

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 24 年 5 月 21 日現在

機関番号：11301
 研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20360092
 研究課題名(和文) 高温高压環境における一酸化炭素を主成分とする予混合乱流燃焼機構の解明
 研究課題名(英文) On the mechanism of turbulent premixed combustion for CO as a major fuel component at high pressure and high temperature
 研究代表者
 小林 秀昭 (KOBAYASHI HIDEAKI)
 東北大学・流体科学研究所・教授
 研究者番号：30170343

研究成果の概要(和文)：

石炭改質ガスを模擬した CO/H₂ 燃料ガスと空気、または純酸素との混合気を多量の CO₂ で希釈した予混合気に対し、高压環境における乱流予混合火炎を高圧容器内に安定化させた。乱流燃焼速度、乱流火炎領域体積、火炎面密度、輻射強度などを測定し、天然ガスを想定した CH₄/air 乱流予混合火炎と比較した結果、石炭改質模擬ガスに対する乱流火炎は、火炎面密度と平均火炎領域体積に強く関係する火炎領域の微細化が著しく、火炎輻射強度も大きく増大することがわかった。

研究成果の概要(英文)：

Assuming coal gasification syngas combustion, turbulent premixed flames for the mixtures of CO/H₂ and air as well as pure O₂ diluted with large amount of CO₂ were stabilized in a high pressure environment and the measurement of turbulent burning velocity, mean volume of turbulent flame region, flame surface density, radiation intensity, etc. were performed. It was proven that structure of turbulent flame region became very fine, being related the change in flame surface density and mean flame volume, and the radiation intensity became strong.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
2009年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2010年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：乱流燃焼・高压燃焼・予混合燃焼・一酸化炭素・石炭改質ガス・乱流燃焼速度

1. 研究開始当初の背景

次世代高効率石炭火力発電として有望である石炭ガス化複合発電(IGCC)システムでは、燃料となる石炭改質ガス(syngas)は燃料成分が CO、H₂ と特殊であること、ふく射性ガス

である CO₂、H₂O を多く含むこと、発熱量が代表的な炭化水素燃料である天然ガスに比べて大幅に小さいことなどの特徴を有し、一般的炭化水素燃料とは燃焼特性が大きく異なることが予想される。さらに IGCC に低

NO_x 型燃焼器として予混合ガスタービン燃焼器を採用した場合、燃焼器内部には高温高圧下における CO, H₂ を燃料成分とする乱流予混合火炎が形成されるが、基礎的なデータはほとんど存在しない。そこで特にガスタービン作動条件である高圧環境における、石炭改質ガス燃焼を模擬した CO/H₂/CO₂/air 高圧乱流予混合火炎の基礎特性を明らかにすることが不可欠である。

2. 研究の目的

燃焼学的に未だ知られていない高温高圧環境における一酸化炭素(CO)を主成分とする予混合乱流燃焼機構を明らかにし、極限環境乱流燃焼の学理構築を図ると共に、環境・エネルギー問題において重要性が益々高まっている高温高圧下の燃料改質ガス(シンガス)燃焼システムの設計と制御に対する燃焼学的根拠に基づく指針を提示することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、東北大学流体科学研究所の高圧燃焼試験装置を用いて実験を行った。高圧容器内部に口径 20 mm の円形ノズルバーナーを設置し、高圧下で乱流予混合火炎を安定化させた。予混合気の乱流はノズル出口に設置した多孔板によって生成した。乱流の各特性値の計測には、空気に対して定温度型熱線風速計を用いた。

実験で用いる石炭改質模擬ガス組成は IGCC に用いられる石炭改質ガス組成を基にして決定した。石炭改質ガスは燃料成分として CO と H₂ を、不活性な成分として CO₂, H₂O, N₂ を、微量成分として CH₄ を含む混合ガスである。

図 1 に代表的な石炭改質ガスの組成例を示す。CO/H₂ モル比は概ね X_{CO}/X_{H₂} = 65/35 の周辺に分布している。よって石炭改質模擬ガスの CO/H₂ モル比は X_{CO}/X_{H₂} = 65/35 (CO65) と決定した。

本研究では、酸化剤に空気を用いる IGCC, ならびに、燃焼ガス主成分である CO₂ を再循環し純酸素を酸化剤として加え生成ガス中の CO₂ 濃度を高め CO₂ 回収を可能にする IGCC の両方を想定した研究を行った。天然ガスに代表される炭化水素燃料として CH₄/air 予混合火炎についても同様の実験を行った。当量比 ϕ の選定条件は、各圧力に対して層流燃焼速度を概ね一致させたが、純酸素を用いる場合、燃焼ガスに CO₂ および H₂O 以外の成分が含まれないよう $\phi = 1.0$ とした。実験条件は雰囲気圧力を 0.5, 1.0 MP とした。なお、本研究開始時には予熱した高温乱流火炎の実験を計画したが、毒性のため取り扱いに注意を要する CO をはじめとして、高圧容器内に供給するガス種が多く、その調整が非

常に複雑となることが判明したので、安全性を優先し、温度条件は常温(300 K)に限定することとした。

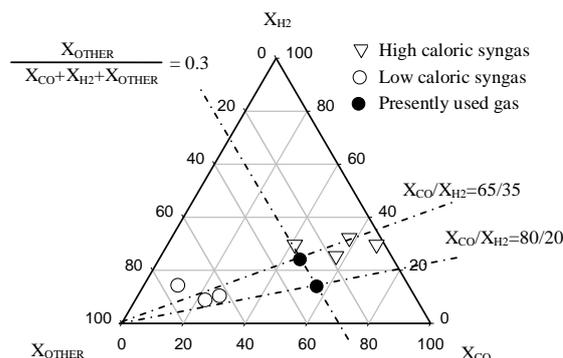


図 1 石炭改質ガスの組成予測図

4. 研究成果

(1) 空気を酸化剤とした CO/H₂ 高圧乱流予混合火炎の特性

① OH-PLIF による火炎観測

空気を酸化剤とした高圧乱流燃焼実験においては、酸素吹き改質ガスシステムを想定し X_{CO₂} / (X_{CO} + X_{H₂} + X_{CO₂}) = 0.3 とした。また、CO/H₂ モル比の影響を明らかにするために CO 濃度の高い X_{CO}/X_{H₂} = 80/20 (CO80) に関しても一部実験を行った。

図 2 に代表的な OH-PLIF 画像の比較を示す。CO65 火炎の乱流火炎領域の構造には、CH₄ 火炎に比べて大きな凹凸の上に微細なカスパが多数発生している。さらに u'/S_L の増大によって顕著に微細化、複雑化が進行することが明らかとなった。微細化の定量化については後述する。

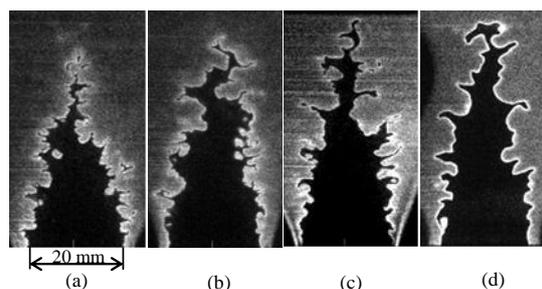


図 2 0.5 MPa, u'/S_L=1.4 における OH-PLIF 画像 (a) CO65, $\phi = 0.7$; (b) CO80, $\phi = 0.7$; (c) CH₄, $\phi = 1.0$; (d) CH₄, $\phi = 0.73$

② 乱流火炎領域構造の特徴

乱流火炎領域構造の特徴を定量的に示すため、取得した約 500 枚の OH-PLIF 画像をもとに火炎領域体積 V_f および局所火炎面密度 Σ の導出を行った。V_f は平均反応進行変数 $\langle c \rangle$ を導出し、 $\langle c \rangle = 0.1$ および $\langle c \rangle = 0.9$ 等高線が囲む領域の体積と定義した。

図3に u'/S_L と V_f の関係を示す. CO65 火炎は CH₄, $\phi = 1.0$ 火炎に対して V_f が小さいことが分かる. 次に図4に $\langle c \rangle$ と Σ の関係を示す. Σ の導出は 10 pixel の正方形検査領域にある火炎面の長さを検査面の面積で除した値とした.

図4に Σ を $\langle c \rangle$ で集計し平均化した結果を示す. CO65 火炎は CH₄, $\phi = 1.0$ 火炎に比べて全体的に Σ が大きくなっている. このように CO65 火炎の乱流火炎領域の構造は CH₄, $\phi = 1.0$ 火炎に比べて, より狭い範囲で微細化・複雑化が進行することで, 火炎面密度が大きくなるという特徴を有している. CO/H₂ モル比を変化させた CO65 火炎と CO80 火炎についてみると, CO80 火炎は CO60 火炎に比べて V_f が大きく, Σ の $\langle c \rangle$ に対する分布では全体的に低くなる傾向が見られる. 以上の結果から, CO/H₂ モル比が小さくなると乱流火炎領域の構造は, より狭い領域に火炎が存在し, 微細化・複雑化が進行しやすくなることが明らかとなった.

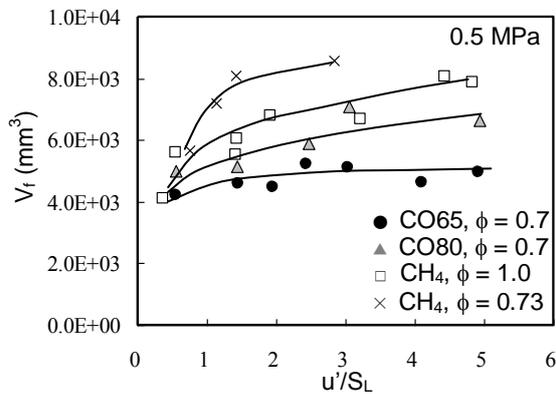


図3 0.5 MPaにおける u'/S_L と V_f の関係

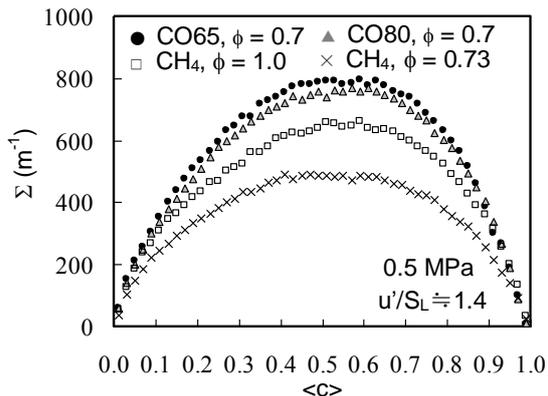


図4 0.5 MPaにおける $\langle c \rangle$ と Σ の関係

③乱流燃焼速度と特性長さスケール

$\langle c \rangle = 0.1$ 等高線に対して角度法を用いて乱流燃焼速度 ST を導出した.

図5に u'/S_L と ST/S_L との関係を示す. CO65 火炎は CH₄, $\phi = 1.0$ 火炎に比較して

ST/S_L が大きく, さらに実験範囲において **bending** の傾向が見られず, 直線的な増加傾向が見られる. このような **bending** が生じない現象について, フラクタル理論に基づく総火炎増大メカニズムから考察を行った. 最小凹凸スケール ϵ_i は OH-PLIF 画像に対してサークル法を用いたフラクタル解析を行うことで導出した. 以前の研究において, ϵ_i は乱流レイノルズ数 R_λ の増加に伴い, 乱流渦管平均直径に相当する約 $10\eta_k$ (ただし η_k はコルモゴロフスケール) と共に減少し, R_λ がさらに増大すると ϵ_i は火炎の固有不安定性の特性スケール l_i に漸近する. また l_i に漸近する R_λ と **bending** が生じる ST/S_L はよく対応することが報告されている.

図6に CO65 火炎および CH₄, $\phi = 1.0$ 火炎の R_λ と ϵ_i , l_i , η_k の関係を示す. ϵ_i は R_λ の増大にともない $10\eta_k$ に沿うように減少していることが分かる. さらに CH₄, $\phi = 1.0$ 火炎は R_λ の増大によって l_i にすでに漸近しており, 漸近する u'/S_L は ST/S_L が **bending** を生じる u'/S_L と一致している. 一方 CO65 火炎は実験範囲において l_i に漸近しているとは言えず, このような微細化の余地があるために ST/S_L が **bending** を示さなかったと考えられる.

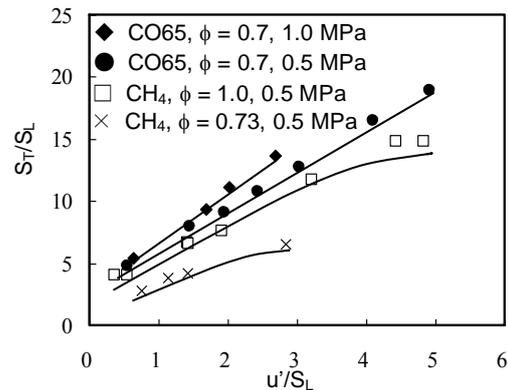


図5 u'/S_L と ST/S_L の関係

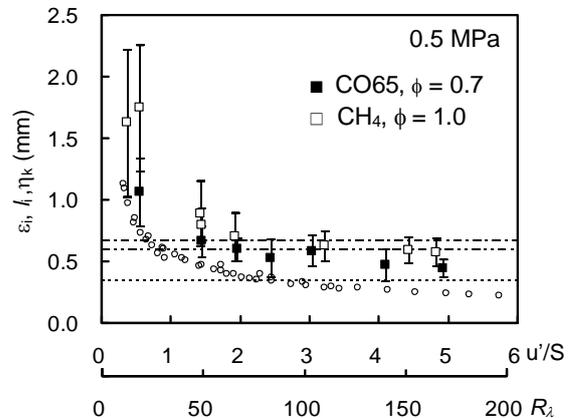


図6 u'/S_L および R_λ と ϵ_i , l_i , η_k の関係

(2) 純酸素を酸化剤とし高濃度CO₂で希釈したCO/H₂ 高圧乱流予混合火炎の特性

①乱流火炎領域構造の特徴

純酸素を酸化剤とする燃焼実験では、燃料成分以外に関し燃焼ガス再循環を想定して多量のCO₂で希釈した。そのCOモル分率は、層流燃焼速度SLが空気を酸化剤とした場合のSLに等しい条件を計算によって調べ、 $XCO_2 / (XCO + XH_2 + XCO_2 + XO_2) = 0.55$ とした。当量比は、CO、H₂O以外のガス成分が燃焼ガスに残らないよう、 $\phi = 1.0$ とした。以下において、純酸素を酸化剤とした火炎をCO/O₂火炎、空気を酸化剤とした火炎をCO/air火炎と称して区別する。

図7に平均火炎領域体積V_fとu'/SLの関係を示す。CH₄/air火炎が最も大きく、CO/air火炎との中間にCO/O₂火炎があることが分かる。V_fが小さい場合、予混合型ガスタービン燃焼器に燃焼振動が起こりやすいことが指摘されており、従来の天然ガスを燃料とするガスタービン燃焼器を流用するとCO/O₂火炎やCO/air火炎では燃焼振動が起こりやすくなることが予想される。

図8に<c>とΣの関係を示す。ΣはCO/O₂火炎が最も大きく、次いでCO/air火炎、CH₄/air火炎の順である。これらの結果からCO/O₂火炎は、CO/air火炎と比較しても、より狭い領域で火炎構造の複雑化・微細化が起こり、火炎面密度が大きくなることが分かる。

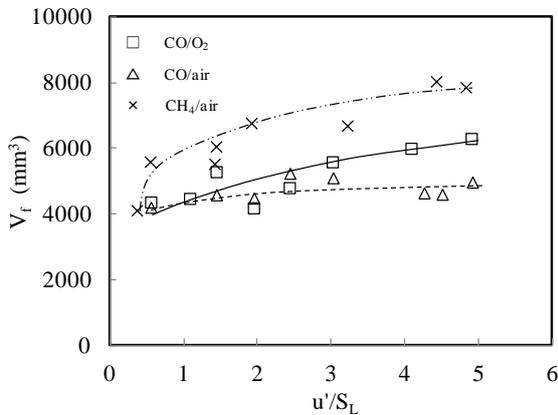


図7 0.5 MPaにおけるu'/SLとV_fの関係

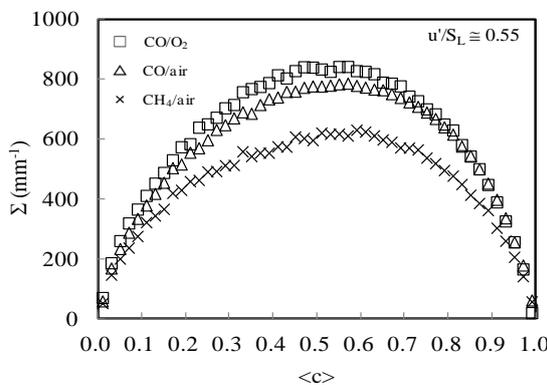


図8 0.5 MPaにおける<c>とΣの関係

②乱流燃焼速度と特性長さスケール

図9にu'/SLとST/SLの関係を示す。u'/SL ≃ 3.5までは各火炎のST/SLはu'/SLの増大に対し線形的に増大する。この領域においてST/SLの値は大きい方から順にCO/O₂火炎、CO/air火炎、CH₄/air火炎となっている。

前述のように、CO/air火炎の場合、本研究の実験範囲ではbendingせずST/SLが線形的に増加を続けたが、CO/O₂火炎ではbendingがみられた。

図10に各火炎のRλとε_i, 10η_k, l_iの関係を示す。いずれの火炎も、ε_iはRλの増大に伴って10η_kに沿って減少していることが分かる。CO/O₂火炎およびCH₄/air火炎では、Rλが大きくなるとε_iが特性スケールl_iに到達している。またl_iに到達するときのRλがbendingが生じる時のu'/SLとよく対応している。一方CO/air火炎では実験範囲ではε_iがl_iに到達しているとは言えない。すなわち、CO/O₂火炎は乱流火炎領域の微細化がRλ増大と共に急激に進行し、l_iに到達するためbendingが生じた。これはCH₄/airのl_iがCO/H₂燃料ガスよりも大きいため、比較的小さいRλでl_iに到達する性質とやや異なっており、混合気特性、局所燃焼速度の火炎伸長依存性(マークSTEIN長さの効果)などが影響していると考えられる。

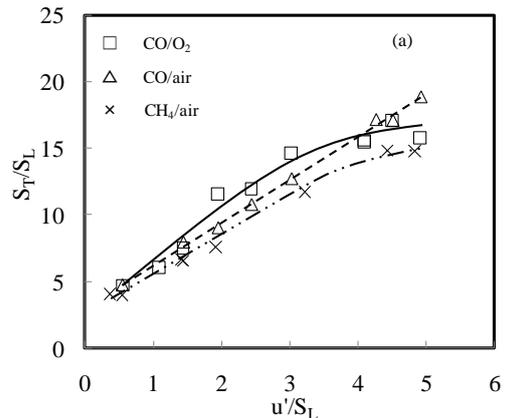


図9 純酸素を酸化剤とした場合におけるu'/S_LおよびRλとε_i, l_i, η_kの関係

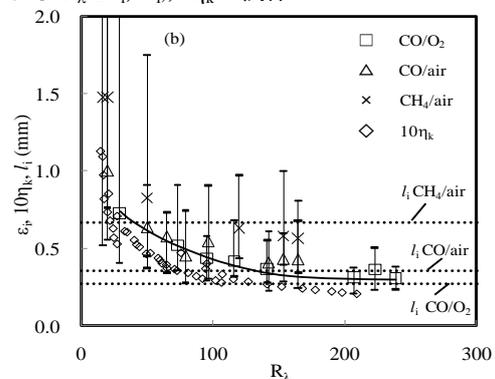


図10 純酸素を酸化剤とした場合におけるu'/S_LおよびRλとε_i, l_i, η_kの関係

③ 火炎発光スペクトルと輻射強度

図 1 1 に波長範囲 $\lambda = 300 \sim 1000 \text{ nm}$ における分光計測結果を示す。発光強度 I_E は CH_4/air 火炎のスペクトル計測範囲内の発光強度の最大値で規格化した。 CH_4/air 火炎に比べ CO/O_2 火炎および CO/air 火炎は可視波長域 ($\lambda = 400 \sim 700 \text{ nm}$) において強度の大きい連続スペクトルを有することが確認できる。これは CO_2 生成過程における CO-O 放射と呼ばれる発光が要因であると考えられる。

図 1 2 に総輻射強度の比較を示す。総輻射量計測は、 300 nm から $50 \mu\text{m}$ におよぶ感度域を有する校正された輻射センサーを用いて行われた。

横軸は断熱火炎温度であり、空気を酸化剤とした火炎 (CO/air) では当量比を、酸素を酸化剤とした火炎 (CO/O_2) では CO_2 希釈量を変化させた。 CH_4/air 火炎と比較するといずれも総輻射量が大きい、 CO/O_2 火炎では CO/air 火炎よりも更に大きい輻射量である。総輻射計測のバンドは、図 11 に示した CO-O 放射ばかりでなく、非常に強い CO_2 振動遷移バンドスペクトル領域を包含する。 CO/O_2 火炎の CO_2 モル分率は非常に大きいため、 CO_2 ガス輻射の影響が大きく現れたものと考えられる。

以上のことから、 CCS を想定した CO/O_2 高压乱流予混合火炎は、図 7 に示したように平均火炎領域体積が小さいことによって、予混合型ガスタービン燃焼器の燃焼振動が生じやすくなる可能性に加え、大きい輻射強度によりガスタービン燃焼器ライナーならびにタービン翼に大きな熱負荷を生じさせる可能性が高く、機器設計において考慮すべき課題といえる。

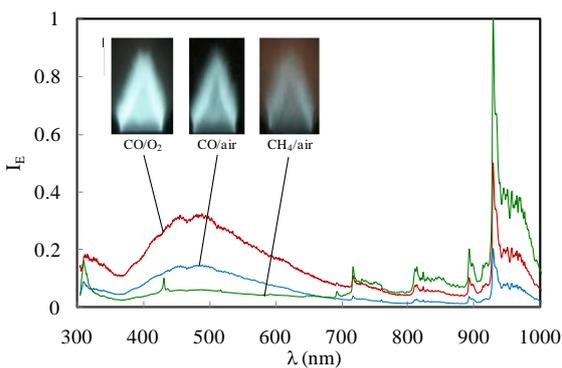


図 1 1 火炎発光スペクトルの比較例

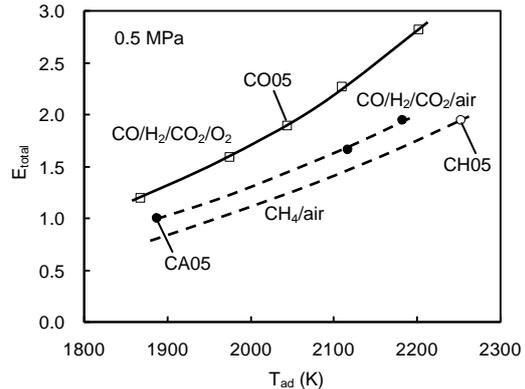


図 1 2 総輻射強度の比較

5. 主な発表論文等

(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 3 件)

- ① Y. Ichikawa, Y. Otawara, H. Kobayashi, Y. Ogami, T. Kudo, M. Okuyama, S. Kadowaki, Flame Structure and Radiation Characteristics of $\text{CO}/\text{H}_2/\text{CO}_2/\text{air}$ Turbulent Premixed Flames at High Pressure, Proceedings of the Combustion Institute, 査読有, Vol.33, 2011, pp 1543-1550
- ② Hideaki Kobayashi, Soichiro Yata, Yasuhisa Ichikawa and Yasuhiro Ogami, Dilution Effects of Superheated Water Vapor on Turbulent, Premixed Flames at High Pressure and High Temperature, Proceeding of the Combustion Institute, 査読有 Vol32, 2009, pp2171-2178
- ③ Satoshi Kadowaki and Hideaki Kobayashi Dynamic Behavior of Premixed Flames Propagating in Non-uniform Velocity Fields - Assessment of Intrinsic Instability in Turbulent Combustion, Transactions of The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 査読有, Vol.51 2009 pp244-251

[学会発表] (計 12 件)

- ① 市川泰久, 大田原祐樹, 奥山昌紀, 工藤琢, 大上泰寛, 小林秀昭, 門脇敏, 高压下における石炭改質模擬ガスを燃料とする $\text{CO}/\text{H}_2/\text{CO}_2/\text{air}$ 乱流予混合火炎に関する研究, 第 48 回燃焼シンポジウム, 2010 年 12 月 1 日, 福岡県 (福岡市)
- ② Y. Otawara, Y. Ichikawa, J. H. Wang, Y. Ogami, T. Kudo, M. Okuyama, H. Kobayashi, Turbulent Burning Velocity and Flame Structure of $\text{CO}/\text{H}_2/\text{CO}_2$ Premixed Flames in a High Pressure Environment, The

- Seventh International Conference on Flow Dynamics (7th ICFD 2010), 2010年11月3日, 宮城県 (仙台市)
- ③ S. Kadowaki, M. Yahata, H. Kobayashi, Intrinsic Instability of High-Temperature Premixed Flames: Formation of Cellular Flame Fronts, The Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration (AFI/TFI-2010), 2010年11月1日, 宮城県 (仙台市)
- ④ 小林秀昭, 市川泰久, 大田原祐樹, 大上泰寛, 工藤琢, 奥山昌紀, 門脇敏, 高圧環境におけるCO/H₂/CO₂/air/乱流予混合火炎の構造に関する研究, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2010, 2010年10月30日, 新潟県 (長岡市)
- ⑤ 八幡将史, 小林秀昭, 門脇敏, 高温予混合火炎の固有不安定性に及ぼすレイノルズ数の効果, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2010, 2010年10月30日, 新潟県 (長岡市)
- ⑥ Y. Ichikawa, H. Otawara, H. Kobayashi, Y. Ogami, T. Kudo, M. Okuyama, S. Kadowaki Flame Structure and Radiation, Characteristics of CO/H₂/CO₂/air Turbulent Premixed Flames at High Pressure, The 33rd International Symposium on Combustion 2010年8月5日 中国 (北京)
- ⑦ S. Kadowaki, H. Takahashi, H. Kobayashi The Effects of Radiation on the Dynamic Behavior of Cellular Premixed Flames Generated by Intrinsic Instability, The 33rd International Symposium on Combustion, 2010年8月2日 中国 (北京)
- ⑧ 市川泰久, 矢田創一郎, 大上泰寛, 小林秀昭, 高温高圧下におけるCO₂およびH₂O希釈乱流予混合火炎の局所曲率と幾何学的構造に関する研究, 第47回燃焼シンポジウム, 2009年12月2日, 札幌 (北海道)
- ⑨ S. Kadowaki, H. Takahashi, and H. Kobayashi, Dynamics of Premixed Flames Propagating in Non-Uniform Velocity Fields: Combined Effects of Intrinsic Instability and Radiation, AFI/TFI-2009 2009年11月4日, 仙台 (宮城県)
- ⑩ Hideaki Kobayashi, Turbulent Combustion in a High-pressure and High-temperature Environment, Department of Mechanical and Aerospace Engineering Fall 2009 Seminar, Princeton University, 2009年10月23日, プリンストン大学 (米国)
- ⑪ Hideaki Kobayashi, Recent Progress in High-Pressure Combustion Research, 7th Asia-Pacific Conference on Combustion, 2009年5月27日 台北 (台湾)

- ⑫ 矢田創一郎, 市川泰久, 大上泰寛, 小林秀昭, 高温高圧下における水蒸気希釈乱流予混合火炎の構造と排出ガス特性, 第46回燃焼シンポジウム, 2008/12/3, 京都

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

http://cat-vnet.tv/movie/columbus/018_01.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 秀昭 (KOBAYASHI HIDEKAI)
東北大学・流体科学研究所・教授
研究者番号：30170343

(2) 研究分担者

大上 泰寛 (OGAMI YASUHIRO)
秋田県立大学・システム科学技術学科・准教授
研究者番号：00375122

(3) 連携研究者

無し