



Title	詳細反応機構を適用した高圧メタン酸素ロケットエンジン燃焼振動シミュレーション：燃焼振動発生機構の解明と噴射条件の特定
Author(s)	寺島, 洋史
Citation	サイバーメディアHPCジャーナル. 2026, 16, p. 17-20
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/106225
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

詳細反応機構を適用した高圧メタン酸素ロケットエンジン燃焼振動シミュレーション：燃焼振動発生機構の解明と噴射条件の特定

寺島 洋史

北海道大学 大学院工学研究院

1. はじめに

近年、世界各国で宇宙開発の機運が高まっており、ロケットの運用需要が急激に増加することが見込まれる。宇宙開発を安定的に取り組むためには、信頼性の高いロケット輸送技術の確立が不可欠であり、その中でも、ロケットエンジンは、ロケット運用能力を決定付ける最重要コンポーネントといえる。

ロケットエンジンの開発において、現在でも大きな課題となるのが、燃焼振動の問題である。燃焼振動は、燃焼室内の圧力変動と発熱変動が相互作用する燃焼不安定現象として古くから知られている[1]。大きな圧力振動が発生した場合、燃焼室が破壊に至ることもあり、その予測が非常に重要となる。しかし、圧力波と発熱（化学反応）が連成する複雑な物理現象であること、噴射条件や燃焼器の幾何形状などの様々な要因が絡むことから、現在でも発生機構は十分に解明されておらず、予測も困難とされる。

燃焼振動に関する研究は実験と数値シミュレーション、いずれにおいても多数行われてきた[2, 3]。申請者らは、水素酸素ロケットエンジンを対象に、経験的に燃焼振動が発生しやすいとされる低温燃料噴射[1]に着目した燃焼振動シミュレーションを実施してきた[4]。その結果から、低速度比および低混合比条件下で、大きな圧力振動が発生することを示した。さらに、大きな圧力振動の発生原因として、燃焼器上流部に残存した未燃水素の燃焼による火炎面積の増大が燃焼振動の発生原因となることを示した。

本研究課題では、これまでの水素を用いた解析結果[4]を基に、管理運用の容易さから近年ロケ

ット燃料として注目される炭化水素系燃料メタンを用いたロケットエンジン燃焼振動シミュレーションを実施する。達成目標は、ロケットエンジンの燃焼器内で発生する燃焼振動現象に対する燃料特性の影響を明らかにすることである。具体的には、水素を用いた解析で得られた混合比および速度比による圧力振動有無の分類がメタンにも適用可能かを調べる。さらに、強い圧力振動が発生した場合、その発生機構が水素とどのように異なるのかを明らかにする。

これまでのロケットエンジン解析では、利用頻度が高い水素を用いた解析が多く、メタンを用いた研究は実験およびシミュレーションのいずれにおいても少ない。今後、ロケット燃料として管理運用が容易かつ安価なメタンが用いられる可能性は高く、本研究の成果はその利用に貢献できるものと考えられる。

2. 数値解析法

本研究では、単一噴射器を持つロケット燃焼器に対し、詳細反応機構を考慮した直接数値解析を実施した。水素とメタンの比較を行い、燃焼振動現象に対する燃料特性の影響を明らかにする。

2.1 支配方程式と数値解析法

支配方程式には、圧縮性 Navier-Stokes 方程式、化学種の質量保存式、熱的完全気体を仮定した状態方程式を用いた。紙面の都合から具体的な数値計算手法に関しては文献[4]を参照いただきたい。

2.2 計算条件

本研究では、主に計算コストの観点から 2 次元

解析を行った。燃焼流れ場は 3 次元ではあるが、2 次元仮定であっても燃焼振動マップの不安定境界が実験[1]と概ね一致すること、燃焼振動の軸方向モード周波数において、解析で得られた値と理論値が概ね一致することを確認している[4]。

図 1 に解析対象の概略図を示す。解析対象にはミュンヘン工科大の実験[5]で使用された単一噴射器のロケット燃焼器を用いた。なお、噴射面より上流部分は解析対象としていない。格子点数は 766×279 点とした。事前に、粗い計算格子 (538 $\times$ 189 点) および細かい計算格子 (1088 $\times$ 401 点) を用いた解析で格子収束性の確認を行っており、燃焼振動発生有無や燃焼流れ場が格子解像度によって大きく変化しないことを確認した。

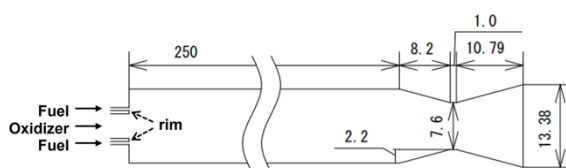


図 1：解析対象の概略図

燃料温度は理想気体仮定が適用できる下限値近くにそれぞれ設定し、水素 80 K、メタン 200 K に設定した。一方、酸化剤（酸素）は 300 K とした。ターゲット燃焼圧は 24 bar である。水素を用いた先行研究[4]において、燃焼振動は混合比 (O/F) および速度比 (VR) を用いて整理できることが示されているため、本研究のメタン解析においても混合比と速度比を変化させた。以降、条件の名称として OF#VR#を使用する。

メタン酸素の反応には、38 化学種 291 反応の詳細反応機構 FFCM-1[6]を用いた。

3. 結果と考察

3. 1 燃焼流れ場と圧力振動

図 2 に、燃焼器上流部の温度分布を示す。左の境界面からメタンおよび酸素が噴射され、非予混合火炎が形成、生成された高温燃焼ガスが下流へ流れていく。また、リム背後（図 1）の再循環領域

域は非予混合火炎の基部（アンカー）として重要な領域となる。

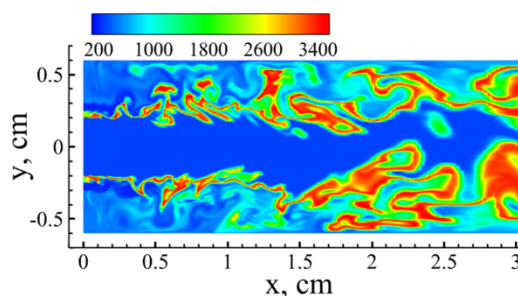
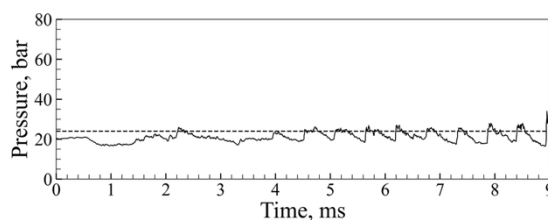
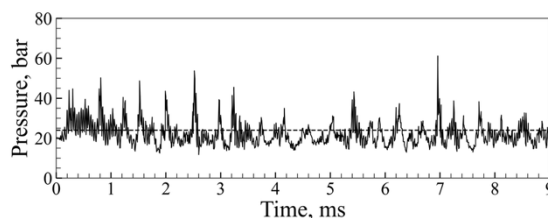


図 2：噴射器近傍の瞬間温度場（OF4VR1）

図 3 に、 $x = 3$ cm、 $y = 0.5$ cm における圧力時間履歴を示す。点線はターゲット燃焼圧を示す。OF4VR1 条件では多少の振動が見られるものの、ターゲット燃焼圧付近を推移しており、強い燃焼振動は発生していない。一方、OF4VR4 条件では、圧力の最大値が 60 bar 付近まで上昇する強い燃焼振動が観察された。FFT 解析によって、支配モードが 1 次の軸方向モードに相当することから、本振動は軸方向の燃焼振動と確認した。



(a) OF4VR1

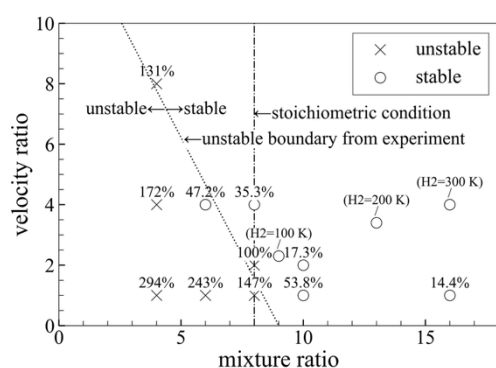


(b) OF4VR4

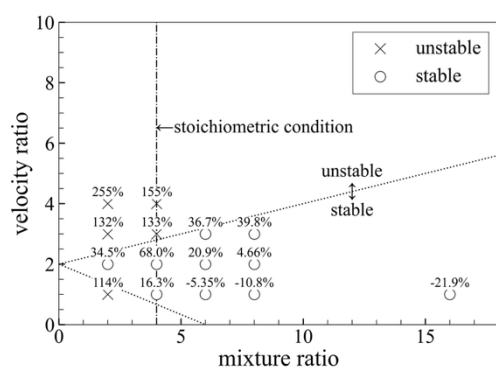
図 3：燃焼器内の圧力時間履歴

図 4 に、水素およびメタン解析で得られた燃焼振動マップを示す。横軸は混合比であり、縦軸は速度比である。マル印は燃焼振動が発生しなかつ

た条件、バツ印は燃焼振動が発生した条件を表す。プロット上部の数値はターゲット燃焼圧に対する最大圧力値を表す指標である[4]。また、水素の解析結果に示す破線は実験[1]における不安定境界である。水素の場合、低混合比もしくは低速度比ほど燃焼振動が発生しやすくなる傾向があるが、メタンの場合、低速度比条件では水素と同様の傾向を示すが、高速度比条件では水素と異なる傾向を示す。つまり、メタンは速度比が大きいほど燃焼振動が発生するという水素とは逆の傾向を示すことが明らかになった。



(a) 水素



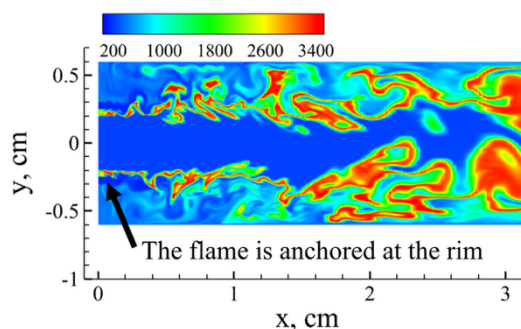
(b) メタン

図 4：燃焼振動マップ

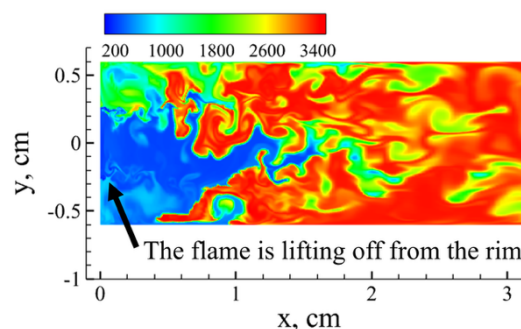
3. 2 速度比に対する燃焼振動発生傾向の違い

前節の結果から、燃料種によって燃焼振動の発生傾向が異なることが示された。その原因を調べるため、図 5 に、噴射器近傍の瞬間温度場を示す。一般的に、ロケット同軸噴射器では非予混合火炎が形成され、リム背後がそのアンカーとなる。メタンの OF4VR1 条件（燃焼振動が発生しない条

件）では、非予混合火炎の基部がリム背後に形成していることが確認できる。一方で、強い燃焼振動が観測されたメタンの OF4VR4 条件では、火炎がリム背後領域から消失し、浮き上がり火炎となることが示されている。水素ではすべての条件で浮き上がり火炎は観察されていないため[4]、浮き上がり火炎となることが、燃料種による燃焼振動の傾向の違いを生み出した原因と考えられる。



(a) OF4VR1（燃焼振動が発生しない）

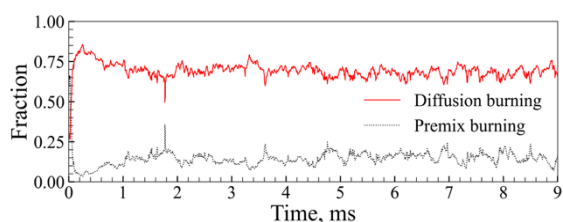


(b) OF4VR4（燃焼振動が発生）

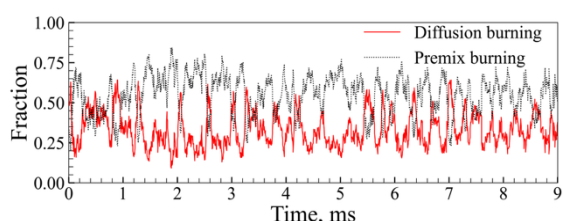
図 5：瞬間温度場の比較

浮き上がり火炎形成と強い燃焼振動発生との関係を調べるため、図 6 に、Flame Index を用いた burning fraction (BF) の時間履歴を示す。BF は全体発熱量における予混合火炎および非予混合火炎の割合を表すものである[4]。ルム背後に火炎基部が形成される OF4VR1 条件では、非予混合火炎の割合が 90%以上を占めている（水素ではすべての条件でこの傾向を有する）。一方、OF4VR4 条件では、予混合火炎の割合が非予混合火炎の割合を上回ることがわかる。これは、浮き上がり火炎の発生により、未燃燃料と酸化剤が混

合し未燃予混合気が形成されたことを意味する。予混合気の自着火は発熱および圧力変動を引き起こすため、メタンの OF4VR4 条件では、強い燃焼振動が発生したといえる。



(a) OF4VR1



(b) OF4VR4

図 6 : Burning fraction の時間履歴

3. 3 浮き上がり火炎：速度比と消炎の関係

メタンの OF4VR4 条件では、浮き上がり火炎が形成されたことで、強い圧力振動が発生した。浮き上がり火炎が形成する理由を考察するため、オープンソフト Cantera を用いた対向流非予混合火炎の消炎解析を実施した。図 7 に解析結果を示す。変曲点が消炎条件に相当し、その点のひずみ率が大きいほど、消炎しにくいことを意味する。水素とメタンの結果（3 つの異なる反応機構で解析）を比較すると、メタンが水素に対して消炎しやすいことがわかる。ひずみ率は速度比に相当するものであり、メタンが低速度比条件でも消炎しやすい、つまり浮き上がり火炎を形成しやすい特性を持つことが示された。

4. おわりに

本研究では、詳細反応機構を用いた圧縮性流体解析により、ロケット燃焼器における水素とメタンの燃焼振動特性の比較を行い、燃焼振動機構に対する燃料種の効果を調べた。燃焼振動の発生に

おいて、混合比に対する傾向は、水素とメタンで同じであったが、速度比に対する傾向は、低速度比条件は同じであるが、高速度比条件では逆の傾向を示した。温度場の比較から、水素のすべての条件およびメタンの低速度比条件では、非予混合火炎がリム背後領域から形成されている一方、メタンの高速度比条件では浮き上がり火炎が形成する。これは、水素火炎と比較して、メタン火炎が伸張に対して消炎しやすいためであり、メタンの特徴といえる。浮き上がり火炎により、未燃予混合気形成され、その自着火によって圧力および発熱振動が強まり、強い燃焼振動が発生したと考えられる。以上により、混合比および速度比という観点から、燃焼振動に対する燃焼種の効果を明らかにすることができた。

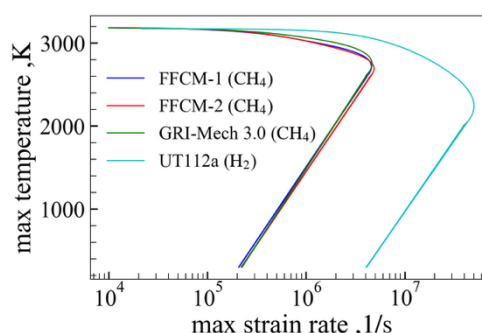


図 7 : 対向流非予混合火炎の消炎解析結果

参考文献

- (1) D.T. Harrje, Liquid propellant rocket combustion instability, **194**, NASA, (1972).
- (2) Y. C. Yu, et al., J. Propul. Power, **28**, 876-887, (2012).
- (3) M. E. Harvazinski, et al., Phys. Fluids, **27**, 045102, (2015).
- (4) R. Shimoyama and H. Terashima, Phys. Fluids, **37**, 097128, (2025).
- (5) S. Silvestri, et al., EUCASS, **26**, (2017).
- (6) G. Smith, et al., FFCM-1, (2016).