

スクラムジェット用燃料としての液体炭化水素の適合性に関する研究

日大生産工(院) ○石川 雄太 東大工 津工 光洋 日大生産工 野村 浩司
東大(院) 橋本 晋 東大新 河野 通方 日大生産工 氏家 康成

1. 緒言

次世代の宇宙往還機用推進機関として、スクラムジェットエンジンが有望視されている。スクラムジェットエンジンは極超音速機用の推進機関として期待され、国内外問わず多くの研究が行われてきた。^{1)~5)}

エンジンの燃料としては、主として水素や炭化水素を用いることが考えられている。燃焼室内を空気が超音速で流れるスクラムジェットエンジンにおいては、一般的には反応性の高い水素を用いることが燃焼には有利である。しかし一方で、水素は単位体積当りの発熱量が小さいため、航空機において必須条件となる燃料タンクの小型化には不向きである。そのためエネルギー密度の大きい液体炭化水素を燃料とすることでこの問題を解決しようという試みがなされ、ケロシンを用いた超音速燃焼の研究が広く行われてきた。²⁾

これらの成果から、ケロシンの超音速燃焼特性はおおよそ明らかになってきた。そこで本研究では、ケロシンの他にも数種の液体炭化水素燃料を採用し実験を行う事で、燃料の物性値が超音速燃焼に及ぼす影響を調べることにした。その中で、ディーゼルエンジン内での自発点火のし易さを表すセタン価に特に注目した。セタン価の高い燃料ほど超音速燃焼に有利という予測の下、スクラムジェットエンジンを模擬した燃焼器内での燃焼特性を実験的に調べた。本稿では、スクラムジェットにおける主種の様々な液体炭化水素系燃料の燃焼特性を報告する。

2 実験装置・測定方法

2.1 風洞設備

実験は、東京大学の超音速燃焼風洞を用いて行った。装置全体の概略図を Fig.1 に示す。本風洞は貯気槽を用いたブローダウン方式の風洞であり、空気の加熱に水素の希薄燃焼を用いる vitiation 方式を採用している。このため、試験部に供給される主流空気には水素の燃焼による副生成物が含まれ、それらが燃料

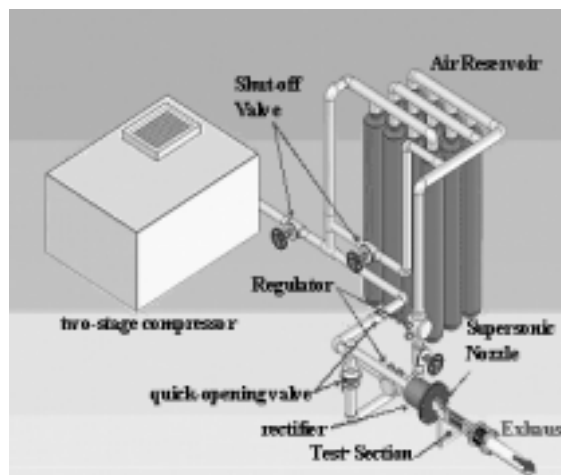


Fig.1 Supersonic wind tunnel

Table 1 Airflow conditions at the combustor entrance

mach number	total temperature [K]	total pressure [MPa]	static pressure [MPa]
2	1800~2400	0.38	0.05

の燃焼に影響を及ぼすことが懸念された。しかし、本研究の目的は成分分析的な燃焼特性を調べるのではなく、物性値の違いを対象としているため、この影響は無視するものとした。試験部入口での主流の条件を Table 1 に示す。

2.2 試験部

スクラムジェットエンジン燃焼室を模擬した試験部、および燃料噴射装置付近の詳細を Fig.2 に示す。この燃焼器は、入口において 30 [mm] × 36 [mm] の矩形断面を有し、下壁には燃焼の発熱による熱閉塞を緩和するため入口から 142 [mm] の地点から 2° の拡大角が設けられている。

A study on the adaptability of the liquid hydrocarbon as fuel for scramjets

Yuta ISHIKAWA, Hashimoto SUSUMU, Mitsuhiro TSUE, Hiroshi NOMURA,
Michikata KONO and Yasushige UJIIE

Table.2 Properties of the fuels

	ケロシン	GTL 軽油	n-C ₁₀ H ₂₂	n-C ₈ H ₁₈
セタン価	50	77	77	64
分子量	195	224.5	142.1	114.1
密度 at 20 [g/cm ³]	0.78	0.78	0.73	0.70
沸点 at 1atm [°C]	175 - 325	205 - 354	174	127
真発熱量 [kJ/g]	43.0	43.5	48.1	48.3

本研究で燃料として用いた液体炭化水素とその物性値を Table 2 に示す。ケロシンは現在ジェット航空機用の燃料として広く用いられているものである。今回は比較的セタン価の高い燃料として GTL (Gas To Liquid) 軽油を採用した。また、詳細な物性値が得られる純物質のデカン ($n\text{-C}_{10}\text{H}_{22}$) とオクタン ($n\text{-C}_8\text{H}_{18}$) を、比較検討のために採用することとし、実験を行った。

燃焼器上壁には流れ方向に 23 個の静圧孔が設けてあり (Fig.2), 燃焼室内の静圧分布を得ることが出来る。この分布から燃焼室内部の燃焼, 非燃焼の判別を行った。

燃焼器内部の状況は、熱閉塞（Thermal Choke）、超音速燃焼（Supersonic Combustion）、非燃焼（No Combustion）のおよそ3つに分けられる。Fig.3に、各モードにおいて得られる典型的な燃焼室内の静圧分布のグラフを示す。スクラムジェットエンジンにおいて理想とされる燃焼形態は、熱閉塞を伴わない燃焼の成立である。

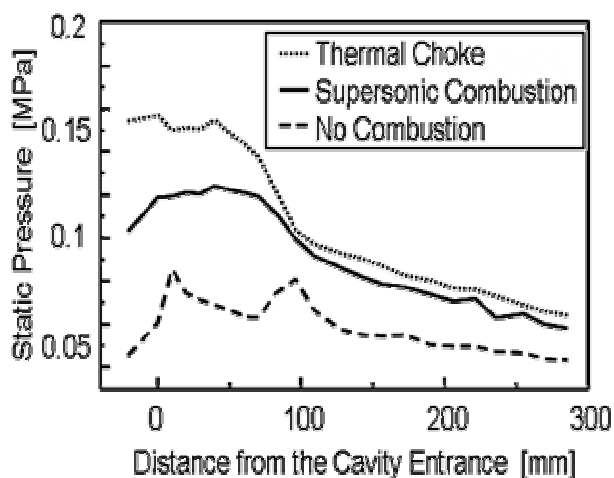


Fig.3 Typical Static Pressure Distributions

3. 実験結果および考察

3.1 自発点火性能

各燃料について，主流全温と当量比を変化させ，実験を行った．実験条件は，主流全温を 2400 [K] ~ 1400 [K] まで 200 [K] ずつ下げていき，また，各主流全温の条件下において当量比も変化させ，噴射した燃料が燃焼器内で自発点火をおこなうかを調べた．その結果を Fig.4 の (a) ~ (d) に示す．各燃料の比較にあたっては，より低温，低当量比の条件において自発点火可能な燃料を，自発点火性の優れた燃料であると考えることができる．

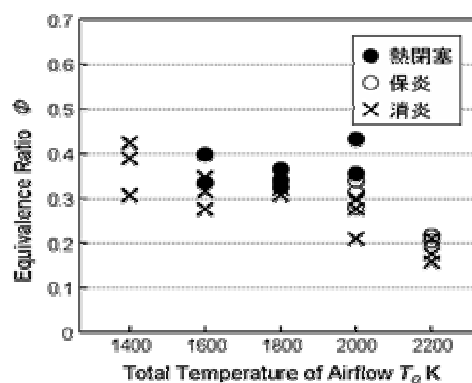
全ての燃料において，主流全温が 2400，2200 [K] の下では自発点火が確認されたが，1800 [K] 以下の条件では保炎が成立する正常な自発点火が確認されなかった．すべての燃料で正常な自発点火が確認された最低温度条件の 2200 [K] に注目する．ここでは GTL 軽油と n-オクタンがより低い当量比で自発点火することができ，それからケロシン，n-デカンの順であった．

この結果は，ディーゼルエンジンの場合のようにセタン価の高い燃料ほど自発点火に有利という予測とは一致していない．このことから超音速燃焼においては，燃料全体のセタン価で自発点火性能を評価することはできないことがわかった．自発点火への寄与が大きい他の物性値が存在するものとおもわれる．そのため，個々の燃料の詳しい成分にも注目した調査が今後必要であると考えられる．

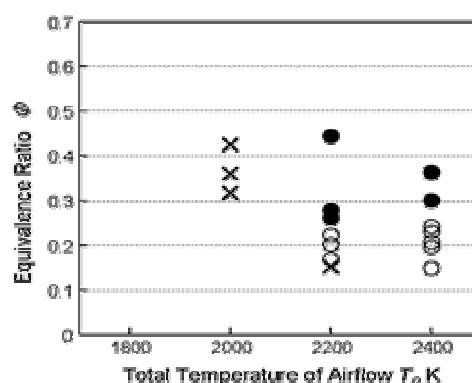
3.2 保炎性能

各燃料について，自発点火が確認できなかった低温，低当量比の条件において実験を行った．まず，キャリアガスに水素を添加し，さらにそこへ燃料を加えたものを燃焼器内へ噴射する．この過程で，燃料は水素の燃焼によって燃焼器内で強制的に点火される．次に，燃料流に含まれる水素を除去し，燃料のみの単独の噴射を行う．この際に燃料が保炎を行うかを調べた．その結果を Fig.5 に示す．自発点火の場合と同様に，より低温度，低当量比のもとで保炎を行える燃料を，保炎性の優れた燃料として取り扱うものとする．

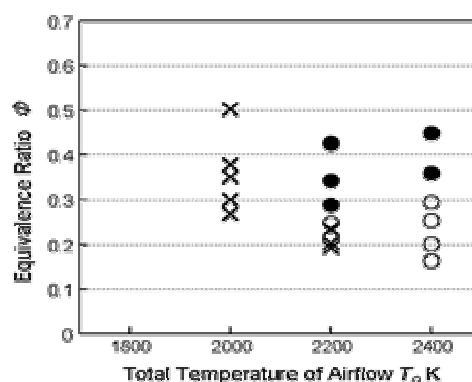
全ての燃料について，主流全温 1600 [K] では熱閉塞を伴わない保炎は確認できなかった．GTL 軽油，n-デカン，n-オクタンは 1800 [K] 以上の主流全温で保炎することができたが，ケロシンについては 2000 [K] 以上の範囲でしか保炎が確認できなかった．また，1800 [K] においては n-デカンが最も低い当量比で保炎



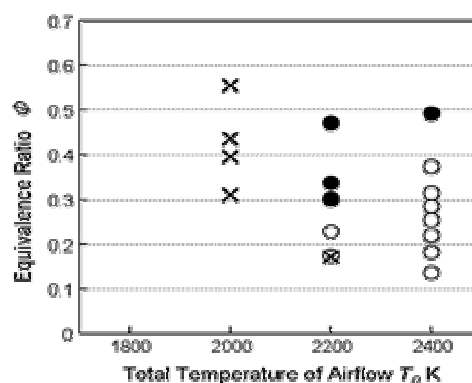
(a) Kerosene



(b) GTL light oil



(c) n-decane



(d) n-octane

Fig.4 Self-ignition performance

することができ、それから GTL 軽油、n-オクタンの順であった。

この保炎性能の優劣は、各燃料のセタン価の大きさに非常によく対応していることが見て取れる。これらの結果から、超音速燃焼における炭化水素系燃料の保炎は、高いセタン価数をしめすものが保炎には有利であるということが示唆された。ディーゼルエンジン内での自発点火性能を評価する指標であるセタン価が、ここでは自発点火よりもむしろ保炎性能と強く関係していたという結果が得られた点は非常に興味深い。これは、スクラムジェット用燃焼器内における保炎の成否は、空気の流れに抗して燃焼の連鎖反応を持続させることができるかによって主に決まると考えられ、そのため燃料の反応性を表すようなセタン価の影響が強く現れたものと思われる。

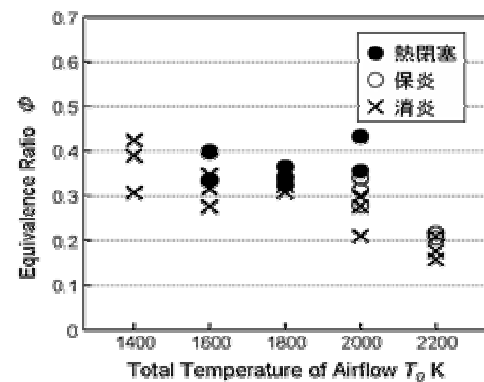
4. 結論

ケロシン、GTL 軽油、n-デカン、n-オクタンを燃料とし、スクラムジェットエンジンを模擬した燃焼器を用いて超音速燃焼実験を行い、以下のような結論を得た。

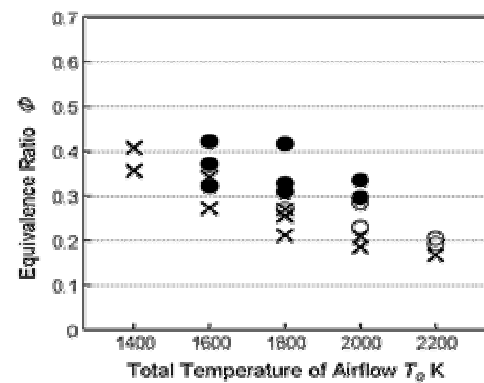
- 1) 自発点火性能についてケロシンと比較すると、GTL 軽油と n-オクタンは優れており、n-デカンはほぼ同等であった。
- 2) 保炎性能は n-デカンが最も優れており、次に GTL 軽油、n-オクタンの順で、ケロシンが最も劣っていた。
- 3) 超音速燃焼においては、セタン価で自発点火を評価することはできない。
- 4) 超音速燃焼においては、高いセタン価が保炎に有利である。

5. 参考文献

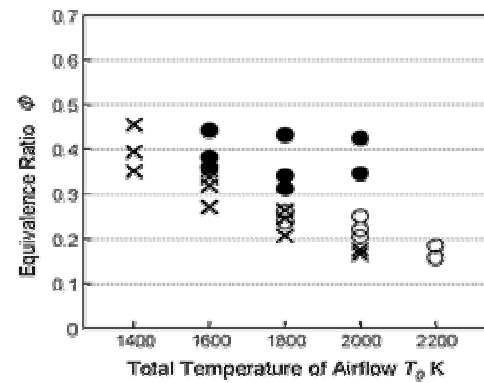
1. 参考文献
- 1) Billig, F.S., "Research on Supersonic Combustion," Journal of Propulsion and Power, Vol.9, No.4, July-Aug.1993 pp. 499-514
- 2) Waltrup, P.J., "Liquid-Fueled Supersonic Combustion Ramjets: A Research Perspective," Journal of Propulsion and Power, Vol. 3, No.6, Nov.-Dec. 1987, pp.515-524
- 3) Takahashi, S., Tanaka, H., Noborio, D., and Miyashita, T., "Mach 2 Supersonic Combustion with Hydrocarbon Fuels in a Rectangular Scramjet Combustor," Proceedings of 16th ISABE, paper No.2003-1172, Cleveland, 2003.
- 4) Avreshkov, V., et.al, "Organization of Supersonic Combustion in a Model Combustion Chamber," AIAA-Paper 90-5268, 1990
- 5) Gruenig, C and Mayinger, F., "Supersonic Combustion of Kerosene/H₂ Mixtures in a Model Scramjet combustor," Combustion Science and Technology, Vol. 146, pp.1-22



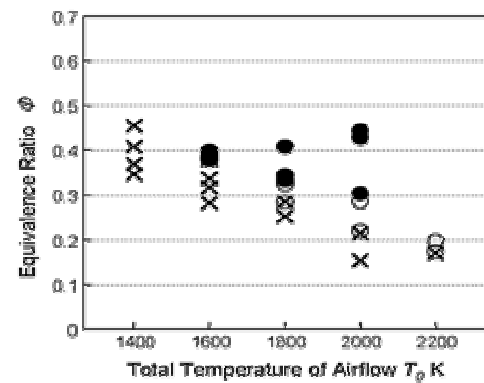
(a) Kerosene



(b) GTL light oil



(c) n-decane



(d) n-octane

Fig.5 Flame-holding performance