

水素ターボエンジンの高空低圧始動を模擬した低圧水素/空気予混合気の点火実験

日大生産工(院) ○添田 幸寛 日大生産工 野村 浩司 JAXA 岡井 敬一

1. 緒言

完全再使用型宇宙往還機の初段推進系および極超音速巡行航空機の推進系に使用するため、液体水素を燃料とする予冷ターボジェットエンジンの研究開発が行われている。この飛行実証試験用エンジンを気球により高空から落下・加速させ、点火から定常運転に至るまでの飛行環境試験(BOV)が計画されている。そのため、高空低圧環境下で確実に水素エンジンを始動させることが求められている。予冷ターボジェットエンジンに用いられている逆流アニュラ型燃焼器は、内壁と外壁の距離が1インチと小型の燃焼器であるため、点火・始動が困難であることが予想される。また、将来の航空機に水素エンジンが採用される可能性があることから、安全運行のために水素エンジンの高空再始動に関する基礎データを収集しておくことは重要である。

予冷ターボエンジンの水素燃料は、熱交換・気化の過程を経た気体水素であり、気体水素燃料に関しての点火・燃焼特性に関しては、過去にも多くの研究がなされている^(1,2)。しかしながら、水素ターボエンジンの高空点火を検討するのに重要な高空低圧環境での最小点火エネルギーに関する基礎データは、NASAによる限られた例でしか参照できないのが現状である⁽¹⁾。そこで本研究では、高空環境を模擬した低温・低圧環境下で気体水素/空気予混合気の点火・燃焼実験を行い、予冷ターボエンジンの開発に資する基礎データを収集することを目的とする。本報では、小型定容燃焼容器で行った低温・低圧水素/空気予混合気の最小点火エネルギー測定の結果について報告する。

2. 実験装置および方法

実験装置概略を図1に示す。実験装置は、点火装置、燃焼容器、大型低温容器、計測装置および制御装置から構成される。点火装置は、低圧での点火に必要な高点火エネルギーを発生することができ、点火エネルギー、放電時間を容易に計測・調整できるアーク放電を用いた。放電エネルギーの算出は、オシロスコープ(Tektronix社製TPS2024)を使用して放電時の電圧・電流を測定し、電圧 $V[V]$ と電流 $I[A]$ の積を時間 $t[s]$ で積分して求めた。電圧測定位置から電極先端までの回路内抵抗を、予め電流の関数として求めておくことにより、測定した放電エネルギーを補正した。放電時間と直流電源の出力電圧を調整することにより、放電エネルギーを変化させた。直流電源にはTAKASAGO社

製ZX-400(最大電圧:80V,最大電流:40A)を用いた。アーク放電用に、ピエゾ素子を用いた可動式放電電極を新たに開発した。ピエゾ素子で駆動される可動電極により、接触した状態の2本の電極先端が離れ、放電間隙が生まれる。ピエゾ素子の駆動には、整流平滑回路を用いた自作アンプを使用した。また、制御装置にはシーケンサ(KEYENCE社製KV-700)を使用し、放電時間(ピエゾ駆動時間)を制御した。放電時間 t_{dc} は $250 \pm 30 \mu s$ とした。放電間隙がほぼ一定(0.14mm)になるのは10ms以降であり、放電時間を250 μs とした場合、放電間隙は0から0.04mmへと放電の経過とともに徐々に直線的に増大する。電極は、先端角60°に仕上げられた直径1.2mmのタングステン線であり、2本の電極の先端間で放電させる。燃焼容器形状は、内直径25mm、長さ50mmの円筒形とした。内直径は、実機のアニュラ形燃焼器の内壁と外壁の距離に一致させた。燃料には気体水素を用いた。水素/空気予混合気の初期温度 T と圧力 P は、飛行実証試験のエンジン始動時燃焼室内温度・圧力(233K, 6.9kPaを想定)を参考にし、233~293Kおよび5~15kPaの範囲で変化させた。燃焼容器を設置する大型低温槽には、SANDEN社製SH-500X(最低温度:253K)を使用した。実験温度が233Kの条件では、低温槽とドライアイス(温度:194K)を併用して実験を行った。実験温度が323Kの条件では、燃焼容器にリボンヒータを巻き、実験を行った。実験は、燃焼容器内圧力、予混合気温度および当量比を変化させ、最小点火エネルギーを測定した。予め実験圧力において空気のみで放電を行い、放電加熱による圧力上昇を測定しておき、その圧力の1.1倍以上の圧力で放電後の燃焼容器内圧力が達した場合を点火成功とした。最小点火エネルギーの測定は、予混合気が点火するまで放電電圧を0.1V刻みで徐々に増大させながら繰り返し放電を行い、予混合気が点火したときの放電エネルギーを点火エネルギーとした。同一条件で5回の測定を行い、得られた点火エネルギーの平均値を各実験条件における最小点火エネルギーとした。本実験では、放電エネルギーを200mJ与えても点火が確認できない場合、点火失敗とした。

実験手順を記述する。燃焼容器内を空気で満たした後、実験を行う圧力と当量比 ϕ の予混合気を生成するのに必要な空気量が燃焼室に残るまで真空ポンプで減圧する。燃焼容器内が熱平衡状態になった後、水素により実験圧力まで

Ignition Experiments on Hydrogen/Air Premixtures Simulating Engine Start of Hydrogen Turbo Jet at High-Altitudes

Yukihiro SOETA, Hiroshi NOMURA and Keiichi OKAI

昇圧する。燃焼容器内のスワラを回転させ、空気と水素の混合を行う。燃焼容器内の予混合気が静止した後、点火実験を行う。点火の成否は、絶対圧センサ(Kulite 社製 XTE-190, 圧力範囲：0～173 kPa)を用いて行った。

3. 実験結果および考察

3.1 常温低圧水素／空気予混合気の最小点火エネルギー

図2に、圧力が2.5～15 kPaの範囲における最小点火エネルギーと当量比の関係を示す。実験温度は293 Kで一定とし、放電エネルギーは200 mJまで変化させた。図中の黒塗のプロットは、放電エネルギーを200 mJとしても予混合気が点火しなかったことを示している。圧力2.5 kPaの条件では、いずれの当量比でも予混合気の点火は確認できなかった。5～15 kPaの圧力範囲においては、当量比が0.8付近で最小点火エネルギーが最小値を示した。圧力が5および10 kPaの当量比が0.3以下の条件においては、放電エネルギーを200 mJとしても予混合気の点火が確認できなかった。また、圧力が15 kPaの当量比が0.2以下の条件でも同様であった。当量比が1.2以上の範囲では、圧力が5 kPaの場合の最小点火エネルギーが特に急峻に増大している。図3に、最小点火エネルギーと圧力の関係を示す。圧力が減少するに伴って最小点火エネルギーが増大することがわかる。また、点火限界付近で最小点火エネルギーの圧力依存性が大きくなることがわかった。

3.2 常温での臨界火炎核直径の測定

観察窓が付いている大型の燃焼容器を用い、点火の成否に大きな影響をもつ火炎核挙動の観察を行った。実験装置を図4に示す。燃焼容器には内直径150 mm、高さ210 mmのものをを用い、火炎核と壁面が干渉しないようにした。観察窓の直径は15 mmであり、燃焼容器の中心で点火を行った。高速度カメラに放電の発光が入らないように、撮影時は電極先端を観察窓においてマスクした。火炎核の観察にはシュリーレン光学装置と高速度カメラ(撮影速度：2000 fps)を用いた。シュリーレン光学装置の点光源には、YAGレーザーを使用した。火炎核直径は、火炎核が球対象に広がると仮定し、点火位置から火炎核の平均半径を計測し、2倍して求めた。アーク放電により生成された火炎核が自立火炎に移行する時点での火炎核直径を臨界火炎核直径 d_c とし、測定した火炎核履歴を3次曲線近似してその変極点における直径とした。同条件で3回実験を行い、測定された臨界火炎核直径の平均値をその条件における臨界火炎核直径とした。

図5に、圧力10 kPaの条件での火炎核直径履歴を示す。図中の実線は、実験値を3次曲線で近似した曲線である。火炎核直径は、点火と同時に急激に増大し、点火から数 ms後に増大が緩やかになる。点火が成功した場合は、再び火炎核直径が急激に増大するが、失火の場合は、その後減少

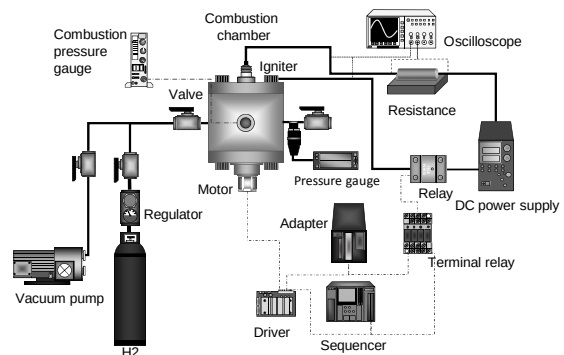


Fig.1 Experimental apparatus.

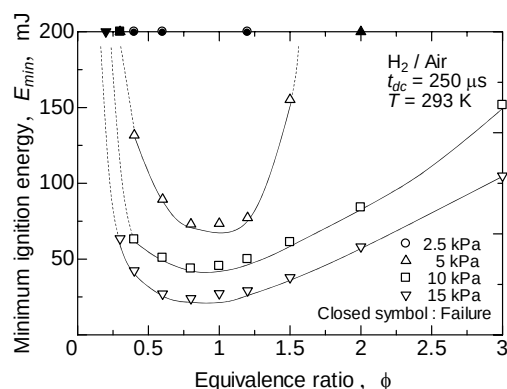


Fig.2 Minimum ignition energy versus equivalence ratio.

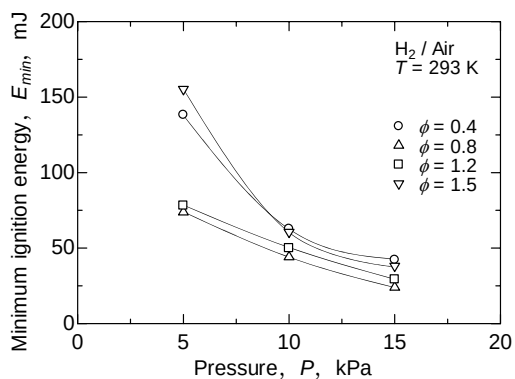


Fig.3 Minimum ignition energy versus pressure.

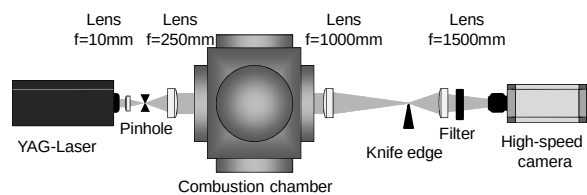


Fig.4 Optics for schlieren photography.

に転じる。当量比 1.0 の混合気の場合と比較して、点火限界付近の混合気では、火炎核直径が急激に増大するまで、すなわち自立火炎になるまでの時間が長くなっている。図 6 に、圧力 10 kPa の条件における臨界火炎核直径と当量比の関係を示す。放電エネルギーは、各当量比における最小点火エネルギーとした。当量比が 0 の位置にプロットされているデータは、空気中で 200 mJ の放電を行った際に、実験で使った光学系で観察された熱核の最大直径を示している。当量比 1.0 の混合気と比較して、点火限界付近の混合気では臨界火炎核直径が増大していることがわかる。これは、自立火炎を発生させるために必要な放電エネルギーが増大しているためだと考えられる。この結果より、小さな燃焼容器を使用した場合、点火限界付近の混合気では、火炎核が燃焼容器内直径に近くなり、点火遅れ時間も長いいため、火炎核から燃焼容器壁への熱損失が急激に増大することが予想される。

図 7 に、当量比を 1.5 で一定とし、圧力 10, 15 および 20 kPa の条件で計測された火炎核直径履歴を示す。図中の実線は、実験値を 3 次曲線で近似した曲線である。図より、圧力の減少に伴って自立火炎に移行するまでの時間が長くなっていることがわかる。図 8 に臨界火炎核直径と圧力との関係を示す。圧力の減少により臨界火炎核直径が増大していることがわかる。この結果より、小さな燃焼容器を使用した場合、低圧の混合気では、火炎核が燃焼容器内直径に近くなり、火炎核から燃焼容器壁への熱損失が急激に増大することが予想される。圧力 2.5 kPa の条件では、いずれの当量比においても臨界火炎核直径が燃焼容器内直径に達してしまったため、点火が起こらなかったと推察される。

3.2 低温低圧水素／空気予混合気の最小点火エネルギー

図 9 に、233～323 K の予混合気温度範囲における最小点火エネルギーと当量比の関係を示す。実験圧力は 10 kPa で一定とし、放電エネルギーは 200 mJ まで変化させた。いずれの予混合気温度においても、当量比が 0.4 以下の条件では予混合気の点火が確認できなかった。予混合気温度の低下に伴って、最小点火エネルギーを示す曲線はエネルギーが高くなる方向にほぼ平行移動していることがわかる。図 10 に、最小点火エネルギーと予混合気温度の関係を示す。予混合気温度の減少に伴って最小点火エネルギーが増大することがわかる。当量比 1 付近では、予混合気温度の減少に伴って臨界火炎核中の予混合気を点火温度まで加熱するのに余分に必要となる熱量が、最小点火エネルギーを増大させたと推察された。点火限界付近の予混合気では、予混合気温度の減少に伴って臨界火炎核直径が増大し、火炎核から燃焼容器への熱損失が増大したため、さらに最小点火エネルギーが増大したと考えられる。

図 11 に、圧力 5 kPa における最小点火エネルギーと当量

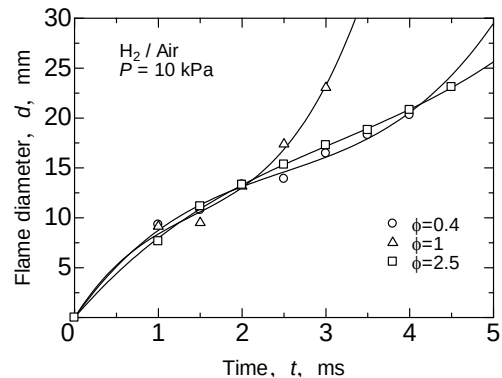


Fig.5 Time variation of flame diameter.

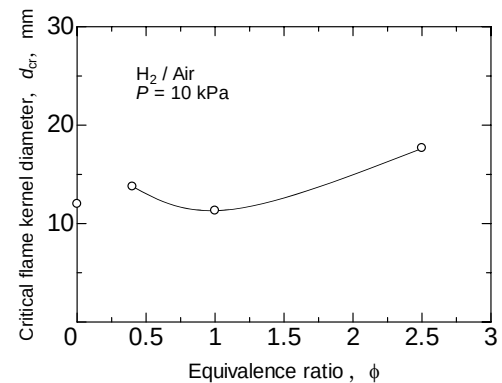


Fig.6 Critical flame kernel diameter versus equivalence ratio.

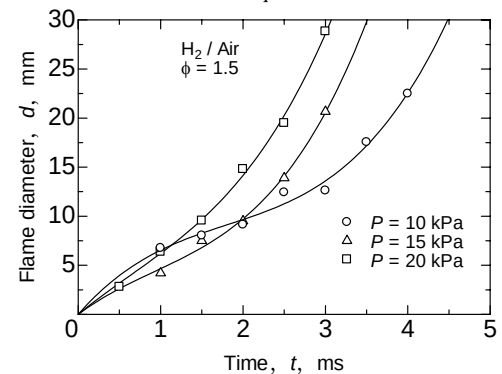


Fig.7 Time variation of flame diameter.

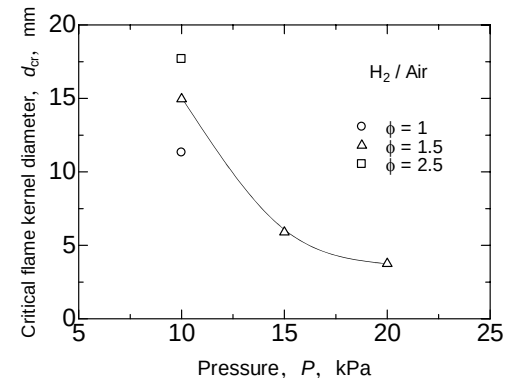


Fig.8 Critical diameter versus pressure.

比の関係を示す。予混合気温度が 293 K の条件では、当量比 0.4～1.5 の範囲で予混合気の点火が確認できた。予混合気温度が 233～263 K の条件において、当量比 0.4 および 1.5 では、予混合気の点火が確認できなかった。予混合気温度の減少に伴い、点火可能な温度範囲が狭まっていることがわかる。図 12 に、最小点火エネルギーと予混合気温度の関係を示す。圧力が 10 kPa である図 10 と比較し、予混合気温度の減少に伴って最小点火エネルギーが急激に増大することがわかる。圧力 5 kPa の予混合気では、当量比が 1.0 であっても臨界火炎核が燃焼容器内直径に近い大きさになるので、予混合気初期温度に等しい壁面温度の影響を火炎核が強く受け、最小点火エネルギーが予混合気温度の減少に伴って急激に増大したと考えられる。

4. 結言

低圧水素/空気予混合気の最小点火エネルギーについて調べた結果、以下の知見を得た。

- (1) 圧力の減少に伴って、最小点火エネルギーは増大する。
また、点火限界付近では最小点火エネルギーの圧力依存性が大きくなる。
- (2) 当量比 1.0 の予混合気と比較し、点火限界付近の予混合気では、最小点火エネルギーを予混合気に与えた際の臨界火炎核直径および自立火炎に移行するまでの時間は大きな値を示す。また、最小点火エネルギーを予混合気に与えた際の臨界火炎核直径は、圧力の減少に伴って増大した。
- (3) 圧力が 5 kPa の予混合気は、当量比が点火限界に近づくとき最小点火エネルギーが急激に大きくなる。点火限界付近では臨界火炎核が壁面付近まで拡大するので、火炎核から壁面への熱損失増大の影響が強く現れているためであると推察された。
- (4) 予混合気温度の減少に伴って、最小点火エネルギーは増大する。予混合気圧力が 5 kPa の条件では、全ての当量比において最小点火エネルギーが予混合気温度の影響を強く受ける。圧力 10 kPa、当量比 1 付近の条件では、予混合気温度の減少に伴って臨界火炎核中の予混合気を点火温度まで加熱するのに余分に必要となる熱量が、最小点火エネルギーを増大させたと推察された。圧力 10 kPa の点火限界付近および 5 kPa の条件では、予混合気温度および圧力の減少に伴って臨界火炎核直径が増大し、火炎核から燃焼容器壁面への熱損失が増大したため、さらに最小点火エネルギーが増大したと推察された。

参考文献

1. Lewis, B. and von Elbe, G., Combustion Flames and Explosions of Gases, 3rd Ed. (1987)
2. Isadore, Drell., et al., Survey of hydrogen combustion properties. NACA, REPORT 1383.

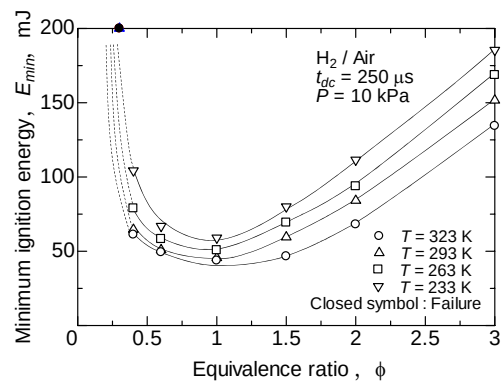


Fig.9 Minimum ignition energy versus equivalence ratio. ($P = 10$ kPa)

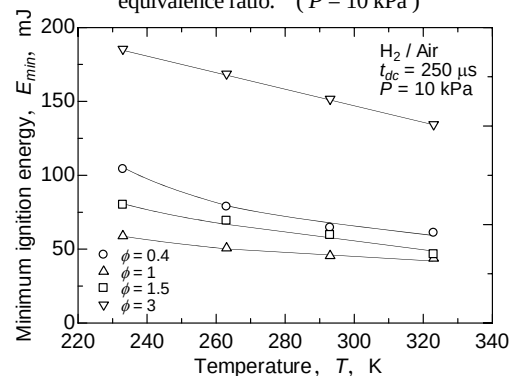


Fig.10 Minimum ignition energy versus Temperature. ($P = 10$ kPa)

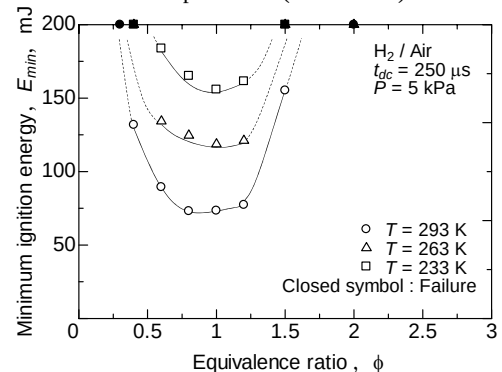


Fig.11 Minimum ignition energy versus equivalence ratio. ($P = 5$ kPa)

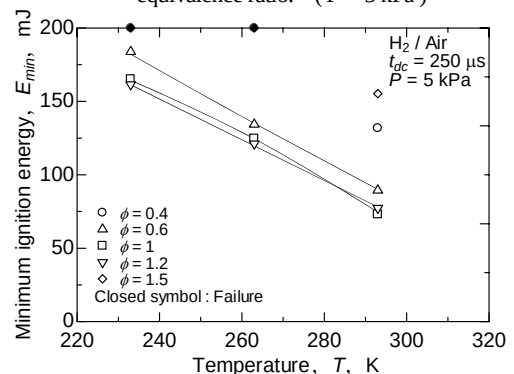


Fig.12 Minimum ignition energy versus Temperature. ($P = 5$ kPa)