

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03893

研究課題名（和文）旋回空気流および非旋回環状空気流を用いた対向噴流超希釈拡散燃焼の研究

研究課題名（英文）Study on counter jet ultra-diluted diffusion flame using swirling air or coflowing air without swirl

研究代表者

西岡 牧人（Nishioka, Makihito）

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：70208148

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）：本研究では当初の計画を若干変更し、対象を二酸化炭素希釈メタン空気の旋回対向噴流三重火炎および水素空気の旋回対向噴流拡散火炎に変更した。そして前者の希釈消炎限界と後者のNOx排出特性を実験的に調べるとともに、詳細反応数値計算によりそれらのメカニズムを調べた。その結果、二酸化炭素希釈メタンの旋回対向噴流三重火炎は希釈に対する耐消炎性が大きく向上し、一元的火炎伝播における希釈可燃限界ギリギリの希釈率まで安定に燃焼すること、水素空気旋回対向噴流拡散火炎においては燃料噴射管出口のすぐ外側に既燃ガスの逆流領域が形成されるため、比較的低い全体当量比においてNOxの生成が大きく抑制されることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低品位バイオガスや製鉄所からの副生ガス、燃料電池のオフガスなどは不燃成分を多く含み、通常では燃焼が困難である。従ってそれを安定に燃焼させる燃焼技術の開発はエネルギー問題の解決に貢献する。本研究で旋回対向噴流三重火炎方式が安定な希釈燃焼に有効であることが明らかになり、その方式を利用した実機の開発へのヒントになる。一方、水素火炎はCO2は排出しない点ではクリーンであるが、NOxは一般に炭化水素以上に排出されるという問題がある。本研究の旋回対向噴流拡散バーナの結果はNOx排出を大きく削減できる可能性を示しており、低NOx水素燃焼技術の開発へのヒントになる。

研究成果の概要（英文）：In this study, the original plan was slightly modified and the target flames were changed to a carbon dioxide diluted methane air swirling counter jet triple flame and a hydrogen air swirling counter jet diffusion flame. The dilution extinction limit of the former and NOx emission characteristics of the latter were experimentally investigated, and their mechanisms were studied by detailed reaction numerical calculations. The results showed that the carbon dioxide-diluted methane swirling counter jet triple flame has greatly improved flame resistance to dilution and burns stably up to the dilution limit of flammability in a one-dimensional flame propagation. In the case of a hydrogen-air swirling counter jet diffusion flame, the formation of a backflow region of the burned gas just outside the exit of the fuel injector suppresses NOx formation significantly at a relatively low overall equivalence ratio.

研究分野：燃焼学

キーワード：旋回対向噴流火炎 三重火炎 希釈燃焼 メタン燃焼 水素燃焼 窒素酸化物

1. 研究開始当初の背景

近年、バイオガスなどカーボンフリーな燃料の燃焼に注目が集まっている。バイオガスからは比較的簡便な装置により高濃度のメタンを燃料として抽出できるが、その際のオフガスとしてメタン濃度 10%以下の二酸化炭素希釈燃料が排出され、その有効利用が望まれる。しかし、このような低品位燃料は発熱量が低いため通常の方法では燃焼が困難である。なお、二酸化炭素や窒素などの不燃成分で希釈された燃料については各当量比に対する「希釈可燃限界」が存在し、そして全当量比の中で最も限界燃料濃度が低い「最希釈可燃限界」の外では、通常の方法では燃焼は不可能である。もし最希釈可燃限界より大幅に低い燃料濃度で安定に燃焼する方法が開発され、その燃焼メカニズムを解明できれば、それは上述のオフガスなど不燃成分を多量に含む燃料の利用につながるだけでなく、アンモニアなどの難燃燃料の安定燃焼のヒントにもなる。

申請者は最近、安定な超希釈拡散燃焼を可能にする燃焼方式として旋回空気対向噴流拡散燃焼方式を考案した[1]。空気が下から上に旋回しながら流れ、燃料が上側の燃料噴射管から下に向かって噴射される。旋回流の中心の圧力は遠心力のために低下し、それにより逆流を伴う再循環領域が形成される。そしてその逆流に乗って高温の既燃ガスが下側に戻って火炎先端を強化する。また、火炎および既燃ガスは上側の燃料噴射管を加熱し、その中を通る燃料を予熱する。この予熱はエネルギー回収の一種であり、可燃範囲を広げる効果がある。この方式は従来から研究されてきた対向噴流拡散火炎の変形であるが、火炎が旋回流中心軸付近において下側に伸ばされることで火炎面積が大きくなるとともに、火炎先端での火炎伸長が減少して局所的消炎が抑制される。この方式により、旋回予混合方式に劣らない超希釈燃焼が実現できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究は、燃焼研究分野において以前から研究されてきた対向噴流拡散火炎をベースに考案した「旋回空気流対向噴流拡散火炎」と「非旋回環状空気流対向噴流拡散火炎」を超希釈燃焼に適用し、その有効性を実験的に調べるとともに、詳細反応数値計算によってその燃焼メカニズムを解明することを目的に設定した。そこで初年度に二酸化炭素希釈メタンを対象として両バーナを用いた実験を多数実施したところ、旋回空気流の場合には火炎先端付近において発生する局所消炎を抑制することができず、また非旋回環状空気流の場合は火炎の乱れが強く消炎を引き起こすため、計画を変更することにした。具体的には、対象を旋回対向噴流火炎に限定し、その噴射管から噴射する燃料の代わりに過濃予混合気、空気の代わりに希薄予混合気を用いて形成される三重火炎の消炎特性の調査を第一の研究目的にすることにした。

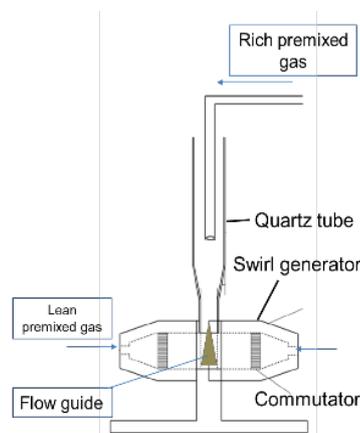


図1 旋回対向噴流バーナの概略図

三重火炎の耐消炎性が高いことは申請者の研究室で行っている対向流火炎の数値計算で明らかになっており[2]、それを本研究に取り入れたものである。更に第二の研究目的を水素空気の旋回対向噴流拡散火炎の NO_x 排出の低減特性の調査とした。この燃焼方式を水素火炎に適用した場合、旋回流により形成される再循環流で逆流する既燃ガスが噴射された水素を希釈し、局所的な火炎面温度を低下させ、Zeldovich NO の生成の抑制を期待できることが理由である。

3. 研究の方法

(1) メタン空気対向噴流三重火炎の実験方法

メタン空気対向噴流三重火炎の実験では希釈剤、燃料、酸化剤としてそれぞれ二酸化炭素、メタン、空気を用いた。空気は小型空気圧縮機より供給され、続いて圧力調節弁によって圧力を調整し、マスフローコントローラを用いて流量を制御し、旋回流発生装置に供給する。メタンと二酸化炭素はそれぞれ高圧ポンペから供給され、圧力調節弁によって圧力を調整した後、マスフローコントローラを用いて流量を制御する。その後二酸化炭素とメタンを混合し、燃料噴射管から噴射する。図1に実験で用いた旋回対向噴流燃焼器の概略図を示す。燃焼器の下部はアクリル製の旋回流発生装置であり、上部は石英ガラス製の燃焼容器及び燃料噴射管である。またガラス管の上に金属製の噴射管固定装置がのせられている。燃料噴射管は真鍮製で内径 4 mm、燃料噴射管出口から燃焼容器の拡大開始位置までの距離 60 mm、燃焼容器の拡大角 $\alpha=15^\circ$ とした。この実験では希薄側と過濃側の空気流量の比は 3:1 とし、過濃側と希薄側の当量比の組み合わせは $(\phi_{rich}, \phi_{lean}) = (2.0, 0.5), (2.5, 0.4), (3.3, 0.3)$ のように逆数の関係とした。希釈消炎限界の測定の際には、希釈燃料中のメタン割合 $Z = X_{CH_4} / (X_{CH_4} + X_{CO_2})$ (X_k はモル分率) を徐々に減少させ、火炎全体が消炎する限界の Z を測定した。

(2) 水素空気対向噴流拡散火炎の実験方法

水素火炎の実験でも同じ構造のバーナを用いた。なお $L_{im}=40\text{ mm}$ とした以外はメタン空気旋回対向噴流火炎の場合と同一である。空気は小型空気圧縮機、マスフローコントローラを介して図1

下部にある旋回流発生装置より旋回流を伴いながら供給される。燃料は水素ボンベからマスフローコントローラを介して下流側の燃料噴射管から供給される。また水素火炎は発光が弱く観察が困難であるため、撮影にはICCDカメラを用いた。なおレンズにはOHからの発光に合わせた中心波長311 nm、半値幅10 nmのフィルターを装着した。本実験では空気流量を $Q_{\text{air}}=5 \text{ L/min}$ とした。旋回の強さを示すスワール数は $S_w=\pi(D-d_s)D/(4nd_s L_s)$ で求められ、本研究で用いた旋回流発生部の内径 $D=17 \text{ mm}$ 、スリット数 $n=2$ 、スリット幅 $d_s=1 \text{ mm}$ 、スリット長さ $L_s=10 \text{ mm}$ より、 $S_w=10.68$ である。

旋回対向噴流バーナの排ガスを上部に設置した金属製チャンバー内に滞留させ、その中の排ガスを抽気し、塩化カルシウムを通して脱水した後に化学発光式 NO_x 分析計を用いて NO_x を計測した。なおチャンバーと石英ガラス製燃焼容器の間は密閉した。なお単位燃料消費量あたりの NO_x 生成量で定義される EINO_x (Emission Index of NO_x)により排出特性を評価した。

(3)数値計算方法

本研究では旋回流バーナを軸対称二次元モデルで模擬し、計算領域と境界条件を図2のように設定した。寸法は実験装置と同一である。なお石英ガラス管と真鍮製の円錐台型フローガイドの内部の温度分布は熱伝導方程式を解いて導出した。実際の現象ではガラス管の外側に自然対流熱伝達が存在するが、その影響は無視できると仮定し、ガラス管の外側を断熱条件とした。流入部境界での予混合気の r 方向流速 $-V$ 、周方向流速 W と実験における流量との対応は文献[3]と同じである。輻射モデルとしてはBarlowらのOptically thin model [4]を用いた。メタン火炎の場合はGRImech3.0[5]からN関係反応を削除した反応機構、水素火炎の場合は更にそれからC関係反応を削除したものをを用いた。

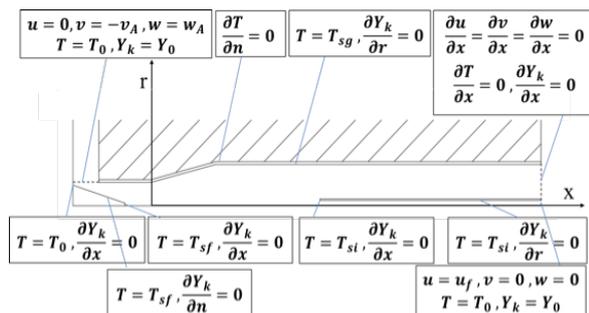


図2 数値計算モデル

4. 研究成果

(1)メタン空気対向噴流三重火炎の実験結果

図3に代表的な火炎の直接写真を示す。いずれも全体空気流量3 L/min、過濃側当量比2.0、希薄側当量比0.5で、左はメタン割合40%、右はメタン割合21%の場合である。40%の場合、当初の予想通り、内側の過濃予混合火炎、外側の希薄予混合火炎、その間の拡散火炎からなる三重火炎が形成されていることがわかる。一方21%のように燃料濃度がある値まで低下した場合、火炎先端が局所的に消失する。この場合、燃料が完全には燃焼せず、一部は大気に排出する。本研究ではこのような局所消炎限界も測定した。

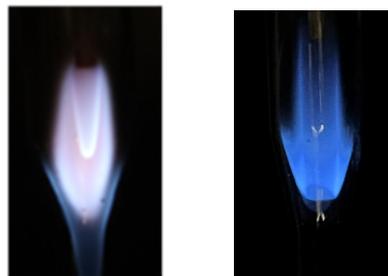


図3 代表的な火炎の直接写真
左: $Z=40\%$ 、右: $Z=21\%$

図4に全体空気流量2.0 L/min、2.5 L/min、3.0 L/min および4.0 L/min の場合の希積消炎限界を示す。横軸は全体空気流量であり、縦軸は消炎時のメタン割合 Z である。まず局所消炎限界については、空気流量2.5 L/min、過濃側当量比2.0におけるメタン割合22.8%が最も低い値であり、この値は蔦らによる旋回対向噴流拡散火炎の結果^[1]と比べると約0.9%低い。一方全体消炎限界については、空気流量3 L/min、過濃側当量比2.0における値18.5%が最も低い値であり、旋回対向噴流拡散火炎に比べると約0.2%低い。これらのことは、三重火炎の高い耐消炎性を示している。なお二酸化炭素希積メタンの一次元的火炎伝播における最希積可燃限界(全当量比範囲で最も低い値)は22.8%^[6]であり、本研究で得られた最希積局所消炎限界と一致している。すなわち、本研究の燃焼方式により希積可燃限界ギリギリまで局所消炎を起こさずに燃焼できている。

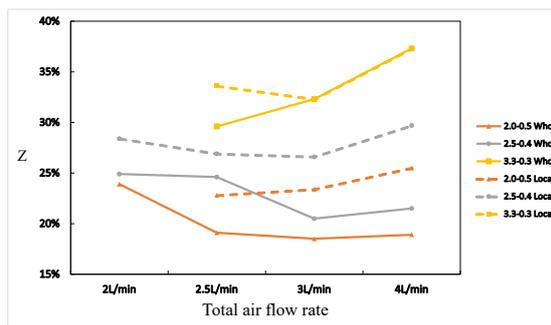


図4 総空気流量に対する希積可燃限界の変化

(2)メタン空気対向噴流三重火炎の数値計算結果

図5に過濃側当量比2.0、希薄側当量比0.5、総空気流量3.0 L/min、メタン割合40%の場合における温度、速度、熱発生速度、 CH_4 濃度、 O_2 濃度、 H_2O 濃度を示す。熱発生速度分布において、上から過濃予混合火炎、拡散火炎、希薄予混合火炎が確認できる。ただし拡散火炎における熱発生速度は2つの予混合火炎に比べて非常に小さい。速度分布から、噴射管から下に向かって逆流領域が形成されていることがわかる。 CH_4 は2つの予混合火炎の未燃領域のみに存在している。

O₂ は過濃予混合火炎では未燃側のみに存在するが、希薄予混合火炎では燃焼で余った分が背後に存在している。図 6 は図 5 と同じ条件の火炎における H ラジカル、O ラジカル、OH ラジカル、CO と H₂ の濃度を示す。拡散火炎の位置における H、O、OH ラジカルの分布形状は似ている。過濃予混合火炎では H ラジカルの濃度が高い。しかしいずれのラジカルも拡散火炎における濃度の方が 2 つの予混合火炎における濃度より非常に高い。これは、熱発生速度において拡散火炎における値が非常に小さいこととは対照的である。CO と H₂ は下流に行くに従ってほぼ消滅しており、未燃成分をほとんど排出していないことがわかる。図 5 の熱発生速度分布と図 3 の Z = 40% の写真を比較すると、過濃予混合火炎の長さがかなり異なっていることがわかる。また、希薄予混合火炎と拡散火炎の形状もあまりよく一致していない。その原因の一つとして、気体からの輻射を考慮していないことが挙げられる。本研究の火炎のように未燃ガスや既燃ガスの中に CO₂ を多く含む場合、気体からの輻射の効果が大きく現れる可能性が高い。また火炎で加熱された噴射管の表面からの輻射の影響も考えられる。

(3) 水素空気旋回対向噴流拡散火炎の実験および数値計算結果

図 7 に実験および数値計算によって得られた EINO_x を示す。横軸は水素供給量と空気供給量の比をその理論混合比で除した値で定義される「全体当量比」である。全体当量比の増加に対して、同軸流拡散火炎の EINO_x の変化は小さいが、旋回対向噴流拡散火炎の EINO_x は大幅に増加することがわかる。また後者の実験値と計算値にはかなりの差が見られるが、全体当量比に対する変化の傾向は良好に一致している。なお $\Phi_{total} = 0.2 \sim 0.3$ の条件においては、同軸流拡散火炎と比較して数値計算による NO_x 排出が 1/4~1/2 程度に抑制されている。図 8 に最高火炎温度の数値計算結果を示す。同軸流拡散火炎ではどの条件においても約 2370 K であるのに対し、旋回対向噴流拡散火炎では全体当量比の増加に伴い最高火炎温度が上昇する。なお全体当量比 0.7 以上では理論混合比の断熱火炎温度 (2388K) を超えており、この温度上昇は燃料噴射管を通した燃料の予熱の影響であると考えられる。この最高温度の上昇が図 7 に示す EINO_x の増加をもたらしていると考えられる。なお同軸流拡散火炎の数値計算は現時点ではまだ完全な定常状態には至っておらず、特に EINO_x の値は今後若干変化する可能性がある。

図 9 に旋回対向噴流拡散火炎における ICCD カメラによる撮影画像および数値計算によって得られた OH ラジカル濃度分布を示す。ICCD 画像と比較して、

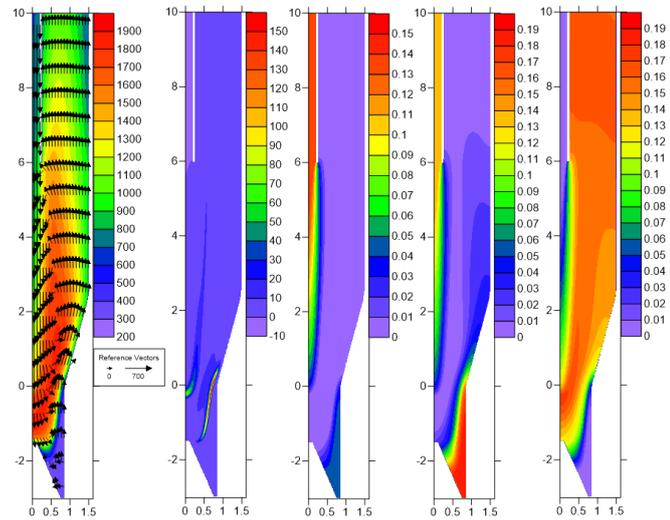


図 5 メタン空気対向噴流三重火炎の火炎構造 (Z = 40%) : 左から温度及び速度, 熱発生速度, CH₄ 濃度, O₂ 濃度, H₂O 濃度

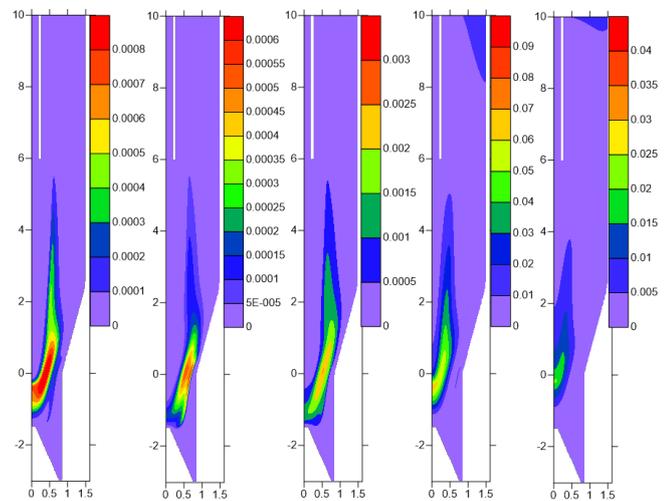


図 6 メタン空気対向噴流三重火炎の火炎構造 (Z = 40%) : 左から H 濃度, O 濃度, OH 濃度, CO 濃度, H₂ 濃度

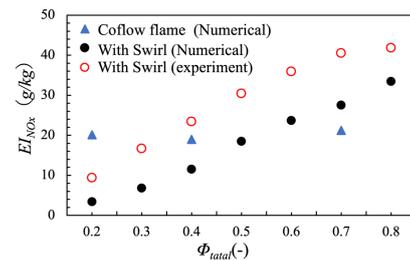


図 7 全体当量比に対する EINO_x の変化

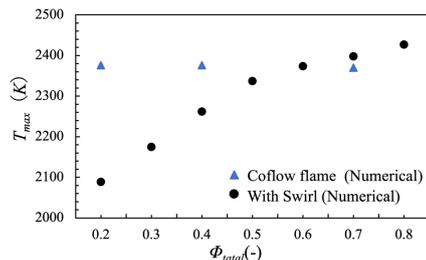


図 8 全体当量比に対する最高火炎温度の変化

数値計算によって得られた OH ラジカルはわずかに広く分布している様子が確認された。一方、どちらの全体当量比においても OH ラジカルのピーク位置は実験と計算で近似しており、また全体当量比の増加に伴って OH ラジカル分布が広がる傾向も実験と計算で一致している。図 10 に同軸流拡散火炎の数値計算結果を示す。温度分布における最高温度は 2376 K であり、2000 K 以上の領域が下流に向かって広く分布していること、そして噴射管出口に近い上流側火炎面において特に温度が高いことが確認できる。メタンなどの拡散火炎では火炎先端の温度が最も高いのが一般的であるが、水素の場合は高い拡散速度のために噴射管を出てすぐに周囲に早く供給されるため、出口付近においてこのような高温がもたらされていると考えられる。また NO 分布より $x = 0.5 \text{ cm}$ 付近から下流に向かって NO 濃度の高い領域が広く分布していることがわかる。そして NO 生成速度分布より、燃料噴射管近傍において最も多くの NO が生成されることがわかる。これは温度分布図に示した上流側火炎面の高温領域によく対応している。

図 11 に全体当量比 0.4 における、旋回対向噴流拡散火炎における数値計算結果を示す。下向きの強い流れが存在し、それが上向きに流れる既燃ガスの一部を巻き込んで、火炎先端の方向に循環させている。この下向きの流れは、下向きに噴射された水素の流れだけでなく旋回流による逆流も加わっていると考えられる。また温度分布より、最高火炎温度は 2262 K であり、同軸流拡散火炎と比較して約 100 K 低下しており、2000 K 以上の領域も縮小している様子が確認できる。NO 濃度及び NO 生成速度分布を見ると、燃料噴射管出口のすぐ外側の逆流領域では NO_x をほとんど生成していないことがわかる。これは図 10 に示した同軸流拡散火炎の燃料噴射管出口付近の状態と顕著に異なっている。

(4)まとめ

本研究では旋回対向噴流バーナを用いて(1)二酸化炭素希釈メタンの三重火炎、(2)水素空気拡散火炎の実験と詳細反応数値計算を実施し、前者の火炎の希釈消炎限界および後者の NO_x 排出特性を調べた。その結果、以下の知見を得た。

- ・二酸化炭素希釈メタンの三重火炎は単独の拡散火炎に比べて希釈に対する耐消炎性が向上する。その結果、一次元的予混合火炎伝播における最希釈可燃限界であるメタン割合 22.8%まで局所消炎を起こさずに燃焼が実現できる。

- ・数値計算結果によれば、水素空気旋回対向噴流拡散火炎の EINO_x は、全体当量比 $\Phi_{total} = 0.2 \sim 0.3$ において同軸流拡散火炎の約 1/4 ~ 1/2 に抑制される。

- ・水素空気旋回対向噴流拡散火炎では、燃料噴射管出口のすぐ外側において既燃ガスの逆流領域が形成される。これにより、その領域において NO_x の生成が抑制される。

引用文献

1. Y. Jiang, M. Nishioka, Study on Ultra-Diluted Diffusion Combustion Using Swirling Counterflow Jet Burner, Proc. 13th Asia-Pacific Conference on Combustion (2021).
2. 張・西岡, 数値計算による対向流拡散火炎・二重火炎・三重火炎の希釈燃焼特性の研究, 第 60 回燃焼シンポジウム(2022).
3. A. Uemichi, et al., Combust. Flame 196, 314 (2018).
4. R.S. Barlow, et al., Combust. Flame 127, 2102 (2001).
5. V.V. Lissianski, et al., available at http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/
6. H.F. Coward, G.W. Jones, Limits of Flammability of Gases and Vapors, U.S. Bur. Mines Bull. No. 503 (1952).

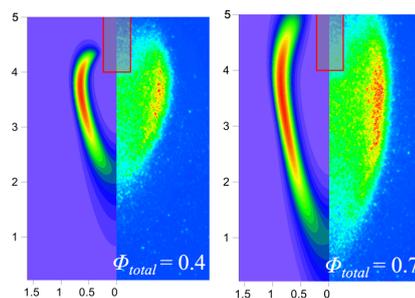


図 9 数値計算で得た OH 濃度と ICCD カメラで得た OH 発光画像の比較

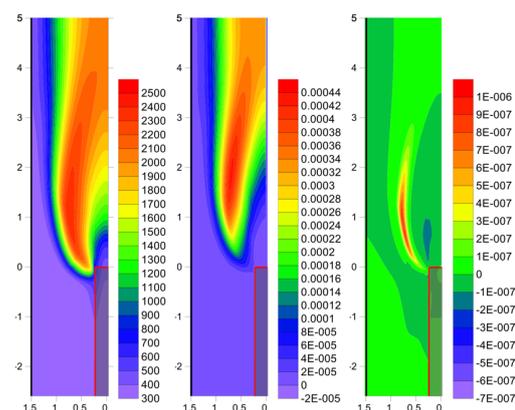


図 10 同軸流拡散火炎の数値計算結果 ($Q_{air} = 5 \text{ L/min}$, $\Phi_{total} = 0.4$): 左から温度(K)と速度, NO 濃度, NO 生成速度(mol/(cc-s)).

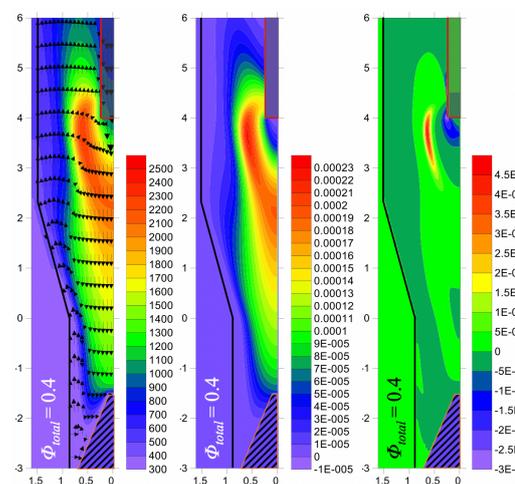


図 11 旋回対向噴流拡散火炎の数値計算結果 ($Q_{air} = 5 \text{ L/min}$, $\Phi_{total} = 0.4$): 左から温度と速度, NO 濃度, NO 生成速度

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Y.Jiang, M.Nishioka	4. 巻 -
2. 論文標題 Study on Ultra-Diluted Diffusion Combustion Using Swirling Counterflow Jet Burner	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 13th Asia-Pacific Conference on Combustion	6. 最初と最後の頁 -
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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 シュウ ヤシヨウ、蔣宇洋、張弛、西岡牧人
2. 発表標題 旋回空気型対向噴流拡散バーナを用いた三重火炎の希釈燃焼
3. 学会等名 第60回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村祐人、蔣宇洋、内山雄太、西岡牧人
2. 発表標題 水素空気旋回対向噴流拡散火炎の研究
3. 学会等名 第60回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y.Jiang, M.Nishioka
2. 発表標題 Study on Ultra-Diluted Diffusion Combustion Using Swirling Counterflow Jet Burner
3. 学会等名 13th Asia-Pacific Conference on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

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