

令和 6 年 4 月 23 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04521

研究課題名（和文）マイクロ波プラズマを用いたアンモニア・空気予混合ガスの燃焼特性の改善

研究課題名（英文）Improvement of combustion characteristics for premixed ammonia-air gas using microwave plasma

研究代表者

関口 秀紀（Sekiguchi, Hidenori）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・海上技術安全研究所・上席研究員

研究者番号：80415843

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）： 当量比1.0以下のNH₃（アンモニア）とAir（空気）の予混合ガスに対して、開発したマイクロ波プラズマ源を用いたプラズマ支援着火・燃焼を実施しました。本実験では、当量比1.0、流速0.167m/s、平均マイクロ波伝送電力84Wにおいて、燃焼ガス中の未燃NH₃濃度は25ppm、N₂O濃度は4ppmを達成しました。加えて、純NH₃に対して、開発したマイクロ波プラズマ源を用いたNH₃改質を実施しました。本実験では、純NH₃流量0.2L/min、平均マイクロ波伝送電力112Wにおいて、最高NH₃分解率84%を達成しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の気候変動の主要因とされる温室効果ガス（GHG: greenhouse gas）内の二酸化炭素（CO₂）濃度を低減するため、燃焼時にCO₂を排出しないアンモニア（NH₃）を燃料として利用する技術が求められています。そこで、NH₃・空気（Air）予混合ガスに対するマイクロ波プラズマ源を用いた支援着火・燃焼技術、およびマイクロ波プラズマ源を用いた純NH₃改質H₂生成技術の開発を実施しました。これらの研究成果により、開発した技術が、燃焼時にCO₂を排出しないNH₃を燃料として利用する技術として有用であることが実証されました。

研究成果の概要（英文）： Plasma-assisted ignition and combustion using a developed microwave plasma source was demonstrated for the premixed NH₃ (ammonia) and Air (air) gas with an equivalent ratio of 1.0 or less. In the experiments, the unburned NH₃ and N₂O concentrations in the combustion gas achieved 25 ppm and 4 ppm, respectively, at an equivalent ratio of 1.0, a flow velocity of 0.167m/s, and an average microwave transmission power of 84 W. In addition, NH₃ reforming to H₂ using a developed microwave plasma source was demonstrated for pure NH₃. In the experiments, the highest NH₃ decomposition rate achieved 84% at a pure NH₃ flow rate of 0.2 L/min and an average microwave transmission power of 112 W.

研究分野：EMC

キーワード：プラズマ マイクロ波 アンモニア 燃焼 改質

1. 研究開始当初の背景

大気中の温室効果ガス（GHG: greenhouse gas）濃度の増加に起因する気候変動は、洪水、干ばつ、豪雨、高潮などの自然災害の発生を増加させると懸念されています。この GHG の中で、石油や石炭、天然ガスなどの化石燃料（炭化水素燃料）の燃焼などによって排出される二酸化炭素（CO₂）は、GHG 全体の約 75%を占めています。このため、燃焼時に CO₂ を排出しないアンモニア（NH₃）を燃料として利用することが考えられており、炭化水素燃料と比べて着火温度が高く燃焼速度が遅い NH₃ を安定・高効率に着火・燃焼させる技術開発が求められています。

2. 研究の目的

本研究では、従来の化石燃料（炭化水素燃料）の燃焼から排出される CO₂ を削減するため、NH₃ ガスを燃料として利用する技術開発を行います。具体的には、NH₃ ガスと空気（Air）の予混合ガスの燃焼特性（着火性および燃焼性（火炎伝播速度等））を改善する手法として、マイクロ波プラズマ技術を適用し、NH₃・Air 予混合ガスの燃焼時の一酸化二窒素（N₂O: GHG の 1 つ、二酸化炭素の約 300 倍の地球温暖化係数を持つ）の生成を抑制しながら、NH₃・Air 予混合ガスを安定・高効率に着火・燃焼させる技術を開発することを目的としています。また、炭化水素燃料と比べて着火温度が高く燃焼速度が遅い NH₃ を燃焼速度が速い水素（H₂）に改質する手法として、マイクロ波プラズマ技術を適用し、100%NH₃ ガス一部を H₂ に改質する技術を開発することを目的としています。

3. 研究の方法

本研究では、NH₃・Air 予混合ガスに対するマイクロ波プラズマ支援着火・燃焼技術として、マイクロ波プラズマ生成装置（棒電極型マイクロ波プラズマ源）を開発し、NH₃・Air 予混合ガスバーナー着火・燃焼実験システムを構築しました。本実験では、NH₃・Air 予混合ガスの燃焼特性を調査するため、各種計測装置（火炎画像取得用光学カメラ、プラズマ中の燃焼促進物質特定用マルチチャンネル分光器、排ガス中の成分分析装置（未燃 NH₃、窒素酸化物（NO_x: NO および NO₂）、N₂O ガス生成量）等の計測システムを構築しました。本実験・計測システムの構築後、NH₃・Air 予混合ガスに対して棒電極型マイクロ波プラズマ源を適用し、当量比 1.0 以下の NH₃・Air 予混合ガスに対するマイクロ波プラズマ支援着火・燃焼技術の有効性を NH₃・Air 予混合ガスの当量比および流速、プラズマ生成電力（マイクロ波伝送電力）、排ガス中の成分の観点から調査しました。

また、本実験・計測システムを応用して、マイクロ波プラズマを用いた NH₃ 改質 H₂ 生成技術として、100%NH₃ ガスに対して棒電極型マイクロ波プラズマ源を適用し、NH₃ 改質 H₂ 生成に対するマイクロ波プラズマの有効性を 100%NH₃ ガスの流量およびプラズマ生成電力（マイクロ波伝送電力）、分解ガス中の成分の観点から調査しました。

4. 研究成果

(1) NH₃・Air 予混合ガスに対するマイクロ波プラズマ支援着火・燃焼技術の開発

図 1 は、NH₃・Air 予混合ガスに対するマイクロ波プラズマ支援着火・燃焼技術の開発における実験・計測システムの構成図を示します。本実験では、燃焼ガス中の未燃 NH₃、NO_x、N₂O 濃度を、棒電極型マイクロ波プラズマ源内の NH₃・Air 予混合ガスの流速と棒電極型マイクロ波プラズマ源へのマイクロ波伝送電力の観点から調査しました。図 2 は、棒電極型マイクロ波プラズマ源内の NH₃・Air 予混合ガス燃焼写真の一例を示します。

主な調査結果として、開発した棒電極型マイクロ波プラズマ源は、NH₃ の化学量論的燃焼以下の当量比の NH₃・Air 予混合ガスを燃焼可能であることが確認されました。当量比 0.2~1.0 の範囲において、燃焼ガス中の未燃 NH₃ と N₂O 濃度は当量比 1.0 で最も低くなりました。また、NH₃・Air 予混合ガスの流速に関しては、流速を 0.056~0.212m/s の範囲で増加させた際、燃焼ガス中の未燃 NH₃ と N₂O 濃度が減少しました。さらに、マイクロ波伝送電力に関しては、平均マイクロ波伝送電力を約 31~107 W の範囲で増加させた際、燃焼ガス中の NH₃ と N₂O 濃度はわずかに減少しました。

結論として、開発した棒電極型マイクロ波プラズマ源は、NH₃・Air 予混合ガスの当量比 1.0、流速約 0.167m/s、平均マイクロ波伝送電力約 84W のとき、燃焼ガス中の NH₃ 濃度と N₂O 濃度が約 25ppm と約 4ppm を達成し、マイクロ波プラズマ支援着火・燃焼技術は、NH₃・Air 予混合ガスを安定・高効率に着火・燃焼させる技術として有用であることが実証されました。今後は、棒電極型マイクロ波プラズマ源を改良することにより、これらの特性を向上させることが課

題となります。

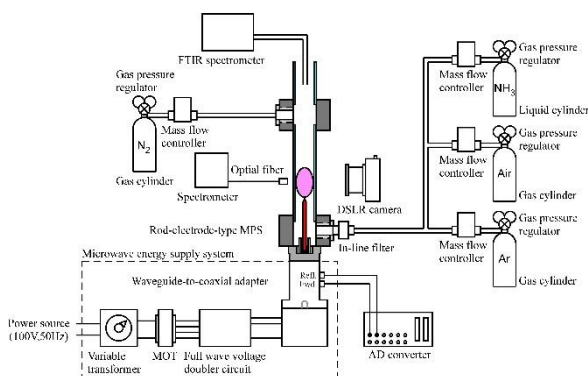
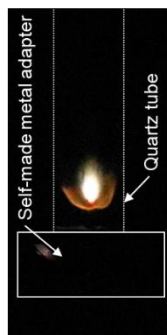


図1 実験・計測システムの構成図



当量比 : 1.0
 流速 : 約0.167 m/s
 伝送電力 : 約84 W

図2 NH₃・Air 予混合ガス燃焼写真の一例

(2) マイクロ波プラズマを用いた NH₃ 改質 H₂ 生成技術の開発

図3は、棒電極型マイクロ波プラズマ源を用いた純 NH₃ 改質 H₂ 生成技術の開発における実験・計測システムの構成図を示します。本実験では、大気圧下において棒電極型マイクロ波プラズマ源を用いた純 NH₃ 分解を実施し、分解ガス中の NH₃、H₂、窒素 (N₂) 濃度を、棒電極型マイクロ波プラズマ源内の NH₃ ガスの流量と棒電極型マイクロ波プラズマ源へのマイクロ波伝送電力の観点から調査しました。図4は、棒電極型マイクロ波プラズマ源内の 100%NH₃ ガスプラズマ写真の一例を示します。

主な調査結果として、開発した棒電極型マイクロ波プラズマ源は、100%NH₃ ガス流量 0.2~0.8 L/min、平均マイクロ波伝送電力約 63~166 W において、100%NH₃ ガスを 40%以上分解可能であることが確認されました。この NH₃ 分解率 40%以上の NH₃、H₂、N₂ 混合ガスの層流燃焼速度は、メタン (CH₄) よりも速くなると考えられます。また、最も高い NH₃ 分解率は、100%NH₃ ガス流量 0.2 L/min、平均マイクロ波伝送電力約 112 W において、84%を達成しました。

結論として、開発した棒電極型マイクロ波プラズマ源は、100%NH₃ を直接分解可能であり、100%NH₃ 流量 0.2 L/min、平均マイクロ波伝送電力約 112 W において、NH₃ 分解率 84%を達成し、マイクロ波プラズマは、純 NH₃ 改質 H₂ 生成技術として有用であることが実証されました。なお、本結論は、現場での迅速な NH₃ 分解法として燃焼機関等に適用できる可能性を示しています。今後は、棒電極型マイクロ波プラズマ源を改良することにより、これらの特性を向上させることが課題となります。

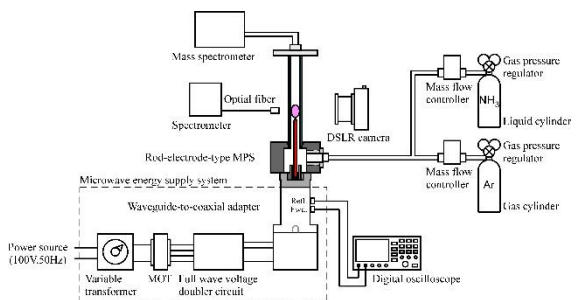
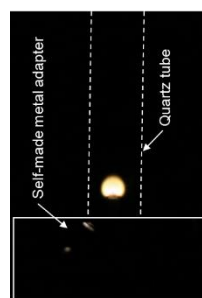


図3 実験・計測システムの構成図



流量 : 0.2 L/min
 伝送電力 : 約84 W

図4 100%NH₃ プラズマ写真の一例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hidenori Sekiguchi	4. 巻 65
2. 論文標題 Experimental investigations of plasma-assisted ammonia combustion using rod-electrode-type microwave plasma source	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 66, 73
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijhydene.2024.03.370	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 Hidenori Sekiguchi	4. 巻 57
2. 論文標題 Pure ammonia direct decomposition using rod-electrode-type microwave plasma source	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 1010, 1016
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijhydene.2023.12.296	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0件

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 改質ガスのプラズマ改質方法、及びプラズマ改質システム	発明者 関口 秀紀	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-057276	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------