

報告番号	※ 乙 第 7126 号
------	--------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 数値解析による燃料希薄メタン-空気予混合火炎の火炎構造と支配パラメータの解明

氏 名 林 直樹

論 文 内 容 の 要 旨

近年、地球温暖化や大気汚染が大きな問題となっている。地球温暖化の主要な原因とされている温室効果ガスの代表例として挙げられるのが二酸化炭素である。二酸化炭素の排出要因において、自動車などの内燃機関や工場、発電所などにおける燃焼機器が占める割合は大きい。そのため、これらの燃焼機器の効率の向上を行うことで、燃料の消費を抑え、二酸化炭素の低減を行うことは非常に重要である。燃焼は大きく分けて予混合燃焼と非予混合燃焼(拡散燃焼)に分けられる。このうち予混合燃焼は、燃料と酸化剤の混合比を変えることでNO_x やすすなどの大気汚染物質を低減可能である。特に燃料希薄予混合火炎は、大気汚染物質の低減に加え、燃焼を利用した熱機関の燃費の向上にも役立つ。そこで、本研究では特に燃料希薄予混合火炎に着目し、その基礎的な火炎特性や火炎の反応場のモデリング手法の検討を行った。

メタン-空気予混合火炎は最も基礎的な炭化水素燃料として広く基礎研究および実用研究に用いられてきた。その一方で、燃料希薄メタン-空気予混合火炎の Lewis 数が 1 に非常に近いことから、様々な研究において Lewis 数が 1 の火炎として扱うのか、1 より小さい火炎として扱うのかあいまいな場合がある。そこで、本研究では、燃料希薄メタン-空気予混合火炎の火炎構造に与える種々の物理量の影響を明らかにすることを第一の目的とし、特に、混合気の輸送係数、火炎伸長、火炎の非定常性に着目した。また、対向流火炎は火炎伸長を受ける火炎の代表例であるが、この対向流予混合火炎では流れ場を基に”燃焼速度”を明確に定義することが困難である。一方、数値シミュレーションで算出可能な反応物消費速度であれば対向流火炎においても算出可能である。そこで、本研究では燃料や酸化剤の質量生成速度の積算値を基にした燃焼速度を算出し、それらの火炎伸長率に対する応答について明らかにした。

乱流燃焼のモデル化の手法の一つとして、Laminar flamelet model に基づく組み合わせ手法がある。この手法は Laminar flamelet model による「乱流火炎の瞬間の局所的な構造は層流火炎によって模擬できる」という考え方にに基づき、多次元の複雑な流れ場は単純な反応機構を用いて計算し、単純な反応機構では考慮されていない化学種の分布や生成速度等

はそれに対応する単純な流れ場に対して詳細な反応機構を用いて計算を行い、両者を再結合パラメータにより結びつけることにより計算を行うというものである。この組み合わせ手法における再結合パラメータとして最も適切な物理量を把握することを第二の目的とした。特に現在のモデリングにおいて火炎の非定常性があまり考慮に入れられておらず、火炎がその瞬間において準定常であるという条件が必要となる場合が多い。そこで、非定常火炎を対象にその瞬間の火炎構造を支配するパラメータを明らかにした。最後に、実際の乱流燃焼場を火炎面に凹凸を持つ非定常火炎として模擬し、局所の火炎構造を反映する局所燃焼速度と乱流燃焼場全体の燃焼強度を反映する乱流燃焼速度について考察した。

まず第1章では本研究の背景、目的、既往の研究について述べた。第2章では本研究で用いる基礎方程式について述べ、数値解析手法についてまとめた。第3章では、本研究で用いた熱力学定数と輸送係数、さらに、3種の化学反応機構について述べ、それらの比較を行った。

第4章、第5章では主に、第一の目的である燃料希薄メタン-空気予混合火炎の火炎構造に与える種々の物理量の影響について明らかにした。第4章では基礎的な流れ場である火炎伸長のない平面一次元予混合火炎を用い、混合気の有効熱伝導率や各化学種の有効拡散係数と火炎構造の関係について検討を行った。層流燃焼速度は、熱伝導率が大きくなると大きくなり、拡散係数が大きくなると小さくなる。また、ルイス数一定の条件下で熱と物質の拡散係数を大きくすると、層流燃焼速度は大きくなるという結果が得られ、その依存性は定量的にLawらによって改良された熱理論から推測される結果とほぼ一致することが数値解析により確認できた。これらの輸送係数を変化させた場合における火炎構造の変化については、断熱火炎温度は変化しないが、火炎帯における温度勾配は変化すること、また、熱発生速度の積算値は層流燃焼速度の変化とよく対応するが、その最大値の傾向は異なることがわかった。

次に、火炎伸長率の変化に対する火炎構造の応答に与えるLewis数効果の影響を明らかにするために、火炎伸長率を任意に設定することが可能な場である平面对向流予混合双子火炎について、素反応機構を用いた数値解析を行った。これにより、各化学種のLewis数を任意に変化させた場合について、Lewis数効果の影響を明らかにした。この結果、燃料希薄メタン-空気予混合火炎における不足物質のLewis数は1よりもわずかに小さいだけであるため、Lewis数効果だけではなく、燃え残りの効果などの影響を受けることにより火炎伸長率の大きさ、また、熱発生速度の最大値や積算値といった指標ごとにその挙動は異なることがわかった。その火炎構造の火炎伸長率に対する応答は当量比によって異なることもわかった。

第5章では、燃料と酸素の質量生成速度および熱発生速度の積算値に基づいた複数の手法で“燃焼速度”の定義を試みた。まず、層流燃焼速度を明確に定義可能な火炎伸長を受けない平面一次元予混合火炎を用いて、層流燃焼速度との対応関係を調べた。その結果、燃料希薄条件と燃料過濃条件および総括反応と素反応機構において異なる式を用いる必要はあるものの、燃料と酸素の質量生成速度および熱発生速度の積算値に基づいたそれぞれの手法による“燃焼速度”と層流燃焼速度はよい一致を示すことがわかった。

また、火炎伸長率との関係について検討することにより、熱発生速度の最大値は、燃料の質量生成速度に基づく“燃焼速度”と正の相関を持つことがわかった。一方、熱発生速度

の積算値は、酸素の質量生成速度および熱発生速度の積算値に基づく”燃焼速度”と正の相関を持つことがわかった。

第6章において、素反応機構を用いた定常および非定常対向流予混合火炎の数値解析を行い、非定常挙動および火炎構造を支配するパラメータについて明らかにし、Laminar flamelet modelに基づく組み合わせ手法における再結合パラメータとして適切であると考えられる物理量として酸素の質量分率に基づく反応進行度およびその勾配の火炎面における値が最も適切であることがわかった。また、空間的および時間的に変動する非定常二次元予混合火炎においても、酸素の質量分率に基づく反応進行度およびその勾配の火炎面における値を用いることにより火炎構造の整理が可能であることを明らかにした。

第7章において、火炎面曲率を持つ予混合火炎の数値シミュレーションを行い、初期条件である平面火炎に対して、流入境界の一部に局所的に大きな流速を与え、その際の定常的な曲率を持つまでの過渡応答において現れる局所消炎に対して、その熱発生速度の挙動を明らかにした。

第8章では、第6章までの基本的な流れ場の知見を基に、速度場はかなり強い変動を空間および時間的に与えた二次元予混合火炎の火炎構造について検討を行い、条件によって現れる局所消炎や、未燃および既燃ガスの島について、その火炎構造を明らかにした。さらに、酸素の質量生成速度の積分値と火炎長さ(火炎面積)から算出した乱流燃焼速度と火炎長さ(火炎面積)は、局所的な消炎が発生するか否かに関わらず強い相関を持ち、ほぼ比例関係にあることがわかった。また、単位火炎長さ当たりの平均燃焼速度は火炎長さとは比べ変化が小さいことがわかった。

また、レーザ計測により比較的容易に計測可能なOHラジカルとCH₂Oの濃度の積が熱発生速度分布と対応するという従来の知見について、局所消炎を伴う非定常火炎においても濃度の積と熱発生速度の分布はよい一致を示すことを示した。

第9章において結論として総括した。最後に、本研究の目的に対して得られた知見は以下のようにまとめることができる。

まず、第一の目的である燃料希薄メタン-空気予混合火炎の火炎構造に与える種々の物理量の影響については、混合気の有効熱伝導率と各化学種の有効拡散係数およびそれらの比であるLewis数に着目して検討した。その結果、火炎伸長のない平面一次元予混合火炎では輸送係数の大小により、反応帯における反応物の濃度や温度勾配が変化することにより層流燃焼速度や燃焼強度が変化する。一方、火炎伸長を受ける火炎の場合、燃料希薄メタン-空気予混合火炎ではLewis数が1に近い場合、Lewis数の効果は小さく、火炎伸長の影響は燃え残りの効果などLewis数効果以外のメカニズムが支配的になることがわかった。

次に、第二の目的である燃料希薄メタン-空気予混合火炎の火炎構造を支配するパラメータについては、定常および非定常対向流予混合火炎に着目して検討した。その結果、酸素の質量分率に基づく反応進行度およびその勾配の火炎面位置における値が最も適切であり、組み合わせ手法における再結合パラメータとして用いることができると考えられることがわかった。また、火炎面曲率を有する火炎や局所消炎が生じるような火炎についても検討し、本研究で提案した再結合パラメータの適用の可能性がわかった。