste Heat Recovery of Diesel Engine System using Thermoelectric Module、Keisuke Yokota, Tsutomu Iida, Takahide Motegi, Jin Kusaka, Yasuhiro Daisho, Ryo Inoue,Yasuo Kogo, Hirofumi Tsuchida, Yasuhiko Izumi, Kei Yoshimura、2019 年 10 月
- (5) ICE2019_SAE、SAE Technical Paper 2019-24-0150、Analysis and modeling of NOx reduction based on the reactivity of Cu active sites and Bronsted acid sites in a Cuchabazite SCR catalyst、Yoshihisa Tsukamoto、Takao Fukuma,、Jin Kusaka(Waseda)、 2019 年 9 月
- (6) ICE2019_SAE、 SAE Technical Paper 2019-24-0123、 A Fundamental Study on Combustion Characteristics in a Pre-Chamber Type Lean Burn Natural Gas Engine、 Masashi Tanamura, Shintaro Nakai, Mahoko Nakatsuka, Shota Taki, Kohei Ozawa, Beini Zhou, Ratnak Sok, Yasuhiro Daisho, Jin Kusaka、2019 年 9 月
- (7) ICE2019_SAE、 SAE Technical Paper 2019-24-0106、 A Study on Combustion Characteristics of a High Compression Ratio SI Engine with High Pressure Gasoline Injection、Takashi Kaminaga、Kyohei Yamaguchi、Sok Ratnak、Jin Kusaka (Waseda)、 Takashi Youso、Tatsuya Fujikawa、Masahisa Yamakawa (Mazda)、2019 年 9 月
- (8) ICE2019_SAE、SAE Technical Paper 2019-24-0148、Exhaust Purification Performance Enhancement by Early Activation of Three Way Catalysts for Gasoline Engines Used in Hybrid Electric Vehicles、Toshinori Okajima、Ryota Sone、Xieyang Yan、Ryoya Inoue、 Suchitra Sivakumar、Hajime Shingyouchi、Jin Kusaka、Kyohei Yamaguchi (Waseda)、 Makoto Nagata (NECC)、2019年9月
- (9) 自動車技術会 2019 年秋季学術講演会、6014、Cu 活性点及び Bronsted 酸点上の反応を 考慮した Cu-chabazite SCR 触媒の高温域での反応性解析とモデリング・、塚本 佳久,福 間 隆雄, 草鹿 仁、2019 年 10 月
- (10) PFL2019_SAEKyoto、JSAE20199090/SAE2019-01-2326、Modeling three-way catalyst converters during cold starts and potential improvements、Xieyang Yan, Ryota Sone, Ryoya Inoue, Jin Kusaka (Waseda) Katunori Umezawa, Yasuhiro Kondo (AZAPA)、2019 年 8 月
- (11) PFL2019_SAEKyoto、JSAE20199299/SAE2019-01-2236、Analysis of NH3 Diffusion Phenomena in a Selective Catalytic Reduction Coated Diesel Particulate Filter Catalyst Using a Simple One-Dimensional Core Model、Ken Sahara、Yoshihisa Tsukamoto,、Akihisa Ishimaru、Takao Fukuma,、Jin Kusaka、2019年8月

- (12) 日本機械学会 年次大会、J05208P、液相 HC が DOC 内の酸化反応に与える影響、上山陸人、畑裕登、福間隆雄、草鹿仁、2019 年 8 月
- (13) 第 29 回環境工学総合シンポジウム 2019、J408、ディーゼルエンジンの指圧解析の研究、瀧 翔太、松永 尭明、草鹿 仁、2019 年 7 月

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 2030 年で 27%、2050 年で 80%の削減を実現する方策を提示したい。