

持続可能ロケット推進剤および従来燃料の噴霧燃焼における すす生成と火炎特性に関する研究

日大生産工(院) ○中村 凜 東大工学(院) 高岡 泰正
日大生産工 松本 幸太郎 宇宙研 羽生宏人

1. まえがき

近年、環境問題の深刻化により、化石燃料に代わる低環境負荷エネルギーとしてバイオマス由来の持続可能航空燃料 (SAF) が注目されている。SAFは燃焼時にすすやSO_x, NO_xの原因となる芳香族化合物・窒素化合物・硫黄化合物を含まず¹⁾、原料植物が成長時にCO₂を吸収するため温室効果ガスを最大80%削減できる²⁾。また、製造工程で物性や分子構造を調整でき³⁾、燃焼特性の最適化が可能であることから、ロケット推進剤への応用が期待される。本研究では、バイオマス由来の持続可能なロケット推進剤 (SRP) の実用化を目指す。SRPは灯油由来の液体ロケット燃料RP-1と同等の性能を持ち、貯蔵性・信頼性に優れ、環境負荷が低く高性能な次世代ロケット燃料として期待される。

燃焼時に発生するすす量はロケット燃料の有用性を評価する重要な指標であり、持続可能な宇宙輸送に向けた最適なSRP組成の提案に不可欠である。本研究では、SRPの燃焼特性を石油由来ジェット燃料JETA-1および炭素数12の2種の炭化水素化合物と比較するため、二色法によるすす濃度および火炎温度の計測³⁻⁶⁾を行った。二色法とは、燃焼場中のすすについて2つの波長で輝度温度を測定し、その結果から火炎温度およびすす濃度を示すKL値を算出する手法である。さらに、測定対象と検出器間にあるガラスなどの透過率変動の影響を抑制でき、実験環境において安全かつ高精度な温度測定を実現できる。本研究では、Hottel & Broughton の二色温度法（以下 H&B二色温度法と記す）を適用し、高速度カメラによる撮影画像を用いて、燃焼火炎の火炎温度とKL値の分布を測定、解析した。

2. 提案手法

本研究では、二色放射測定法を用いて火炎温度とすす濃度を算出した。二色法は熱放射理論に基づく手法であり、火炎中のすすの絶対放射強度を可視域の二波長で測定し、同時に炎温度とすす濃度を算出する。

絶対黒体における放射強度はプランクの法則で表される。黒体の場合、短波長における放射強度はPlanckの放射則より式 (1) で表すことができる。

$$I_B(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_b}\right) - 1 \right)} \quad (1)$$

$I_B(\lambda, T)$: Blackbody radiation intensity
 $c_1 = 2\pi h C^2 = 3.7403 [J/m^3]$: Planck first constant
 $c_2 = Chk = 14387.69 [\mu m K]$: Planck second constant
 T : True temperature [K]
 λ : Wavelength [μm]

黒体においては火炎温度 T と輝度温度 T_b は同一値だが、すすをはじめとした非黒体物質では輝度温度は火炎温度と異なり、その放射強度は単色放射率と ε_λ 黒体放射強度の積で表される。

$$I_s(\lambda, T) = \varepsilon_\lambda I_B(\lambda, T) \quad (2)$$

$I_s(\lambda, T)$: Radiation intensity
 ε_λ : Monochromatic emissivity

ゆえに、単色放射率 ε_λ は以下のように表される。

$$\varepsilon_\lambda = \frac{I_s(\lambda, T)}{I_B(\lambda, T)} = \frac{\frac{c_1}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_b}\right) - 1 \right)}}{\frac{c_1}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right)}} \quad (3)$$

T_b : Brightness temperature

Hottel & Broughton の経験則式によると $\alpha = 1.38$ という、すすに固有の定数を用いて、単色放射率 ε_λ は以下のように表される。

$$\varepsilon_\lambda = 1 - e^{-\frac{KL}{\lambda^\alpha}} \quad (4)$$

Study of soot formation and flame characteristics in spray combustion of sustainable rocket propellants and conventional fuels

Rin NAKAMURA, Taisei TAKAOKA, Kotaro MATSUMOTO and Hiroto HABU

ゆえに、式(2),(3)より

$$KL = -\lambda^\alpha \ln \left[1 - \left(\frac{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_b}\right) - 1} \right) \right] \quad (5)$$

波長 λ_1 における輝度温度を T_{b1} 、波長 λ_2 における輝度温度を T_{b2} とすると、火炎の同じ場所KL値は異なる波長においても同じであるため以下の式が成り立つ。

$$\begin{aligned} & -\lambda_1^\alpha \ln \left[1 - \left(\frac{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda_1 T}\right) - 1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda_1 T_{b1}}\right) - 1} \right) \right] \\ &= -\lambda_2^\alpha \ln \left[1 - \left(\frac{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda_2 T}\right) - 1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda_2 T_{b2}}\right) - 1} \right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

輝度温度 T_{b1} 、 T_{b2} はカメラの校正によって得ることができるため、(6)式に代入し、火炎温度 T を求め、(5)式に代入することでKL値を得ることができる。

本研究では火炎観察用カメラのRGB出力値のうちRとGの出力値を使用し、2次標準電球で校正を行った。

3. 実験方法および測定方法

本研究では、JETA-1, Isododecane (C12-I), Bicyclohexyl (C12-BiC)，試作SRP候補成分 SRP-P1, SRP-P3及び水素化したSRP-P3-1の6種類を対象とした。SRPは、植物由来の原料である菜種油を以下のプロセスによって合成された燃料である。

- ・焙煎菜種油→脱酸素水素化→蒸留→水素化異性化→蒸留→SRP-P1
- ・焙煎菜種油→脱酸素水素化 → FCC 触媒→固定床→蒸留→ SRP-P3→ 芳香族水素化→蒸留→SRP-P3-1

SRP-P1はN-パラフィンとイソパラフィン主体の燃料で、SRP-P3-1はシクロパラフィンが主体の燃料である。水素化前のSRP-P3は芳香族化合物が主体である。各燃料の物性・組成をTable 1に示す。今回調査を行った各種燃料について密度、粘度、表面張力の測定および燃料組成分析を行った。各物性の測定は、高精度温度計を使用し、293 K (± 0.5 K)で行った。密度の測定は密度比重計を用い、粘度の測定は振動式粘度計を用いた。

表面張力の測定は、デュヌイ法張力計（を用いた。表面張力は5回測定を行い、得られた測定値のうち最大値および最小値を除外した後、残りの3回の測定値の平均値を算出した。燃料組成の分析は、ガスクロマトグラフ質量分析計 (GC/MS) を使用した。

本研究では、燃焼の安定性を確保するため、圧電素子を用いた噴霧燃焼方式を採用し、すすおよび火炎の計測を行った。

実験装置の概要をFig.1に示す。システムは主に、燃料噴霧用圧電素子（穴径5 μ m, 穴数740個）、ファンクションジェネレーター、燃焼室（80×500 mm）で構成される。圧電素子はファンクションジェネレーターに接続され、印加電圧と周波数を調整することで単位時間あた

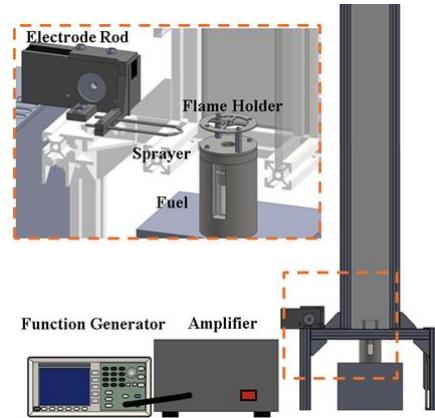


Fig.1 実験装置の概要。オレンジの点線はアトマイザーの拡大図

りの燃料供給量を一定に保ち、微細霧化により安定した着火と火炎形成を実現した。本方式は少量燃料で実験可能であり、希少サンプルの評価やすす捕集にも適している。燃料の着火は、先行研究で用いられた平行流メタン火炎バー（7-11）ではなく、400 kV昇圧モジュールに接続した対電極間の火花放電により行った。電極はモータ駆動で水平方向に可動し、着火後5秒以内に燃焼室外へ退避する。火炎安定化のため、厚さ1 mmのステンレス製リング状保炎板を噴霧器から高さ15 mmに設置した。すす濃度の評価には二色法を用いた。各燃料の燃焼火炎を、10 mm F1.8レンズおよびND8フィルターを装着した高速度カメラで撮影した。撮影条件は500 fpsで約8 秒間とし、約4000枚の火炎画像を取得した。得られた画像を2色式温度計測ソフトウェアで解析し、平均火炎温度およびすすのKL値の平均を算出した。KL値は値が高いほど

すす濃度が高いことを示す。これらの平均値は、画像全体の画素温度およびKL値の分布から算出した。

4. 実験結果および検討

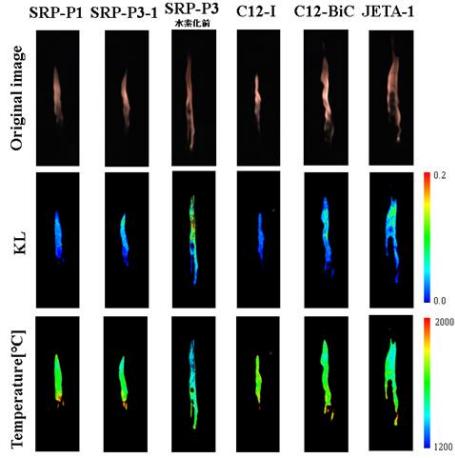


Fig.2 噴霧燃焼実験における燃焼場の真温度とKL値の分布

Fig.2は、各燃料の噴霧燃焼実験における燃焼場の火炎温度およびKL値の分布を示す。各燃料の噴霧燃焼火炎では、上部のすすの濃度が高い領域で火炎温度の低下が確認された。これは、すす生成が火炎温度分布に直接影響し、さらに自然対流によるすすの上方輸送で火炎上部に高濃度領域が形成されたためと考えられる。分布画像から得られた画素ごとKL値の平均値および火炎温度をFig. 3, Fig.4に示す。測定結果から、SRP-P1, C12-I, SRP-P3-1, C12-BiC, JETA-1, 水素化前のSRP-P3の順にすす濃度の増加傾向がみられた。この傾向は、さまざまな炭化水素燃料の層流拡散火炎におけるすす形成傾向を調査した先行研究¹³⁾と一致しており、本試験装置の有用性が明らかになった。

すす生成には芳香族化合物の含有量が重要であり、その生成過程が律速段階となる。炭素結合を切断せずに芳香族化合物を直接生成する経路は、低分子化合物（エチレンやプロピレンなど）を経由する経路よりもすす生成に有利とされる。本研究で最もすす生成量が多かった水素化前のSRP-P3は、主成分の約50%が芳香族化合物であり、これがすす生成を促進した要因と考えられる。次に多かったJETA-1も、芳香族化合物を含む環状構造化合物を約20 vol%含有しており¹²⁾、同様にすす生成に寄与したと考えられる。さらにC12-BiCは反応初期にシクロヘキサンとシクロヘキセンへ同量分解し¹⁴⁾、シクロヘキセンが脱水素反応を経て芳香族化合

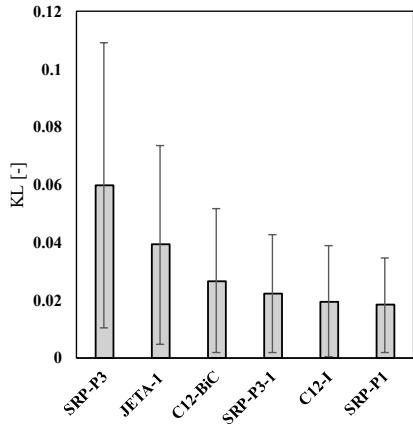


Fig.3 分布画像から得られた各画素のKL値平均

物を形成する。このため、ビシクロアルカンを

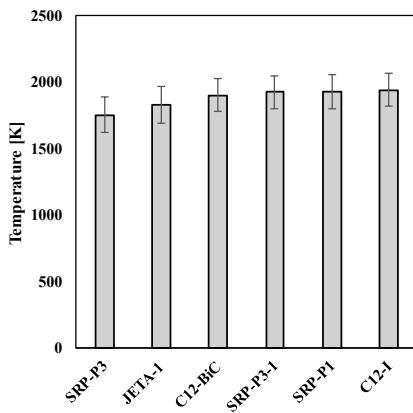


Fig.4 分布画像から得られた各画素の火炎温度平均

含む燃料では反応初期から芳香族化合物生成量が多く、多量のすすが生成したと考えられる。また、SRP候補燃料であるSRP-P1は、SRP-P3-1に比べてすす生成量が少ないことが確認された。すす生成要因の一つである芳香族化合物はSRP-P1の方が多く含まれているが、実際にはSRP-P1の方がすす生成量が少なかった。両燃料はそれぞれ異なる種類のアルカンを主成分としており（SRP-P1はイソパラフィン、SRP-P3-1はシクロパラフィン），この分子構造の違いがすす生成挙動に大きく影響を及ぼしていると考えられる。先行研究においても、シクロパラフィンはイソパラフィンより多くのすすを生成することが報告されており¹⁵⁾、本研究の結果はこれと一致している。したがって、燃料組成における分子構造の違いがすす生成特性に直接的な影響を与えることが明らかとなった。

火炎温度は、C12-I，SRP-P1，SRP-P3-1，C12-BiC，水素化前のSRP-P3，JETA-1の順に低下する傾向が見られた。過剰なすすの生成は、燃料液滴と火炎との間に障壁を形成し、蒸発燃料の拡散および火炎から液滴への熱伝達を妨げる。その結果、燃焼速度が低下し、推進効率の減少を招く。本実験の結果から、SRPはJETA-1に比べてすす生成が少ないため、燃焼速度が速く、推進効率の高いロケット燃料としてより適した燃焼特性を有すると期待される。

5.まとめ

- ・ 本研究では6種類の燃料を用い、各燃料の火炎温度とすす生成傾向を明らかにした。
- ・ KL値および温度分布画像から、火炎上部の高すす濃度領域で火炎温度が低下する傾向が確認され、すす生成が火炎温度に直接影響している可能性が示唆された。
- ・ 火炎温度は C12-I, SRP-P1, SRP-P3-1, C12-BiC, 水素化前SRP-P3, JETA-1 の順に低下し、過剰なすす生成が燃料拡散や熱伝達を妨げたと考えられる。
- ・ 二色法の結果、すす濃度は SRP-P1, C12-I, SRP-P3-1, C12-BiC, JETA-1, 水素化前 SRP-P3 の順に増加した。これより、SRP はJETA-1 よりすす生成が少なく、高い推進効率が期待され、ロケット燃料として有望であると考えられる。

参考文献

- 1) Pavel Šimáček. et al., "Hydroprocessed rapeseed oil as a source of hydrocarbon-based biodiesel", Fuel(2009)p.456-460.
- 2) Hongjian Wei a. et al., "Renewable bio-jet fuel production for aviation", A review(2019).
- 3) Mingming Zhu. et al., "Effect of n-butanol addition on the burning rate and soot characteristics during combustion of single droplets of diesel–biodiesel blends", Fuel(2020).
- 4) Mingming Zhu. et al., " Effect of oxygenates addition on the flame characteristics and soot formation during combustion of single droplets of a petroleum diesel in air", Fuel(2015)p.88-95
- 5) S Simonini. et al., "Soot temperature and concentration measurements from colour charge coupled device camera images using a three-colour method", Sage Journals(2001)
- 6) H. Zhao. et al., "Optical diagnostics for soot and temperature measurement in diesel engines", Fuel(1998)p.221-255.
- 7) T.X. Li a. et al., "Synthesis, droplet combustion, and sooting characteristics of biodiesel produced from waste vegetable oils", Proceedings of the Combustion Institute(2011)p. 2039-2046.
- 8) Mario Angeloni. et al., "Experimental investigation of the combustion of crude glycerol droplets", Fuel(2016)p.889-895.
- 9) Álvaro Muelas. et al., "Combustion Behavior of Jet A Droplets and its Blends With Butanol", Proceedings of ASME Turbo Expo(2017)p.12.
- 10) A. Lee. et al., "Aerothermochemical studies of energetic liquid materials. 2. Combustion and microexplosion of droplets of organic azides", Combustion and Flame(1988),p123-136.
- 11) C.H. Wang. et al., "Combustion and microexplosion of freely falling multicomponent droplets", Combustion and Flame(1984)p.175-197.
- 12) 三愛オブリ株式会社, " JETA-1 Certificate of Analysis"
- 13) Y. Kobayashi. et al., "PM Formed from Laminar Diffusion Flames of Various Hydrocarbon Fuels", International Journal of Automotive Engineering,(2014)p.989-994.
- 14) Zhan Gao. et al., "A comparative study on soot and PAH formation of C10 naphthenic ring-containing species in laminar coflow diffusion flames", (2023)
- 15) T Takaoka. et al., "Experimental study on the relationship between the molecular structure and droplet combustion/flame characteristics of various alkane hydrocarbon fuels", Fuel (2025).