

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420149

研究課題名(和文) バイオガスの過膨張サイクルと直噴成層燃焼による高熱効率化と蓄電池への充電実証

研究課題名(英文) Increasing thermal efficiency of biogas application with more-expansion cycle and direct-injection stratified combustion

研究代表者

志賀 聖一 (Shiga, Seiichi)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：00154188

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)： バイオマスをガス化して生成されるバイオガスを燃料として火花点火機関を運転し、以下を明らかにした。超過膨張は、予混合圧縮点火燃焼と排気再循環が図示熱効率45%を達成できる。ガス直噴燃焼は、急速圧縮機を用い、混合の程度を、完全予混合実験の排気組成の結果に基づいて、正規分布を仮定して、平均当量比と分散でモデル化できる。ディーゼルベースの高乱流、高圧縮比燃焼室では、ガス燃焼で、図示熱効率40%程度を達成できる。実バイオガスでは、低温ガス化で正味熱効率30%を達成でき、高温ガス化で22%程度であること、ニッケル水素電池への充電効率は抵抗負荷と同一であり、充放電効率が80%程度であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)： Bio-gas produced through low and high temperature gasification was applied to a spark-ignition engines. A diesel based engine with higher turbulence and higher compression ratio gave the indicated thermal efficiency of about 40%. Actual bio-gas was also used to a gas engine. It gave the maximum brake thermal efficiency of 30% in the case of low-temperature gasification, while in high-temperature gasification, it goes down to 22%. Over-expansion effect in a homogeneous compression ignition mode was also examined and gave the maximum indicated efficiency of 45% with no NOx emission. Direct-injection of gaseous fuel was experimentally examined by using a rapid compression machine where engine-like condition was safely reproduced. A model was successfully established on the basis of comparison between emissions data obtained by completely uniform mixture combustion. The non-uniformity was reasonably expressed by the mean equivalence ratio and the dispersion of Gaussian distribution.

研究分野：熱工学

キーワード：バイオマス 熱効率 成層燃焼 超過膨張サイクル ガス機関 蓄電 実バイオガス 充放電効率

1. 研究開始当初の背景

家畜糞などの産業廃棄物をガス化によって資源化し、ガス機関で発電することの可能性においてとくにガス機関での発電まで含めた実証がされていなかった。加えて、バイオガスのみならず、ガスを燃料とする火花点火機関は、環境と資源量の観点から高い将来性が見込まれるため、ガス機関一般への波及効果はきわめて大きい。とくに、超過膨張サイクルとの複合効果は、熱効率の飛躍的向上が期待できるとともに、筒内直接噴射燃焼も、ガス燃焼の新しい方式としての可能性が未知数である。

2. 研究の目的

本研究では、大きく二つの目的がある。一つは、超過膨張サイクルや筒内直接噴射燃焼などの、新しい熱効率増大手法の可能性解明と、バイオマスから生成されたバイオガスを蓄電まで含めて利用することを実証することである。そのために、本研究では以下に述べる4つの項目を調べた。

- (1) 超過膨張サイクルによる熱効率増大効果の可能性解明
 - (2) 天然ガス直接噴射燃焼の基礎特性
 - (3) 実際のバイオガスを用いた発電実験
 - (4) 模擬バイオガスを用いた発電実験
- 以降の説明は、この番号に対応させている。

3. 研究の方法

(1) 超過膨張サイクルの効果

表3.(1).1に超過膨張サイクルの効果を実験的に検討するための装置概略を示す。単気筒液冷のガソリン機関をベースに、膨張比を10~30、吸気弁閉じ時期を0~110 deg ABDCで変化できるようにしており、吸気加熱と排気再循環(EGR)を行って、均一自発点火燃焼

表3.(1).1 超過膨張サイクル実験機関

Type	4-Stroke, Single-Cylinder, Liquid Cooling
Fuel	n-Heptane
Valve Arrangement	SOHC with 4 Valves
Combustion Chamber	Pent Roof
Bore × Stroke (Stroke Volume)	100 mm × 82.6 mm (649 cc)
Expansion Ratio	15
Compression Ratio	12.3 (LC60)

(HCCI)ができるようにした。

(2) 天然ガス直接噴射燃焼の基礎特性

図3.(2).1に天然ガスを直接噴射して成層燃焼させた場合の燃焼特性を実験的に解明するための、急速圧縮機を示す。これは、実機関内の高温で高圧な雰囲気を実現し、燃焼の基礎特性を実験的に調べる装置であり、ボア80mm、ストローク約120mmで、圧縮時間は約80msである。高速に運動する

実機関の1回だけの点火、燃焼を再現する。これに、改造型ガソリン用直噴弁を装着し、噴射圧力4.5ないし9MPaで、シリンダ内の成層度を変化させるために、噴射時期を変化させた。

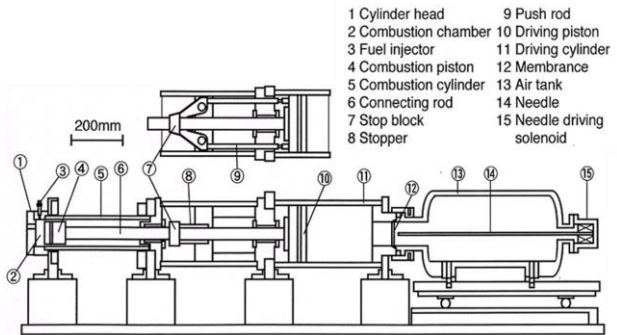


図3.(2).1 急速圧縮機

(3) 実際のバイオガスを用いた発電実験

図3.(3).1に実際のバイオガスを用いた発電実験(以降実バイオと呼ぶ)装置の概略を示す。小型の定置型コージェネ用天然ガス機関発電システムで、その主要諸元は表3.(3).1に示す通りである。

行程体積163cc、2弁式単気筒火花点火機関で、圧縮比は12、天然ガス運転時の定格出力/回転数は、1.0kW/1950rpmである。発電

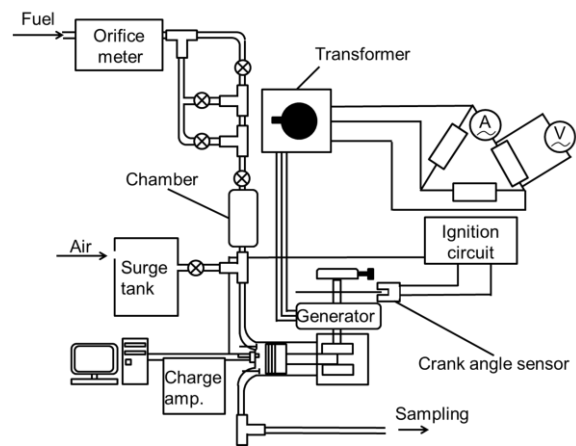


図3.(3).1 実験装置概略

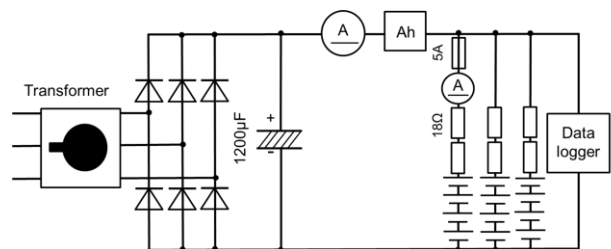


図3.(3).2 Ni-MH バッテリ充電回路

表 3. (3). 1 供試機関発電機の主要諸元

GE160V, 1-Cylinder, 4-Stroke, OHV	
Displacement volume	163 cc
Rated power / Speed	1.0 kW / 1950 rpm
Compression ratio	12
Ni-MH BATTERY PACK	
Maximum capacitance / stored energy	20 Ah / 240 Wh

機は、20 極の同期型で、出力端は 3 相交流である。ここに、負荷として、抵抗と蓄電池（ニッケル水素）の 2 種類を接続した。抵抗の場合はスター接続とし、1 相の線間電圧と相電流の実効値を 3 倍して正味出力（受電端電力）を求めた。蓄電池に充電する場合は、図 3. (3). 2 のような 3 相全波整流回路を用い、蓄電池個数と出力電圧、電流の調整の関係上、若干の抵抗を組み合わせた。出力の制御は、燃料流量と 3 相単巻変圧器を用いて行い、絞り弁開度も始動、停止等には用いたが、基本的には全開で運転した。回転数は、使用するバイオガスによって、低温ガス化の場合は 2200 rpm、高温ガス化の場合は 2,400 rpm くらいとした。

空気量計測は吸気サージタンクに設けたタンクオリフィスにより、また燃料ガス流量計測には、管内オリフィスをそれぞれ用いた。

(4) 模擬バイオガスを用いた発電実験

図 3. (4). 1 にボンベガスを用いて模擬バイオガスを供給して、高圧縮比と高乱流燃焼室が形成できるディーゼル機関ベースをガス機関とした機関の実験装置概略を示す。ここでは、メタンと水素の混合燃焼を行うために、ボンベガスをそれぞれの燃料噴射によって供給した。制御は、自作の ECU（電子制御装置）を用いた。圧縮比は 15, 20 の 2 種類を、ピストンキャビティ形状によって、乱流強さを 2 種類設定した。

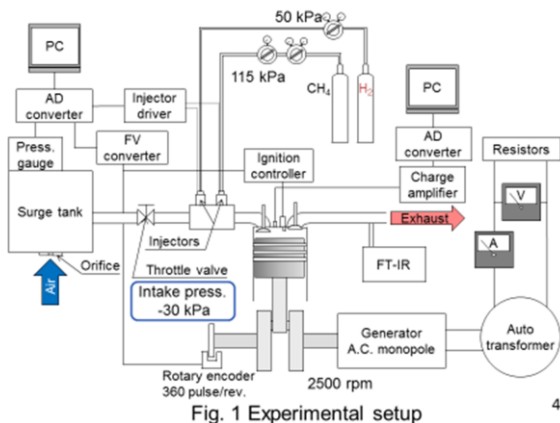


図 3. (4). 1 模擬バイオガス実験装置

4. 研究成果

(1) 超過膨張サイクルの効果

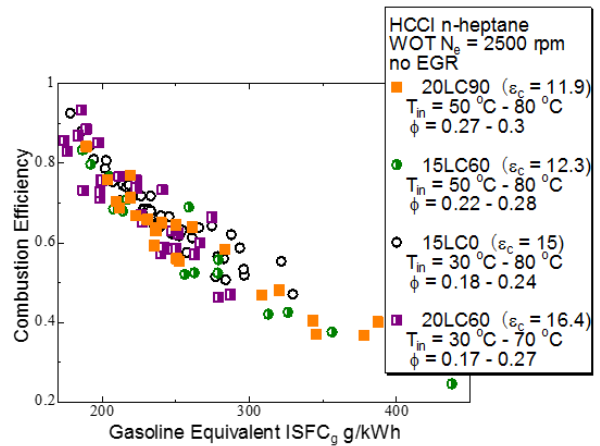


図 4. (1). 1 超過膨張サイクルの効果

図 4. (1). 1 に、膨張比 20 と 15 で、吸気弁閉じ時期が 0, 60, 90 deg ABDC の条件で、正ヘプタンを燃料として自発点火燃焼を行った場合の結果を示す。燃焼効率と図示燃費率（図示熱効率）とは強い相関があり、機関の熱効率にとって燃焼効率が決定的に重要であることがわかる。また、これらの条件のなかで、図示燃費率 180 g/kWh（図示熱効率 46%）を達成できることがわかった。雑誌⁽²⁾

(2) 天然ガス直接成層燃焼の特性

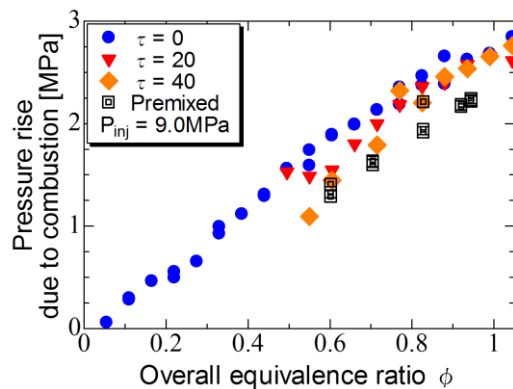


図 4. (2). 1 総当量比に対する燃焼による圧力上昇

図 4. (2). 1 は総当量比に対する燃焼による圧力上昇を示す。希薄燃焼限界は、予混合燃焼が 0.6 と最も高く、τ=40, 20 ms で 0.5, 0 ms では 0.05 と実験装置のほぼ限界まで燃焼することがわかる。したがって、点火限界の観点からは、混合時間が 40 ms 程度でほぼ均一予混合と同一になることがわかる。0 と 40 ms とで燃焼による圧力上昇の差が高当量比側で大きくなるのは、燃料の分圧分が大きくなることと、噴流の持つ乱れの効果が大きくなって燃焼速度が増大することによる。こ

の成層の程度を、実験的に推定するモデルを構築した。

一方、成層燃焼における最大の問題点である、NO 濃度の結果を図 4. (2). 2 に示す。予混合燃焼に比べて、成層燃焼は全体的にフラットで希薄側に移動したように見える。最大値も約半分程度に低下している。理想的な成層燃焼であれば、NO 最大値の領域が当量比に比例するはずであるから、右上がりの直線になる。したがって、全体的には、理想的な成層化よりも全体的に希薄化している可能性がある。しかしながら、最大値が半減していることは、過濃な領域の生成も併せて示しており、混合気分布の生成が示唆される。初期圧力の影響は、濃度で評価するかぎり有意な差としては現れないことが明らかである。図 4. (2). 3 は、NO を濃度ではなく、単位燃料質量あたりの排出質量、いわゆる NO 排出率と燃焼による圧力上昇の関係を示す。燃焼を利用する観点からは、圧力上昇に対する正味の NO 排出が重要であるとの観点からは、所期圧力の増大が NO 排出率の低減に有効であることがわかる。 発表(3)

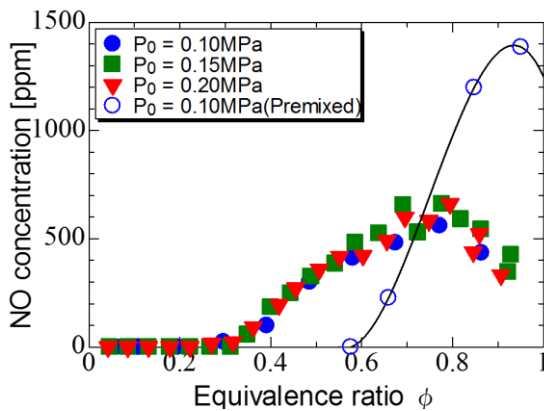


図 4. (2). 2 初期圧力が NO の生成濃度に及ぼす

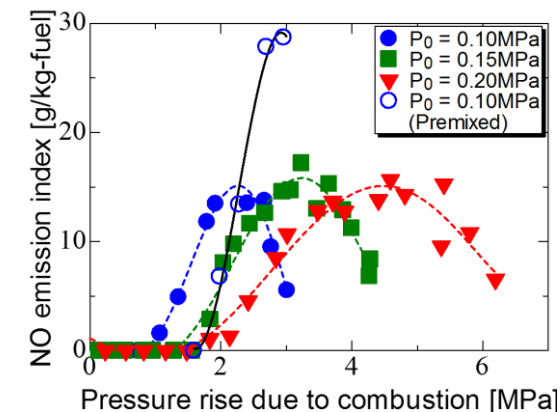


図 4. (2). 3 NO 排出率と燃焼による圧力上昇の関係

(3) 実際のバイオガスを用いた発電実験

図 4. (3). 1 に、実バイオガスによる運転が正味平均有効圧力、BMEP に及ぼす影響を、天然ガス運転と比較して示す。希薄運転限界は、天然ガスの場合 0.7 であるのに対して、バイオガスでは 0.3 に達する条件もあり、H₂ や CO を多量に含むことによる。バイオガスは供給圧力、組成が変動するため、MBT がとれるか不明な場合は 22 deg BTDC 一定で運転した。それ以外の条件も含めて、バイオガスの BMEP は天然ガスのものよりも低い。これは、バイオガス中の希積成分である CO₂ と若干含まれる N₂ による。なお、ここに示した実バイオガスはすべて低温ガス化で生成されたものである。これらの結果は、抵抗、抵抗+蓄電池の違いによらない。

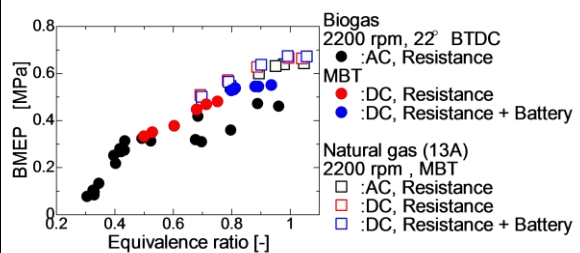


図 4. (3). 1 各種ガス運転による BMEP

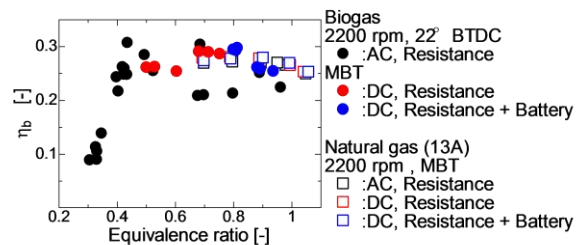


図 4. (3). 2 各種ガスによる正味熱効率

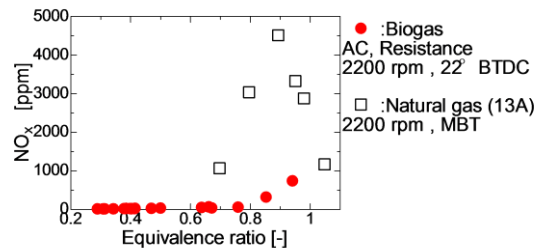


図 4. (3). 3 各種ガスによる NOx 排出濃度

図 4. (3). 2, 3 はそれぞれ、正味熱効率と NOx 排出濃度を示す。バイオガスの BMEP は低かったにもかかわらず、正味熱効率は天然ガスと同等か若干高い条件もあり、最大で 30% に達しており、しかもその範囲は当量比 0.3 ~ 0.8 と広い。これはおもにバイオガス中の

H2 が持つ高い燃焼速度によるサイクル効率増大が BMEP 低下による機械効率低下を補ってなお正味効率を増大させるためと考えられる。NOx 濃度は十分に低く、バイオガス中の不活性ガス成分による。したがって、低温ガス化で生成されたバイオガスは、低カロリーでありながら、天然ガスよりもむしろ高い正味熱効率をきわめて低い NOx 排出で実現できることがわかった。雑誌⁽¹⁾

(4) 模擬バイオガスを用いた発電実験

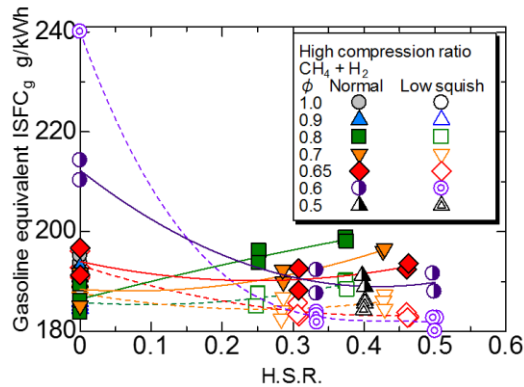


図 4. (4).1 図示燃費率の水素置換率 (H. S. R.) による変化 (高圧縮比 20)

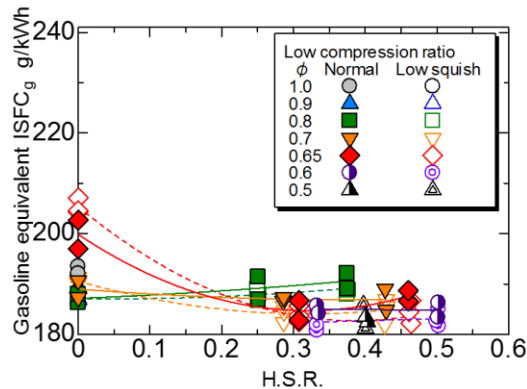


図 4. (4).2 図示燃費率の水素置換率による変化 (低圧縮比 15)

図 4. (4).1, 2 はそれぞれ、ガソリン換算図示燃費率の水素置換率 (H. S. R.) による変化を、高低両圧縮比に対して示す。いずれの圧縮比条件においても、水素置換率の増大に対する図示燃費率の依存性は、当量比がおおむね 0.6 ないし 0.7 を境目にして逆転するように見える。つまり、当量比が高い場合、水素置換はむしろ熱効率を低下させるが、低い場合は逆に増大させる。これは、高当量比では、水素の燃焼によるモル数低下の影響が燃焼速度増大の効果よりも大きく、低当量比では、それらの効果が逆転することによると考えられる。この結果は、実バイオガスの場合、当量比 0.3~0.8 の広い範囲で最高の熱効率を実現できること、0.8 以上ではそれが低下することに対応している。したがって、実バ

イオガスの現象が、このような模擬バイオガスでの実験によって部分的にでも説明できることが明らかとなった。圧縮比および乱流強度については、いずれも低下させたほうが高い熱効率となることがわかる。発表⁽⁵⁾

5. 主な発表論文等 (参考文献に対応)
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- (1) 木村 翔平, 秋元 亮哉, ゴンザレスファン, 荒木 幹也, 志賀 聖一, 火花点火ガス機関発電システムを用いた実バイオガスによる運転特性, 日本エネルギー学会誌, 94 巻, p. 594-600, (2015), 査読有.
- (2) 王 偉昭, 吉澤 廣昭, ゴンザレスファン, 荒木 幹也, 志賀 聖一, HCCI 燃焼に及ぼす超過膨張サイクルの影響要因の検討, 自動車技術会論文集, 146 巻, p. 1051-1056, (2015), 査読有.

[学会発表] (計 9 件)

- (1) 酒巻 司, 秋元 亮哉, ゴンザレスファン, 荒木 幹也, 志賀 聖一, 笠井 晴樹, 金子 啓一, 火花点火ガス機関を用いた実バイオガスによる燃焼と発電の特性, 第 26 回内燃機関シンポジウム, 2015. 12. 8-10, 京都府・京都市.
- (2) 東泉 智子, 吉澤 廣昭, ゴンザレスファン, 荒木 幹也, 志賀 聖一, 大量 EGR を用いた超過膨張サイクル機関における HCCI 燃焼制御, 第 26 回内燃機関シンポジウム, 2015. 12. 8-10, 茨城県・つくば市.
- (3) 中里 隆文, 奈良 靖, ゴンザレスファン, 荒木 幹也, 志賀 聖一, 圧縮天然ガスの筒内直接噴射成層燃焼における NOx 低減の可能性, 第 53 回燃焼シンポジウム, 2015. 11. 16-18, 茨城県・つくば市.
- (4) 秋元 亮哉, 酒巻 司, ゴンザレスファン, 荒木 幹也, 志賀 聖一, 笠井 晴樹, 金子 啓一, 火花点火ガス機関を用いた実バイオガスによる燃焼と発電の特性, 日本エネルギー学会年次大会, 2015. 8. 3-4, 北海道・札幌市.
- (5) 湯本 智史, 田畑 博史, ゴンザレスファン, 荒木 幹也, 志賀 聖一, バイオガス模擬燃料を用いたディーゼル機関ベースの火花点火機関における燃焼室諸元の影響, 日本エネルギー学会年次大会, 2015. 8. 3-4, 北海道・札幌市.
- (6) 王 偉昭, 吉澤 廣昭, ゴンザレスファン, 荒木 幹也, 志賀 聖一, HCCI 燃焼に対する超過膨張サイクルの影響要因の検討, 第 25 回内燃機関シンポジウム, 2014. 11. 26-28, 茨城県・つくば市.

- (7) 木村 翔平, 秋元 亮哉, 酒巻 司, ゴンザレス ファン, 荒木 幹也, 志賀 聖一, 笠井 晴樹, 金子 啓一, ガス機関発電システムを用いた実バイオガスの運転特性, 第 25 回内燃機関シンポジウム, 2014. 11. 26-28, 茨城県・つくば市.
- (8) 木村 翔平, 秋元 亮哉, ゴンザレス ファン, 荒木 幹也, 志賀 聖一, 天然ガス機関発電システムを用いた実バイオガスによる運転, 日本機械学会関東支部第 20 期総会・講演会, 2014. 3. 13-14, 東京.
- (9) 郭 品, 関口 昌彦, 荒木 幹也, Gonzalez Palencia J. C., 志賀 聖一, 急速圧縮機を用いたメタンの燃焼特性に及ぼす多点点火の影響, 第 50 回燃焼シンポジウム, 2013. 12. 4-6, 東京.

()

研究者番号 :

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

志賀 聖一 (SHIGA, Seiichi)
群馬大学・大学院理工学府・教授
研究者番号 : 0 0 1 5 4 1 8 8

(2) 研究分担者

荒木 幹也 (ARAKI, Mikiya)
群馬大学・大学院理工学府・准教授
研究者番号 : 7 0 3 4 4 9 2 6

GONZALEZ・P JUAN (GONZALEZ, P Juan)
群馬大学・大学院理工学府・助教
研究者番号 : 3 0 7 2 0 3 6 2

(3) 連携研究者