

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820056

研究課題名(和文) 火炎と乱流渦の相対スケール関係に着目した乱流燃焼メカニズムの解明

研究課題名(英文) Premixed turbulent combustion characteristics taking into account the relative scales of flame and turbulence

研究代表者

早川 晃弘 (Hayakawa, Akihiro)

東北大学・流体科学研究所・助教

研究者番号：90709156

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：予混合乱流燃焼特性に及ぼすスケール効果を明らかにするために、出口直径が14 mm, 20 mm, 40 mmおよび60 mmの様々な大きさのバーナーを用いて、乱流燃焼実験を大気圧下から加圧下まで行った。その結果、乱れ強さと層流燃焼速度との比が同程度の条件においては、バーナーの出口直径が大きい条件の方が、すなわち火炎の代表スケールが大きい条件の方が乱流燃焼速度は大きくなる事が明らかとなった。球状に伝播する予混合乱流火炎の燃焼速度は、火炎が伝播するにつれて増大することが知られており、本研究で明らかにした定在火炎の乱流燃焼速度特性との間に関連性が見られた。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the effects of flame and turbulence scales on premixed combustion characteristics, turbulent combustion experiments were carried out using nozzle burners being outlet diameters of 14 mm, 20 mm, 40 mm and 60 mm under various mixture pressure conditions. Flame front structures were observed by OH-PLIF. The flame front wrinkling increased with an increase in burner outlet diameter. The turbulent burning velocity increased with an increase in turbulence intensity. In addition, it was clarified that the turbulent burning velocity also increased with an increase in the burner outlet diameter. Since the turbulent burning velocity of spherically propagating premixed turbulent flame increases with an increase in flame scale during flame propagation, the similar trend was also observed in the burner stabilized turbulent flame.

研究分野：燃焼工学

キーワード：予混合乱流燃焼 火炎のスケール 乱れのスケール 圧力 乱流 乱流燃焼速度

1. 研究開始当初の背景

乱流燃焼速度は予混合気の乱流燃焼特性のうち最も重要な因子の一つであるため、その解析や予測がこれまでに多く行われている。研究代表者はこれまで、ガソリンエンジン筒内における燃焼のような、球状に伝播する予混合乱流火炎の乱流燃焼速度特性について検討を行ってきた。その結果、非定常に伝播する予混合気の乱流燃焼速度は、火炎が伝播するにつれて増大することが明らかとなった。一方、従来の研究において、乱流燃焼実験の多くは、ノズルバーナーのような定常乱流火炎に対して行われたものが多く、このような形態の予混合乱流火炎から得られた乱流燃焼速度は、乱れ強さ、当量比や圧力などのパラメータに対して、ただ一つの値として定まる固有の値として求められている。このような定常・非定常乱流予混合火炎において乱流燃焼速度特性が異なる理由として、火炎と乱流渦の相対スケールが、火炎伝播中に変化するためであると考えられる。すなわち火炎面に乱れとして作用する乱れ強さが、火炎の大きさと共に変化しているものと考えられる。このような乱れ強さを、通常の乱れ強さと区別して、有効乱れ強さと呼ぶ。図1に有効乱れ強さの模式図を示す。

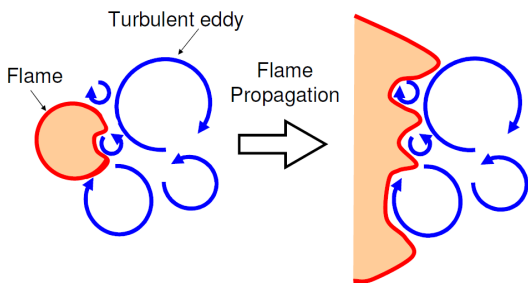


図1 有効乱れ強さの模式図

図1に示すように、同一の乱れ強さであっても、火炎の大きさの異なる場合、火炎面に乱れとして作用する乱れ強さは異なり、より大きなスケールの乱流渦までが火炎面に乱れとして作用するものと考えられる。

2. 研究の目的

以上のような背景から、本研究では、乱流火炎のスケールが変化した場合の乱流燃焼速度特性について明らかにすることを目的とする。実燃焼器においては高圧下での乱流燃焼が行われているため、高圧環境下における乱流燃焼特性ならびにスケール効果についても検討を行う。

3. 研究の方法

本研究ではノズルバーナー上に定在した予混合乱流火炎を対象とした。研究代表者が所属する研究室では、出口径 D_0 が 14 mm, 20 mm および 60 mm のバーナーを保有している。そこで本研究では、新たに出口径 $D_0 = 40$ mm のノズルバーナーを設計・製作した。

また、様々なスケールおよび強度の一樣乱流を形成するため、4種類の乱流発生板を製作した。乱流発生板の詳細を表1に、図2に40 mm バーナー用の乱流発生板詳細を示す。14 mm, 20 mm および 60 mm バーナーにおいても、並び、孔径、孔間隔はそれぞれ同様である。

表1 乱流発生板構造

名称	孔並び	孔径 (mm)	孔間隔 (mm)
A	千鳥	2.1	1.7
B	細密	3.5	3.6
C	細密	4.0	4.5
D	千鳥	3.5	3.5

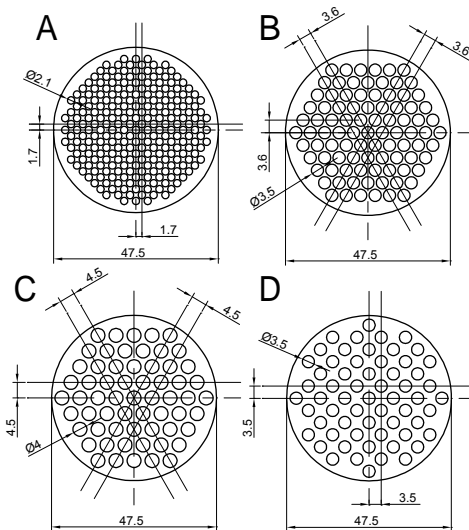


図2 乱流発生板構造

燃料には、イソオクタンおよびメタンを用いた。イソオクタンは常温で液体であるため、燃料蒸発装置により気化させ、予熱空気と混合させてバーナーへと供給した。イソオクタン空気予混合気およびメタン空気予混合気の乱流燃焼実験において、予混合気温度はそれぞれ 340 K, 298 K とした。高圧燃焼試験には、東北大学流体科学研究所の高圧燃焼試験設備を用いた。乱流特性は熱線流速計 (Dantec, Streamline) を用いて計測した。

火炎面構造を詳細に観察するために、OH-平面レーザー誘起蛍光計測 (OH-PLIF) を行った。OH-PLIF 画像はそれぞれの実験条件において 500 枚以上取得した。これから火炎境界を検出し、平均反応進行変数 $\langle c \rangle$ を求める。この等高線に基づき、 $\langle c \rangle = 0.1$ となる面を乱流火炎の平均火炎面として、この面の頂角および混合気流速から乱流燃焼速度 S_T を求めた。蛍光画像は ICCD カメラ (Andor, USB iStar) を用いて取得した。

4. 研究成果

4.1 乱流計測結果

図3および図4に大気圧下および3気圧の

条件における，乱れ強さ u' の主流平均速度 U_{mean} に対する変化を示す．ここで乱流計測には予熱を行っていない乾燥空気をを用いた．図3に示すとおり，乱流発生板 A を用いた際， u' と U_{mean} の間に比例関係が現れなかった．一方，それ以外の乱流発生板 B, C および D については u' と U_{mean} が概ね比例関係にあった．また，図4に示すとおり，乱流発生板の孔のパターン形状が同一の場合，バーナー大きさが変化した場合であっても，生成される乱れ強さは比較的近い．

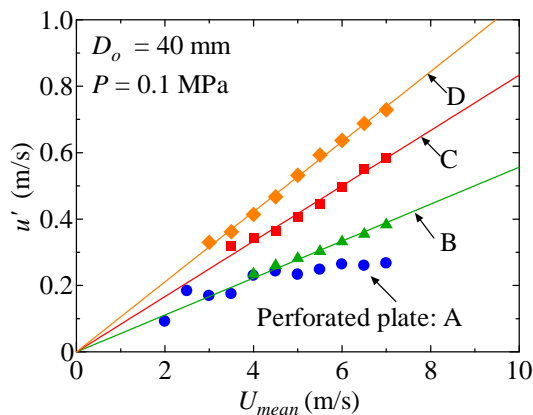


図3 $P = 0.1 \text{ MPa}$ での $D_o = 40 \text{ mm}$ バーナー乱流特性

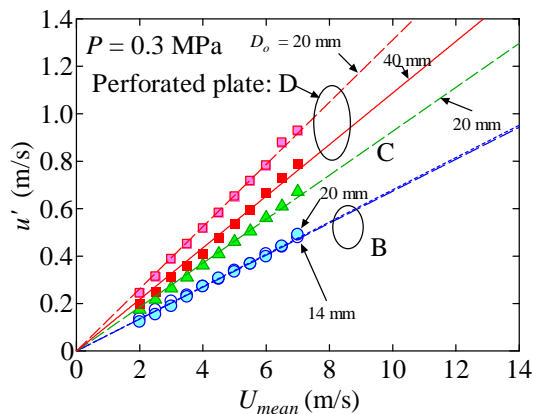


図3 $P = 0.3 \text{ MPa}$ 乱流特性

4.2 イソオクタン / 空気予混合気の乱流燃焼特性

まず，ガソリンを模擬する燃料の一つと考えられるイソオクタンを用いて，乱流燃焼実験を実施した．混合気圧力は 0.1 MPa ，当量比 ϕ は 0.8 から 1.4 まで変化させた．図4に，バーナー出口主流速 $U_{mean} = 3 \text{ m/s}$ におけるイソオクタン / 空気予混合乱流火炎の OH-PLIF 像を示す．ここで，図4aが当量比 $\phi = 0.8$ ，4bが $\phi = 1.4$ である．図に示すように，当量比が大きくなるにつれて，図4bのAの部分のような，未燃混合気が既燃部へ深く入り込んでいるカスプが数多く観察されるようになり，火炎面は複雑な形状を有するようになっ

た．このような未燃部に凹となっているカスプの先端付近においては蛍光強度が極めて低い．一方，図中のBで示すような，未燃側に凸になっている部分の傾向強度は強い．イソオクタン / 空気予混合気の Markstein 数は当量比が大きくなるにつれて小さくなり，特に $\phi = 1.4$ において Markstein 数は負の値となる．このことから，Markstein 数により表される熱 - 拡散効果のため，未燃部に凹になっている部分の火炎面は局所的に弱化したものと考えられる．一方で，Bの部分においては，正の火炎伸長率を有するため，火炎面が強化され，OH の蛍光強度も大きくなったものと考えられる．

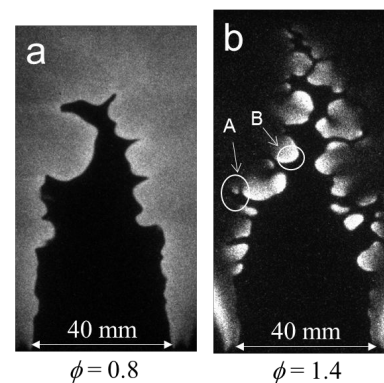


図4 イソオクタン/空気乱流予混合火炎の OH-PLIF 画像:(a) $\phi = 0.8$; (b) $\phi = 1.4$.

上述のような局所的な火炎面の弱化が生じた条件においては，正しく火炎面を評価することができなかった．そのため，乱流燃焼速度は $\phi \leq 1.0$ の条件でのみ求めることができた．図5に，同一の乱れ強さ u' の条件における，層流燃焼速度で無次元化した乱流燃焼速度 S_T/S_L の当量比 ϕ に対する変化を示す．

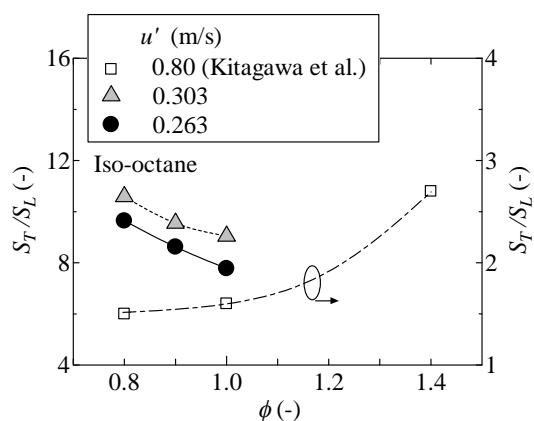


図5 S_T/S_L の当量比 ϕ に対する変化

図5に示すように， S_T/S_L の値は当量比が大きくなるにつれて小さくなった．これは乱流燃焼速度を求めることができた当量比範囲内においては，当量比が大きくなるにつれて

S_L が大きくなるため、火炎に相対的な乱れ強さ u'/S_L の値が小さくなっているためと考えられる。また図中には北川および古川[北川・古川, 第45回燃焼シンポジウム講演論文集, (2007) 364-365.]により求められた, イソオクタン/空気予混合気の球状伝播予混合乱流火炎から得られた S_T/S_L の値を示している。本研究で求めたノズルバーナーにおける実験より求めた S_T/S_L の値は, 球状伝播火炎の実験条件に比べて u' が半分以下であるにも関わらず, 4倍以上も大きな値となった。火炎面形状を球状伝播火炎とバーナー火炎とで比較した場合, バーナー火炎の方が複雑な火炎面形状を有していた。このことから, 乱流燃焼速度の差異は火炎面形状に起因しているものと考えられる。

4.3 メタン/空気予混合火炎の乱流燃焼特性に及ぼすスケール効果

4.2 節に述べたように, イソオクタンを燃料として用いた場合, 熱・拡散効果の影響によって, 当量比を幅広く変化させて乱流燃焼速度を求めるのが困難であることが分かった。そこで, メタンを燃料として用いて, 乱流燃焼速度特性に及ぼすスケール効果について検討を行った。メタンを燃料とした場合, 混合気温度は 298 K とした。出口径 14 mm のバーナーにおいては, 乱流発生板 C および D を用いた場合, バーナー出口流速分布が一様とならなかった。そのため, 14 mm バーナーによる乱流燃焼実験において, 乱流発生板 C および D は使用しなかった。

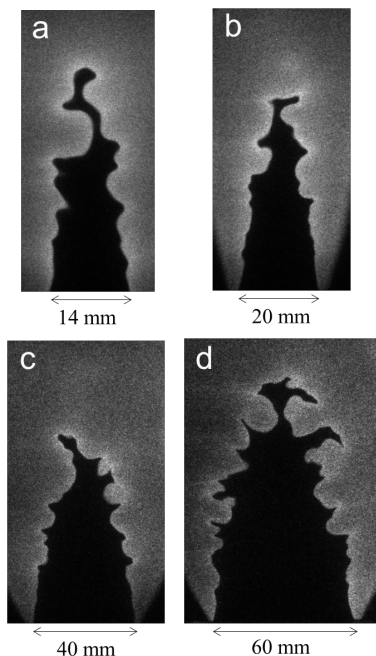


図6 $P = 0.1$ MPa におけるメタン/空気乱流予混合火炎の OH-PLIF 画像:(a) $D_o = 14$ mm; (b) 20 mm; (c) 40 mm; (d) 60 mm.

図6に $P = 0.1$ MPa におけるメタン/空気予混合乱流火炎の OH-PLIF 画像を示す。ここで図6aはバーナー出口直径 D_o が 14 mm, 6bが 20 mm, 6cが 40 mm, 6dが 60 mm のバーナーを用いた場合の画像である。図に示すように, バーナーの出口直径 D_o が大きくなるにつれて, 火炎面の形状は複雑になっていることが分かる。図7に, $P = 0.3$ MPa におけるメタン/空気予混合乱流火炎の OH-PLIF 画像を示す。ここで図7aはバーナー出口直径 D_o が 14 mm, 7bが 20 mm, 7cが 40 mm のバーナーを用いた場合の画像である。ここで図6および7は, 乱流発生板 B を用いた主流速 $U_{mean} = 3$ m/s の結果である。また, 図7cは乱流発生板 D を用いた主流速 $U_{mean} = 4.5$ m/s の条件において撮影したものである。40 mm バーナーを用いた 0.3 MPa の実験においては火炎のフラッシュバックのため U_{mean} を 4.5 m/s 以下にすることができなかった。図7aと7bを比較すると, バーナー直径の大きい図7bの方が, 火炎面形状が複雑となっているように見える。図6と図7を比較した場合, 圧力が高い条件の方が, 火炎面が複雑な形状となっていることが分かる。

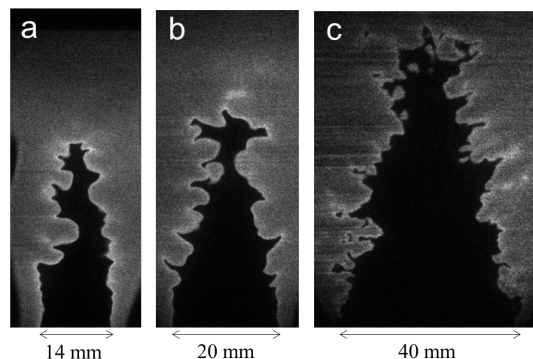


図7 $P = 0.3$ MPa におけるメタン/空気乱流予混合火炎の OH-PLIF 画像:(a) $D_o = 14$ mm; (b) 20 mm; (c) 40 mm.

図8に, 圧力 $P = 0.3$ MPa における S_T/S_L の u'/S_L に対する変化を示す。ここで層流燃焼速度 S_L は球状伝播層流火炎から求めた。

図に示すように, S_T/S_L の値は, u'/S_L が大きくなるにつれて大きくなった。また, 同一の u'/S_L で比較した場合, バーナー出口直径が大きいほど, すなわち火炎のスケールが大きいほど S_T/S_L の値は大きくなった。これは, 図6および7に示したとおり, バーナー出口直径が大きくなるにつれて, 火炎面形状が複雑になっているためであると考えられる。

球状に伝播する予混合乱流火炎の燃焼速度は, 火炎が伝播してそのスケールが大きくなるにつれて増大することが知られており, 本研究で明らかにした定在火炎の乱流燃焼速度特性との間に関連性が見られた。

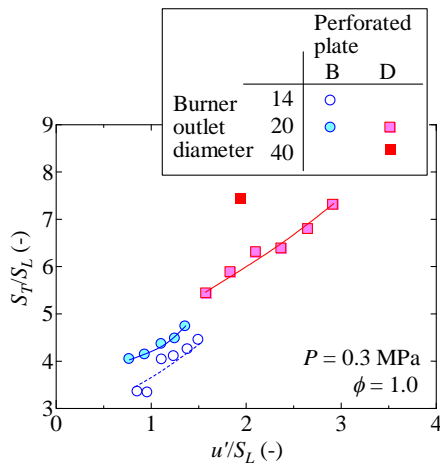


図8 S_T/S_L の u'/S_L に対する変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計0件)

[学会発表](計1件)

早川晃弘, 中島隼, 工藤琢, 小林秀昭, バーナー上に定在したイソオクタン空気予混合乱流火炎の燃焼特性, 第50回日本機械学会東北支部 第50回総会・講演会, 東北大学工学研究科・工学部 機械系講義棟(宮城県・仙台市), 平成27年3月13日

6. 研究組織

(1)研究代表者

早川 晃弘 (HAYAKAWA, Akihiro)
 東北大学・流体科学研究所・助教
 研究者番号: 90709156

(4)研究協力者

小林 秀昭 (KOBAYASHI, Hideaki)