

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560219

研究課題名(和文)低カロリーガスによるエクセルギー保持燃焼：国際安全規格準拠の超小型燃焼器の開発

研究課題名(英文)Combustion of low-calorie gases under low exergy loss conditions: Development of combustors based on the international safety standards

研究代表者

門脇 敏(KADOWAKI, Satoshi)

長岡技術科学大学・その他の研究科・教授

研究者番号：20185888

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：メタン/酸素/二酸化炭素混合気を取扱い、セル状火炎の形状とゆらぎを調べた。当量比が低下すると、セル幅と深さは大きくなった。これは、拡散・熱的不安定性の強度が高くなったためである。加えて、発光のゆらぎに関する時系列解析を遂行した。得られたアトラクターはトーラス状で、その軌道は低当量比において複雑となった。さらに、数値シミュレーションを遂行し、三次元セル状火炎の特性を精査した。未燃ガス温度が高くなると、増幅率は増大した。一方、火炎面は滑らかになったが、これは熱膨張の効果が弱くなったためである。

研究成果の概要(英文)：We treated CH₄/O₂/CO₂ mixtures to study the front shape and fluctuation of cellular flames. As the equivalence decreased, the cell width and cell depth became larger, which was due to the high intensity of diffusive-thermal instability. In addition, we performed the time series analysis on the brightness fluctuation. The obtained attractors were similar to the torus, and the trajectory was complicated at low equivalence ratios. Moreover, we performed numerical simulation to study the characteristics of three-dimensional cellular fronts. As the unburned-gas temperature became higher, the growth rate increased. On the other hand, the shape of cellular fronts became smoother, which was due to the weakness of thermal-expansion effects.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：熱工学 燃焼診断 エクセルギー 安全確認型

1. 研究開始当初の背景

社会全体として合理的なエネルギー利用体系を築く観点から、燃焼によるエネルギー変換時のエクセルギー損失を抑制する術が注目されている。燃焼は本質的に不可逆であり、そのプロセスにおける一定のエクセルギー損失は不可避である。しかし、常温の反応物をそのまま燃焼させるのではなく、燃焼の前にその温度を上昇させることで、燃焼プロセスにおけるエクセルギー損失を大幅に低減することが可能である。このような燃焼の例として、超過エンタルピー燃焼や高温空気燃焼が挙げられる。超過エンタルピー燃焼は熱再循環を伴う燃焼であり、通常よりも低い燃料濃度の混合気を燃焼させることができる。また、高温空気燃焼は熱再循環と物質再循環を併用するものであり、燃焼前温度が高く酸素濃度が低いガスによる特殊な燃焼が実現されている。未燃ガス温度を高くして混合気を燃焼させる手法は、エクセルギー損失の低減に直結する。つまり、燃焼ガスと未燃ガスの温度差を小さくすることにより、燃焼プロセスにおけるエクセルギー損失を大幅に低減することが可能となる。つまり、有効エネルギーを高効率で取り出すことができる。従って、この手法の開発は省エネルギーに直接的に貢献することになる。

新たな燃焼手法を開発する上で、最も配慮すべき点は安全の確保である。これまでに、安全を確保するための技術が数多く開発されている。しかし、従来の技術の多くは危険検出型であるので、安全は必ずしも確保されていないのが現状である。充分安全なシステムを構築するためには、安全確認型の考えを取り入れる必要がある。これは、安全情報によるインターロックシステムであり、安全であることを確認して安全情報を受け取るときのみ、実際の行動命令を発して作業を続行するものである。安全を確認するセンサーの故障や情報を伝達する通信装置の故障などで安全情報が伝わらない場合、機械の行動命令は実施されない(安全側故障)。つまり、安全確認型では、何らかの故障が生じても、安全は常に確保される。一方、危険検出型では危険側故障が生じる可能性がある。従って、安全の確保には安全確認型の採用が必須である。

国際安全規格は、安全確認型の考えをベースとしており、次の三つの体系から構成されている。つまり、タイプA規格(基本安全規格)、タイプB規格(グループ安全規格)、タイプC規格(個別安全規格)である。国際安全規格の中で最も基本となるのがタイプA規格である。これに対応する規格としては、ISO-12100(機械類の安全性-設計のための基本概念、一般原則)とISO-14121(機械類の安全性-リスクアセスメントの原則)が存在する。特に、ISO-12100は燃焼器などの機械類を設計する上で必須の規格となっている。この規格は、二つのパートから構成され

ている。第一部は、基本用語・方法論であり、機械類を設計する際および機械類の安全規格を開発する際、従うべきあらゆる基本的な方法論が示されている。第二部は、技術原則であり、利用可能な技術を用いて安全原理を如何に適用することができるかについての助言を与えている。本燃焼装置は、これらの国際安全規格に準拠して設計・製作を行う。燃焼装置に対するリスクアセスメントを遂行した後、許容可能なリスクとなるよう、リスク低減方策を3ステップの原則に基づいて行う。具体的には、ステップ1:本質的安全設計方策、ステップ2:安全防護および付加保護方策、ステップ3:使用上の情報である。充分なリスク低減方策を施し、全てのリスクが許容可能となる装置にする。低カロリーガスを用いるエクセルギー保持燃焼では、火災は不安定に成り易いことが知られている。それゆえ、安全を確保するためには、燃焼システムを安全にコントロールする術を確立し、国際安全規格に準拠した設計・製作を行う必要がある。

2. 研究の目的

低カロリーガスを燃料とし、その温度上昇後に燃焼させる手法は、新しい燃焼技術の一つになることが期待される。本システムの応用例は枚挙に暇が無く、バイオメタンガスの有効利用に止まらず、地震などの非常時におけるエネルギー源としての使用などが考えられる。つまり、今後の低炭素社会の構築および安全安心社会の構築に大きく貢献するものである。

本研究では、未利用バイオマスの有効利用とエネルギーの高効率利用を目的として、低カロリーガスを取り扱い、燃焼特性の解明とシステムの構築を図る。燃焼装置の設計・製作は、安全確認型の考えをベースとしている国際安全規格に準拠して行い、システムの安全を確保する。また、数値計算を遂行し、未燃ガス温度が燃焼現象に及ぼす影響を精査する。本研究は、バイオメタンガスを安全に有効利用する技術に繋がり、今後の低炭素社会と安全安心社会の構築に大きく貢献するものである。

3. 研究の方法

(1) 実験

本研究では、メタン・空気混合気および二つのタイプのメタン・酸素・二酸化炭素混合気(Type-1 & Type-2)を取り扱う。メタン・空気混合気では記号A、Type-1では記号B、Type-2では記号Cを用いる。記号A、B、Cの後の数値は当量比を示すものである。

図1は本研究で用いた実験装置であり、フラットバーナーの概略が示されている。メタン・空気混合気、またはメタン・酸素・二酸化炭素混合気が、フラットバーナー(LAVISION)下部から流入する。直径60mmの多孔質板(焼結金属製)上に、セル状また

は平面状の予混合火炎が形成される．予混合火炎はデジタル一眼レフカメラ (CANON, EOS Kiss Digital X) で撮影する．火炎のゆらぎの測定には, フォトダイオード (浜松ホトニクス, S1223-01) を用いる．フォトダイオードの前方に干渉フィルター (光伸光学工業, BWBE431) を置き, CH 発光を受光する．火炎からの CH 発光の照度変化を電流変化として取り出し, 電流 / 電圧変換アンプ (浜松ホトニクス, C9329) を介してデータ収集装置 (KEYENCE, NR-600) に取り込む．サンプリング周波数は 500Hz, 測定時間は 262.144s である．

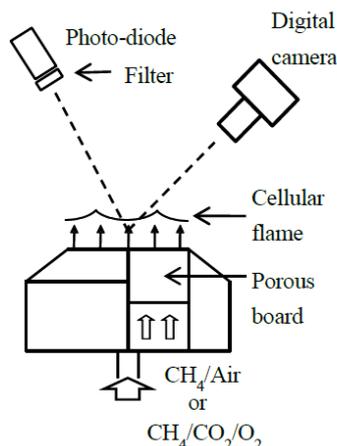


図1 フラットバーナーの概略

(2) 数値計算

本数値計算では, 未燃ガス中の燃料濃度は充分低く, 化学反応は主に燃料濃度に依存し, 酸化剤などの濃度には依存しないものとする．そして, 化学反応は一段不可逆の発熱を伴う反応で, 反応速度はアレニウスの法則に従うものとする．また, ガスは理想気体の状態方程式を満たし, その輸送係数と比熱は全領域で一定であるとする．外力, ソレ効果, デュフル効果, 圧力勾配拡散, 体積粘性, および熱損失は無視する．燃焼による熱膨張の効果 (固有不安定性における流体力学効果) を考慮するために, 支配方程式として, 化学反応を含む三次元圧縮性ナビエ・ストークス方程式を採用する．デカルト座標を用い, ガスの主流方向を x 方向とし, 火炎面を y-z 面とする．

計算スキームとして, 時間および空間の両方において二次精度をもつ陽的マッコーマック法を用いる．計算領域としては, x 方向へは予熱域厚さの 200 倍, y-z 方向へは擾乱の一波長分とする．格子数は 1001 × 65 × 65 とする．計算領域の上流側と下流側では, 流れ変数の x 方向の勾配を零とする．なお, 未燃ガスの流入速度は平面火炎の燃焼速度と一致させる．また, y-z 方向の境界では, 周期境界条件を用いる．分散関係とセル状火炎の計算では, 定在の平面火炎の上に, y-z 方向に周期的な正弦波状の擾乱を加え, それを

初期条件として計算を遂行する．擾乱の初期振幅の値は, 分散関係の計算では 0.1 とし, セル状火炎の計算では 1.0 とする．

4. 研究成果

(1) 実験

図 2 は, メタン・空気混合気 (A-0.66 & A-0.70), メタン・酸素・二酸化炭素混合気 Type-1 (B-0.76 & B-0.90), Type-2 (C-0.90 & C-1.00) における火炎の直接写真である．当量比が減少すると, セル状火炎のセル幅は大きくなる．これは, 拡散・熱的不安定性が顕著になるからである．また, メタン・空気混合気の場合と比較すると, メタン・酸素・二酸化炭素混合気では, メタン流量が多い条件下においてセル状火炎が観察される．さらに, Type-1 より Type-2 の方がセル幅は大きくなっている．

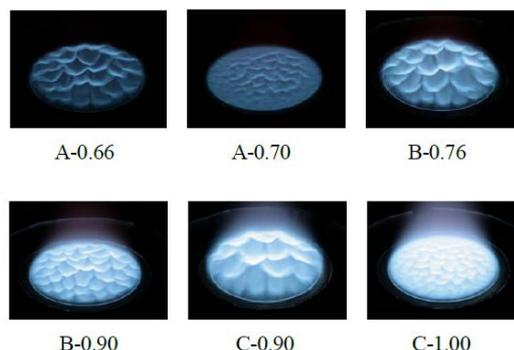


図2 セル状火炎の直接写真

セル状火炎のゆらぎの特性を調べるために, 発光強度の時系列データをその平均値で標準化し, FFT 変換してパワースペクトルを求める．図 3 は, 発光強度のパワースペクトルを示したもので, 周波数 f_1 および f_2 でピークが生じている．このとき, f_2 は f_1 の二倍の周波数と一致しているのので, 前者は後者の調和周波数に対応しているものと考えられる．また, メタン・空気混合気の場合と比較すると, メタン・酸素・二酸化炭素混合気では, f_1 や f_2 より高周波数域に多くの成分が含まれている．これは, セル状予混合火炎がより複雑にゆらいでいるためと推察される．

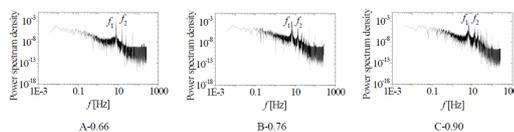


図3 発光強度のパワースペクトル

標準化した発光強度の時系列データに対して, カオス時系列解析で用いられている手法を適用し, アトラクターを再構成する．アトラクターの再構成には, Takens の埋め込み定理を採用する．遅れ時間を用い, 三次元の遅延座標において構成されるベクトルを生

成して、アトラクターを再構成する。図4は、各条件下におけるアトラクターを示したものである。全てのアトラクターは準周期的な振る舞いを示すトーラス形状を保持している。そして、メタン・酸素・二酸化炭素混合気では、アトラクターの形状が複雑になっている。このことは、軌道がより不安定になっていることを示している。

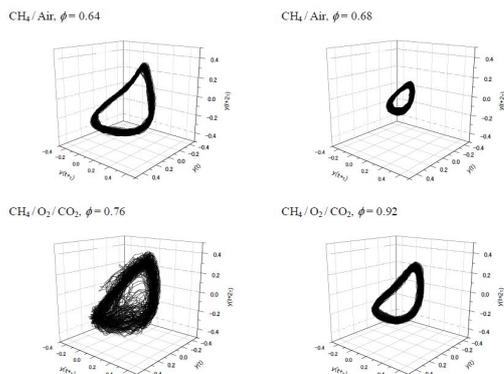


図4 アトラクター

(2)数値計算

図5は、平面火炎の速度分布と温度分布を示したものである。未燃ガス温度が高くなると共に、燃焼速度が大きくなることから分かる。

図6は、二次元および三次元火炎における分散関係を示したものである。未燃ガス温度が高くなると、増幅率は増大する。これは、燃焼速度が大きくなるからである(図5参照)。また、増幅率が最大となる波数(特性波数)が存在し、その値は未燃ガス温度が変化しても不変である。このことは、固有不安定性に起因するセルの大きさが未燃ガス温度に依存しないことを示している。また、波数が十分小さい領域では、理論解析により求められた増幅率と波数の関係とほぼ一致している。

図7は、火炎面形状を示したものである。セル状の火炎面が形成されており、実験で観察される形状と定性的に一致している。

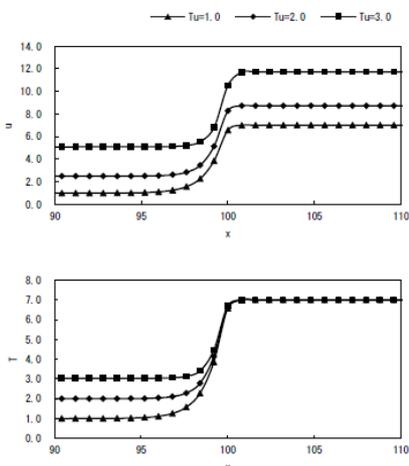


図5 平面火炎の速度分布と温度分布

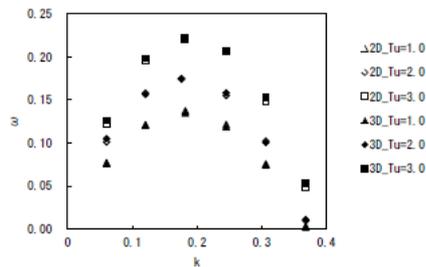


図6 分散関係

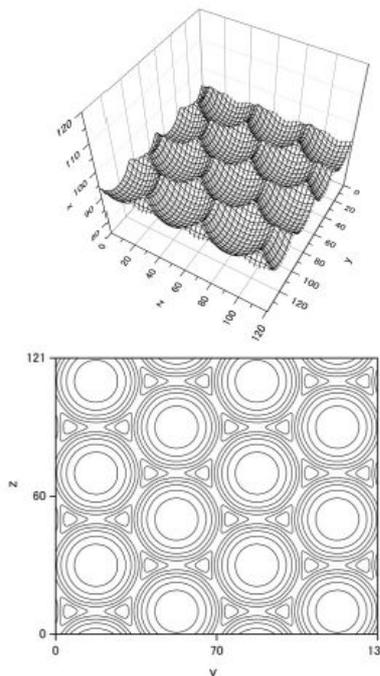


図7 火炎面形状

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

Kadowaki, S. and Ohashi, H., Shape and fluctuation of cellular premixed flames: lean combustion system of CH₄/O₂/CO₂ mixtures, Journal of Visualization, Vol. 16, pp. 5-8, (2013).

Kadowaki, S., Oshima, T., and Kobayashi, H., Numerical study on the intrinsic instability of high-temperature premixed flames under the conditions of constant density and constant pressure in the unburned gas, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 8, pp. 233-246, (2013).

〔学会発表〕(計2件)

Kadowaki, S., Aoki, Y., Yamazaki, W., and Kobayashi, H., Numerical study on the hydrodynamic instability of high-temperature premixed flames: Formation of three-dimensional cellular fronts, Proceedings of the 9th Asia-Pacific Conference on Combustion, CD-ROM, p. 184, 2013年5月, 慶州(韓国).

大橋, 目崎, 山田, 門脇, フラットバーナー上に形成されるセル状火炎のレーザー計測, 熱工学コンファレンス 2011, 2011年10月, 浜松市.

〔その他〕

ホームページ等

<http://mcweb.nagaokaut.ac.jp/~kadowaki/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

門脇 敏 (KADOWAKI, Satoshi)

長岡技術科学大学・技術経営研究科・教授

研究者番号: 20185888