

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04219

研究課題名（和文）NOx低減と高負荷燃焼の同時機能を目指したアンモニアバーナーの開発

研究課題名（英文）Development of ammonia burner for simultaneous high-intensity combustion and NOx reduction

研究代表者

奥村 幸彦（Okumura, Yukihiro）

香川大学・創造工学部・教授

研究者番号：80262971

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：地球温暖化は化石燃料の燃焼によって発生する二酸化炭素が主原因である。日本政府は2050年の脱炭素化を目指し、新燃料のアンモニア（383 kJ/mol-NH<sub>3</sub>）に注目している。しかしながら、従来の石油系由来の炭化水素系ガス燃料と比較して、燃焼機構は今なお不明な部分が多い。本研究では、新燃料アンモニアの燃焼機構の解明を行うとともに高負荷燃焼（単位体積当たりの発熱量の増加）を目指した。この高負荷燃焼により、ボイラのコンパクト化がはかれるとともに、燃焼設備の最小化、伝熱効率の増加、および省エネ技術に直接的に貢献できる。低着火性であることを克服し、新構想下でのバーナー開発について取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

工場ではアンモニアを水素用途のみではなく、直接的に熱利用（燃料：エネルギーキャリア）として併用利用することが実用的観点から望まれる。アンモニアはCO<sub>2</sub>を排出しない、すなわち地球温暖化ガス（CO<sub>2</sub>）の排出がゼロの燃料である。しかしながら、アンモニアの層流燃焼速度は7.0cm/s以下であり、従来の石油系燃料と比較すると低いために安定燃焼が困難である。かつ、強制的に燃焼させると大量の窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）を生成する。そこで本研究では、この難燃性のNH<sub>3</sub>を安定に高負荷燃焼させ、かつNO<sub>x</sub>を同時低減できるバーナーを開発した。加えて、NH<sub>3</sub>火炎（新燃料）からのNO<sub>x</sub>低減のメカニズムを学術的に明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The main cause of global warming is carbon dioxide generated by the combustion of fossil fuels. The Japanese government is aiming to achieve decarbonization by 2050 and is focusing on the new fuel ammonia (383 kJ/mol-NH<sub>3</sub>). However, compared to conventional petroleum-derived hydrocarbon fuels, there are still many unknowns about its combustion mechanism. In this study, we aimed to clarify the combustion mechanism of the new-fuel ammonia and achieve high-load combustion (increasing the amount of heat generation per unit volume). This high-load combustion will enable to be made more compact in boiler design, and also contributes directly to minimizing the size of heat transfer equipment, increasing heat transfer efficiency, and energy-saving technology. We had conducted on developing a burner under a new concept.

研究分野：熱工学

キーワード：新燃料 アンモニア 高負荷燃焼 NO<sub>x</sub>

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

化石燃料の燃焼によって発生する二酸化炭素が地球温暖化の主原因である。日本政府は2050年の脱炭素化を目指し、新燃料のアンモニア ( $383 \text{ kJ/mol-NH}_3$ )に注目している。しかしながら、従来の石油系由来の炭化水素系燃料と比較して、燃焼機構は今なお不明な部分が多い。本研究では、新燃料アンモニアの燃焼機構の解明を行うとともに高負荷燃焼(単位体積当たりの発熱量の増加)を目指す。この高負荷燃焼により、ボイラのコンパクト化がはかれるとともに、燃焼設備の最小化、伝熱効率の増加、および省エネ技術に直接的に貢献できる。新規燃料でありかつ低着火性である短所を克服し、新構想下でのバーナー開発について取り組む。

### 2. 研究の目的

水素循環型社会の実現に向けて、水素を効率よく運搬・貯留するために水素キャリアとしてアンモニア ( $\text{NH}_3$ ) が注目されている。工場ではアンモニアを水素用途のみではなく、直接的に熱利用(燃料: エネルギーキャリア)として併用利用することが実用的観点から望まれる。アンモニアは $\text{CO}_2$ を排出しない、すなわち地球温暖化ガス( $\text{CO}_2$ )の排出がゼロの燃料である。しかしながら、アンモニアの層流燃焼速度は $7.0 \text{ cm/s}$ 以下であり、従来の炭化水素燃料(石油系燃料)と比較すると低いために安定燃焼が困難である。かつ、強制的に燃焼させると大量の窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )を生成する。そこで本研究では、この難燃性の $\text{NH}_3$ を安定に高負荷燃焼させ、かつ $\text{NO}_x$ を同時低減できるバーナーを開発した。加えて、 $\text{NH}_3$ 火炎(新燃料)からの $\text{NO}_x$ 低減のメカニズムを学術的に明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究では、燃料流(アンモニア、補助 $\text{H}_2$ )、高速空気流、および周囲空気流により形成されるバーナーを提案する。(図1, 表1) 水素で保炎することにより、強乱流場でも安定的に燃焼できる3重噴流バーナーを作製した。燃焼バーナーの概形(外径, 内径)を図1に示す。本システムにおいては、三重管の最外側の管から $10 \text{ m/s}$ 以上の高速空気流が可変的に供給できる。代表的な条件として、三重噴流拡散火炎ではバーナー中心から燃料流( $\text{NH}_3$ および $\text{H}_2$ )をそれぞれ $3 \text{ m/s}$ で、高速空気流 $V_H$ を $8.0 \text{ m/s}$ で、周囲空気流を $3 \text{ m/s}$ で(バーナー部を除く直径 $20 \text{ cm}$ 以上の範囲から)噴出した。三重拡散火炎は、同軸拡散火炎において中心燃料噴流と周囲空気流の間にもう一つの同軸高速空気流が付加され、この三重管からの空気噴出により火炎周辺部に強い乱れを与える機構となる。重管の内側より、それぞれアンモニア、水素(補助)、高速空気、周囲空気流を流すことで、水蒸気に包まれたかつ安定に保炎された火炎を生成する。加えて、アンモニアの周りを水素で囲むことにより $\text{NO}_x$ 還元域を生成し、 $\text{NO}_x$ を同時低減するコンセプトとする。以下の研究計画(1)~(5)を実施した。

- (1) 高速空気流速を変えて、高負荷時の燃焼計測を行うとともに火炎安定性を評価する。
- (2) 火炎構造について明らかにする。実験ではプローブを使用し、火炎の高さ方向および半径方向における火炎内温度分布、火炎内化学種分布および流速分布を計測する。これら温度・濃度・流れ場の実験結果を大規模数値解析(図2, 表1-2)の結果と比較する。
- (3) 数値計算では、反応性熱流体Advance/ FrontFlow/red のソフトを採用し、ナビエ・ストークスの式(RANS, LES)、化学種保存式、エネルギー方程式、気体の状態方程式、その他

の関連式群を解き，実験で計測できないラジカルの挙動を考察する．これにより，高速空気が10m/sでも吹き飛ばない現象解明やNO<sub>x</sub>低減メカニズムが明らかにできる．

- (4) 新燃料であるNH<sub>3</sub>の燃焼研究の深化を図っていく．特殊燃料における乱流場でのNO<sub>x</sub>低減機構を示すとともに，さらにNO<sub>x</sub>還元域を配置する設計により実際に高NO<sub>x</sub>排出値を急速に減少させる．

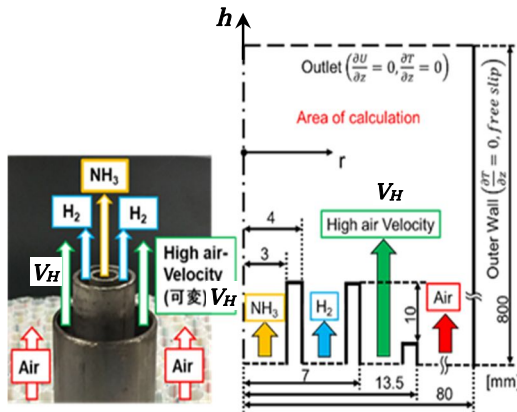


図1 実験装置（水素保炎型バーナ）

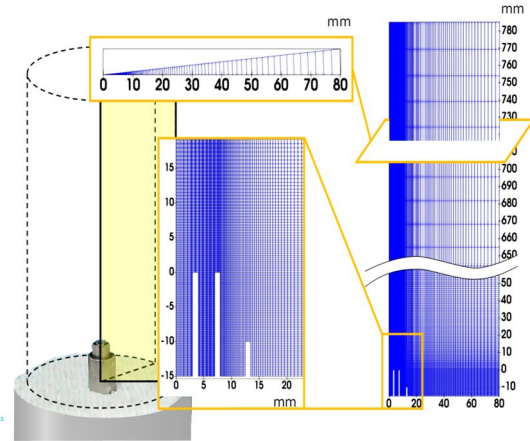


図2 計算領域と計算格子

表2 計算条件（水素保炎型バーナ）

表1 実験条件（水素保炎型バーナ）

	Single	Duplex	Triple	Surrounding s air flow
Component	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub>	Air	Air
Composition (wt%)	100	100	N <sub>2</sub> : 77 O <sub>2</sub> : 23	N <sub>2</sub> : 77 O <sub>2</sub> : 23
Velocity (m/s)	3.0	3.0	8.0 (variable)	3.0

Computational details	
Solver	Advance/FrontFlow/red
Turbulence model	RANS: Chen-Kim k-ε model
Reaction model	see Table 3
Discretization method	Finite volume method 2nd order central difference method
Time integration method	Equation of motion, Equation of Energy, Equation of k-ε Euler implicit method
Viscosity model	Chapman – Enskog theory
Radiation	Disregard/Weighted sum of gray-gases method
Number of grid points	999,608 (Minimum size above rim: 0.1mm cubic)
Wall boundary condition	Neumann boundary condition
Outlet boundary condition	Neumann boundary condition

#### 4. 研究成果

水素保炎することにより，安定維持可能なアンモニア乱流燃焼が生成した．火炎構造は実験的に計測され，温度分布，化学種分布等のベンチマークデータが取得された．加えて，NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub> 拡散場でのアンモニアの数値計算により NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub> 燃料に対するNO<sub>x</sub>生成機構が考察された．

- (1) 高速空気流の増加に伴い，火炎周辺部に強いせん断が発生するが，図3のように水素火炎から火炎中心部への高濃度のOH，H の供給および高速な熱供給により NH<sub>3</sub> 燃焼は維持される．
- (2) CRECK-Mech 使用による，水素保炎型アンモニアバーナーにおける N 系の主要反応パス，特に NO<sub>x</sub> 生成・消滅機構（図4）が明らかにされた．同様に，3次元空間におけるNO<sub>x</sub> 生成・消滅位置が詳細に把握できた．
- (3) 計算上で Fuel NO<sub>x</sub> および Thermal NO<sub>x</sub> を分離することにより，それらの生成領域が示された．図には示さないが，Thermal NO<sub>x</sub> は，リム近傍の水素火炎付近でのみ発生し，Fuel NO<sub>x</sub> に比べて排出量が十分に小さいことが明らかにされた．(Fuel NO<sub>x</sub> 生成が大半

を占める.)

- (4) 3種類の反応スキーム (GRI-Mech, Okafor-Mech, CRECK-Mech) からの計算結果である化学種および温度分布, 火炎長等およびそれらと実験結果を比較した。(代表として図5, 6) CRECK-Mech 使用による計算結果は実験値とよく一致し, 最適なスキームが特定された。

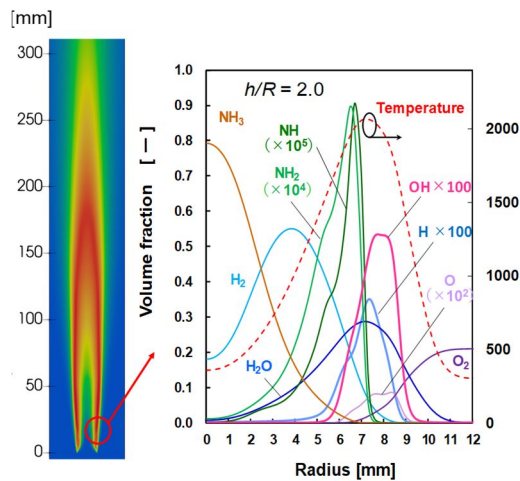


図3 半径方向のラジカル及び温度分布 ( $V_H=8.0\text{m/s}$ )

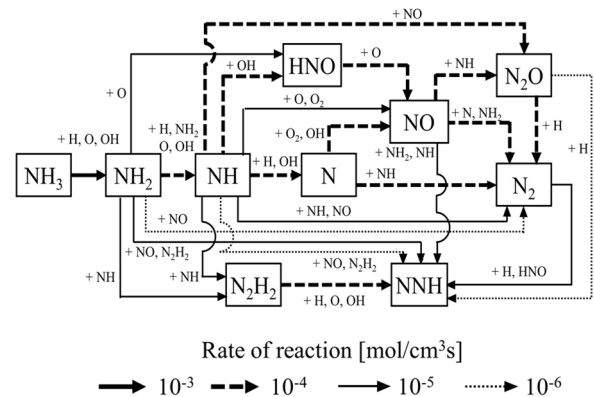


図4 NOの生成機構(最大発生位置)

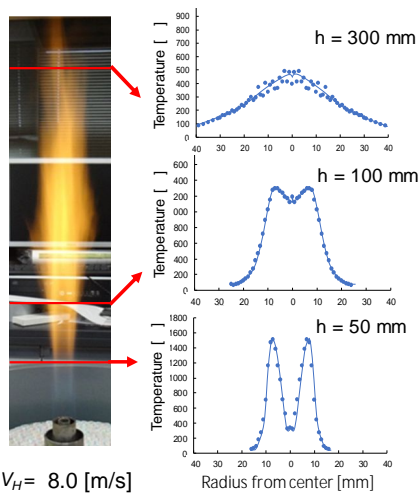


図5 半径方向の温度分布(実験:  $V_H=8.0\text{m/s}$ )

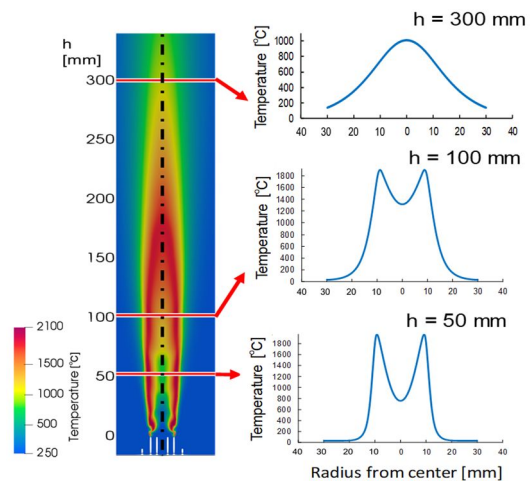


図6 半径方向の温度分布(計算:  $V_H=8.0\text{m/s}$ )

## 主たる発表論文等

### 学術査読付き論文 (計3件)

奥村幸彦, 「アンモニアバーナーの開発とボイラーの基礎伝熱特性の解明: Development of Ammonia Burner and Elucidation of Fundamental Heat Transfer in Boiler, **ボイラ研究 (Journal of Japan Boiler Association)**, **442**, pp. 21-26, 6 pages, (2023). ISSN 0387-0162.

奥村幸彦, 坪田知大, 松田直也, 堀 司, 赤松史光, 水素保炎型アンモニア乱流拡散火炎の構造と反応解析, 日本燃焼学会誌 第64巻208号, pp.168-176, (2022)。

奥村幸彦, 「高負荷燃焼とNO<sub>x</sub>低減の同時機能実現に向けたCO<sub>2</sub>フリー燃焼器の開発」, *Cybermedia High Performance Computer Journal*, Vol.10, pp.57-60, (2021). ISSN: 2186-473X

[学会発表](国際会議9件, 特別講演3件, 学会発表15件, 計27件)

国際会議

1. Hossain Md. Zakir, Naoya Kishi, Yukihiko Okumura, Effect of syngas (CO/H<sub>2</sub>) ratio on exhaust gas characteristics of gas engine, International Workshop on Environmental Engineering 2023 (IWEE2022), E308, Paper No.23-206, 2 pages, 2023.7. (審査付国際会議論文)
2. Hossain Zakir, Naoya Kishi and Yukihiko Okumura, Exhaust Gas Characteristics and NO<sub>x</sub> Formation Mechanism on Spark Ignition Engine Using By Bio-Syngas, AIChE Annual Meeting(American Institute of Chemical Engineers), Paper No.466c , #646043, 13pages, 2023.9., (Plaza International Ballroom I, Hyatt Regency, Orlando, USA) ,
3. Yukihiko Okumura, Tomohiro Tsubota, Kenta Kikuchi, Noritoshi Yagawa, Tomohiro Matsunami, Combustion characteristic of NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> premixed flame”, 33rd International Symposium on Transport Phenomena (ISTP2023), Session: Combustion and Reacting Flows 1, Paper ID 25, 5 pages, 2023. (審査付国際会議論文)
4. Yukihiko Okumura, Tsukasa Hori, Fumiteru Akamatsu, Takahiro Kitano, Tomohiro Tsubota, Naoya Matsuda, Reaction Analysis of nitrogen oxide for ammonia turbulent burner with hydrogen flame stabilizer, 32nd International Symposium on Transport Phenomena, Paper No.210, 6 pages, 2022. (審査付国際会議論文)
5. Kosuke Hoshika, Kira Kagawa, Yukihiko Okumura, Combustion characteristics of NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub> premixed flames and mechanism of NO<sub>x</sub> formation, The European Japan Experts Association International Conference, Proceedings NO. 08, pp.233-234, 2021.10. (審査付国際会議論文)
6. Tomohiro Tsubota, Naoya Matsuda, Yukihiko Okumura, Effect of reaction scheme on the structure of ammonia turbulent flame, The European Japan Experts Association International Conference, Proceedings NO. 07, pp.231-232, 2021.10. (審査付国際会議論文)
7. Matsuda Naoya, Tsubota Tomohiro, Yukihiko Okumura, NO<sub>x</sub> reaction analysis of ammonia flame burner with hydrogen stabilizer, The European Japan Experts Association International Conference, Proceedings NO.06, p.229-230 2021.10. (審査付国際会議論文)
8. Yukihiko Okumura, Tsukasa Hori, Fumiteru Akamatsu, Takahiro Kitano, Tomohiro Tsubota, Naoya Matsuda, Development of ammonia burner with hydrogen flame stabilizer, The 2nd Asian Conference on Thermal Sciences, Paper No.20111, Session: Combustion, 2 pages, 2021.10. (審査付国際会議論文)
9. Yukihiko Okumura, Tsukasa Hori, Fumiteru Akamatsu, Takahiro Kitano, Tomohiro Tsubota, Naoya Matsuda, Numerical simulation of ammonia burner with hydrogen flame stabilizer, 31st International Symposium on Transport Phenomena, Paper No.29, Technical session C5, 6 pages, 2020. (審査付国際会議論文)

#### 特別講演，解説など

1. 【巻頭言】奥村幸彦，脱炭素社会へ向かう燃料転換期において，日本エネルギー学会機関誌 *Enermix* , Vol.103, No.2, pp.127, 2024.3.20 発刊. ISSN: 2432-3586
2. 【招待講演】Yukihiko Okumura, Flame structure and reaction analysis for ammonia turbulent burner, 7th International Workshop on Heat-Mass Transfer Advances for Energy Conservation and Pollution Control (IWHT2023), Paper II-10, 9-pages, 2023.8.7 (審査付国際会議論文)
3. 【特別講演】奥村幸彦，「石炭/バイオマスのガス化および燃焼 - 21世紀の環境保全と高度利用に向けて - 」，日本燃焼学会 夏季研究会, 2019.9.5. (香川県観音寺市)

#### 学会発表

別紙参照

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 奥村幸彦, 坪田知大, 松田直也, 堀 司, 赤松史光	4. 巻 第64巻、208号
2. 論文標題 水素保炎型アンモニア乱流拡散火炎の構造と反応解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本燃焼学会誌	6. 最初と最後の頁 168-176
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20619/jcombsj.64.208_168	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yukihiko Okumura, Tsukasa Hori, Fumiteru Akamatsu, Takahiro Kitano, Tomohiro Tsubota, Naoya Matsuda	4. 巻 No.210
2. 論文標題 Reaction Analysis of nitrogen oxide for ammonia turbulent burner with hydrogen flame stabilizer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. 32nd International Symposium on Transport Phenomena (ISTP2022)	6. 最初と最後の頁 6 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 奥村 幸彦	4. 巻 10
2. 論文標題 高負荷燃焼とNOx低減の同時機能実現に向けたCO2フリー燃焼器の開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cybermedia High Performance Computer Journal	6. 最初と最後の頁 57-60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 奥村幸彦	4. 巻 442
2. 論文標題 アンモニアバーナーの開発とボイラーの基礎伝熱特性の解明	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ボイラ研究 (Journal of Japan Boiler Association)	6. 最初と最後の頁 21-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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16件(うち招待講演 0件/うち国際学会 6件)

1. 発表者名 坪田知大, 菊池賢太, 矢川憲利, 松浪智広, 奥村幸彦
2. 発表標題 NH <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> 予混合火炎の燃焼特性
3. 学会等名 第60回 燃焼シンポジウム(日本燃焼学会主催)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 楠直也, 竹原裕貴, 奥村幸彦
2. 発表標題 旋回 絞り構造バーナーによるバイオシingasの高負荷燃焼
3. 学会等名 第31回日本エネルギー学会大会講演論文集(日本エネルギー学会主催)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹原裕貴, 楠直也, 奥村幸彦
2. 発表標題 難燃性バイオシingasの高負荷燃焼
3. 学会等名 第59回日本伝熱シンポジウム講演論文集(日本伝熱学会主催)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yukihiko Okumura, Tsukasa Hori, Fumiteru Akamatsu, Takahiro Kitano, Tomohiro Tsubota, Naoya Matsuda
2. 発表標題 Reaction Analysis of nitrogen oxide for ammonia turbulent burner with hydrogen flame stabilizer
3. 学会等名 32nd International Symposium on Transport Phenomena (ISTP2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yukihiko Okumura, Tsukasa Hori, Fumiteru Akamatsu, Takahiro Kitano, Tomohiro Tsubota, Naoya Matsuda
2. 発表標題 Development of ammonia burner with hydrogen flame stabilizer
3. 学会等名 The 2nd Asian Conference on Thermal Sciences (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kosuke Hoshika, Kira Kagawa, Yukihiko Okumura
2. 発表標題 Combustion characteristics of NH <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> premixed flames and mechanism of NO <sub>x</sub> formation
3. 学会等名 The European Japan Experts Association International Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomohiro Tsubota, Naoya Matsuda, Yukihiko Okumura
2. 発表標題 Effect of reaction scheme on the structure of ammonia turbulent flame
3. 学会等名 The European Japan Experts Association International Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Matsuda Naoya, Tsubota Tomohiro, Yukihiko Okumura
2. 発表標題 NO <sub>x</sub> reaction analysis of ammonia flame burner with hydrogen stabilizer
3. 学会等名 The European Japan Experts Association International Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 松田直也, 坪田知大, 奥村幸彦, 堀 司, 赤松史光
2. 発表標題 同軸噴流アンモニアバーナーにおける低 NOx化への一考察 - 重管による NOx還元域設定とバーナー設計 -
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム講演論文集 (日本燃焼学会主催)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 星加浩輔, 岸 直弥, 奥村幸彦, 神原 信志
2. 発表標題 ガスエンジン特性に及ぼすアンモニア混合の影響
3. 学会等名 第30回日本エネルギー学会大会 (日本エネルギー学会主催)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坪田知大, 松田直也, 奥村幸彦, 北野貴寛, 堀 司, 赤松史光
2. 発表標題 水素保安型アンモニア乱流拡散バーナーの燃焼解析
3. 学会等名 環境シンポジウム講演論文集 (日本機械学会主催)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岸 直弥, 星加 浩輔, 奥村 幸彦
2. 発表標題 ガスエンジンの排ガス特性に及ぼすシンガス (CO/H <sub>2</sub> ) 比の影響
3. 学会等名 第 58 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (日本伝熱学会主催)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松田直也, 坪田知大, 奥村幸彦, 北野貴寛, 堀 司, 赤松史光
2. 発表標題 水素保炎型アンモニアバーナーのNOx反応解析- Thermal とFuel NOxとの分離およびNOx生成・消滅機構-
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム (日本燃焼学会主催)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坪田知大, 松田直也, 奥村幸彦, 北野貴寛, 堀 司, 赤松史光
2. 発表標題 水素保炎型アンモニア乱流拡散火炎の燃焼構造
3. 学会等名 第29回日本エネルギー学会大会 (日本エネルギー学会主催)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥村 幸彦
2. 発表標題 アンモニアの火炎構造に関する実験的研究: CO2フリー燃焼への検討
3. 学会等名 第30回環境工学総合シンポジウム2020 (日本機械学会主催)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yukihiko Okumura, Tsukasa Hori, Fumiteru Akamatsu, Takahiro Kitano, Tomohiro Tsubota, Naoya Matsuda
2. 発表標題 Numerical simulation of ammonia burner with hydrogen flame stabilizer
3. 学会等名 31st International Symposium on Transport Phenomena (ISTP2020)査読有 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 加藤 之貴編著、(奥村幸彦：第3章担当，分担：pp.118-128)	4. 発行年 2022年
2. 出版社 情報機構	5. 総ページ数 253
3. 書名 カーボンニュートラル燃料最新動向～水素・アンモニア・e-fuel・バイオ燃料～	

〔産業財産権〕

〔その他〕

環境エネルギー工学研究室 <a href="https://www.eng.kagawa-u.ac.jp/~okumura/index0.html">https://www.eng.kagawa-u.ac.jp/~okumura/index0.html</a>
---

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