

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

拡散火炎の PLIF 計測と熱発生速度の検討

PLIF Measurement of Diffusion Flame and Investigation of Heat Release Rate

麻田 泰生・山本 和弘*・林 直樹・山下 博史

ASADA, Yasuo, YAMAMOTO, Kazuhiro*, HAYASHI, Naoki, and YAMASHITA, Hiroshi

名古屋大学大学院工学研究科 〒464-8603 名古屋市千種区不老町
Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8603, Japan

2009年8月19日受付; 2009年12月7日受理/Received 19 August, 2009; Accepted 7 December, 2009

Abstract : Although heat release rate is one of the important combustion characteristics, its direct measurement is impossible. Recently, Najm et al. have reported that the heat release rate is well correlated with the product of OH and HCHO fluorescence signals in PLIF measurement. So far, it is well confirmed that this approach can be applied to premixed combustion. In this study, we tried to evaluate the heat release rate in diffusion flame in the same manner. Before that, we numerically investigated the correlation between heat release rate and the product of OH and HCHO concentrations in counter-flow diffusion flame. It is found that the profile of large heat release rate is well correlated with the product of OH and HCHO concentrations, because the heat release rate largely depends on HCO production rate, described by OH and HCHO concentrations through $\text{HCHO} + \text{OH} \rightarrow \text{HCO} + \text{H}_2\text{O}$. However, in the region where the heat release rate is relatively small, the same correlation is not observed. In PLIF measurement, since the profiles of OH and HCHO fluorescence signals match those concentrations predicted by simulation, these radial concentrations are well determined by experiments. The product of OH and HCHO fluorescence signals shows the similar profile to that of the simulated heat release rate. However, different from the premixed flame, the disagreement was found especially in the region of small heat release rate. Thus, it is concluded that the region of large heat release rate in diffusion flame is well correlated with OH and HCHO PLIF measurement.

Key Words : Diffusion Flame, Laser Diagnostics, PLIF, Heat Release Rate

1. 緒言

近年、実験により燃焼場を研究する手法として、高い時間・空間分解能を持つレーザー計測法が広く用いられている。燃焼場を非接触で測定でき、レーザーシートを用いることにより燃焼場の2次元断面の可視化が可能であり、さまざまな研究例が報告されている[1-6]。我々も旋回噴流燃焼器を用いて乱流予混合火炎の燃焼場をレーザー計測により検討してきた。例えば、PIV(粒子画像流速計, Particle Image Velocimetry)を用いて流れ場を調べている[7,8]。また、PLIF法(平面レーザー誘起蛍光法, Planar Laser-Induced Fluorescence Technique)により瞬時の火炎構造や局所消炎について検討している。

一般に、火炎帯を可視化する方法としてCH-PLIFが用いられる。CHが存在する領域は非常に狭く、またその濃度

も非常にわずかであることから、S/N比のよいデータを得るためには高出力のレーザーや高性能のカメラが必要である。そのため、PLIF法を用いた研究例として、計測の対象をOHとしたOH-PLIFが広く用いられる。OHは燃焼場に比較的多く存在するラジカルであり、得られる蛍光強度が高い。我々もこのOHに着目し、火炎構造の可視化を行った[9-11]。特に、燃焼領域におけるOH濃度から局所の燃焼速度を見積ることが可能であることを報告している[12,13]。また我々はこれまでに、OHとHCHOの同時PLIF計測を行っている[10,11]。OHは温度が高い反応帯あるいは既燃ガス中に存在し、HCHOは燃焼初期の温度が増加しはじめた予熱領域および反応帯に存在している。この2種類のラジカルは燃焼場に多く存在するため、CHでは計測が困難な燃料希薄の条件においても測定が可能であると思われる。また、OHとHCHOの濃度分布をもとに、未燃と既燃の判定が可能となるため、画像から火炎構造の検討を行う上でも有利である[14,15]。加えて、OHとHCHOの蛍

* Corresponding author. E-mail: kazuhiro@mech.nagoya-u.ac.jp

光強度の積が熱発生速度と良い相関を持つことが報告されている[15,16]. これにより Vagelopoulos らは, メタン-空気非定常予混合火炎の熱発生速度について検討している[17]. また Fayoux らは, プロパン-空気の予混合気を用いた対向流予混合火炎を対象に, 検証を行っている[18]. また, Ayoola らは熱発生速度と曲率の効果について検討している[19]. ただしこれらの研究では, 予混合火炎のみを対象としていた. 一般に, 多くの工業用燃焼炉には拡散火炎が用いられている. 熱発生速度を実験によって直接計測することは困難であるため, 拡散燃焼場においても熱発生速度を評価できれば, 燃焼器の設計や性能評価に役立てることが可能である.

そこで本研究では, PLIF 法を用いて対向流燃焼器により形成される拡散火炎の OH と HCHO を計測し, これらの蛍光強度の積から熱発生速度を見積ることを試みた. また, 対向流拡散火炎の数値解析を行い, その妥当性について検討した.

2. 実験装置および実験方法

2.1. 対向流燃焼器

図 1 に実験に用いた対向流燃焼器の概略図を示す. 燃焼器は, 上下対称に配置された 2 つの軸対称ノズルから構成される. 燃焼器上部ノズルより酸化剤 (酸素) を, 下部ノズルより燃料 (メタンと窒素の混合気) を供給した. 酸化剤と燃料はともに, 複数のメッシュによって大きな乱れを取り除き, 整流して一様な速度分布にした後, 燃焼場に導入される. これにより, 対向する流れのよどみ面付近において, 平面状の拡散火炎が形成される. またカーテンフローとして, 上下ノズル出口の外周から窒素を流した. 火炎からの輻射などによるノズル出口部の温度上昇を防ぐため, 燃焼器の外周に水冷式の冷却装置を取り付けている. ノズル間距離は, 火炎の安定性およびノズル出口部の温度上昇を考慮して 20 mm に設定した. 座標は, 燃料を供給する下部ノズルの出口中心を原点とし, 鉛直上方に z 軸, 半径方向に r 軸をとる.

表 1 に実験条件を示す. この実験条件は Bijjula らの実験を参考にした[20]. 酸化剤は純酸素とした. 燃料は, メタン濃度をモル分率で 0.18 とし, 残りは窒素とした. 燃料と酸化剤, および周囲の窒素の流速はすべて同じ V_0 とし, 室温において 20 cm/s となるように設定した. なお, 本実験条件によって作り出される燃焼場では, 酸化剤に純酸素を用い, 燃料中のメタン濃度も小さいため, 輝炎が発生しない. 予備実験でレーザー誘起赤熱法 (LII 法) によるすす濃度測定[21-23]を行ったが, すすが発生していないことを確認している.

2.2. PLIF システム

次に, PLIF システムについて説明する. その概略図を図 2 に示す. OH ラジカルの励起光源として Nd:YAG レーザ

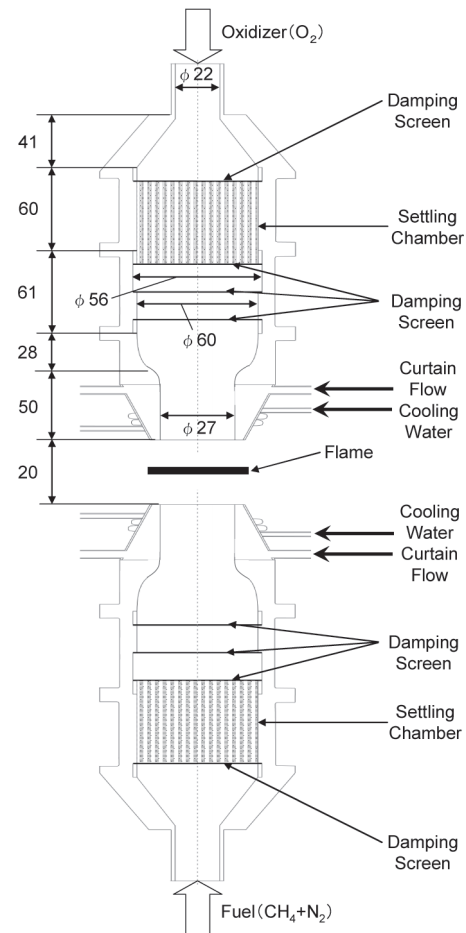


Fig.1 Counterflow combustor

Table 1 Experimental condition at 300K, 760mmHg

Fuel ($\text{CH}_4 + \text{N}_2$)	CH ₄ mole fraction [-]	0.18
	N ₂ mole fraction [-]	0.82
	CH ₄ volume flow rate [l/min]	1.24
	N ₂ volume flow rate [l/min]	5.63
	Flow velocity V_0 [cm/s]	20
Oxidizer (O_2)	O ₂ mole fraction [-]	1
	O ₂ volume flow rate [l/min]	6.87
	Flow velocity V_0 [cm/s]	20
Curtain flow (N_2)	Volume flow rate [l/min]	6
	Flow velocity V_0 [cm/s]	20

の第 2 高調波を用い, 色素レーザー, SHG (BBO 結晶) を用いることにより OH 分子の $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi$ 遷移における (1, 0) バンド吸収線の Q₁(7) を利用する. このときの波長は 283.2 nm であり, 温度依存性の低い励起線であることを確認している[1,13,24]. 一方, HCHO の測定には別の Nd:YAG レーザの第 3 高調波を用い, $AA^2 - XA_14_0^1$ 吸収バンドの回転遷移を励起線とした. 2 つの YAG レーザの発振間隔をともに

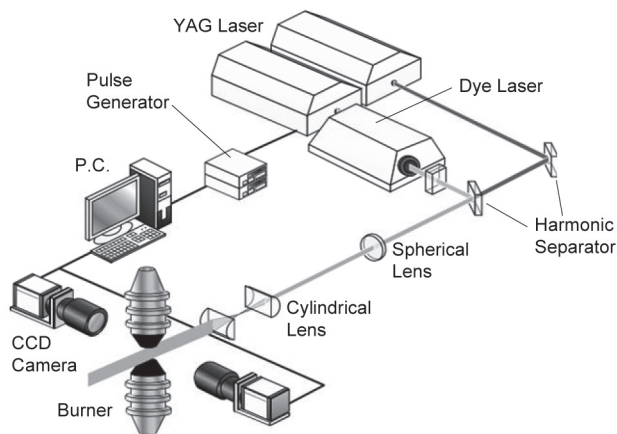


Fig.2 Experimental setup

10 Hz とし、2 枚のシリンダリカルレンズによりシート状にして、燃焼場へ照射する。燃焼場から得られる OH と HCHO の蛍光はフィルターにより必要な波長だけを選択し、2 台の ICCD カメラを用いてパソコンに画像を取り込む。また各条件について、画像を 500 枚撮影し、平均して解析を行った。計測する範囲は、上下ノズルの中心を画像中心とし、2 台のカメラにより撮影されたどちらの画像も大きさは横 25 mm×縦 25 mm とした。画像には上下ノズルにより形成される燃焼場全体が入り、画像のほぼ中央に火炎が形成されている。ただし、両方のカメラで撮影した範囲がずれる可能性があるため、画像の位置補正を行っている。

3. 解析モデルと熱発生速度の評価

3.1. 対向流拡散火炎の解析モデル

実験に先立ち、対向流拡散火炎の数値解析を行い、OH と HCHO の濃度および熱発生速度について調べた。これにより、実験結果の妥当性についても検討することができる。今回用いた平面 2 次元対向流拡散火炎の解析モデルを図 3 に示す。実験と比較するため、流速や系の大きさは実験と同じである。計算領域は z 方向 20 mm、r 方向 10 mm とし、燃料と酸化剤のノズル間距離は 20 mm である。それぞれ格子数は、z 方向に 201 格子、r 方向に 101 格子とした。なお、中心軸を対称境界、外側境界を自由流出境界としている。酸化剤や燃料の条件は表 1 に示したのと同じである。反応には、表 2 に示す Skeletal 反応機構[25]を用いた。熱力学定数については CHEMKIN データベース[26]、輸送係数については、Smooke らの Simplified Transport Model [25]を用いている。

3.2. 予混合火炎の熱発生速度

まず今回行った拡散火炎の結果を示す前に、すでに多くの計測例[11,17-19]がある予混合火炎について検討し、熱発生速度の評価方法の妥当性について説明する。

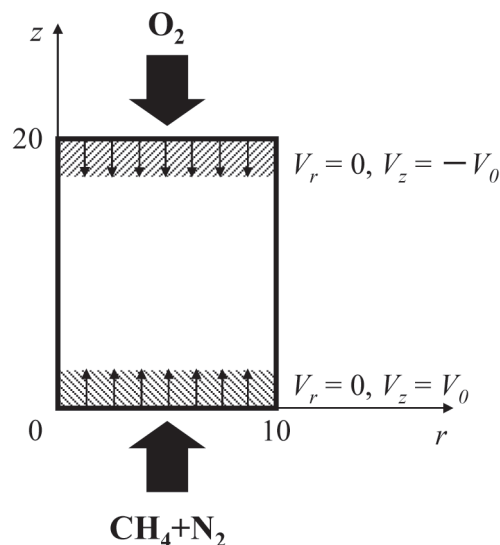


Fig.3 Analytical model of counterflow diffusion flame

Table 2 The chemical equation number of Skeletal elementary reaction mechanism

1	$\text{H} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{OH} + \text{O}$
2	$\text{O} + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{OH} + \text{H}$
3	$\text{H}_2 + \text{OH} \leftrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}$
4	$\text{OH} + \text{OH} \leftrightarrow \text{O} + \text{H}_2\text{O}$
5	$\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{M}$
6	$\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{OH}$
7	$\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}_2$
8	$\text{OH} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$
9	$\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$
10	$\text{CH}_4 + \text{M} \leftrightarrow \text{CH}_3 + \text{H} + \text{M}$
11	$\text{CH}_4 + \text{H} \leftrightarrow \text{CH}_3 + \text{H}_2$
12	$\text{CH}_4 + \text{OH} \leftrightarrow \text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$
13	$\text{CH}_3 + \text{O} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{H}$
14	$\text{CH}_2\text{O} + \text{H} \rightarrow \text{HCO} + \text{H}_2$
15	$\text{CH}_2\text{O} + \text{OH} \rightarrow \text{HCO} + \text{H}_2\text{O}$
16	$\text{HCO} + \text{H} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$
17	$\text{HCO} + \text{M} \rightarrow \text{CO} + \text{H} + \text{M}$
18	$\text{CH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{O} + \text{O}$
19	$\text{CH}_3\text{O} + \text{H} \rightarrow \text{HCHO} + \text{H} + \text{M}$
20	$\text{CH}_3\text{O} + \text{M} \rightarrow \text{HCHO} + \text{H} + \text{M}$
21	$\text{HO}_2 + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$
22	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{M} \leftrightarrow \text{OH} + \text{OH} + \text{M}$
23	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{OH} \leftrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{HO}_2$
24	$\text{OH} + \text{H} + \text{M} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{M}$
25	$\text{H} + \text{H} + \text{M} \rightarrow \text{H}_2 + \text{M}$

一例として、我々が行った層流 1 次元火炎の数値解析結果を示す[10]。この場合、燃料にはプロパンを用いており、計算した当量比 ϕ は 0.70～0.90 の範囲である。計算方法の詳細をここでは記述しないが、火炎が計算領域内に定在するよう流入速度を調整することで火炎の温度・濃度分布を求めている。当量比が 0.75 の場合における温度分布および OH と HCHO の濃度分布を図 4 に示す。HCHO は燃料が分解される比較的初期に生成されると考えられるが、こ

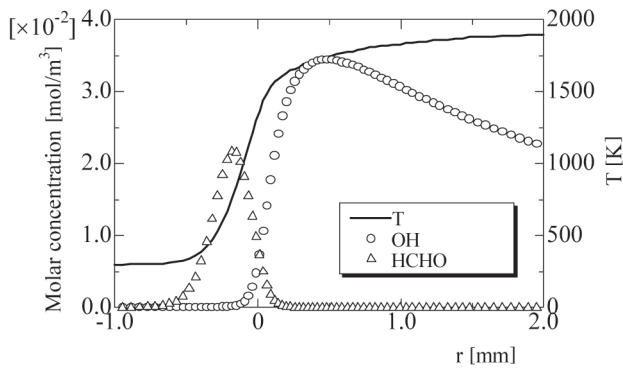


Fig. 4 OH and HCHO concentrations and temperature distributions; $\phi=0.75$.

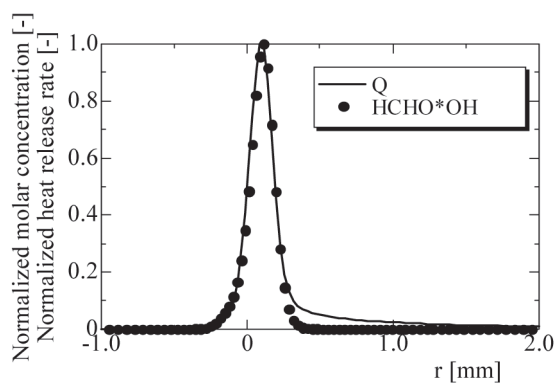


Fig. 5 Profiles of heat release rate and the product of HCHO and OH mole fraction; $\phi=0.75$.

の計算結果によると 400 K から 1400 K の予熱帯から反応領域に HCHO が存在している。他の当量比でも計算したが、HCHO が存在する温度範囲はほぼ同じであった。一方、OH は 1000 K 以上の比較的高温の領域に存在している。また、OH と HCHO の濃度の積と熱発生速度 Q を比較して図 5 に示す。いずれの分布も最大値で正規化している。これによると、多くの計測例があるメタンだけでなく燃料がプロパンの場合も、OH と HCHO の濃度の積は熱発生速度に非常によく対応していることがわかる。

Najm らは詳細素反応機構を用いてメタン-空気の予混合火炎の数値解析を行い、OH と HCHO の濃度の積が熱発生速度とよい相関がある理由について検討している [15,16]。そこでは、ホルミルラジカル (HCO) の生成速度が熱発生速度の良い指標となっていることが指摘された。HCO の濃度がその生成速度に比例するため、HCO の濃度を計測することにより熱発生速度を可視化することが検討されたが、PLIF により得られる HCO の蛍光が非常に弱く、S/N 比が十分ではない [27]。その対策として、OH と HCHO を同時に PLIF 法で測定し、それら 2 つの蛍光強度の積により熱発生速度を見積ることが提案され、その妥当性が確認されている。我々もこれまでに対向流予混合火炎の数値解析を行い、乱流火炎であっても OH と HCHO の濃度の積

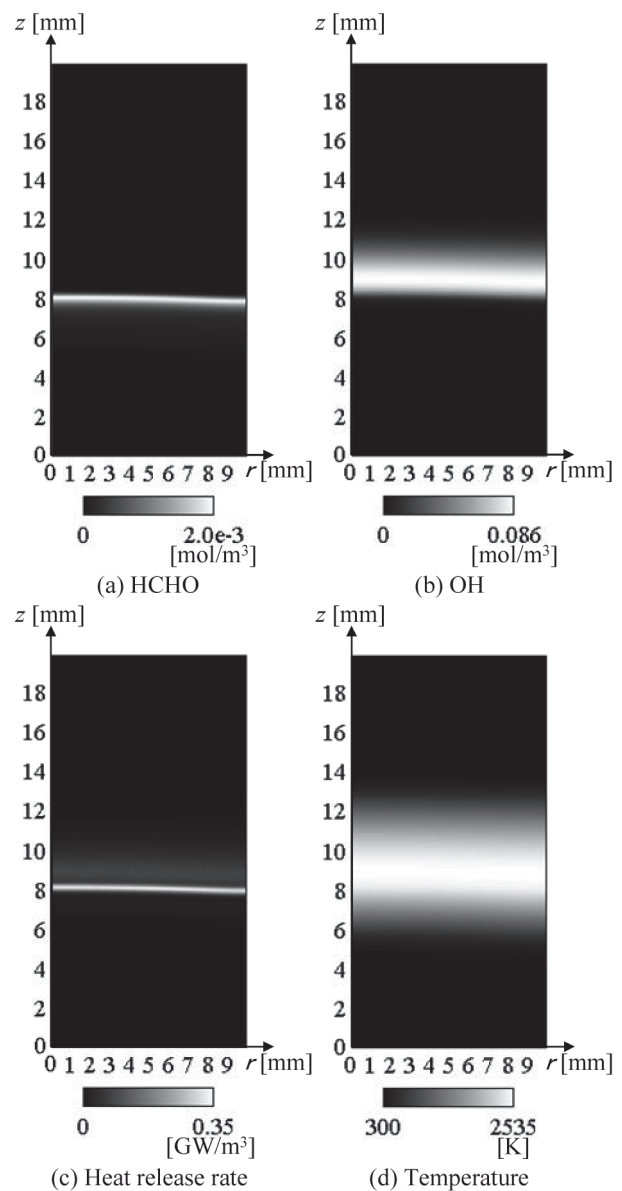


Fig. 6 Distributions of HCHO and OH concentrations by numerical simulation

が熱発生速度とよい相関があることを確認している [28]。

3.3. 拡散火炎の熱発生速度

次に、拡散火炎について検討した。図 6 に対向流拡散火炎の数値解析により得られた HCHO と OH の濃度、熱発生速度、および温度の 2 次元分布を示す。燃料と酸化剤 (酸素) が対向し、拡散火炎が形成されていることがわかる。温度分布と HCHO および OH の分布を比較することにより、燃料側の比較的高温の高い領域と熱発生速度が大きい反応帯に HCHO が存在していることがわかる。一方 OH は、反応帯および空気側的高温の領域に存在していることがわかった。また図 7 に、 $r=0$ の中心軸における HCHO と OH の濃度の積、および熱発生速度の分布を示す。いずれの分布も最大値で正規化している。これによると熱発生速度の燃

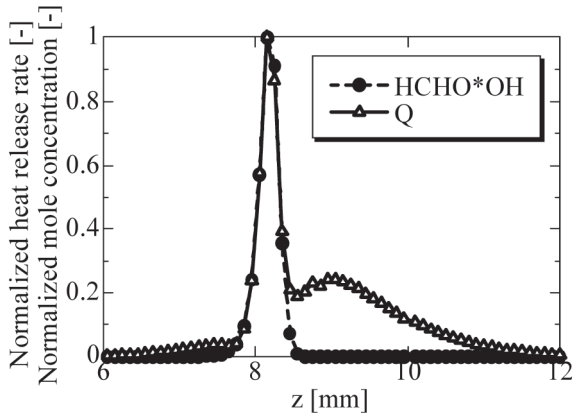


Fig.7 Distributions of product of HCHO and OH concentration and heat release rate by numerical simulation

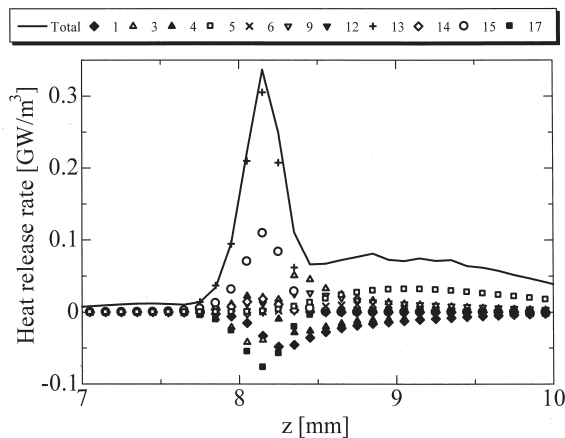
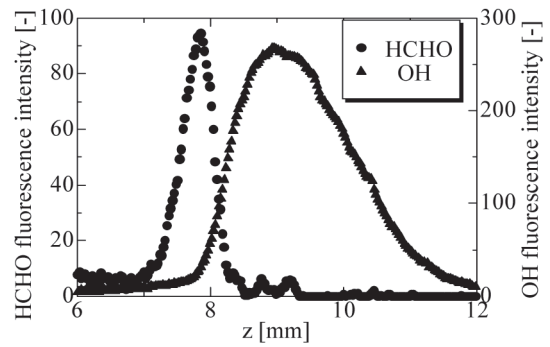


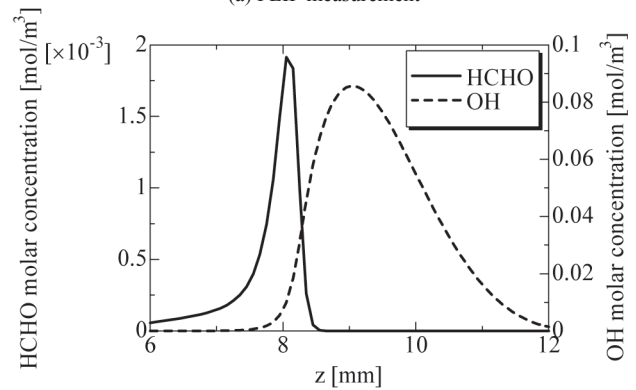
Fig.8 Heat release rate of major elementary reactions

料側ピーク領域である $7.5 \text{ mm} < z < 8.5 \text{ mm}$ の範囲において、熱発生速度と OH と HCHO 濃度の積に良い相関があることが確認できた。

そこで、拡散火炎においても熱発生速度が OH と HCHO の濃度の積によく対応する理由について考察を行う。まず、 $\text{HCHO} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{HCO}$ の反応 15 に着目する。この反応は HCO の生成反応である。予混合火炎では HCO の生成速度が熱発生速度とよい相関を持つことが知られている。図 7 によれば、拡散火炎の熱発生速度は $z = 8.2 \text{ mm}$ 付近にピークを持つが、 8.5 mm 以上の領域でもある程度の発熱が見られた。そこで、今回用いた各反応の熱発生速度について検討した。図 8 に、素反応別の熱発生速度を示す。図の凡例に示す番号は、表 2 に示した Skeletal 反応機構の式番号に対応している。なお、全熱発生速度に対して寄与の小さい素反応については省略している。これによると、全熱発生速度に占める割合の大きな反応は HCHO や HCO が関わる反応 13 および 15 であることが分かる。今回着目した反応 15 は全熱発生速度とよい相関が見られている。したがって、HCHO と OH の濃度の積から結果的に熱発生速度分布を見積ることができたものと思われる。ただし、酸化



(a) PLIF measurement



(b) Numerical simulation

Fig.9 Distributions of (a) HCHO and OH fluorescence signals and (b) HCHO and OH concentrations by numerical simulation

剤側の $z > 8.5 \text{ mm}$ では、吸熱反応である O_2 の分解反応 (反応 1) により比較的小さい熱発生速度が広い範囲で見られる。この範囲では HCHO がほとんど存在しない。以上により、拡散火炎でも HCHO と OH の濃度の積により熱発生速度の分布を見積ることができるものの、その範囲は熱発生速度が比較的大きい領域付近に限定されることがわかった。

4. 実験結果

4.1. OH と HCHO の分布

実際の対向流拡散火炎を対象に PLIF 計測を行い、熱発生速度を実験により評価した。蛍光強度は測定対象とした化学種の濃度だけに依存するのが望ましいが、励起準位にある化学種が蛍光を發しなくてエネルギーを失うクエンチングの影響を受ける。そこで、数値解析で得られた化学種の濃度と蛍光強度を比較することにした。図 9 に、実験による蛍光強度分布と数値解析で得られた OH と HCHO の濃度分布を示す。これによると、両者の分布がほぼ同じであり、PLIF により OH と HCHO の濃度を見積ることがわかった。次節において、OH と HCHO の蛍光強度の測定と熱発生速度の検討を実験により行った。

4.2. 熱発生速度

OH と HCHO の蛍光強度の積を求め、計測により得られ

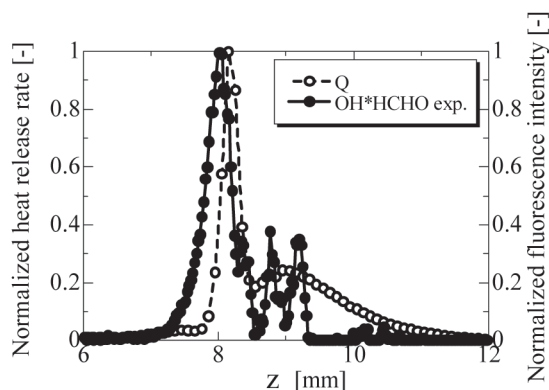


Fig.10 Calculated heat release rate and fluorescence signal

た熱発生速度の分布を検討した。図 10 に、OH と HCHO の蛍光強度の積および数値解析により得られた熱発生速度の分布を比較して示す。いずれも最大値で正規化しており、燃焼器の中心軸上の分布を示している。それぞれの値は燃料側から急激に増加し、 $z = 8$ mm 付近で最大となった後、酸化剤側で減少している。ただし、最大となる z 座標が 0.1 mm 程度異なっていた。おそらく、数値解析では浮力について考慮しておらず、実際の燃焼場とは多少異なることが考えられる。両者を比較すると、 $z = 8$ mm 付近の分布形状が非常に似ている。したがって、3.3 節で議論したように、拡散火炎でも OH と HCHO の濃度を計測することにより熱発生速度を予測することができるものと思われる。

しかしながら、OH と HCHO の蛍光強度の積の分布には $z = 9$ mm 付近に複数のピークがあり、変動も大きいのに対し、計算により予測された熱発生速度は広い範囲である程度の値を持っている。図 7 に示したように、酸化剤側の熱発生速度の分布は OH と HCHO の濃度から予測できないことが確認できる。 $z = 9$ mm 付近の複数のピークは、OH に比べて HCHO の濃度が非常に小さく、両者の積をとったことによる PLIF 法のノイズの影響であると思われる。以上により、拡散火炎の場合は、熱発生速度が最大となる領域付近に限定されるものの、OH と HCHO の蛍光強度の積から熱発生速度分布を十分に予測できることが実験でも確認された。

ただし今回の研究では、輝炎の発生しない火炎を対象として実験を行っている。実際の拡散火炎では輝炎が発生し、すすや PAH からの信号[29]についても考慮する必要があるが、実際の燃焼器を設計するにあたり、実験により熱発生速度を可視化し、主要な熱発生速度の領域を特定できることは非常に有用であり、今後の実器への適用が期待される。

5. 結言

対向流燃焼器を用いて拡散火炎の PLIF 計測を行い、OH と HCHO の濃度の積をもとに熱発生速度を検討した。また、実験と同条件で数値解析を行い、その妥当性を検討し

た。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 拡散火炎でも熱発生速度の燃料側ピーク領域において、OH と HCHO の濃度の積と熱発生速度の間により相関があることを数値解析により確認した。燃焼場の全熱発生速度に占める割合の高い反応は HCHO や HCO が関わる反応であったことから、予混合火炎と同様拡散火炎でも、HCO の生成速度が熱発生速度のよい指標となり、OH と HCHO の濃度の積から熱発生速度を予測できる。
- (2) 実験で計測された OH と HCHO の蛍光強度分布は、数値解析により得られたそれぞれの濃度分布にほぼ一致したことから、蛍光強度がそれぞれの濃度に比例することを確認した。実験により得られた OH と HCHO の蛍光強度の積と数値解析により得られた熱発生速度を比較したところ、熱発生速度の燃料側ピーク領域については数値解析により予測された熱発生速度とほぼ同じ分布となった。

謝辞

本研究に使用した対向流燃焼器を製作するにあたり、芝浦工業大学の矢作裕司先生に貴重なご助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

References

1. Dieke, G. H., and Crosswhite, H. M., *Journal Quantitative Spectroscopy Radiative & Transfer* 2:97-199 (1962).
2. Kohse-Hoinghaus, K., *Progress in Energy and Combustion Science* 20: 203-279 (1994).
3. Masai, A. M., Kelman, J. B., and Dally, B. B., *Proceedings of the Combustion Institute* 27:1031-1038 (1998)
4. Mansour, M. S., Peters, N., and Chen, Y. C., *Proceedings of the Combustion Institute* 27:767-773 (1998).
5. Giezendanner, R., Keck, O., Weigand, P., Meier, W., Meire, U., Stricker, W., and Aigner, M., *Combustion Science and Technology* 175:721-741 (2003).
6. Tanahashi, M., Murakami, S., Choi, G. M., Fukuchi, Y., and Miyauchi, T., *Proceedings of the Combustion Institute* 30:1665-1672 (2005)
7. Yamamoto, K., Inoue, S., Yamashita, H., Shimokuri, D., Ishizuka, S., and Onuma, Y., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, B*, 71:2741-2747 (2005).
8. Yamamoto, K., Inoue, S., Yamashita, H., Shimokuri, D., and Ishizuka, S., *Journal of Thermal Science and Technology*, 2:90-101 (2007).
9. Yamamoto, N., Nakamura, Y., and Zhao, D., *Institute of Fluid & Heat Engineering*, 38:19-28 (2003).
10. Yamamoto, K., Ohnishi, M., Hayashi, N., Ozeki, M., and Yamashita, H., *Transactions of the Japan Society of*

- Mechanical Engineers, B*, 73: 1943-1949 (2007).
11. Ohnishi, M., Ishii, S., Yamamoto, K., Hayashi, N., and Yamashita, H., *The Proceeding of the Sixth Asia-Pacific Conference on Combustion*, 340-343 (2007).
 12. Yamamoto, K., Isayama, T., Hayashi, N., and Yamashita, H., *Journal of the Combustion Society of Japan*, 49:181-186 (2007).
 13. Yamamoto, K., Ozeki, M., Hayashi, N., and Yamashita, H., *Proceedings of the Combustion Institute*, 32:1227-1235 (2009).
 14. Harrington, J. E., and Kermit, S. C., *Chemical Physics Letters* 202:196-202 (1993).
 15. Paul, P. H., and Najm, H. N., *Proceedings of the Combustion Institute* 27:43-50 (1998).
 16. Najm, H. N., Paul, P. H., Mueller, C. J., and Wyckoff, P. S., *Combustion and Flame* 113:312-332 (1998).
 17. Vagelopoulos, C. M., and Frank, J. H., *Proceedings of the Combustion Institute* 30:241-249 (2005).
 18. Fayoux, A., Zahringer, K., Gicquel, O., Rolon, J. C., *Proceedings of the Combustion Institute* 30:251-257 (2005).
 19. Ayoola, B. O., Balachandran, R., Frank, J. H., Mastorakos, E., and Kaminski, C. F., *Combustion and Flame* 144:1-16 (2006).
 20. Bijjula, K., and Kyritsis, D. C., *Proceedings of the Combustion Institute* 30:493-500 (2005).
 21. Yamamoto, K., Fujikake, F., Taya, Y., Hayashi, N., Yamashita, H., and Gakei, S., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, B*, 74:498-504 (2008).
 22. Kanagawa, Y., Yamamoto, K., Oshima, H., Yamashita, H., and Uejima, M., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, B*, 74: 505-512 (2008).
 23. Oshima, H., Yamamoto, K., Hayashi, N., Yamashita, H., and Okuyama, G., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, B*, 74: 2731-2737 (2008).
 24. Horie, R., Ito, A., Nishioka, M., Zhu, X. L., and Takeno, T., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, B*, 65:54-61 (1999).
 25. Smooke, M. D., *Reduced Kinetic Mechanisms and Asymptotic Approximations for Methan-Air Flames*, 1-28 (1991).
 26. Kee, R. J., *Sandia Report*, SAND 89-8009, (1989).
 27. Nguyen, Q. V., and Paul, P. H., *Proceedings of the Combustion Institute* 26:357-363 (1996).
 28. Nonomura, K., Yamashita, H., Hayashi, N., and Yamamoto, K., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, B*, 74:2393-2400 (2008).
 29. Bruneaux, G., *International Journal of Engine Research* 9(3): 249-265 (2008).