2019/01/28 SIP「革新的燃焼技術」公開シンポジウム

ガソリン燃焼チーム クラスター大学17（燃料・ノック班）

Institute of Fluid Science, Tohoku University
P. Grajetzki, H. Nakamura, T. Tezuka , S. Hasegawa, K. Maruta

A new approach to determine the reactivity of fuels using steady-separated weak flames in a micro flow reactor with a controlled temperature profile

1 Objective

Background
- New automotive engines are developed to increase efficiency and decrease CO_2
- Ultra-lean combustion of gasoline can lead to higher efficiency
- Engine knocking can occur and must be avoided
  ➔ Reactivity of fuels must be well understood

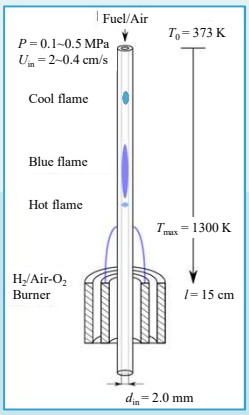
Challenges
- Common methods are expensive especially for novel fuels
- Common approaches use transient methods (RCM, Shock tube)

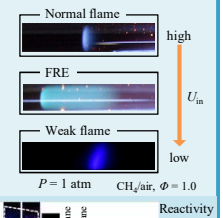
Approach
- Investigate fuel reactivity by steady-separated weak flames in a **micro flow reactor with a controlled temperature profile** (MFR)[1][2]
- Allows for investigation at low temperatures, ultra-lean and EGR conditions at atmospheric and elevated pressures
- Easy and reliable method to evaluate fuel reactivity

2 Principle

Micro flow reactor with a controlled temperature profile[1][2]

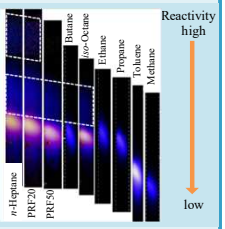
- Steady temperature profile
- Laminar flow, constant pressure
- **Steady-separated weak flames at low velocity**
- WF represents ignition branch of Fendell curve

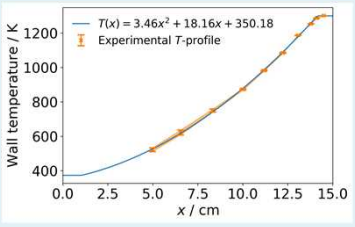




Weak flames

- Cool, blue and hot flame
- Temperature at reaction zone can be identified
- Reactivity can be evaluated from flame pattern





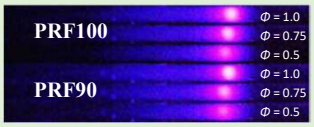
Computation

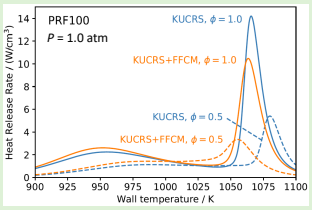
- PREMIX[3]-based 1-D steady code[1]
- Detailed KUCRS reaction mechanism[4]
- T-profile of experiment
- Additional term to account for heat transfer between gas-phase and wall[1]

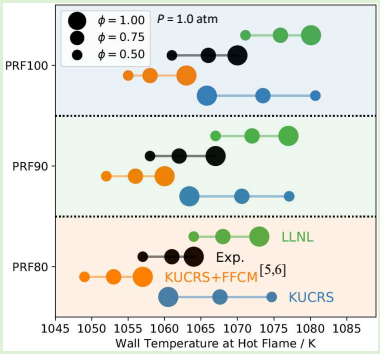
$$\dot{M}\frac{dT}{dx} - \frac{1}{c_p}\frac{d}{dx}\left(\lambda A\frac{dT}{dx}\right) + \frac{A}{c_p}\sum_{k=1}^{K}\rho Y_k V_k c_{pk}\frac{dT}{dx} + \frac{A}{c_p}\sum_{k=1}^{K}\dot{\omega}_k h_k W_k - \frac{A}{c_p}\frac{4\lambda Nu}{d^2}(T_w - T_g) = 0$$

3 Results

Ultra-lean combustion[5]





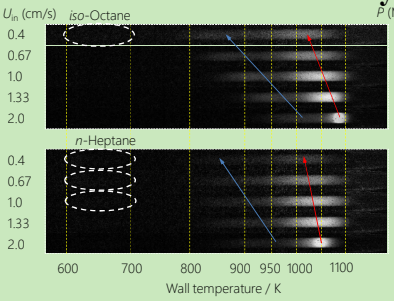


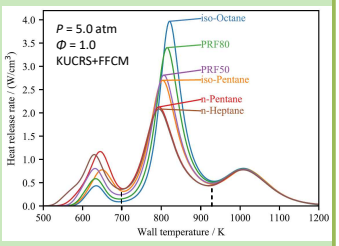
Important reactions:

Chain branching:
$O_2 + H \Leftrightarrow OH + O$
$H + HO_2 \Leftrightarrow OH + OH$

Chain termination:
$H + O_2(+M) \Leftrightarrow HO_2(+M)$
$OH + HO_2 \Leftrightarrow H_2O + O_2$

Novel method for reactivity measurement





Flame structure

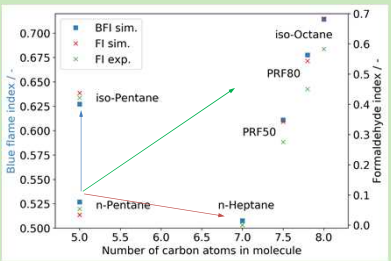
- Cool flame: Consumption of fuel
- Blue flame: Consumption of intermediates
- Hot flame: Oxidation of CO and H-O reactions

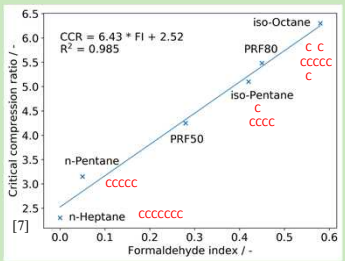
Heat Contribution Index and Formaldehyde Index

$$HCI = \frac{\int_i HRR(x)\,A_{cs}\,dx}{\int_{WF} HRR(x)\,A_{cs}\,dx}$$

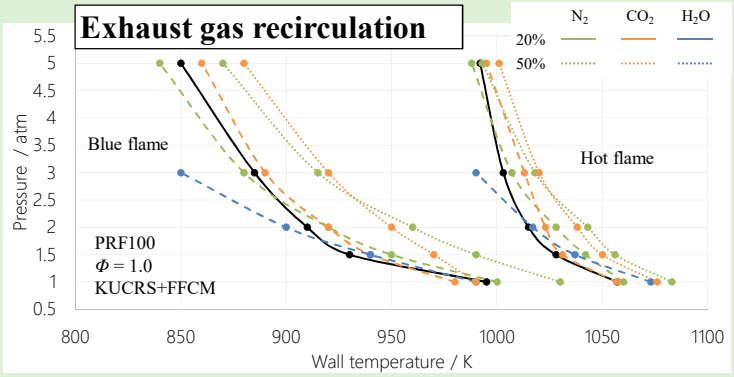
$$FI = 1 - \frac{x_{CH2O}}{x_{CH2O,n-heptane}} \quad @670K$$

Fuel structure and reactivity





Exhaust gas recirculation



References

[1] K. Maruta, T. Kataoka, N. Kim, S. Minaev, R. Fursenko, *Proc. Combust. Inst.*, 30 (2005), 2429-2436.
[2] S. Minaev, K. Maruta, R. Fursenko, *Combustion Theory and Modelling*, Vol. 11 No. 2 (2007), 187-203.
[3] R.J. Kee, et al., Sandia National Laboratories Report (1985), No. SAND85-8240.
[4] A. Miyoshi, *J. Phys. Chem. A.*, 115 (2011), 3301-3325.
[5] P. Grajetzki, H. Nakamura, T. Tezuka, S. Hasegawa, K. Maruta, *Combust. Sci. Tech.*, 190(11) (2018), 1950-1970.
[6] G. Smith, Y. Tao, H. Wang, FFCM-1, 2017.
[7] W. G. Lovell, *Industrial and Engineering Chemistry* 40(12) (1948).

SIP 革新的燃焼技術 Innovative Combustion Technology bridging to....

2019/01/28 平成31年度 SIP「革新的燃焼技術」公開シンポジウム

ガソリン燃焼チーム クラスター大学17（ノック抑制班）

東北大学流体科学研究所 丸田・森井/中村研究室

中田 涼太，巽 遼太，中村 寿，手塚 卓也，長谷川 進，丸田 薫

温度分布制御型マイクロフローリアクタを用いた定在冷炎分析に関する研究

目　的

多段酸化反応から分離抽出した定在冷炎の特性及び分子構造の差異による冷炎への影響について調べる

背景
- 高効率の燃焼器開発には着火特性の理解が必要
- 多段着火で生じる冷炎の特性およびメカニズムに対する理解は不十分

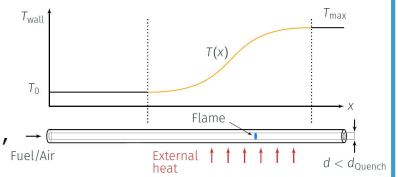
解決手段
- 温度分布制御型マイクロフローリアクタを冷炎に適応

→ 冷炎の定在化が可能

研　究　方　法

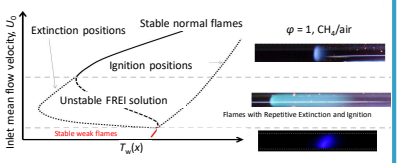
温度分布制御型マイクロフローリアクタ(MFR)[1][2]
- 消炎直径以下の石英管を外部熱源によって加熱
- 層流かつ圧力一定

→ 気相温度は壁面温度に強く依存し，定常な温度分布を得られる

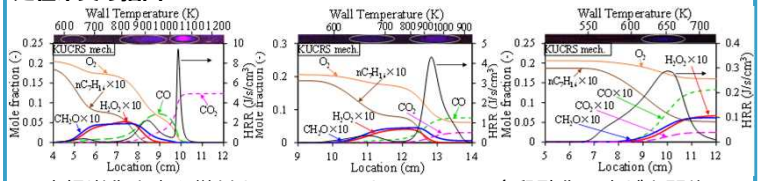


流入流速に応じた火炎応答 [1][2]
- 3つの解分岐（火炎応答）
- 低流入流速において着火解を示すweak flameが存在

→ weak flameにより，着火過程の定常な観察が可能



定在冷炎の抽出[3]

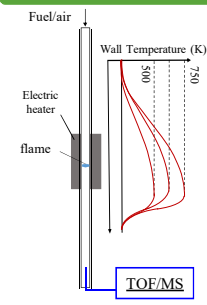


- 高級炭化水素を燃料として用いると，MFRでは多段酸化反応が空間的に分離・定在した3つの反応帯が観察

→ 3つの反応帯：低温側からそれぞれ冷炎，青炎，熱炎と呼ばれる

→ 壁面温度を低下させることで，高温領域の反応を抑制し，三段の反応から抽出した冷炎のみを対象とした詳細な分析が可能

主な研究成果（手法）



実験条件
- 使用燃料：*n*-ヘプタン (RON: 0)
  n-ペンタン (RON: 61.9)
  neo-ペンタン (RON: 85.5)
  iso-ペンタン (RON: 92.3)
- 酸化剤：空気
- 流入流速：V = 2 cm/s
- 圧力：P = 1 atm
- 当量比：ϕ = 1
- 最高壁面温度：500–750 K

分析手法

Time of Flight type Mass Spectrometer (TOF/MS)

数値計算条件
- PREMIXをベースとした一次元定常計算コード[1]

→ エネルギー方程式に気層と壁面との熱伝達項を追加

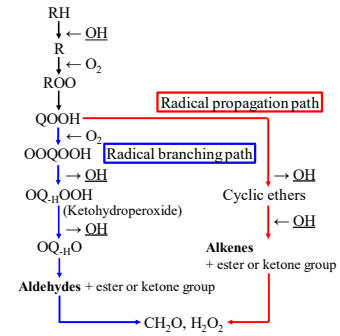
$$\dot{M}\frac{dT}{dx}-\frac{1}{c_p}\frac{d}{dx}\left(\lambda A\frac{dT}{dx}\right)+\frac{A}{c_p}\sum_{k=1}^{K}\rho Y_k V_k c_{pk}\frac{dT}{dx}+\frac{A}{c_p}\sum_{k=1}^{K}\dot{\omega}_k h_k W_k-\frac{A}{c_p}\frac{4\lambda Nu}{d^2}(T_w-T_g)=0$$

研究計画

2014	2015	2016	2017	2018
高分解能MFRの作成	冷炎の抽出	MFRと質量分析計による計測環境構築	反応モデルの検証	他の燃料（ペンタン）を用いた検証

主　な　研　究　成　果

低温酸化反応経路



- OHは低温酸化の促進・抑制に重要な化学種
- QOOH以降，2つの反応経路を持つ

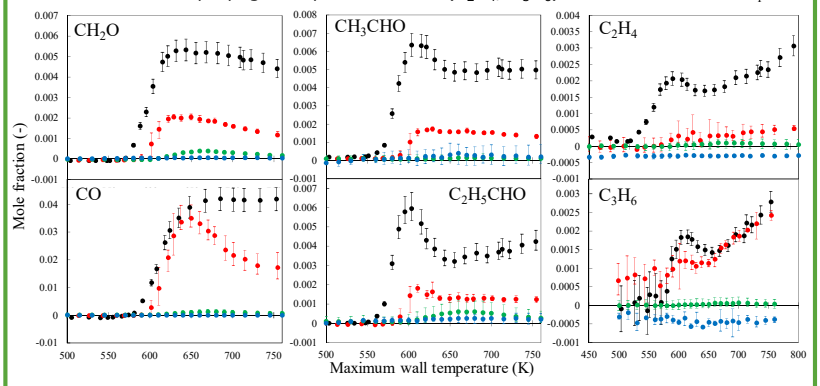
→Radical branching path
- 多量のOHを生成
- アルデヒドが生成

→Radical propagation path
- OHを生成及び消費
- アルケンが生成

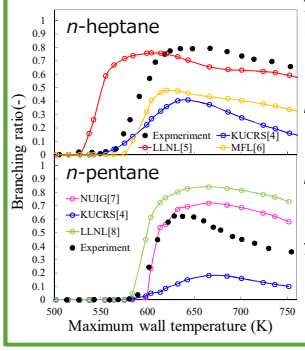
OH生成の観点から，2つの反応経路の割合と低温酸化の強度には強い相関がある

化学種計測を通じた冷炎の化学構造

対象化学種: 熱発生の指標(CH_2O，CO)
Radical branching path経路の指標(CH_3CHO, C_2H_5CHO)
Radical propagation path経路の指標(C_2H_4, C_3H_6)



- *n*-ヘプタン: 570 K付近から低温酸化反応が開始
  n-ペンタン: 590 K付近から低温酸化反応が開始
  neo-ペンタン: 600 K付近から低温酸化反応が開始
  iso-ペンタン: 低温酸化反応が生じない
- 各化学種の生成量は*n*-ヘプタン，*n*-ペンタン，*neo*-ペンタン，*iso*-ペンタンとオクタン価の小さい順に増加（C_3H_6を除く）



全反応中に占めるある温度域のRadical branching経路の割合(Branching ratio)

$$Branching\ ratio=\frac{Aldehydes}{Aldehydes+Alkenes}\times\frac{(\mathrm{fuel})_{initial}-\mathrm{fuel}}{(\mathrm{fuel})_{initial}}$$

n-ヘプタン(nC_7H_{16})
反応が開始する温度域・・・KUCRS ○
最大値をとる温度域・・・LLNL ○

n-ペンタン(nC_5H_{12})
反応が開始する温度域・・・KUCRS ○
最大値をとる温度域・・・×

全温度域で再現する反応機構はない

MFRを用いた化学種計測により，低温酸化を対象とした反応機構の予測精度の向上を目指す

参　考　文　献

[1] K. Maruta et al., Proc. Combust. Inst., 30 (2005) 2429-2436.
[2] S. Minaev et al., Combust. Theor. Model., 11 (2) (2007) 187-203.
[3] R. Tatsumi et al., 26th ICDERS, Boston, USA, 2017.
[4] A. Miyoshi, J. Phys. Chem. A, 115 (15) (2011) 3301–3325.
[5] M. Mehl et al., Proc. Combust. Inst., 33 (1) (2011) 193–200.
[6] Diesel_nheptane_chem_MFL2015, Model Fuel Library, CHEMKIN-PRO v17.2. (2016).
[5] J. Bugler et al., Combust. Flame., 163 (2016) 138–156.
[6] H. Curran et al., Combust. Flame., 129 (3) (2002) 253–280.

SIP 革新的燃焼技術 Innovative Combustion Technology bridging to....

2019/01/28 SIP「革新的燃焼技術」公開シンポジウム

ガソリン燃焼チーム クラスター大学17（燃料・ノック班）

東北大学 流体科学研究所
上杉 滉大，森井 雄飛，手塚 卓也，長谷川 進，中村 寿，高奈 秀匡，丸田 薫

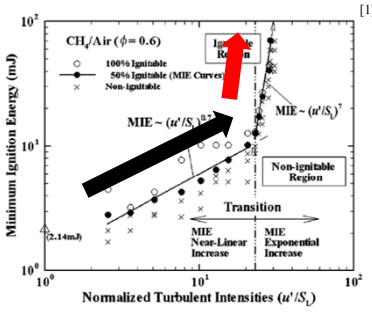
スーパーリーンバーン火花点火エンジンのための 高乱流場におけるナノ秒パルス放電プラズマによる着火に関する研究

目　的

アーク放電およびナノ秒パルス放電プラズマ(NRPD)により高乱流場における着火核の形成に着目し基礎実験及び実機実験を行いNRPDの着火挙動を調べる

研　究　背　景

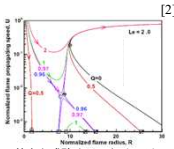
➢ スーパーリーンバーン条件における問題点および対策



[1]

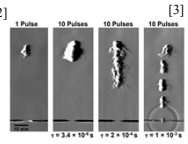
当量比の低下により燃焼速度が低下
→ 燃焼速度を増加させるためには強い乱れが必要となる
→ 左図より乱れが大きくなると大きな着火エネルギーが要求される

[2]

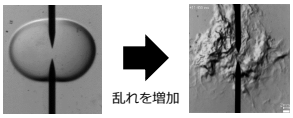


・着火を成功させるためには大きい着火源が要求される

[3]



・短時間に繰り返し放電を行うことで着火核をより大きく形成



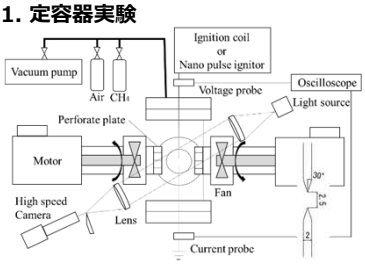
u′ = 0 m/s　　u′ = 5.39 m/s

⇨ ナノ秒パルス放電プラズマ(NRPD)に着目

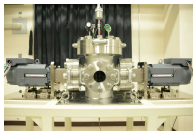
✓ 着火の成功には着火核の形成が重要
✓ NRPDをガソリンエンジンに適用

実　験　手　法

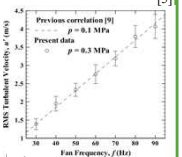
1. 定容器実験



・ファンを回転させることで等方性乱流場を形成
・シュリーレン法により着火により生じた密度勾配の様子を観察
・電圧・電流は各プローブより取得
・放電にはアーク放電およびNRPDを使用



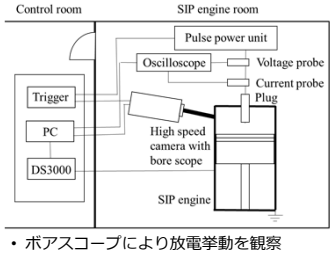
[5]



・Shyらの定容器をもとに設計[4]

定容器実験条件	
混合気	メタン/空気
当量比	0.6
初期圧力	101.3 kPa
ファンの回転速度	1500 - 12000 rpm

2. エンジン試験

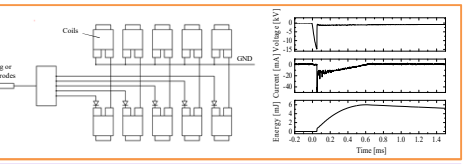


・ボアスコープにより放電挙動を観察
・放電にはNRPDを使用

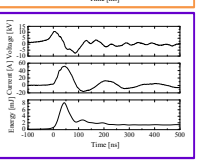
エンジン試験条件	
燃料	SIPガソリン
空気過剰率	0.99 – 1.63
空燃比	14.1 – 21.3
図示平均有効圧力	272 – 404 kPa
プラグ間隙	0.5 – 2.1 mm
放電開始角度	-60 – -30 deg
放電時間	1 – 6 ms
放電周波数	10 kHz
着火エネルギー	3.3 – 8.0 mJ/pulse
回転数	2000 rpm
撮影速度	120 kfps

3. 放電装置

アーク放電
・SIP強力点火装置
・充電時間：~ 4 ms
・コイルの数：1 ~ 10



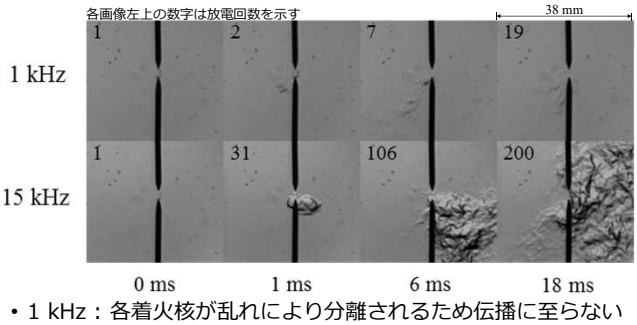
ナノ秒パルス放電プラズマ(NRPD)
・パルスパワー電源装置
・出力電圧：~ 15 kV
・放電周波数：~ 15 kHz



主　な　研　究　成　果

1. 定容器実験

➢ ナノ秒パルス放電プラズマ(NRPD)による時間ごとのシュリーレン画像

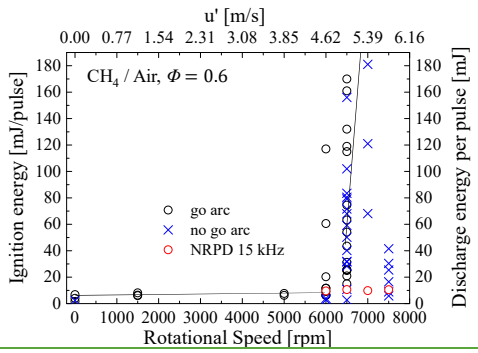


着火失敗
11.3 mJ/pulse
250 pulses

着火成功
10.2 mJ/pulse
200 pulses

・1 kHz：各着火核が乱れにより分離されるため伝播に至らない
・15 kHz：各着火核が放電ごとに相互作用を起こし大きく形成され伝播に至る
→ 着火を成功させるためには放電周波数を増加させることも重要

➢ アーク放電およびNRPDによる着火実験結果



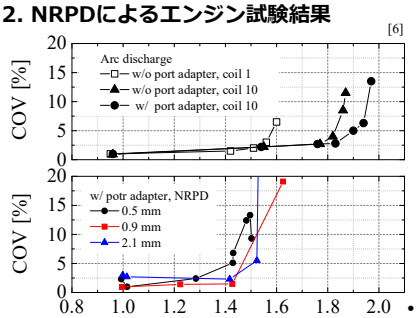
・アーク放電により6500 rpm付近でMIE transitionが見られた
・高乱流場においてNRPDにより着火に成功する様子を確認

⇩

高乱流場ではNRPDがアーク放電に対して優位な可能性がある

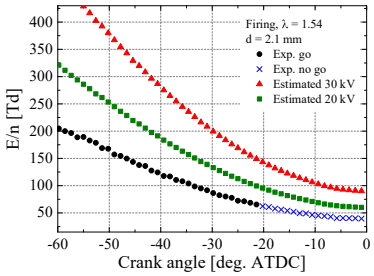
2. NRPDによるエンジン試験結果

[6]



・d = 0.9 mmのときλ = 1.6程度で着火に成功
・NRPDおよびアーク放電による結果は類似の傾向を示した

放電停止時の換算電界，圧力：62.5 Td, 1002 kPa



・高圧のため放電が確認できなくなった
→ 1.0 – 1.5 MPa付近
・電場と分子数密度から換算電界強度(E/n)を計算
→ 30 kV程度の電源により希薄限界拡大の可能性

$$\frac{E}{n} = \frac{k_B T V}{P d}$$

E : Electric field
n : Electron number density
k_B : Boltzmann constant
T : Burned gas temperature
V : Voltage
P : Pressure
d : Electrode gap

今年度の取組及び研究計画

新規提案
（着火～火炎伝播への遷移過程）

2017	2018	2019
実験装置の製作	定容器実験の検証	エンジン試験結果の検証

参　考　文　献

[1] C. C. Huang, S. S. Shy, C. C. Liu, and Y. Y. Yan, *Proc. Combust. Inst.*, vol. 31, no. 1, pp. 1401–1409, 2007.
[2] Z. Chen, M. P. Burke, and Y. Ju, *Proc. Combust. Inst.*, vol. 33, no. 1, pp. 1219–1226, 2011.
[3] J. K. Lefkowitz and T. Ombrello, *Combust. Flame*, vol. 180, pp. 136–147, 2017.
[4] S. S. Shy and M. L. Lin, vol. 20, *Exp. Therm. Ful. Sci.*, pp. 105–114, 2000.
[5] M. Peng, S. S. Shy, Y. Shiu, and C. Liu, *Combust. Flame*, vol. 160, no. 9, pp. 1755–1766, 2013.
[6] T. Yokomori, M. Matsuda, N. Iida, Y. Urata, N. Yokoo and K. Nakata,, JSAE：20165267, 2016.

SIP 革新的燃焼技術 Innovative Combustion Technology bridging to....