

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、BigData など）を通じてこれらの諸問題の解決策を追究し、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等々を評価する。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、副室式の燃焼方法に着目した。実験では、空気過剰率や副室諸元を変えた場合の副室噴流特性と副室燃焼による燃焼特性を調べるために、燃焼観察が可能な急速圧縮膨張装置（以下 RCEM: Rapid Compression and Expansion Machine）を用いた。RCEM では、アクリル製のシリンダーヘッドと高速度ビデオカメラ (MEMRECAM GX-8) を用いることで燃焼室内の火炎の挙動を撮影することができるだけでなく、ピストンヘッド先端を交換することにより、圧縮比や燃焼室形状を変えることが可能となっている。以下の図 1~4 及び表 1, 2 に装置図, 仕様, 可視化範囲, 副室キャップ図, シリンダーヘッド断面図を示す。

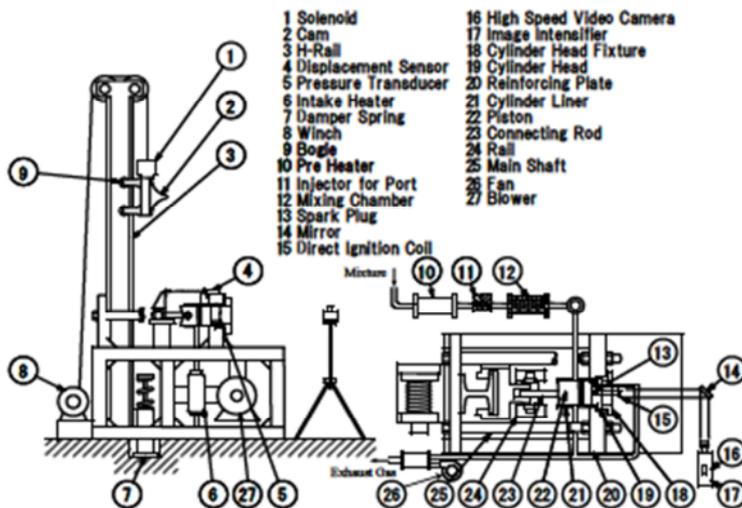


Fig.1 Schematic of RCEM

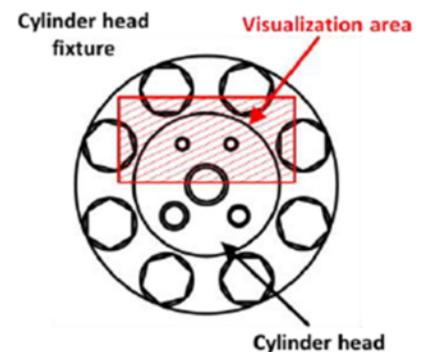


Fig.2 Visualization area

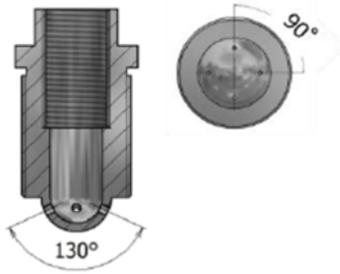


Fig.3 Pre-chamber cap

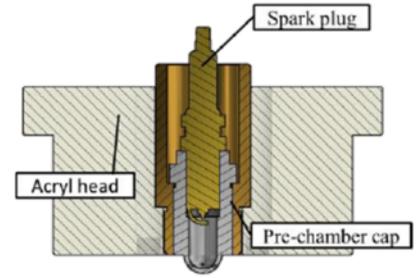


Fig.4 Cross-sectional view of cylinder head with pre-chamber

Table 1 RCEM's specifications and conditions

Bore×Stroke mm	125×140
Displacement cc	1718
Compression ratio	15
Engine speed rpm	800
Cylinder liner temp K	383
Intake gas temp K	383
Fuel	CNG(13A)

Table 2 Pre-chamber cap specification

Volume cc	2.60		
Volume ratio % ($V_{pre-chamber}/V_{TDC}$)	2.14		
Hole diameter mm	1.00	2.00	3.00
Number of holes	4		

2.1.1 空気過剰率が燃焼に与える影響の調査

連絡孔径2.0mmの副室キャップを用いて、空気過剰率を変化させたときの実験条件を表3に示す。また圧力履歴と熱発生履歴を図5に示し、各条件の燃焼画像を図6~8に示す。

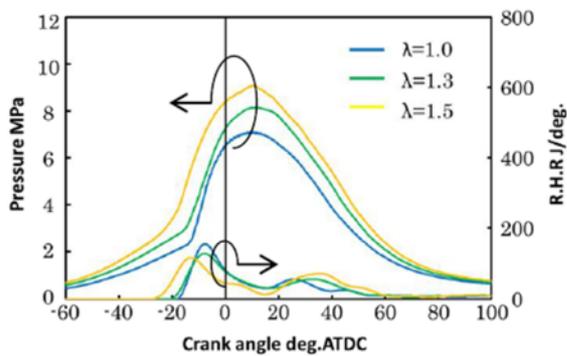


Fig.5 Pressure traces and released heat rates (Comparison of excess air ratios)



Fig.6 Images of pre-chamber combustion ($\lambda=1.0$)



Fig.7 Images of pre-chamber combustion ($\lambda=1.3$)

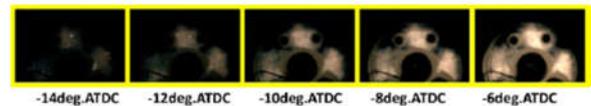


Fig.8 Images of pre-chamber combustion ($\lambda=1.5$)

Table 3 Test conditions (Comparison of excess air ratios)

Excess air ratio	1.00	1.30	1.50
Initial pressure kPa	113	144	164
CA50 deg. ATDC	5~10		
Ignition timing deg. ATDC	-20	-24	-35
Swirl ratio	1.80		
Input energy kJ	5.05		
Hole diameter mm	2.00		

図5から、熱発生率が二段になっていることがわかる。燃焼画像から、いずれの空気過剰率においても、一つ目の熱発生生のピークは、副室噴流が壁面に到達した時期であり、二つ目のピークは、主燃焼室内の混合気の火炎伝播が生じている期間であることが確認される。また、予混合気が希薄になるにつれて、一つ目の熱発生生の立ち上がりが低くなる傾向がある。次に、得られた燃焼画像から、副室からの噴流火炎が画像として確認できる位置から、壁面に至るまでの噴流の平均速度を測定した。その結果を図9に示す。また総熱発生量に対する積算熱発生量割合が10~80%の期間を燃焼期間として計算した結果を図10に示す。

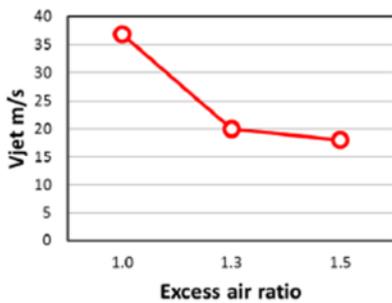


Fig.9 Mean pre-chamber jet velocity
(Comparison of excess air ratios)

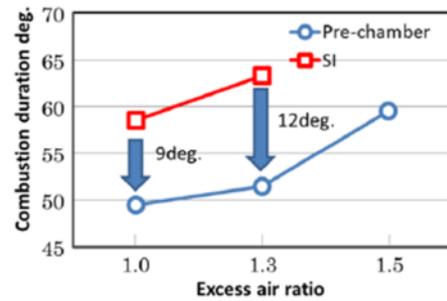


Fig.10 Combustion duration
(Comparison of excess air ratios)

図9より、空気過剰率が増加すると、副室噴流速度が低下することがわかる。これは、混合気が希薄になると、副室内での火炎による温度・圧力が低下し、副室と主室の差圧が低くなり、連絡孔付近の噴流速度が減少することと、主室での燃焼速度が減少するためと考えられる。この噴流速度の低下により、主室での乱流混合の促進が弱まり、上述の熱発生生の立ち上がりが低くなったものと考えられる。また図10より、通常の火花点火では、 $\lambda=1.5$ の希薄条件では燃焼が生じなかったのに対して、副室燃焼では、同条件でも燃焼が発生したことがわかる。この要因としては、副室内は主室よりも温度が高いため点火しやすい条件となることとも考えられる。また、いずれの希薄条件でも、副室燃焼の方が火花点火より、燃焼期間が約10deg.減少していることがわかる。これより副室燃焼は希薄限界を伸ばす効果があることと、燃焼期間を短縮する効果があることがわかった。

2.1.2 連絡孔径が燃焼に与える影響

$\lambda=1$ の条件において、初期圧を113 kPaと一定にしたうえで、副室の連絡孔径を1.00, 2.00, 3.00 mmと変化させ、他の条件は表3に揃えた場合の圧力と熱発生生の履歴を図11に示す。図11では比較のために、点火時期-35deg.ATDCにおける火花点火における圧力・熱発生履歴を併記する。また、各条件の燃焼画像を図12~14に示す。

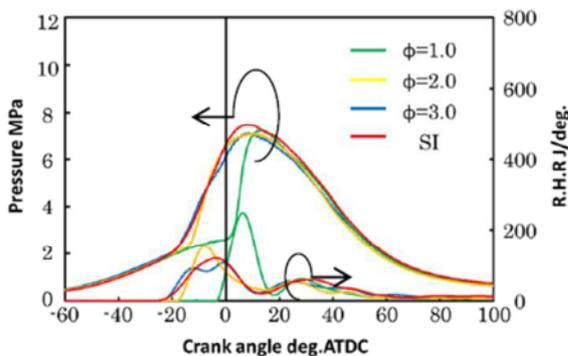


Fig.11 Pressure traces and released heat rates
(Comparison of hole diameter)



Fig.12 Images of pre-chamber combustion ($\phi=1.00$)



Fig.13 Images of pre-chamber combustion ($\phi=2.00$)



Fig.14 Images of pre-chamber combustion ($\phi=3.00$)

副室連絡孔径による圧力・熱発生率の違いを見ると、孔径が小さくなるほど圧力の立ち上がりは急峻になり、同時に熱発生も急峻で高くなる傾向がみられる。これは、副室噴流の燃焼画像からも見てとれる。孔径が小さいほど、副室と主室との差圧が大きくなり、副室噴流が勢いよく噴出しているためだと考えられる。次に副室噴流平均速度と燃焼期間をそれぞれ図 15, 16 に示す。

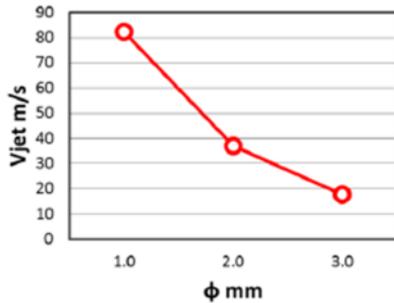


Fig.15 Mean pre-chamber jet velocity
(Comparison of hole diameters)

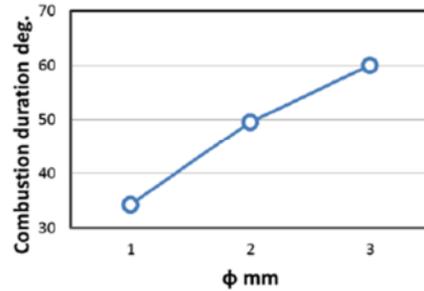


Fig.16 Combustion duration
(Comparison of hole diameters)

連絡孔径による副室噴流速度への影響を見ると、連絡孔径が小さくなると噴流速度は大きくなっていることがわかる。これは連絡孔径が小さいほど、副室と主室との絞りが大きくなり、より大きな差圧が生じることが要因と考えられる。連絡孔径を変化させた場合も、噴流速度が高いほど、主燃焼室の混合気の燃焼が促進され、急峻な圧力・熱発生となり、燃焼期間が短縮される効果がある。

2.1.3 点火時期一定での調査

$\lambda=1$ の条件において、初期圧及び点火時期をそれぞれ 113 kPa, -14 deg. ATDC として、副室の連絡孔径を 1.00, 2.00, 3.00 mm と変化させ、他の条件は表 3 に揃えた際の圧力と熱発生履歴を図 17 に示し、各条件の燃焼画像を図 18~20 に示す。

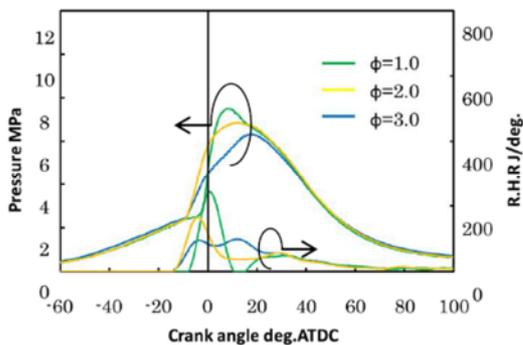


Fig.17 Pressure traces and released heat rates
(Ignition time is constant)

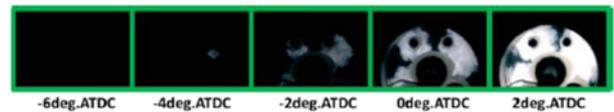


Fig.18 Images of pre-chamber combustion ($\phi=1.00$)

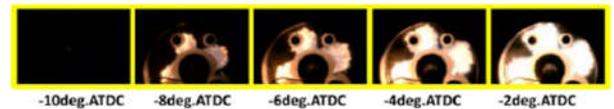


Fig.19 Images of pre-chamber combustion ($\phi=2.00$)

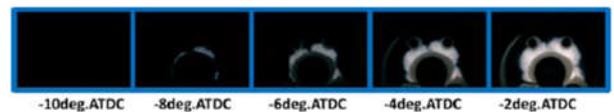


Fig.20 Images of pre-chamber combustion ($\phi=3.00$)

点火時期一定にした時の圧力・熱発生率を見ると、孔径 1.0mm の熱発生の上り上がりは、点火時期から遅れていることがわかる。燃焼画像からもわかる通り、孔径 1.0mm の噴流が確認できる時期は、それより大きい孔径の時よりも遅い。これは、連絡孔径が小さいと噴出速度は増す反面、噴出量自体が減少するためと考えられる。孔径 2.0, 3.0mm の場合は、このような噴流の遅れは見られない。孔径 2.0, 3.0mm の圧力・熱発生の上り上がり時期は同じであるが、孔径 3.0mm の方が熱発生の上り上がりが小さく緩慢な燃焼となっている。

2.1.4 共同研究者

田那村 正志 (草鹿研究室・修士)

関 尚人 (草鹿研究室・修士)

村川 周平 (草鹿研究室・修士)

喜久里 陽 (草鹿研究室・助教授)

大聖 泰弘 (理工学術院・教授)

草鹿 仁 (理工学術院・教授)

2.2 燃料電池ごみ収集車の環境性能および実用性に関する研究

地球温暖化や石油の枯渇化などの環境問題が深刻化する中で、温室効果ガスであるCO₂ 排出量削減や省エネルギー化が急務となっている。自動車産業では自動車の電動化が盛んに開発されている中、運輸部門のCO₂ 排出の3割以上を占める貨物自動車の電動化は比較的遅れている。水素と酸素を燃料とする燃料電池（以下、FC）自動車はそのエネルギー密度の高さから、長距離走行をする乗用車や重量制限のある貨物自動車への適用が期待されている。FC自動車は Well to Wheel



Fig. 1 Fuel Cell Garbage Truck

（以下、WTW）でCO₂ 排出量を削減できるだけでなく、大気汚染の原因となる有害ガスを排出せず走行音が静かである。本研究では、住宅街を走行するごみ収集車において、よりFCの導入効果が高いと考え、図1に示すような燃料電池ごみ収集車（以下、FC車）を開発し、山口県周南市の関門・今宿南の2つのごみ収集ルートに2016年10月から2017年9月まで導入し実証試験を行った。本年度は、実証試験に基づき、既存のディーゼルごみ収集車（以下、Diesel車）をFC車に代替することによるCO₂ 排出量削減効果を算出した。また、空調に着目して季節変動が電費に与える影響を明らかにした。さらに、FCシステムの出力制御方法を改善することで更なるCO₂ 排出量削減を検討した。

2.2.1 燃料電池ごみ収集車

実証試験の対象地域として水素循環型社会へ関心があり中国地方で唯一水素ステーションがある山口県周南市の関門・今宿南ルートを選定した。周南市のDiesel車のごみ収集ルート調査から、一般的な走行に対してごみ収集時は停発車頻度が多く低速運転であるごみ収集走行があることが確認され、ごみ収集走行時間は全運行時間の約半分ほどであった。したがって、ごみ収集車は一般的な重量車両に対して低出力運転の割合を多く占めるという特徴を持つ。また、ごみ袋回収時にはごみ収集車は停車されるため、アイドル運転時のエネルギー消費が大きい。さらに、架装部にゴミ袋を積み込むための回転板や押出板があり、これらを駆動させる架装部駆動エネルギーが生じる。

本研究では、周南市のごみ収集ルートや地形、過去の運行実績に基づいてFC車の設計をした。航続距離100 km、最高速度65 km/h、ごみ満載時に勾配20%の登坂を目標とし、ディーゼル4トントラックをベース車両としてFC車に改造した。開発したFC車の諸元を表1、FC車システム構成図を図2に示す。キャビンの後ろにFC関連装置を搭載し、FCシステム(FC)や水素タンク(H₂ Tank)、各種配管などを内蔵した。FCシステムは出力に依存して作動効率が変動する。FCシステムを高効率で作動させるために10 kW付近の一定で出力し、バッテリーSOCに合わせてON-OFF制御を行った。ただし、季節によって空調利用に伴う要求出力の増加が予想されたため、空調利用に合わせてFCシステムの出力の調整を行った。また、ベース車両からエンジンや燃料タンクなどを取り除き、モータ(Motor)、インバータ(IVT)、昇圧コンバータ(DC)などを新たに搭載した。FCシステムの出力値は一定であるため車両要求出力の変動をバッテリーで補う必要があり26.5 kWhのリチウムイオン電池(Li-Batt)を搭載した。リチウムイオン電池は減速時などにおけるモータの逆起電力からエネルギーを回生できるようになっている。さらに、運行中は特徴が異なる一般走行とごみ収集走行があるため、各走行に対応した2段の変速機(T/M)に改造した。なお、Loading Hopperは架装部、PTOは動力取出し機構、P_{AUX}は車両の補機電力、Pb-Battは鉛電池を示す。

Table 1 Specifications of Fuel Cell Garbage Track

Size	L7080mm × W2190mm × H2560mm
Gross Weight	6140 kg
Payload Weight	1750 kg
Powertrain	PMSM Motor
Max Power	150 kW
Max Torque	400 Nm
Transmission	2 Speed AMT
Battery	LTO/ 26.5 kWh
Fuel Cell	PEMFC/ 33kW
H2 Tank	36L/70MPa×2

2.2.2 実証試験概要

2016年10月から2017年9月まで山口県周南市の関門・今宿南ルートを対象に実証試験が実施され、133日間運行された。関門ルートは月曜日と木曜日、今宿南ルートは火曜日と金曜日の運行で各日可燃ごみの収集が行われた。ただし、祝日や運休日、FC車のメンテナンス日は従来のDiesel車でごみ収集作業が行われた。1日あたりの平均走行距離は82.7 km、平均収集ごみ重量は4,211 kgであった。

実証試験が行われた周南市の地図を図3に示す。FC車の1日の運行は、まず、徳山ビルサービス事務所の車庫(Garage)からその日の収集エリアまで移動しごみ収集作業を行う。ごみが満載になったら恋路クリーンセンター(Incineration plant)でごみを降ろす。その後、水素の残量次第で水素ステーション(H₂ station)で水素を充填しごみ収集を再開する。このサイクルを1日の運行中に2~3回繰り返す。最後に徳山ビルサービス事務所に戻り、洗車などのメンテナンスをして1日の運行を終える。

1年間の実証試験中で走行距離や平均速度などを考慮して最も平均的であった2016年11月29日、今宿南ルートのFC車の1サイクルの速度パターンとFC車のごみ積載量の推移を図4に示す。速度パターンからFC車においても速度域が高い一般走行と速度域が低く停発車頻度が多いごみ収集走行があることが確認できる。一般走行の平均速度は22.9 km/h、ごみ収集走行の平均速度は5.6 km/hであった。また、FC車全体の走行時間に対して一般走行が51.7%、ごみ収集走行が37.5%であった。

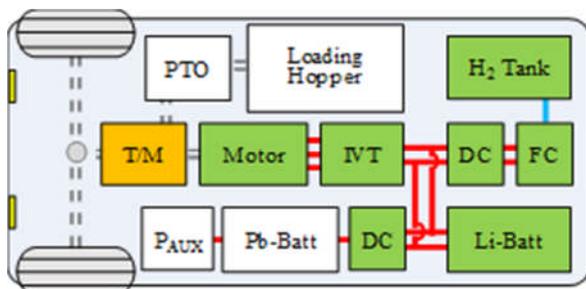


Fig. 2 FC vehicle system configuration



Fig. 3 Map of garbage collection route of Shunan city

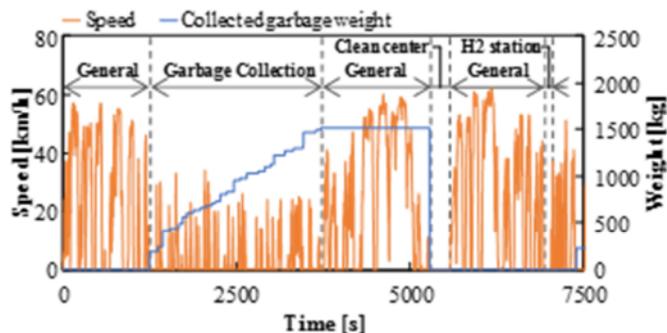


Fig. 4 Speed and garbage weight pattern of Imajuku-Minami route (1 cycle)

2.2.3 CO₂排出量削減効果

1年間の実証試験の実績から周南市における従来の Diesel 車の運行に対する FC 車の WTW での CO₂ 排出量削減効果を明らかにする。Diesel 車と FC 車の CO₂ 排出量は式(1)に基づいて算出した。

$$\text{CO}_2 \text{ 排出量} = \text{燃料の CO}_2 \text{ 排出係数} / \text{燃費} \quad (1)$$

Diesel 車は、2015 年 11 月から 1 年間の運行実績から Diesel 車の燃費を算出し、軽油の CO₂ 排出係数は 2.83 kg-CO₂/L を用いた。FC 車は、測定した水素流量より、CO₂ 排出係数 0.89 kg-CO₂/Nm³ を用いて算出した。Diesel 車と FC 車の月別 CO₂ 排出量を図 5 に示す。月別の FC 車 CO₂ 排出の傾向として冬季と夏季に CO₂ 排出量が多くなっており 2 つのピークが存在している。実証試験を通した年間平均の CO₂ 排出量は Diesel 車で 0.83 kg-CO₂/km, FC 車で 0.52 kg-CO₂/km だった。FC 車は Diesel 車に対して CO₂ 排出量を 20.1%~47.2%, 年間で 37.3%削減したことが確認された。

2.2.4 燃料電池ゴミ収集車の電費

季節変動が FC 車のエネルギー消費に与える影響を明らかにする。ただし、FC 車は FC システムとバッテリーから電力を供給しているので、ここでは水素燃費ではなく電費で評価を行った。FC 車の電費を走行電費、空調電費に分類して月別の電費推移を図 6 に示す。なお、2016 年 10, 11, 12 月は空調による消費エネルギー増加に伴う FC 車の航続距離の低下を懸念し、空調を使用しなかった。FC 車の電費は 1 月と 8 月に 2 つのピークがあることが分かる。FC 車の年間平均電費は 0.71 kWh/km であった。

走行電費は年間を通して変化が小さく一定を保っており季節変動による影響は確認されなかった。一方、空調系電費は冬季と夏季に電費が悪化しており、最も電費の良かった 2017 年 3 月 0.03 kWh/km に対して最も電費が悪かった 2017 年 1 月は 0.07 kWh/km であった。山口県周南市の月別平均気温に対するヒータとエアコンの平均出力を図 7 に示す。暖房平均出力は気温の低い冬季に多く、気温の高い夏季に冷房の出力が高いことが確認できる。FC 車は気温に応じた空調の使用がされており、冷暖房の使用によって FC 車の電費が悪化し、図 5 の冬季と夏季の CO₂ 排出量増加に起因したと言える。

2.2.5 燃料電池システムの平均出力と効率

FC システムの特性上、FC システムを 10 kW 付近で出力させることで、効率よく水素を消費することができる。空調システムを含む走行に要求された平均出力と実際に FC システムが発電した平均出力と FC システムの作動効率を図 8 に示す。図より、年間を通して FC システムは車両要求を超える出力をしていた。特に 1 月や夏季において著しく超過した。これは、空調を使用していない 2016 年 10, 11, 12 月は 12 kW 付近に設定していたが、空調の使用のために出力を上げたためであ

る。しかしながら、図9より、実際の空調システムの出力は最大1.1kW程度で1月の車両が要求した平均出力は12.0kWであったが、1月の平均出力は17.0kWだった。また、空調使用がない10, 11, 12月のFCシステムの平均効率 52.5% であったが、空調のための出力調整後の1月から9月は平均 48.5% であり、約4ポイント作動効率が低下していたことが判明した。よって、FCシステムは必要以上に高い出力かつ低い効率領域で発電していたと言える。

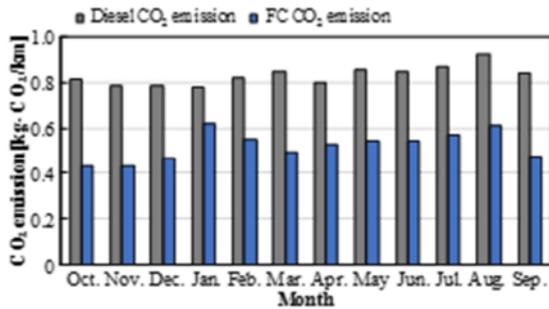


Fig. 5 Reduction of CO₂ emission

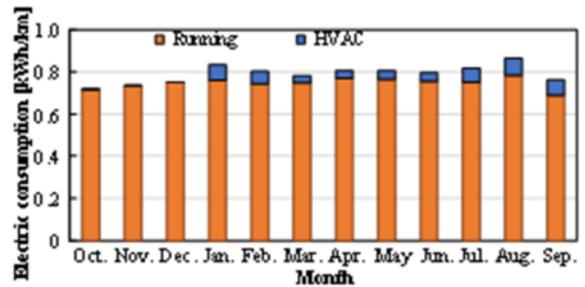


Fig. 6 Seasonal variation of energy consumption

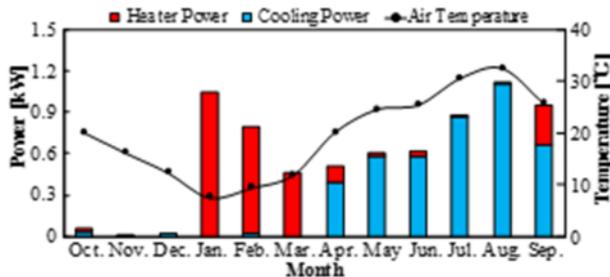


Fig. 7 HVAC power

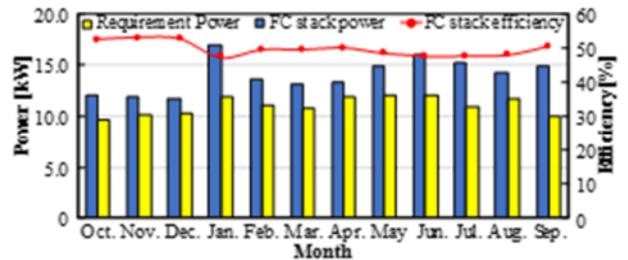


Fig. 8 Vehicle traveling average power and FC system output

2.2.6 共同研究者

中作 祥太 (紙屋研究室・修士)

金 乗炫 (紙屋研究室・修士)

李 鎬式 (紙屋研究室・博士)

廣田 壽男 (紙屋研究室・客員教授)

紙屋 雄史 (紙屋研究室・教授)

井原 雄人 (株早稲田アカデミックソリューション)

山浦 卓也 (株フラットフィールド)

3. 研究業績

3.1 学術論文

田那村正志, 関尚人, 村川周平, 喜久里陽, 草鹿仁, 大聖泰弘, 急速圧縮膨張装置を用いた副室式天然ガス機関の燃焼特性に関する研究, 第 28 回内燃機関シンポジウム.

三輪善裕, 永塚勇斗, 周ベイニ, 草鹿仁, 船用中速ディーゼル機関の混合気形成シミュレーション, 第 28 回内燃機関シンポジウム.

永塚勇斗, 三輪善裕, 周ベイニ, 草鹿仁, 詳細素反応過程を考慮した三次元流体シミュレーションによる船用ディーゼル機関の排出ガス性能向上に関する研究, 日本機械学会中国四国支部第 56 期総会講演会.

石手雄大, 八幡萌, 中山隆雄, 小島啓, 草鹿仁, ガソリンエンジンにおける 1 次元燃焼モデルの高精度化に関する研究, 日本機械学会中国四国支部第 56 期総会講演会.

高橋克仁, 草鹿仁, 宮内祐輔, 田辺光昭, 急速圧縮装置を用いた HCCI の可視化及び数値計算による生成化学種の検討, 第 55 回燃焼シンポジウム論文集, B311.

山口恭平, 喜久里陽, 草鹿仁, 大聖泰弘, 燃料改質を適用した圧縮着火エンジンに関する数値解析, 自動車技術会論文集 49 巻 2 号.

畑裕登, 滋野豪規, 滋野玄規, 植西徹, 福間隆雄, 草鹿仁, Diesel Oxidation Catalyst 内部での Hydro Carbon 酸化反応に及ぼす活性サイト密度の影響に関する研究, 第 28 回内燃機関シンポジウム.

滋野豪規, 畑裕登, 滋野玄規, 植西徹, 福間隆雄, 草鹿仁, 複数炭化水素の競争吸着が酸化反応挙動に及ぼす影響の実験的解明, 第 28 回内燃機関シンポジウム.

薄井陽, 大橋禅, 森元溪, 草鹿仁, 福間隆雄, 北村高明, 松野真由美, 武田好央, 木下幸一, ディーゼルパーティキュレートフィルタ内のアッシュ堆積・輸送に関する研究(第一報)~X 線 CT 線形によるアッシュ堆積密度分布の定量化~, 自動車技術会論文集.

卯滝舜, 塚本佳久, 草鹿仁, NH₃ 選択還元型触媒をコートした Diesel Particulate Filter の内部輸送現象の研究~PM 堆積と燃焼が NO_x 浄化に及ぼす影響解析~, 日本機械学会四国中国支部第 56 期総会・講演会.

Shota Nakasaku, Byunghyun Kim, Hosik Lee, Toshio Hirota, Yushi Kamiya, Yuto Ihara, Takuya Yamaura, A Study on Environmental Performance and Commercialization of a Fuel Cell Garbage Truck (Forth Report), JSAE KANTO International Conference of Automotive Technology Engineers (ICATYE), B3-2, pp.1-4 (2018).

4. 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をも意識し, トータルモデリングの方法を思索ながらも, 当面求められる効率向上及び, 排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.