

ラム燃焼器における水素—空気予混合気の着火特性

○上村 巧大（静岡大学大学院），吹場 活佳（静岡大学）
中田 大将（室蘭工業大学），小林 弘明（JAXA），丸 祐介（JAXA）

Ignition characteristics of hydrogen-air premixture in a ram combustor

○Kodai Kamimura (Shizuoka Univ.), Katsuyoshi Fukiba (Shizuoka Univ.),
Daisuke Nakata (Muroran Institute of Technology), Hiroaki Kobayashi (JAXA), Yusuke Maru (JAXA)

Abstract

In the combustor of the ATR engine, which is currently under development, stable combustion of air and hydrogen in high speed airflow is required. In this study, as a basic experiment to realize this combustor, a small combustor with a flame holding mechanism was constructed, and ignition and flame holding experiments were conducted. The results showed that the ignition and flame retention were successfully achieved in high velocity flow over 60 m/s. It was also found that the combustion became more stable as the equivalence ratio became larger and the flow velocity became slower.

1. 背景

JAXA 宇宙科学研究所(ISAS)を中心としたグループでは、大気吸込みエンジンとロケットエンジンを併用した再使用観測ロケットの研究開発が行われている。大気吸込み式エンジンは大気圏を飛行中に酸化剤となる酸素を大気から取り込むエンジンである。従来の宇宙ロケットでは、空気抵抗係数 C_d がピークとなる遷音速付近を突破するために搭載された推進剤(液体水素・液体酸素)の大半を消費していた。そこで亜音速～遷音速の領域を大気吸込みエンジンに分担させることで、搭載する酸化剤を減らすことができ、打ち上げ能力向上に大きく寄与する可能性がある。^[1] この大気吸込みエンジンとしてガスジェネレーターサイクルの ATR エンジン(Air Turb Ramjet Engine)の採用が決定し、研究開発が行われている。

2. ATR エンジン

図1に ATR エンジンの模式図を示す。ATR エンジンはファン、ガスジェネレータ、タービン、二次燃焼器から構成されている。ガスジェネレータにおいて過剰に供給した液体水素と液体酸素を燃焼させ、その水素リッチな燃焼ガスによりタービンをまわしファンを駆動させる。大気から取り込んだ空気はファ

ンにより圧縮され、二次燃焼器において水素リッチな燃焼ガスと混合され再度燃焼し、その燃焼ガスにより推力を得る。ATR エンジンの研究開発は ISAS を中心に様々な研究機関、大学と共同で行われており、本研究では二次燃焼器を研究対象としている。二次燃焼器はファンから取り込んだ空気と水素リッチなガスジェネレータ燃焼ガスを混合し燃焼させる役割があり、燃焼ガスと空気を混合するミキサー、保炎器、点火器から構成されている。保炎器は下流に循環領域をつくることで火炎を維持する役割がある。したがって保炎器が付いていることで、一度点火器で着火してしまえばその後は点火器を切っても燃焼が持続する。二次燃焼器にはいくつかの問題点がある。一つ目は、現在開発が進められている ATR エンジンでは、ファンから取り込んだ空気が 60 ~ 70 m/s もの高速で流入するため安定した燃焼が困難な点である。高速流中においても火炎が吹き消えないような保炎器の形状が求められている。2つ目は逆火である。水素は燃焼速度が非常に速いため火炎が上流に伝播する逆火の危険性がある。逆火による保炎器の溶解や最悪の場合エンジンの爆発の恐れもあるため逆火をしない二次燃焼器の開発が求められる。このような高速流中においても安全で安定した燃焼を実

現する燃焼器の開発を目標に掲げ、本研究では水素一空気予混合気の着火特性を把握することを目的として行った。

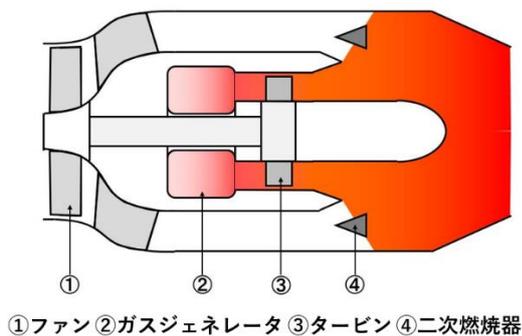


図1 ATR エンジン

3. 供試体

本研究では燃焼器を模した保炎器付きの供試体を作成した。供試体の概要図を図2に示す。供試体は真鍮製であり断面は 15mm×16mm の矩形型となっている。燃焼器出口付近に三角形の保炎器、保炎器下流に点火器として軽量で小型なスパークプラグを設置した。今回作成した保炎器は小型であり、十分に混合できると考えたため、ミキサーは設置していない。左側から空気、側面から水素が流入し、混合気にスパークプラグで着火する。

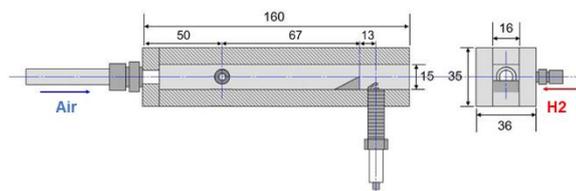


図2 供試体

4. 全圧計測

保炎器下流における循環領域を確認するため、保炎器下流の全圧分布を計測した。計測は非燃焼時に行った。全圧管を燃焼室出口から入れ、保炎器下流の全圧を流れ方向に 11 点、高さ方向に 14 点の計 154 点を計測した。計測したデータは主流中の動圧で割り無次元化した圧力係数 C_p で整理している。空気はコンプレッサで供給しており、コンプレッサ圧力 100 kPa, 150 kPa, 300 kPa の 3 パターンで実施した。どのパターンにおいても同様の傾向が見られたため 150kPa での計測結果を図3に示す。横軸は保炎器背面からの水平距離、縦軸は燃焼室底面からの高さで

ある。黒線は圧力係数が 0 である点を結んだ線であり、循環領域との境界を示している。ここで、青色で示す循環領域では逆流となっており本実験における全圧管を用いた計測では正確に計測できていないことに留意されたい。保炎器の高さは 8 mm であるため保炎器下流に循環領域が形成されており、保炎器背面から 13 mm の位置にあるスパークプラグが循環領域内にあることが確認された。

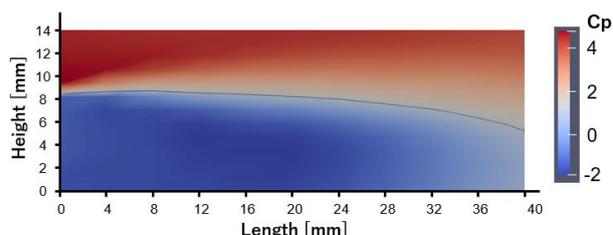


図3 保炎器下流全圧分布

5. 水素実験

水素一空気予混合気での着火実験を室蘭工業大学白老実験場にて実施した。

5.1 実験装置

水素実験の配管系統図を図4に示す。主流空気が流れる配管と水素の流れる配管があり、それぞれの配管が作成した供試体に接続されている。空気及び水素はボンベにより供給する。各配管には、逆火が発生した際に火炎が配管内を逆流することを防ぐための逆止弁を設置している。また配管内に残留した水素を取り除くためのパージ用配管を追加し、各実験終了後に窒素ボンベにより窒素を供給しパージを行う。供試体では燃焼室出口温度 T_e 、燃焼室内温度 T_c に加えて燃焼室内の圧力 P_c を計測する。

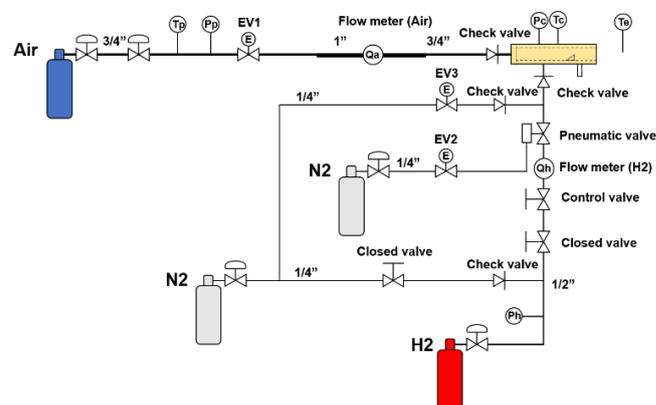


図4 水素実験配管系統図

5.2 実験方法, 実験条件

本実験の実験条件を表 1, 実験動作シーケンスを図 5 に示す. 空気の体積流量を断面積(15 mm×16 mm)で除して算出したものを燃焼室入口流速と定義し 10 ~ 80 m/s で実験を行った. 各々の空気流量に対して水素流量を調整弁で調整させることで当量比 0.2~1.0 まで変化させている. 本実験ではあらかじめ予混合気を燃焼室内に作り出し, 予混合気を流した状態でスパークプラグを点火し, 着火する. 実験の動作シーケンスは, 空気は-10 ~ +5 s までの 15 秒間, 水素は-2 ~ +2 s までの 4 秒間, スパークプラグは 0 ~ 1 s までの 1 秒間を ON としている. したがってスパークプラグが OFF 後も水素-空気予混合気は 1 秒間燃焼室に流入し続けており, その間に火炎が維持できているか否かで作成した供試体の保炎性能を調査する.

表 1 実験条件

パラメータ	記号	実験条件	単位
燃焼室入口流速	V_c	10 ~ 80	[m/s]
空気質量流量	\dot{m}_{air}	5 ~ 23	[g/s]
水素質量流量	\dot{m}_p	0.05 ~ 0.7	[g/s]
当量比	ϕ	0.2 ~ 1.0	—

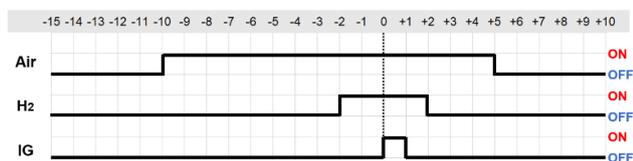


図 5 水素実験動作シーケンス

5.3 実験結果

本実験では目的であった空気流速 60 m/s 以上での着火, 保炎に成功した. 水素-空気予混合気の燃焼の様子を撮影した写真を図 6 に示す. 燃焼室出口に設置した熱電対の先端において橙色の発光が見られるが, 水素の燃焼であるため火炎全体は無色透明である. したがって本実験では撮影した動画の音が非常に重要となった.

次に燃焼室入口における空気流速と当量比を変化させた際の, 水素-空気予混合気の着火特性の結果を図 7 に示す. 着火特性は“着火無し”, “不完全着火”, “着火○保炎×”, “不完全保炎”, “完全保炎”の 5 通りケースに分けられた. このうち“着火無し”はスパークプラグ ON の状態においても不着火であったケース, “着火○保炎×”はスパークプラグ ON の 0~+1 s のみ着火したケース, “完全保炎”はスパークプラグ OFF 後も+2 s まで燃焼を続け, 保炎に成功したケースである. “不完全着火”と“不完全保炎”は燃焼が不完全なケースであり, “不完全着火”はスパークプラグ ON の状態において着火するものの, 燃焼が間欠的で不安定であるものや, 一瞬着火したのちすぐに消えてしまうケース, “不完全保炎”はスパークプラグ OFF 後の燃焼が“不完全着火”と同様に不完全であるケースである. 各ケースは燃焼室出口温度 T_e , 燃焼室内圧力 P_c 及び撮影した動画の音により判断している.

ークプラグ ON の状態においても不着火であったケース, “着火○保炎×”はスパークプラグ ON の 0~+1 s のみ着火したケース, “完全保炎”はスパークプラグ OFF 後も+2 s まで燃焼を続け, 保炎に成功したケースである. “不完全着火”と“不完全保炎”は燃焼が不完全なケースであり, “不完全着火”はスパークプラグ ON の状態において着火するものの, 燃焼が間欠的で不安定であるものや, 一瞬着火したのちすぐに消えてしまうケース, “不完全保炎”はスパークプラグ OFF 後の燃焼が“不完全着火”と同様に不完全であるケースである. 各ケースは燃焼室出口温度 T_e , 燃焼室内圧力 P_c 及び撮影した動画の音により判断している.



図 6 水素-空気予混合気の着火写真

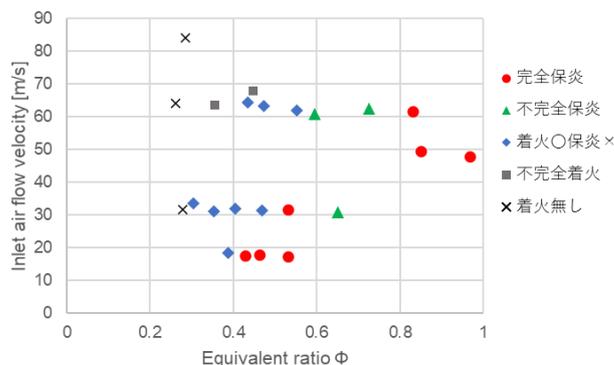
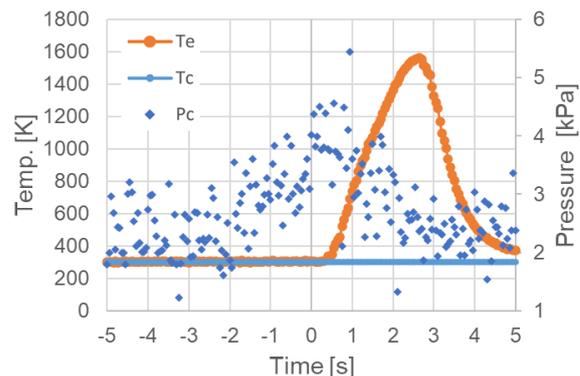


図 7 水素-空気予混合気の着火特性

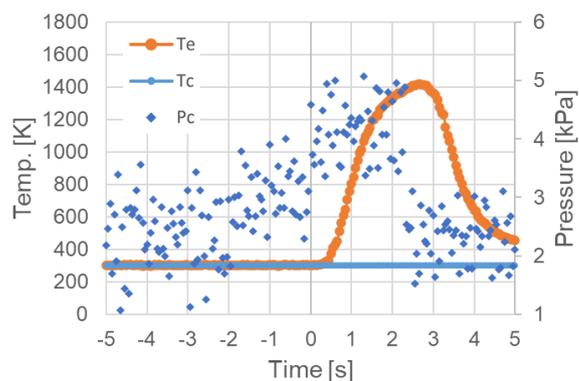
図 7 より, 水素-空気予混合気の着火特性は当量比の増加とともに着火及び保炎性が良くなっていることが分かる. これは当量比 $\phi < 1$ では希薄燃焼領域であり, 当量比 ϕ が大きいほど着火及び保炎しやすいためであると考えられる. また本実験では燃焼室入口流速の影響が顕著に現れ, 流速が増加するほど着火及び保炎性が悪くなることが確認された.これは燃焼室入口流速の増加によって火炎を維持することが困難になる吹き消えの影響であると考えられる. 間

欠的な燃焼が起こる原理は、“不完全着火”の場合、一度吹き消えたのち再びスパークにより再着火する、“不完全保炎”の場合スパークは飛んでいないがスパークプラグや壁面の熱により再着火した可能性が考えられる。

図 8 に-5 ~ +5 s における燃焼室出口温度 T_e 、燃焼室内温度 T_c 、燃焼室内圧力 P_c の結果を示す。横軸が時間、縦軸は左側が温度、右側が圧力となっている。図 8 (a)は“着火○保炎×”の結果であり、0 ~ +1 s の間で燃焼している。図 8 (b)は“完全保炎”の結果であり、0 ~ +2 s の間燃焼をしている。燃焼室内温度 T_c はいずれの場合も燃焼時において温度上昇が見られず、逆火は発生していないことが確認された。水素は燃焼速度が非常に速いため逆火しやすいが、他のすべての実験条件においても逆火は発生しなかった。これは図 3 から分かるように、今回作成した保炎器は流路を絞るような形状となっており、保炎器の上側で流速が最大になるためであると考えられる。燃焼室出口温度 T_e は立ち上がりが遅く応答性が悪いことが分かった。これは本実験で使用した R 型熱電対が太く、熱容量が大きかったためである。図 8 より(a)の保炎が失敗した場合と比較して(b)の保炎が成功した場合には、グラフのピークに若干の差異が見られるものの、燃焼室出口温度 T_e のみによる保炎の可否の判断は困難であることが判明した。その一方で燃焼室内圧力 P_c では保炎の可否で有意な差が見られた。図 8 の+1 ~ +2 s に着目すると保炎が失敗した(a)では 0 ~ +1 s と比較して圧力が落ちていないのに対し、保炎が成功した(b)では圧力が落ちていないことが確認できる。これは燃焼により体積流量が増加し流速が増加するためである。流速の増加により圧力損失が大きくなり、その結果燃焼室内の圧力が増加する。したがってスパークプラグ OFF 後の+1 ~ +2 s における燃焼の有無を燃焼室内圧力 P_c により確認することで保炎の可否が判明する。以上より保炎の可否の判断には実験時の音に加え、燃焼室内の圧力が非常に有効であることが判明した。本実験で使用した圧力計のレンジは~ 200 kPa と広がったためデータにばらつきが生じてしまった。適当なレンジの圧力計を用いることでより正確な保炎の判断ができることが考えられる。



(a) 着火○保炎×



(b) 完全保炎

図 8 着火前後の温度、圧力変化

6. 結論

本研究では ISAS を中心に研究開発が進められている ATR エンジンの燃焼器に関する基礎実験を行った。燃焼器を模した保炎器付きの供試体を作成し、保炎器下流の全圧計測及び、水素を用いた着火実験を行った。全圧計測では保炎器下流に循環領域が存在し、その循環領域内にスパークプラグが設置されていることが確認された。水素を用いた実験では燃焼室入口流速 60 m/s 以上の高速流中において着火、保炎に成功した。また当量比が大きく、流速が遅いほど着火及び保炎性が良いことが確認された。燃焼室内の圧力は燃焼時に圧力が上昇するため、保炎の可否の判断に非常に有効であることが判明した。

7. 参考文献

- [1] 小林弘明 他 ; ISAS 新観測ロケットの開発計画, 第 64 回宇宙科学技術連合講演会講演, 2020