

研究報告書

「エネルギーキャリアとしてのアンモニア普及へ向けた難燃性固体燃料とアンモニアの混焼による着火特性改善効果の解明」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2015年10月～2019年3月

研究者: 橋本 望

1. 研究のねらい

将来の有望なエネルギーキャリアの一つとして、常温で加圧することにより容易に液化することができ、輸送コストや貯蔵コストが低いと考えられるアンモニアが注目されている。アンモニアを直接燃料として用いる燃料電池に関する研究や、ガスタービンでの直接燃焼による発電システムに関する研究も行われているが、その実用化・大型化には長い時間が掛かることが予想され、普及期に必要な大きな需要の確保が難しいことが想定される。一方、既存の発電用大型ボイラ等にアンモニアを燃料として導入することは、技術的ハードルが比較的安くエネルギーキャリアとしての普及段階に必要な大容量の需要を短期間に確保することができると考えられる。また、燃料の一部としてアンモニアを導入し、固体燃料と混焼することにより、固体燃料の燃焼が促進され、難燃性固体燃料の導入も可能となることが期待される。さらに、CO₂ 排出原単位の大い固体燃料の一部を、アンモニアによって代替することにより、CO₂ 排出量を削減することができる。

しかし、発電用大型ボイラ等において、燃料としてアンモニアが大量に導入された例はこれまで無く、アンモニアの導入による着火・火炎伝播特性改善効果についても解明されていない。そのため、本研究では、アンモニアと固体燃料の混焼による着火・火炎伝播特性改善効果を明らかにすることを目的とする。

既存の発電用大型ボイラや工業炉に、アンモニアが導入されれば、新しいエネルギーキャリアの普及期に必要な大量の需要を確保できると共に、これまで利用が難しかった低着火性固体燃料の利用が促進されることによる固体燃料コストの削減も期待される。また、必要な固体燃料の一部を、エネルギーキャリアによって代替することにより、CO₂ 排出量を削減することができる。

本研究では、一様乱流場において固体燃料の火炎伝播実験を行える実験装置を開発し、乱流強度、燃料濃度および燃料性状が火炎伝播特性に与える影響を明らかにする。また、開発した実験装置を活用し、乱流場におけるアンモニアの火炎伝播特性についても明らかにする。さらに、固体燃料とアンモニアの混焼実験を行い、アンモニアの添加が固体燃料の着火・火炎伝播特性に与える影響を明らかにする。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、定容容器内の上下に設置されたファンにより任意の乱流強度の一様な乱流場を形成することができ、分散用のガスにより固体粒子を容器内に一様に分散し、容器中央

に設置されたスパークイグナイタにより固体燃料に着火して火炎が伝播する様子を詳細に観察できる実験装置を開発した。開発した実験装置を使用し、様々な乱流強度および固体燃料濃度における微粉炭火炎伝播実験を行った。その結果、火炎伝播速度は乱流強度に大きく依存し、固体燃料濃度の影響は非常に小さいことが分かった。この傾向は、過去に行われた静止雰囲気もしくは層流場における微粉炭火炎伝播実験で得られた、火炎伝播速度が固体燃料濃度に大きく依存する傾向とは大きく異なる。これは、乱流場においては、乱流渦による乱流熱伝達が火炎伝播速度を支配しているためであると考えられる。これにより得られた知見は、実用燃焼機器内の乱流燃焼場を対象とした固体燃料数値シミュレーションの燃焼モデル高精度化に活用することができる。

次に、開発した上述の実験装置にシュリーレン光学系を適用し、様々な乱流強度、当量比条件において、アンモニア/空気予混合気の火炎伝播実験を行った。その結果、乱流場においては、当量比約 0.9 程度の燃料希薄混合気において、最も高い乱流強度まで火炎が伝播できることが分かった。この傾向は、層流場において当量比約 1.1 程度の燃料過濃条件で燃焼速度が最大となる傾向とは大きく異なる。これは、燃料希薄条件において、温度拡散率と物質拡散率の比を示す Le 数が負となり、乱流によって形成された火炎表面の皺が増長される効果があるため、火炎面積が増大して燃焼速度が増加し、より高い乱流強度でも火炎伝播を維持できるためであると考えられる。この知見は、燃焼数値シミュレーションにおけるアンモニアの乱流燃焼速度モデルの高精度化に活用し、アンモニア燃焼ガスタービンの開発に資することができる。

さらに、開発した上述の実験装置を用いて様々な燃料比（燃料中揮発分と固定炭素の比率）の微粉炭を用いて火炎伝播実験を行い、燃料比が高い方が、火炎が伝播し難いという結果を得た。上述の微粉炭と同じ様々な燃料比の微粉炭とアンモニアの混焼実験を行った。その結果、アンモニアの添加により、低着火性固体燃料である高燃料比炭の着火・火炎伝播特性が大きく改善されることが分かった。

(2) 詳細

研究テーマ A「乱流強度および固体燃料性状が着火・火炎伝播特性に与える影響の解明」

本研究テーマでは図 1 に示す実験装置を開発した。本実験装置では、約 6 L の定容容器内の上下に設置されたファンにより、一様な乱流場を形成することができるようになっている。また、定容容器の四方から、分散用のガスと共に固体燃料粒子を一様に分散できるシステムを備えている。容器中央には点火用のスパーク電極が設置されており、着火後、火炎はほぼ球状に伝播する。伝播する火炎の様子は、容器側面に設置された石英ガラス

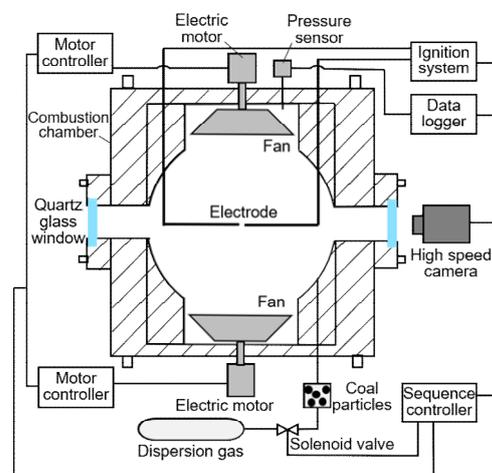


図1 実験装置要

窓を通し、高速度カメラによって記録される。ファンによって形成された乱流場の特性は、Particle Image Velocimetry (PIV)によって計測した。ファンの回転数と乱流強度はほぼ線形な関係を有していることが確認され、ファンの回転数を制御することで、任意の乱流強度の一様乱流場を形成することができる。

開発した実験装置を使用し、様々な乱流強度および固体燃料濃度における微粉炭火炎伝播実験を行った。その結果、図2に示すように、火炎伝播速度は乱流強度に大きく依存し、固体燃料濃度の影響は非常に小さいことが分かった[5.(1)論文 1 参照]。この傾向は、過去に行われた静止雰囲気もしくは層流場における微粉炭火炎伝播実験で得られた、火炎伝播速度が固体燃料濃度に大きく依存する傾向とは大きく異なる。これは、乱流場においては、乱流渦による乱流熱伝達が火炎伝播速度を支配しているためであると考えられる。

この知見は、実用燃焼機器を対象とした固体燃料数値シミュレーションの燃焼モデル高精度化に活用することができる。

研究テーマ B「乱流場中におけるアンモニアの火炎伝播特性の解明」

本研究テーマでは、乱流場におけるアンモニアの火炎伝播特性を明らかにし、アンモニア燃焼ガスタービン用バーナ開発の設計指針を得ることを目的としている。図1の実験装置に、シュリーレン光学系を適用し、様々な乱流強度、当量比条件において、アンモニア/空気予混合気の火炎伝播実験を行った。その結果、図3に示すように、乱流場においては、当量比約0.9程度の燃料希薄混合気において、最も高い乱流強度まで火炎が伝播できることが分かった[5.(3)学会発表 5 参照]。この傾向は、層流場において当量比約1.1程度の燃料過濃条件で燃焼速度が最大となる傾向とは大きく異なる。これは、燃料希薄条件において、温度拡散率と物質拡散率の比を示すLe数が負となり、乱流によって形成された火炎表面の皺が増長される効果があるため、火炎面積が増大して燃焼速度が増加し、より高い乱流強度でも火炎伝播を維持できるためであると考えられる。

この知見は、燃焼数値シミュレーションにおけるアンモニアの乱流燃焼速度モデルの高精度化に活用し、アンモニア燃焼ガスタービンの開発に資することができる。

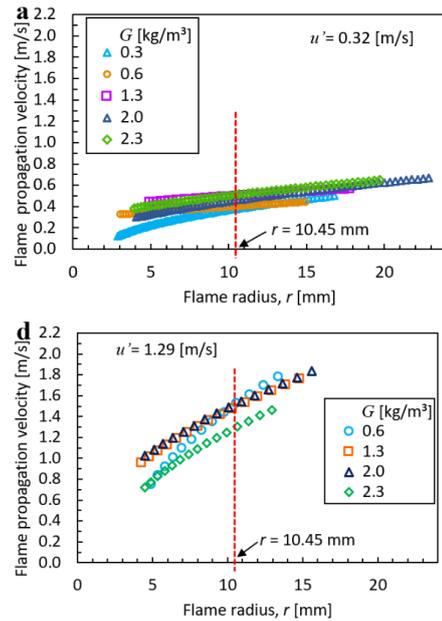


図2 乱流強度が低い条件(上段)および高い条件(下段)における火炎半径と火炎伝播速度の関係

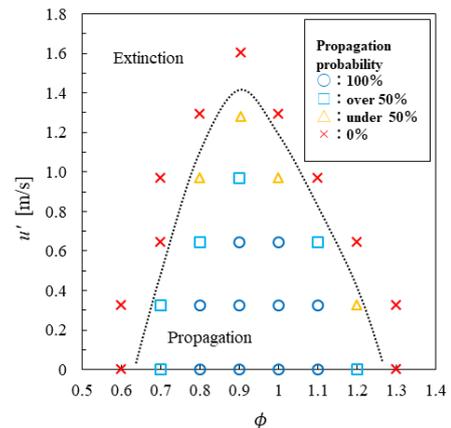


図3 当量比-乱流強度平面におけるアンモニア/空気予混合気の火炎伝播確率マップ

研究テーマ C「アンモニアの添加が固体燃料の火炎伝播特性に与える影響の解明」

本研究テーマでは、アンモニアの添加により、固体燃料の火炎伝播特性がどのように変化するかを解明し、石炭火力へのアンモニア混焼指針を得ることを目的としている。

まず、固体燃料の燃料性状によって火炎の伝播特性がどのように変化するかを調べるため、異なる燃料比（燃料中の揮発分に対する固定炭素の比率で、値が高いほど揮発分が少ない）の微粉炭を用いた火炎伝播実験を行った。その結果、燃料比が高いほど、火炎が伝播できる条件は狭くなり、最も燃料比の高い微粉炭では実験を行った全ての条件において、火炎が伝播しなかった。

一方、様々な燃料比の微粉炭、乱流強度で微粉炭とアンモニアの混焼実験を行い、全ての条件において、火炎が伝播し、アンモニアの添加が高燃料比炭の火炎伝播特性を改善する効果があることが確認された。

さらに、混焼実験においては、微粉炭とアンモニアを混焼させた場合の火炎伝播速度の方が、微粉炭とアンモニアをそれぞれ単独で燃焼させた場合の火炎伝播速度よりも速くなる条件があることが明らかとなった。これは、固体燃料粒子である微粉炭とガス燃料であるアンモニアの相互作用によるものと考えられる。どのような相互作用が働き、混焼条件の火炎伝播速度が増加しているかについて詳細に明らかにするためには、さらに実験条件を追加し、様々なアンモニアと酸化剤の当量比条件における実験データを取得していくことが必要であると考えられる。

以上、3つの研究テーマについて、研究テーマ A「乱流強度および固体燃料性状が着火・火炎伝播特性に与える影響の解明」および研究テーマ B「乱流場中におけるアンモニアの火炎伝播特性の解明」については、ほぼ達成できたと考えられる。最後の研究テーマ C「アンモニアの添加が固体燃料の火炎伝播特性に与える影響の解明」については、一部達成できているが、残りの研究期間で実験データを追加し、考察を深める必要がある。

3. 今後の展開

今後は、本研究で得られた実験データを基に、数値シミュレーション用の微粉炭/アンモニア混焼モデルの構築を行い、石炭火力へのアンモニア導入前に必要な事前評価を高精度に行える数値シミュレーション技術の構築を図る。

4. 自己評価

これまで前例の全く無い、乱流場中の固体燃料の火炎伝播を詳細に観察できる実験装置の開発には当初の想定以上の時間が掛かったが、初期の目的のうちの大部分は達成できたと考えられる。今後は、開発した実験装置を最大限活用することにより、当初の研究目標である実機微粉炭ボイラへのアンモニア導入に関する研究成果だけでなく、固体燃料を取り扱う様々な高温乱流プロセスに活用できる実験データを取得できることから、科学技術及び社会・経済への大きな波及効果が見込めると考えられる。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. K. Hadi, R. Ichimura, N. Hashimoto, O. Fujita. Spherical turbulent flame propagation of pulverized coal particle clouds in an O₂/N₂ atmosphere. Proc. Combust. Inst. 2019, 37, 2935–2942.

2. R. Ichimura, K. Hadi, N. Hashimoto, A. Hayakawa, H. Kobayashi, O. Fujita, Extinction limits of ammonia/air flame propagating in a turbulent field, Fuel, in press.

(2)特許出願

研究期間累積件数:0件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

主要な学会発表

1. 橋本望, Hadi Bin Khalid, 市村涼, 藤田修, O₂/N₂ 雰囲気中における球状微粉炭火炎伝播速度に及ぼす乱流強度の影響に関する研究, 第54回石炭科学会議, 2017/10/19.
2. Khalid Hadi, Ryo Ichimura, Nozomu Hashimoto, Osamu Fujita, Experimental Study of Spherical Turbulent Flame Propagation of Pulverized Coal Particle Cloud in O₂/N₂ Atmosphere, 11th Asia-Pacific Conference on Combustion, 2017/12/12.
3. 橋本望, アンモニアおよび微粉炭の球状乱流火炎伝播に関する研究, スマートエンジニアリング TOKYO2018, アカデミックプレゼンテーション(招待講演), 2018/7/19.
4. Nozomu Hashimoto, Hadi B. Khalid, Ryo Ichimura, Osamu Fujita, Experimental study on turbulent flame propagation of coal particle cloud in a fan-stirred closed vessel, 14th Japan-China Symposium on Coal and C1 Chemistry, 2018/9/14.
5. Ryo Ichimura, Khalid Hadi, Nozomu Hashimoto, Akihiro Hayakawa, Hideaki Kobayashi, Osamu Fujita, Experimental study of turbulent flame propagation of ammonia/air mixture in a fan-stirred closed vessel, 14th International Conference on Combustion and Energy Utilization, 2018/11/8.