

令和 6 年 4 月 10 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03910

研究課題名（和文）燃料濃度の時空間的変動スケールに着目した予混合火炎の燃焼特性に関する基盤研究

研究課題名（英文）Fundamental research on combustion characteristics of premixed flames focusing on spatial-temporal fluctuation scale of fuel concentration

研究代表者

末永 陽介（Suenaga, Yosuke）

岩手大学・理工学部・准教授

研究者番号：60413720

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：当量比の正弦波振動に対する希薄メタン空気・プロパン空気火炎の燃焼特性に及ぼすルイス数と選択拡散の影響を調査した。当量比の変動周波数は5～50Hzである。両火炎は5Hzにおいて準静的な振舞いを示す。20Hzにおいて、燃料の種類（混合気のルイス数）によって火炎のCHラジカル発光（発熱速度）の応答特性に違いが見られた。当量比変動振幅 a の増幅に対しプロパン火炎の中央で局所消炎と再着火が観察された。両火炎において完全消炎に至るまでに遅れ時間 τ が出現した。40Hzにおいて、 a の増幅率の増加に対し、メタン火炎とプロパン火炎の τ は、バックサポート効果のために変化することはなく、希薄可燃限界が拡大した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究における当量比の変動周波数は、5～50Hzであり、エンジン内の濃度変動をミクロ的な視点でとらえた場合、低い周波数域である。この周波数域において、濃度変動火炎に特有のルイス数効果と選択拡散効果が反応速度と比例関係にあるCHラジカル発光強度の応答に出現したことは発見である。また、プロパン火炎では火炎の中央に穴が開く局所消炎と再着火が観察されたのに対し、メタン火炎ではこのような局所消炎は見られなかった点は、濃度変動に対する壁面よどみ流や対向流予混合火炎の数値研究において捉えることができていない特筆すべき事項であり、燃焼学界における学術的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：The influence of Lewis number and selective diffusion on the combustion characteristics of lean methane/air and propane/air flames to sinusoidal oscillation of equivalence ratio was investigated. The oscillation frequency of the equivalence ratio was from 5 to 50 Hz. At 5 Hz, both flames exhibit quasi-static behavior. At 20 Hz, differences appeared in the response characteristics of CH radical emission (heat generation rate) of flame depending on the type of fuel (Lewis number of the mixture). At 20 Hz, local extinction and re-ignition were observed at the center of the propane flame when the equivalence ratio oscillation amplitude a was amplified. For both flames, a lag time τ appeared before the flame was completely extinguished. At 40 Hz, even if the amplification factor of a was increased, the τ of the methane and propane flames did not change due to the back support effect, and these lean flammability limit expanded.

研究分野：燃焼工学

キーワード：燃焼 予混合火炎 成層濃度場 火炎伝播 消炎 ルイス数効果 選択拡散効果 バックサポート効果

1. 研究開始当初の背景

自動車用エンジン等の燃焼器の低燃費化と CO₂ の排出抑制には、燃焼室内における緻密な燃料濃度分布の制御がカギとなる。本研究課題の目的は、ガソリンエンジン内の燃料濃度分布の非定常変化に対する予混合火炎の応答特性を理解することである。エンジン内の複雑な濃度分布を混合気流中の燃料濃度の正弦波振動によってモデル化し、濃度分布の非一様性と濃淡の程度は、濃度の変動周波数とその振幅によって制御する。燃料の多段噴射技術はエンジンの高性能化に有力な技術であるため、3 段噴射を模擬した周波数域までを研究対象とし、燃焼技術の深化に貢献できる知見を獲得する。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、ガソリンエンジン内の燃料濃度分布の非定常変化に対する予混合火炎の応答特性を理解することである。この目的を達成するため、混合気の供給流速を一定に保つことによって流れ場を単純化し、燃料濃度の変動周波数、平均濃度、濃度変動振幅、そして燃料の種類をパラメータに、系統的な実験と緻密なデータ解析を実施する。

3. 研究の方法

図 1 は混合気の供給系と混合気濃度の測定系の概略である。燃焼器は、先の著者らの研究において用いられたものと同じであり、濃度 (当量比) の変動が主流方向にのみ与えることができるように作られている。燃焼器の詳細は文献 (Suenaga et al., 2018) に記載されている。燃焼器は混合室と整流室からなる。主流混合気 (1 次空気+1 次燃料) の濃度と流量は一定であり、この主流混合気は混合室の下部から供給される。濃度変動を与えるために供給される 2 次空気と 2 次燃料は、同じ流量で供給される。2 次空気と 2 次燃料の流量をそれぞれ二組のスピーカを用いて交互に加振することにより、燃焼器出口における混合気濃度を正弦波的に振動させ、かつ混合気流速を一定に保つことができる。混合気は整流室において整流され、直径 20 mm の出口から燃焼場に供給された。火炎は、燃焼器出口から距離 20 mm に設置されたセラミック製よどみ壁に対して平行に形成された。燃焼器出口における混合気流速 U は 120 cm/s に保たれた。濃度変動周波数 f は、5 Hz から 50 Hz まで変化させられた。燃焼器出口における当量比 ϕ は $\phi = \phi_m + \phi_a \sin(2\pi ft)$ によって変化させられた。ここで、 ϕ_m は平均当量比、 ϕ_a は当量比変動振幅である。本研究では、燃料にメタンとプロパンを、酸化剤に空気を使用し、メタン火炎とプロパン火炎において、 ϕ_m はそれぞれ 0.85 と 0.8 に設定された。これらの ϕ_m は、 $U = 120$ cm/s における定常火炎の燃焼速度 Su_s (= 未燃ガス速度 u_g) を揃えるために選ばれ、いずれの Su_s も 40 cm/s であった。 ϕ_a は、いずれの火炎も 0.05 に設定された。消炎の様子を観察する際は、 ϕ_a を増幅させた。 ϕ_a の増幅率 IR は、 ϕ_a の増幅開始後の各周期における ϕ の最大値を直線近似し、無次元時間に対するその傾きとして定義される。本研究では、燃焼反応の活発さを評価するため、火炎の CH ラジカル発光強度 (\propto 発熱速度) を測定した。局所消炎する火炎の反応の活発さを評価するため、解析領域は燃焼器の中央を原点とし、半径を r 、軸方向を x としたとき、 $r = 10$ mm の範囲において r 方向に平均化された x 方向の CH ラジカル分布を得た。消炎しない火炎の応答特性を評価する場合、CH ラジカルの最大値の半値幅における CH の積分値を半値幅で除した値として CH ラジカルは評価された。消炎する火炎の応答については、CH ラジカル分布の最大値を用いた。

本報告書において、定常火炎を静的火炎、濃度変動を与えた火炎を動的火炎と呼ぶ。静的火炎と動的火炎の記号を区別するため、添え字にはそれぞれ s と d を付けた。

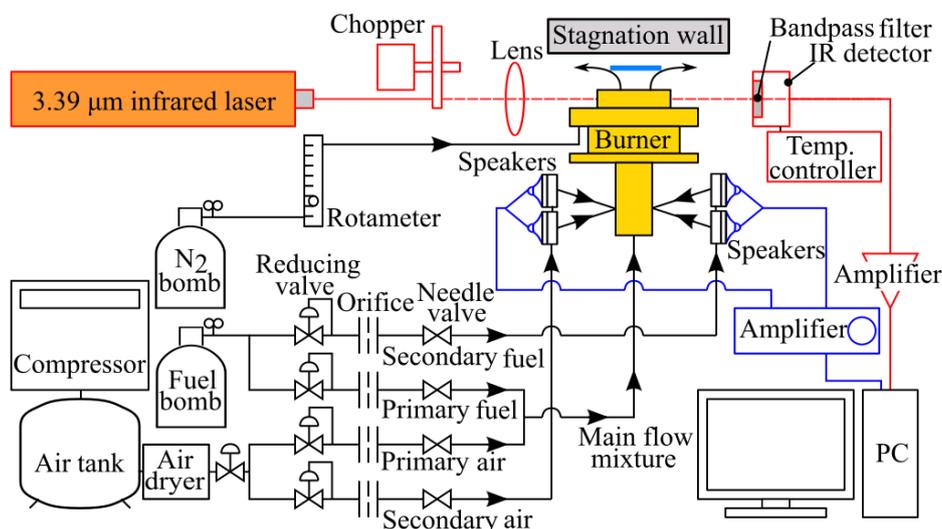


図 1 流路系, 混合気濃度測定系の概略

4. 研究成果

(1) CH ラジカル発光強度の周波数特性

図2 (a), (b) は、それぞれ動的メタン火炎と動的プロパン火炎のCH ラジカル発光強度 CH_d の周波数特性を示している。比較のために、同じ当量比の変化域における静的火炎のCHの最大値 ($CH_{s,max}$) と最小値 ($CH_{s,min}$) がそれぞれ破線で示されている。はじめに、動的火炎のCHの最小値 $CH_{d,min}$ の周波数特性について述べる。燃料の種類によらず、 $CH_{d,min}$ は、 f の増加とともに低下し、その値は $CH_{s,min}$ よりも低くなり、極小値をもつことがわかる。この $CH_{d,min}$ の周波数特性は、燃焼速度の周波数特性と類似していることを確認しており、濃度変動火炎特有の伝播性が弱まる現象がCH ラジカルの結果においても観察された。次に、動的火炎のCHの最大値 $CH_{d,max}$ の周波数特性について観察する。この周波数特性は燃料の種類によって大きく異なる。すなわち、動的メタン火炎の $CH_{d,max}$ は、 f の増加に対して増加し、その値は静的火炎の $CH_{s,max}$ を超え、極大値をとる。一方、動的プロパン火炎の $CH_{d,max}$ は、低い f において、静的火炎の $CH_{s,max}$ を超えることはなく、20 Hz を超えると単調に低下している。なお、燃焼速度の最大値の周波数特性は、燃料の種類によらず、メタン火炎の $CH_{d,max}$ と類似した傾向を示した。ここで、燃焼速度は火炎よりも上流側の流体力学的過程の影響を強く受けるのに対し、燃料消費速度は反応帯における化学的過程に依存することが報告されている (Poinsot et al., 1992)。よって、消費速度は発熱速度に関係することから、発熱速度と比例関係にあるCHに着目して議論を進めることにする。

はじめに、燃料の種類によらず、 f の増加に対して、 $CH_{d,min}$ が $CH_{s,min}$ より低くなる原因について考察する。ルイス数効果の観点から、動的プロパン火炎の $CH_{d,min}$ は、動的火炎の直前における速度勾配 (\propto 火炎伸長率) g の最小値 $g_{d,min}$ が、 f の増加とともに静的火炎の g の最小値 $g_{s,min}$ よりも低くなるため、動的プロパン火炎の $CH_{d,min}$ は増加すると考えられた。しかし、図2より、動的プロパン火炎の $CH_{d,min}$ は、動的メタン火炎と同様に、 f の増加に対して低下している。ここで、 g の低下によって、火炎直前の不足反応物質の濃度勾配もまた小さくなり、火炎への不足反応物質の流入質量流束が、静的火炎の場合よりも減少することが予想される。よって、燃料の種類によらず、 $CH_{d,min}$ が f の増加とともに低下したのは、 $g_{d,min}$ の減少とともに、ルイス数効果よりも、火炎への流入質量流束の減少による火炎を弱める効果が大きく現れたことが原因であると考えられる。このことが当量比の変動域が希薄可燃限界以上においても、濃度変動火炎特有の火炎の伝播性が弱くなる現象を発生させていると考えられる。

次に、 f の増加に対して、動的メタン火炎の $CH_{d,max}$ が $CH_{s,max}$ よりも大きくなるのに対し、動的プロパン火炎の $CH_{d,max}$ が $CH_{s,max}$ を超えることはなく、単調に減少した原因について考察する。 $g_{d,max}$ は、 f の増加に対して増加し、その値は $g_{s,max}$ よりも高くなることを確認している。よって、 f の増加とともに火炎伸長によるルイス数効果が強く現れることになる。5 Hz において、 $CH_{d,max}$ と $g_{d,max}$ が得られる時刻はほぼ同じであり、 $g_{d,max}$ の値は静的火炎とほぼ同じである。 f が大きくなると、 $g_{d,max}$ は $CH_{d,max}$ が得られる時刻よりも前であり、 $g_{d,max}$ が高くなることがわかっている。したがって、動的メタン火炎では、 f の増加に対して、 $g_{d,max}$ が増加するため、ルイス数効果による火炎強化と、不足反応物質の火炎への流入質量流束の増加による火炎強化の効果が出現する。この二つの火炎を強化する効果によって、20 Hz における $CH_{d,max}$ が $CH_{s,max}$ よりも大きくなったと考えられる。一方、動的プロパン火炎では、 f の増加に対する $g_{d,max}$ の増加は、ルイス数効果による火炎の弱化と、不足反応物質の火炎への流入質量流束の増加による火炎強化の効果をもちあわす。この火炎弱化と火炎強化の二つの効果が競合し、 $CH_{d,max}$ は $CH_{s,max}$ を超えることがなかった。動的メタン火炎と動的プロパン火炎に共通して、 f が 40 Hz を超えると、 $CH_{d,max}$ が低下し、 $CH_{d,min}$ が増加するのは (すなわち、 CH_d の変動振幅が減衰するのは)、燃焼器出口における当量比の変動振幅は、下流に移動するにつれて減衰し、その減衰の程度は f の増加に対して顕著になるためである。

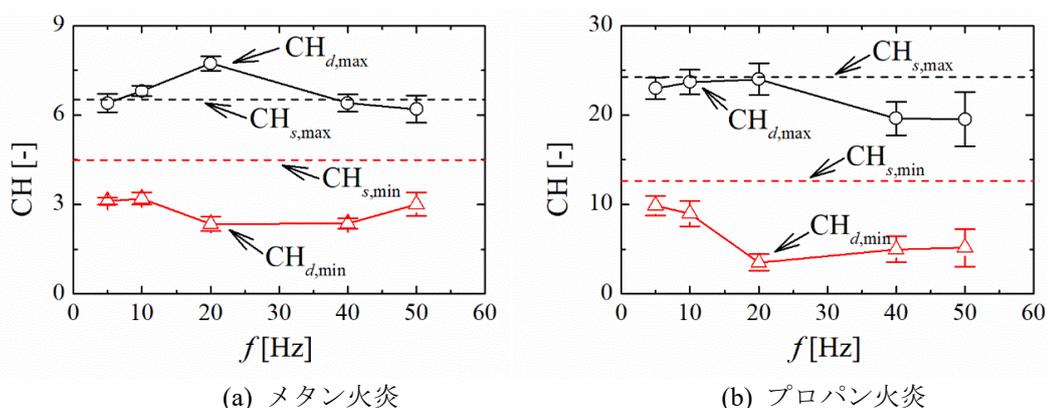


図2 CH ラジカル発光強度の周波数特性

(2) 消炎の様子

5 Hz において、燃料の種類によらず、当量比の変動振幅 ϕ_a を増幅させる過程で、完全消炎直前において、動的火炎に流入する混合気の当量比が低下していくと、火炎は平面形状を維持し、下流へ移動しながら消炎した。

20 Hz において、燃料の種類による影響が見られた。動的メタン火炎は、平面形状を維持し、上流・下流へと周期的に移動し、CH ラジカル発光強度も周期的に変化する。この周期的変化の過程において、CH ラジカル発光が観察できないほど弱くなり、やがて完全消炎に至った。一方、動的プロパン火炎は、図 3 に示されるように、火炎中央に穴が開く局所消炎が観察された。

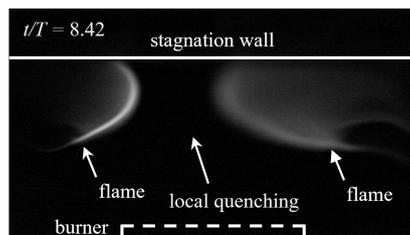


図 3 動的プロパン火炎の局所消炎の様子

このような局所消炎が、プロパン火炎にのみ観察された主な原因は、ルイス数効果によるものと考えられる。この局所消炎部に可燃範囲内の混合気が近づくと再着火し、この局所消炎と再着火が完全消炎するまでに複数回繰り返される。また、一度火炎の中央に穴が開くと、プロパンと酸素の拡散係数が大きく異なるため、火炎面に流入する混合気の濃度は選択拡散効果によって非一様となり、火炎形状は複雑化した。また、流れ場計測の結果、中央に穴が開くことによって、流れ場も複雑化しており、このことも火炎形状の複雑化に影響していると考えられる。40 Hz における火炎の振舞いは 20 Hz のそれと類似していた。

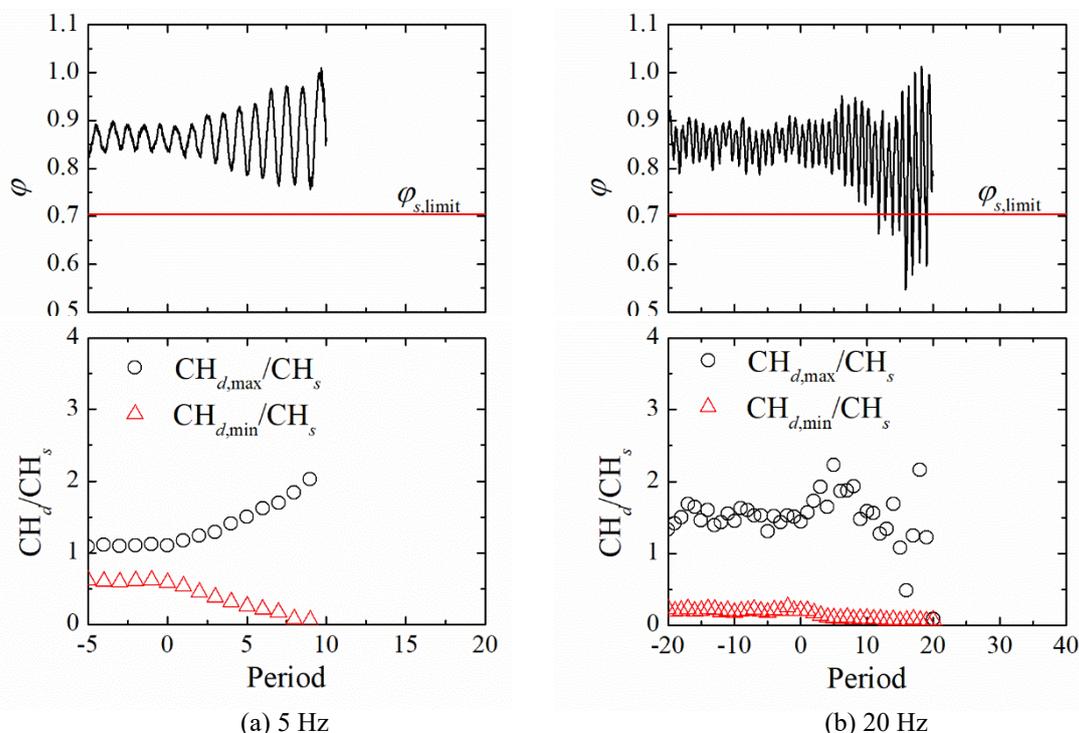


図 4 動的メタン火炎の当量比 ϕ と、平均当量比 ϕ_m における静的火炎の CH ラジカル CH_s に対する各周期の CH の最大値 $CH_{d,max}$ と最小値 $CH_{d,min}$ の時間変化

(3) 消炎特性

図 4 (a), (b) は、それぞれ 5 Hz と 20 Hz における動的メタン火炎の燃焼器出口における当量比 ϕ と、各周期における動的火炎の CH ラジカル発光強度 CH_d の最大値と最小値を平均当量比 ϕ_m における静的火炎の CH_s でそれぞれ除した $CH_{d,max}/CH_s$ と $CH_{d,min}/CH_s$ の時間変化を示している。当量比の変動振幅 ϕ_a の増幅率 IR は 0.01 である。横軸は周期（無次元時間）であり、0 は ϕ_a の増幅の開始時刻である。図 4 (a) の 5 Hz において、 ϕ_a を増幅させると、 $CH_{d,max}/CH_s$ は単調増加、 $CH_{d,min}/CH_s$ は単調減少し、CH の変動振幅が大きくなる様子がわかる。そして、 ϕ が静的火炎の希薄可燃限界 $\phi_{s,limit}$ 付近に達すると、火炎は速やかに完全消炎した。この傾向はプロパン火炎でも同様であった。よって、5 Hz における火炎の振舞いは、準静的であることがわかった。

図 4 (b) の 20 Hz において、 ϕ_a を増幅させると、 $CH_{d,max}/CH_s$ もまた増加するが、およそ 5 周期目以降から、ばらつきはあるものの、その値は低下しているように見える。ここで、5 周期目における ϕ は $\phi_{s,limit}$ に達していない。しかし、 $CH_{d,min}/CH_s$ はゼロ付近まで低下している。このことから、 ϕ が低下する過程において、火炎に流入する不足反応物質の流入質量流束が静的火炎の場合よりも減少し、濃度変動火炎に特有の燃焼反応を弱める効果が出現していることがわかる。

火炎が完全消炎する時刻は、 ϕ が $\phi_{s,limit}$ に到達してから 8 周期後であり、 f を 20 Hz まで増加させることによって、希薄可燃限界が拡大していることを意味する。この希薄可燃限界の拡大の様子は、動的プロパン火炎においても観察され、周波数のより高い $f=40$ Hz においても観察された。

図 5 (a), (b) は、それぞれ 20 Hz と 40 Hz の各周期における動的メタン火炎の $CH_{d,min}/CH_s$ の周期（無次元時間）に対する変化を示している。 ϕ_a の増幅率 IR をパラメータとしている。20 Hz において、 IR を増加させると、 $CH_{d,min}/CH_s$ がゼロとなるまでの周期は短くなっている。しかし、40 Hz においては、 IR を増加させても、その周期はほとんど変化していない。このことは、動的プロパン火炎においても観察されており、 f を 40 Hz まで増加させると動的火炎に作用する back support 効果が強く表れ、希薄可燃限界がさらに拡大することを意味している。

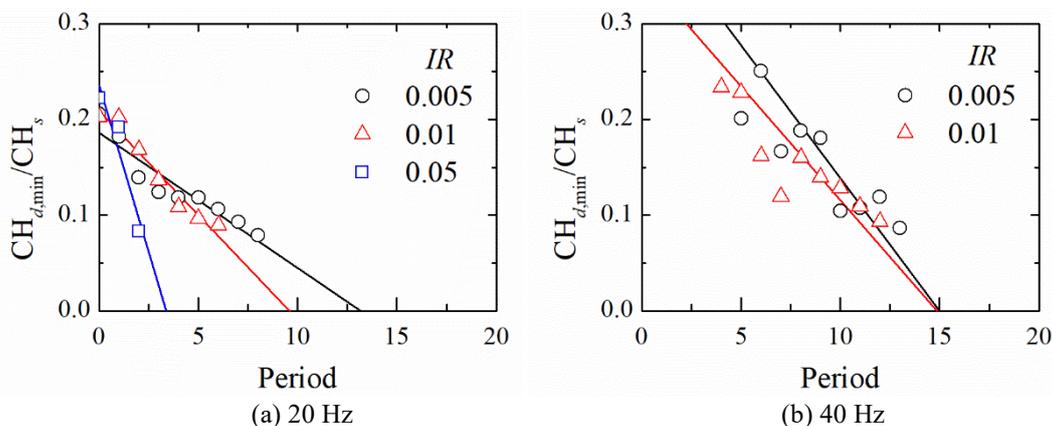


図 5 動的メタン火炎の CH ラジカル比 $CH_{d,min}/CH_s$ の時間変化。 IR は当量比振幅の増幅率。

(4) まとめ

当量比の正弦波振動に対する壁面よどみ流予混合火炎の燃焼特性に及ぼすルイス数効果と選択拡散効果の影響が調査された。希薄メタン空気火炎と希薄プロパン空気火炎を研究対象とした。当量比の変動周波数 f は 5 Hz ~ 50 Hz の範囲で変化させた。平均当量比 ϕ_m は、メタン火炎とプロパン火炎において、それぞれ 0.85 と 0.8 に設定された。これらの当量比は、定常火炎（静的火炎）において、燃焼速度が等しくなるように選ばれた。当量比 ϕ は、燃焼器出口において正弦波的に変動させられた。当量比の変動振幅 ϕ_a はすべての場合において 0.05 とした。ただし、消炎特性の調査においては、 ϕ_a を増幅させて火炎を完全消炎させた。

動的メタン火炎と動的プロパン火炎の CH ラジカル発光強度の最小値から、変動周波数の増加とともに、濃度変動火炎に特有の燃焼反応が弱まる現象が見られた。これには火炎直前の速度勾配の減少とともに濃度勾配も減少することによる、火炎への反応物の流入質量流束の減少効果が出現していると考えられる。一方、CH ラジカルの最大値は、ルイス数効果によって、異なる周波数特性を示した。 ϕ_a を増幅させることによって消炎特性を調査し、5 Hz のような低周波数において、静的火炎の燃焼特性に類似した準静的な振る舞いが観察された。 $f=20$ Hz において、プロパン火炎の中央に穴の開く局所消炎と再着火が観察された。また、燃料の種類によらず希薄可燃限界が拡大することが明らかとなった。 $f=40$ Hz において、 ϕ_a の増幅率 IR の影響が見られ、 IR を増加させると希薄可燃限界がさらに広がることがわかった。

参考文献

- Suenaga, Y., Yanaoka, H., Kikuchi, M. and Kikuchi, T., Dynamic response of wall-stagnating lean methane-air premixed flame to equivalence ratio oscillation, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.13, Issue 1 (2018), Pages JTST0005. doi: 10.1299/jtst.2018jtst0005.
- Poinsot, T., Echekki, T. and Mungal, M.G., A study of the laminar flame tip and implications for premixed turbulent combustion, *Combustion Science and Technology*, Vol.81 (1992), pp.45-73. doi: 10.1080/00102209208951793.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 妹尾翔平, 末永陽介, 柳岡英樹, 庭田孔明
2. 発表標題 周期的当量比変動に対する伸長平面予混合火炎の応答特性に及ぼすルイス数効果
3. 学会等名 日本機械学会東北支部第58期秋季講演会
4. 発表年 2022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
---------	---------