

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02073

研究課題名(和文) 固体燃料とガス燃料混焼時の相互作用メカニズムの解明とモデル構築

研究課題名(英文) Clarification and model development for the interaction mechanism of solid fuels and gaseous fuels during the mixing-combustion

研究代表者

橋本 望 (Hashimoto, Nozomu)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：70392751

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,910,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ガス燃料と固体燃料粒子群の混焼場における火炎伝播現象について、その詳細な火炎構造およびガス燃料と固体粒子群の相互作用について明らかにした。すなわち、ガス燃料/固体粒子群混焼時は、火炎の予熱帯において、(1)粒子がガスから熱を吸収し、火炎伝播速度を低下させる効果、および(2)固体粒子から揮発分が放出され、火炎反応帯前縁において当量比を増加させる効果、の両方が作用していることが解明された。本研究による研究成果は、今後導入が進むと考えられるCO₂フリーのエネルギーキャリアガスの固体燃料を扱う様々な高温プロセスへの導入およびその後の運用に役立てられることが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、ガス燃料と固体燃料粒子群の混焼場における火炎伝播現象について、その詳細な火炎構造およびガス燃料と固体粒子群の相互作用について明らかにした。本研究による研究成果は、今後導入が進むと考えられるCO₂フリーのエネルギーキャリアガスの固体燃料を扱う様々な高温プロセスへの導入およびその後の運用に役立てられることが期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, the detailed flame structure and the interaction between the gaseous fuel and the solid particle cloud for the co-combustion field of the gaseous fuel and the solid particle cloud were clarified. For the co-combustion of gaseous fuel / solid particle cloud, it was clarified that there are two interaction effects, namely, (1) the heat absorption effect of solid particles, and (2) the equivalence ratio increase effect by the evolution of volatile matter from solid particles, in the pre-heat zone of the flame. The outcome of this study is expected to contribute for the introduction of carbon-free energy carrier gas and operation of various high temperature processes using solid fuel.

研究分野： 燃焼工学

キーワード： 固体燃料 エネルギーキャリア 燃焼 直接数値シミュレーション 混焼モデル アンモニア レーザ 誘起化学蛍光法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

CO₂ 排出量削減は全産業において重大な課題となっており、発電分野においては太陽光発電や風力発電等の不安定な電源の導入が加速している。一方で、電力需要の制御は容易ではないため、不安定な電源の調整は主に火力発電が担っている。火力発電のうち、最も単位発電量当たりのCO₂ 排出量が多い石炭火力からのCO₂ 排出量を削減することを目指し、CO₂ フリーのエネルギーキャリアガスの候補であるアンモニアを石炭火力に混焼させることが検討されている。石炭火力発電所へのアンモニア混焼のための技術開発が SIP などのプロジェクトによって実施されており、これまでに、投入熱量 0.76 MW 燃焼試験炉を用いた混焼試験、実機石炭ボイラ(156 MW)への 0.6% 混焼試験、10 MW 燃焼試験炉を用いた混焼試験等が実施されている。これらの燃焼試験では、微粉炭へのアンモニアの混焼により、火炉出口での NO_x 濃度や未燃分がどのように変化するかなどを調べているものの、なぜアンモニアの混焼により未燃分や NO_x の排出濃度が変化するかについては明らかにされていない。従って、火炉のタイプやバーナの種類、運転条件が異なれば、燃料の投入条件を揃えても同じ結果は得られない。将来的に多数の石炭火力にアンモニア等の CO₂ フリーのエネルギーキャリアガスを大量投入し、CO₂ 排出量の大幅な削減を実現するためには、様々なタイプの火炉やバーナを対象として数値シミュレーション等による事前検討を行い、最適な混焼比率や運転条件等をユニット毎に明らかにしていく必要がある。しかし、数値シミュレーション用のエネルギーキャリアガスと微粉炭の混焼モデルは未だ開発されておらず、実用に耐えうる高精度な数値シミュレーション技術が構築されていないのが現状である。これまでは需要が無かったこともあり、微粉炭とガス燃料の混焼をモデル化した研究例は見当たらない。

2. 研究の目的

以上のような背景のもと、本研究の目的は「固体燃料粒子とガス燃料の相互作用メカニズムを解明すること」である。この相互作用を解明することにより、乱流場における固体燃料粒子とガス燃料の混焼モデルを構築することができる。

3. 研究の方法

本研究では、図 1 に示す、本研究代表者らが開発した、世界唯一の固体燃料粒子火炎伝播実験装置[1]を使用した実験を行う。固体粒子として、微粉炭粒子の他、アクリル粒子、シリカ粒子などを用い、アンモニアとの混焼火炎伝播実験を行う。アクリル粒子は粒子径分布の範囲が狭い、ほぼ均一な粒子を用いることができるため、アクリル粒子を用いた実験により、固体燃料粒子径が火炎伝播特性に与える影響を明らかにすることが可能である。また、揮発分を放出しないシリカ粒子を用いた火炎伝播実験を行うことにより、ガスから固体燃料粒子への熱の吸収効果が火炎伝播速度に与える影響を明らかにすることが可能である。

さらに、図 2 に示すように、本実験装置に新たに紫外光パルスレーザーを用いた誘起化学蛍光法を適用し、火炎の予熱帯において固体粒子から揮発分が放出されているかを明らかにする。

4. 研究成果

図 3 に、固体燃料粒子としてアクリル粒子を用いて、アンモニア/アクリル粒子混焼火炎のシュリーレン画像を示す。粒子径 20 μm 以上のアクリル

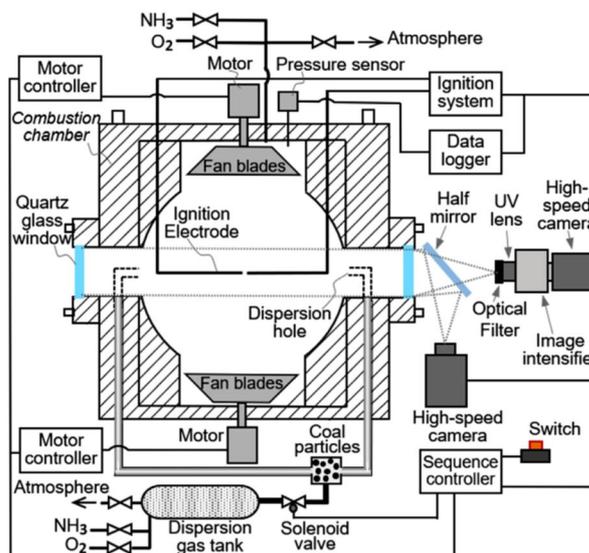


図 1 固体燃料火炎伝播実験装置 (K. Hadi et al., Proc. Combust. Inst. 38 (2021) 4131-4139)

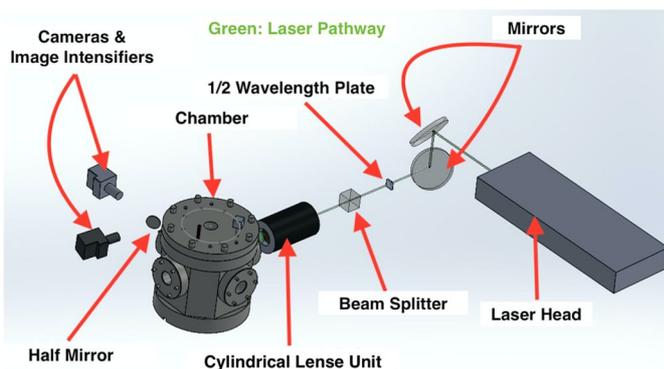


図 2 本研究で新たに導入した紫外光パルスレーザーによるレーザー誘起化学蛍光法光学系のセットアップ

粒子を使用した実験では、シュリーレン法により鮮明な火炎の画像の取得に成功した。

図4に、(a)アンモニア/アクリル粒子群混焼火炎伝播実験における、アンモニア/酸化剤ガスの当量比と火炎伝播速度の関係、および(b)アンモニア専焼実験時の当量比と火炎伝播速度の関係を示す。どちらの実験においても、乱流強度の増加に伴い、火炎伝播速度は高くなることが分かる。これは、乱流強度の増加とともに既燃ガスから未燃ガスへの熱輸送速度が増加するためであると考えられる。また、この傾向は、アンモニア/

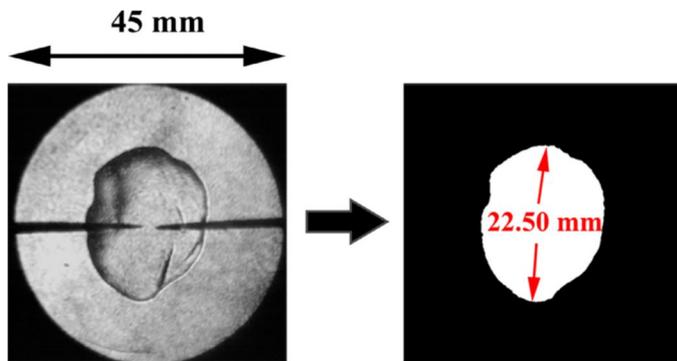
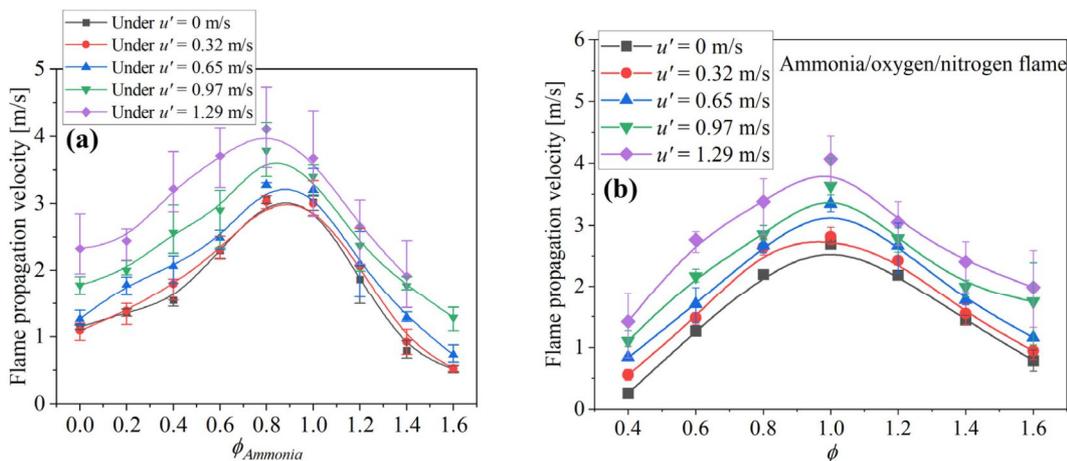


図3 アンモニア/アクリル粒子群混焼火炎伝播実験におけるシュリーレン画像と画像処理イメージ



(a) Turbulent flame propagation velocity of PMMA particle cloud–ammonia–oxygen–nitrogen co-combustion as a function of $\phi_{Ammonia}$ under various turbulence intensities

(b) Turbulent flame propagation velocity of pure ammonia–oxygen–nitrogen as a function of ϕ under various turbulence intensities [13]

図4 アンモニア/アクリル粒子群混焼火炎伝播実験における、アンモニア/酸化剤の当量比と火炎伝播速度の関係

微粉炭混焼火炎でも同様であった[1]。

アンモニアと固体燃料粒子の混焼の効果を明らかにするため、取得した火炎伝播速度データを以下の式により整理した。

$$R_p = (S_{Co} - S_A) / S_A \quad (1)$$

(1)式において、 S_{Co} はアンモニア/アクリル粒子群混焼の際の火炎伝播速度、 S_A はアンモニア専焼の際の火炎伝播速度である。 R_p の値が0のとき、混焼時とアンモニア専焼時の火炎伝播速度は同じとなり、 R_p の値が正の値のときは混焼時の火炎伝播速度がアンモニア専焼時の火炎伝播速度よりも速いことを示す。

図5に、アンモニア/酸化剤ガス当量比と(1)式で計算した R_p の関係を示す。 R_p の値はアンモニア/酸化剤ガス当量比が1のときにほぼ0となり、アンモニア/酸化剤ガス当量比が1よりも小さくアンモニア希薄となる条件においては R_p の値が正となり当量比が小さいほど大きな値になることが分かる。

また、図6に、アンモニア/シリカ

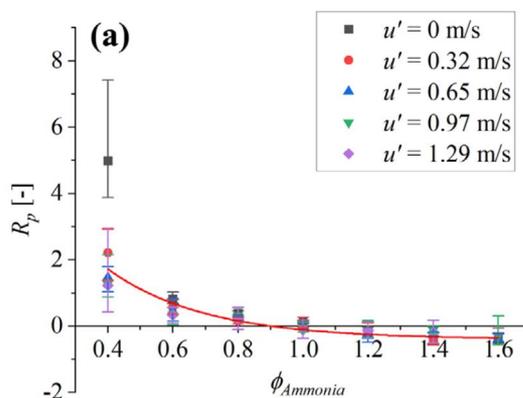


図5 アンモニア/アクリル粒子群混焼時におけるアンモニア/酸化剤ガスの当量比と(1)式の R_p の値の関係

粒子群混焼時における、アンモニア/酸化剤ガス当量比と(1)式で計算した(1)式で計算した R_p の関係を示す。アンモニア/シリカ粒子群混焼時には、当量比条件にかかわらず、 R_p の値が負の値、すなわち、アンモニア専焼時に比べてアンモニア/シリカ粒子混焼時の火炎伝播速度が低くなることが分かった。これは、火炎の予熱帯において、シリカ粒子がガスから熱を吸収することにより、ガス温度が低下するためであると考えられる。

以上のことから、アンモニア/固体粒子群混焼時は、火炎の予熱帯において、(1)粒子がガスから熱を吸収し、火炎伝播速度を低下させる効果、および(2)固体粒子から揮発分が放出され、火炎反応帯前縁において当量比を増加させる効果、の両方が作用していると考えられることが分かった。二つの効果のうち、(2)の効果の方が相対的に影響が大きく、減少を支配しているため、図5に示されたように、アンモニア/酸化剤ガス当量比が1よりも小さい条件においては、混焼時の火炎伝播速度がアンモニア専焼よりも速くなることが分かった。アンモニア/酸化剤ガス当量比が1よりも大きい場合は、燃料過濃条件であるため、固体燃料粒子からの揮発分の放出が火炎伝播速度を高める効果はなく、主に上記(1)の効果により、混焼時の火炎伝播速度がアンモニア専焼時よりも低下するものと考えられる。

火炎の予熱帯において固体粒子から揮発分が放出され、反応帯前縁部における当量比を増加させる効果があることを確かめるため、図2の光学系セットアップを使用し、アンモニア/微粉炭粒子群火炎伝播実験におけるPAHs-LIFとOHラジカル自発光の同時計測を行った。本研究で新たに導入したパルスレーザの波長は355 nmとなっており、この波長を使うことで、微粉単粒子から放出される揮発分に含まれる2~3環の多環芳香族炭化水素(PAHs)のLIF信号(PAHsの濃度に比例する信号)を得ることができる。同時計測結果を図7に示す。赤色で示されたPAHs-LIF信号が、火炎の反応帯を示すOHラジカル自発光(図中の白線および青線)の前縁部よりも外側に見られた。これにより、混焼火炎の予熱帯において、固体粒子から揮発分が放出され、反応帯前縁部における当量比を増加させる効果があることが証明された。

以上のことから、本研究では、アンモニア/固体燃料粒子混焼火炎において、火炎の予熱帯において固体粒子が及ぼす影響が明らかとなった。すなわち、アンモニア/固体粒子群混焼時は、火炎の予熱帯において、(1)粒子がガスから熱を吸収し、火炎伝播速度を低下させる効果、および(2)固体粒子から揮発分が放出され、火炎反応帯前縁において当量比を増加させる効果、の両方が作用していることが解明された。これらの効果により、アンモニア/酸化剤ガス当量比が1よりも小さい条件においては、混焼時の火炎伝播速度がアンモニア専焼よりも速くなり、アンモニア/酸化剤ガス当量比が1よりも大きい場合は、混焼時の火炎伝播速度がアンモニア専焼時よりも低下することが分かった。本研究で明らかになった上記の知見は、乱流場における固体燃料粒子とガス燃料の混焼モデルの構築に活用される。

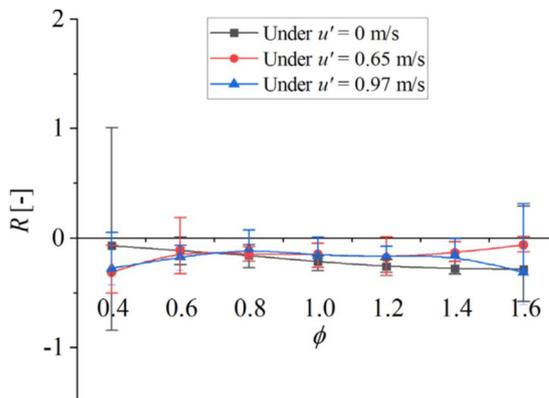


図6 アンモニア/シリカ粒子群混焼時におけるアンモニア/酸化剤ガスの当量比と(1)式の R_p の値の関係

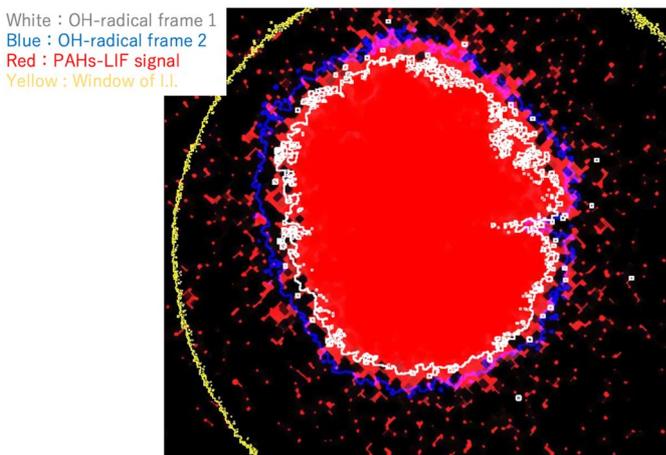


図7 アンモニア/微粉炭粒子群混焼時におけるPAHs-LIFとOHラジカル自発光同時計測結果

[1] Khalid Hadi, Ryo Ichimura, Genya Hashimoto, Yu Xia, Nozomu Hashimoto, Osamu Fujita, Proc. Combust. Inst. 38 (2021) 4231-4239.

[2] Yu Xia, Nozomu Hashimoto, Osamu Fujita, Combust. Flame, 241 (2022) 112077.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hashimoto Genya, Hadi Khalid, Xia Yu, Hamid Aainaa, Hashimoto Nozomu, Hayakawa Akihiro, Kobayashi Hideaki, Fujita Osamu	4. 巻 38
2. 論文標題 Turbulent flame propagation limits of ammonia/methane/air premixed mixture in a constant volume vessel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the Combustion Institute	6. 最初と最後の頁 5171 ~ 5180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.proci.2020.08.055	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hadi Khalid, Ichimura Ryo, Hashimoto Genya, Xia Yu, Hashimoto Nozomu, Fujita Osamu	4. 巻 38
2. 論文標題 Effect of fuel ratio of coal on the turbulent flame speed of ammonia/coal particle cloud co-combustion at atmospheric pressure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the Combustion Institute	6. 最初と最後の頁 4131 ~ 4139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.proci.2020.06.358	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Xia Yu, Hadi Khalid, Hashimoto Genya, Hashimoto Nozomu, Fujita Osamu	4. 巻 38
2. 論文標題 Effect of ammonia/oxygen/nitrogen equivalence ratio on spherical turbulent flame propagation of pulverized coal/ammonia co-combustion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the Combustion Institute	6. 最初と最後の頁 4043 ~ 4052
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.proci.2020.06.102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hashimoto Nozomu, Hayashi Jun	4. 巻 38
2. 論文標題 Coal Particle Devolatilization and Soot Formation in Pulverized Coal Combustion Fields	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 KONA Powder and Particle Journal	6. 最初と最後の頁 168 ~ 188
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14356/kona.2021003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Xia Yu, Hashimoto Genya, Hadi Khalid, Hashimoto Nozomu, Hayakawa Akihiro, Kobayashi Hideaki, Fujita Osamu	4. 巻 268
2. 論文標題 Turbulent burning velocity of ammonia/oxygen/nitrogen premixed flame in O ₂ -enriched air condition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fuel	6. 最初と最後の頁 117383 ~ 117383
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fuel.2020.117383	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Xia Yu, Hashimoto Nozomu, Fujita Osamu	4. 巻 241
2. 論文標題 Turbulent flame propagation mechanism of polymethylmethacrylate particle cloud-ammonia co-combustion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Combustion and Flame	6. 最初と最後の頁 112077 ~ 112077
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.combustflame.2022.112077	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 橋本 玄弥, Khalid Hadi, Xia Yu, Aainaa Hamid, 橋本 望, 早川 晃弘, 小林 秀昭, 藤田 修
2. 発表標題 NH ₃ /CH ₄ /air予混合気のだ容燃焼容器における乱流火炎伝播限界
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Xia Yu, Hadi Khalid, 橋本 玄弥, 橋本 望, 藤田 修
2. 発表標題 Experimental study of turbulent flame propagation behavior of pulverized coal/ammonia co-combustion in an O ₂ /N ₂ atmosphere within a fan-stirred closed vessel
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 橋本 玄弥, Khalid Hadi, Yu Xia, 橋本 望, 早川 晃弘, 小林 秀昭, 藤田 修
2. 発表標題 アンモニア/メタン/空気予混合気の乱流火炎伝播限界に与える拡散熱的不安定性の影響
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yu Xia, Genya Hashimoto, Nozomu Hashimoto, Osamu Fujita
2. 発表標題 Spherical turbulent flame propagation behaviors of the PMMA particle clouds combustion in an O ₂ /N ₂ atmosphere within a Fan-Stirred Closed Vessel
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Khalid Hadi, Ryo Ichimura, Genya Hashimoto, Yu Xia, Nozomu Hashimoto, Osamu Fujita
2. 発表標題 Effect of fuel ratio of coal on the turbulent flame speed of ammonia/coal particle cloud co-combustion at atmospheric pressure
3. 学会等名 38th International symposium on combustion (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Genya Hashimoto, Khalid Hadi, Yu Xia, Aainaa Hamid, Nozomu Hashimoto, Akihiro Hayakawa, Hideaki Kobayashi, Osamu Fujita
2. 発表標題 Turbulent flame propagation limits of ammonia/methane/air premixed mixture in a constant vessel
3. 学会等名 38th International symposium on combustion (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yu Xia, Khalid Hadi, Genya Hashimoto, Nozomu Hashimoto, Osamu Fujita
2. 発表標題 Effect of ammonia/oxygen/nitrogen equivalence ratio on spherical turbulent flame propagation of pulverized coal/ammonia co-combustion
3. 学会等名 38th International symposium on combustion (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橋本 玄弥, 市村 涼, Khalid Hadi, Yu Xia, 橋本 望, 藤田 修, 早川 晃弘, 小林 秀昭
2. 発表標題 アンモニアとメタンの予混合気のだ容容器内乱流場における火炎伝播限界
3. 学会等名 第24回動力・エネルギー技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nozomu Hashimoto, Genya Hashimoto, Ryo Ichimura, Khalid Hadi, Yu Xia, Akihiro Hayakawa, Hideaki Kobayashi, Osamu Fujita
2. 発表標題 Turbulent flame propagation limit of NH ₃ /CH ₄ /air mixture in a fan-stirred closed vessel
3. 学会等名 The Fifth International Symposium on Innovative Materials and Processes in Energy Systems (IMPRES2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋本望, Yu Xia, Khalid Hadi, 橋本玄弥, 藤田修
2. 発表標題 定容容器内乱流場におけるアンモニア/微粉炭混焼時の火炎伝播速度に関する研究
3. 学会等名 第56回石炭科学会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nozomu Hashimoto, Khalid Hadi, Yu Xia, Ryo Ichimura, Genya Hashimoto, Osamu Fujita
2. 発表標題 Flame propagation characteristics of ammonia and coal particle cloud mixture in turbulent fields: Experimental investigations using a fan stirred constant volume vessel
3. 学会等名 16th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu Xia, Genya Hashimoto, Khalid Hadi, Nozomu Hashimoto, Akihiro Hayakawa, Hideaki Kobayashi, Osamu Fujita
2. 発表標題 Experimental study of turbulent burning velocity of Amonia/Oxygen/Nitrogen Mixture in a Fan-Stirred Closed Vessel
3. 学会等名 16th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Genya Hashimoto, Khalid Hadi, Yu Xia, Aainaa Hamid, Nozomu Hashimoto, Akihiro Hayakawa, Hideaki Kobayashi, Osamu Fujita
2. 発表標題 Experimental study of flame propagation limits of ammonia/methane/air mixture in turbulent fields
3. 学会等名 16th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu Xia, Khalid Hadi, Genya Hashimoto, Aainaa Hamid, Nozomu Hashimoto, Osamu Fujita
2. 発表標題 Spherical turbulent flame propagation of pulverized coal particle clouds and ammonia co-combustion in an O ₂ /N ₂ atmosphere within a fan-stirred constant volume vessel
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nozomu Hashimoto, Khalid Hadi, Ryo Ichimura, Yu Xia, Genya Hashimoto, Osamu Fujita
2. 発表標題 Experimental study on turbulent spherical flame propagation characteristics of ammonia / coal particle cloud mixture in a fan stirred closed vessel
3. 学会等名 The 2nd Pacific Rim Thermal Engineering Conference (PRTEC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	藤田 修 (Fujita Osamu) (10183930)	北海道大学・工学研究院・教授 (10101)	
研究分担者	武藤 昌也 (Muto Masaya) (30466445)	名城大学・理工学部・准教授 (33919)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
マレーシア	Politeknik Sultan Azlan Shah		