

バイオジェット燃料を用いた小型ガスタービンのエンジン試験

Engine test of small gas turbines with aviation bio jet fuel

藤原 仁志^{*1}
FUJIWARA Hitoshi

中村 将治^{*2}
NAKAMURA Masaharu

冷水 陵馬^{*2}
HIYAMIZU Ryoma

山田 秀志^{*1}
YAMADA Hideshi

下平 一雄^{*1}
SHIMODAIRA Kazuo

廣田 雅^{*2}
HIROTA Masashi

岡井 敬一^{*3}
OKAI Keiichi

ABSTRACT

Engine tests of small gas turbines were performed with both of 100% HEFA (Hydro-treated Ester and Fatty Acid) bio jet fuel and JetA-1 commercial aviation fuel to investigate the effect of the fuel change on the performance of the gas turbines and the emissions. The results showed that the emission of particulate matter (PM) was greatly reduced with HEFA, while the performance of the gas turbines and other emissions were quite similar to each other. JetA-1+HEFA 50:50 blend fuel, JP4 and HDF (High Density Fuel) were also used to promote the understanding of the effect of fuels. Chemical analysis of the fuels was performed to investigate the relationship between the characteristics of the fuels and the engine performance and emissions. The lubricity of the fuels and the effect of the fuels on O-rings for fuel passages were also investigated which are essential for gas turbine long term operations.

Key words : ガスタービン, バイオジェット燃料, HEFA燃料, すす, エンジン試験

Gas Turbine, Bio Jet Fuel, Hydro-treated Ester and Fatty Acid Fuel, Particulate Matter, Engine Test

1. 緒言

航空分野における地球温暖化対策の目標や行動計画の設定は、航空輸送の性質上、国際的な合意の元で進めることができ望ましく、国際民間航空機関（ICAO）を中心に行われている。航空分野から排出される温室効果ガスは、全体の2%程度と現状では大きくないが、航空輸送は年率5%程度の伸びが続くと予想されていることや、自動車分野他で進む急速な効率化、電動化も考慮すれば、今後、航空分野の温暖化への影響度が日増しに大きくなることが懸念される。ICAOでは2020年から国際航空排出CO₂量を増加させないことを目標に掲げており、この達成には、機材や運航の効率化に加えて、大幅なCO₂削減が可能な航空用バイオジェット燃料の導入が前提となっている⁽¹⁾。

その他、バイオジェット燃料には、燃料供給源の多様

化による安定供給への貢献や、これ以上燃料費を上昇させない効果などが期待されている。海外ではバイオジェット燃料が民間の定期便にも利用されているが、国内では、現在は生成も利用もされていない⁽¹⁾。国内でもバイオジェット燃料生成に向けた試みも多数みられるが^{(2)~(4)}、一方で、バイオジェット燃料のエンジン作動状態への影響、燃料ポンプの潤滑性や燃料系統のシール性、排気ガスの変化などについて、海外での試験報告が見られるものの⁽⁵⁾、まだ完全には明らかされていない。現在、2020年東京パラリンピック・オリンピックに向けて国産バイオジェット燃料を導入する政策の議論がなされており、国内でも、産官学をあげて、バイオジェット燃料を用いたエンジンの実証試験や独自のデータ蓄積が必要になってきている。本論文では、日本初の試みである、小型ガスタービンの100%バイオジェット燃料でのエンジン試験の他、4種類の燃料でのエンジン試験を行った結果と、燃料変化の影響に関する考察について報告する。なお、ガスタービンの形状/性能の詳細は各社固有の知的財産として絶対値は開示できないものが多いが、可能な限り相対値等を利用して結果の開示に努めた。

原稿受付 2015年11月20日

校閲完了 2016年4月26日

* 1 宇宙航空研究開発機構 調布航空宇宙センター
〒182-8522 調布市深大寺東町7-44-1

* 2 三菱重工業 名古屋誘導推進システム製作所
〒485-0826 小牧市東田中1200

* 3 東京大学 工学系研究科 航空宇宙工学専攻
〒113-8656 文京区本郷7-3-1

2. エンジン試験

2.1 試験装置

当該小型ガスタービンは、常温常圧にてテストセル内で運転された。図1に排気ガス測定の系統図を示す。排気ガスは、エンジン排気コアノズル直後に、半径方向に並んだ内径1mmのSUSパイプ3本を周方向に4ヶ所(90度ピッチ)配置し、合計12本の排気管で排気ガスを収集した。12本の排気管は、まず6本ずつ内径6mmのSUSパイプ2本に集合された後、Y字の集合管(図2参照)を介して内径6mmの1本のSUSパイプに集合された。集合部より下流は、約60°Cに保たれた加熱導管約8mによってテストセル室外に導出され、図1に示す通り、各計測装置に排気ガスを供給した。

NO_x、CO、CO₂、O₂、THCのガス濃度は、排ガス測定装置MEXA-ONE(堀場製作所製)を用いて測定した。また、PMの質量密度は、マイクロストンセンサ483(AVL社製)を用いて光音響法による連続計測を行い、数密度はAVL Particle Counter Advanced(D50=23nm:23nm径の微粒子を50%捕捉可能)を用いて不揮発性PM(nvPM)のみの連続計測を行った。

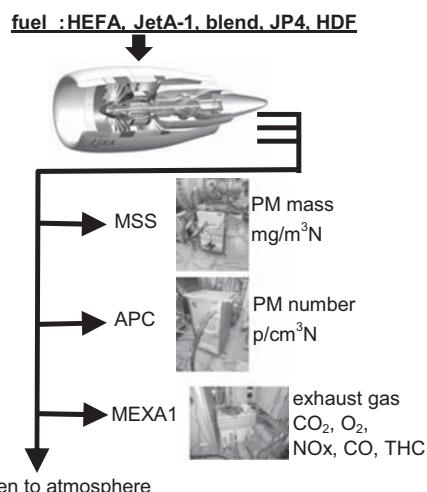


Fig. 1 Exhaust gas measurement system (The engine in the figure is different from that used in this study)

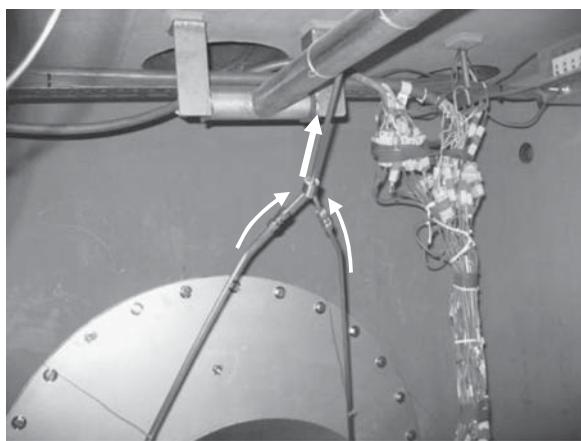


Fig. 2 Exhaust gas sample line

2.2 燃料

試験では5種類の燃料を使用した。使用した航空用バイオジェット燃料(以下HEFA燃料: Hydro-treated Ester and Fatty Acid, Honeywell UOP/日揮ユニバーサル殿提供), JetA-1, HEFAとJetA-1の50:50混合燃料(体積比), JP4, 高密度燃料(以下HDF)の物理的性状および化学成分を独自に分析した結果を表1に示す。当該HEFA燃料は、原料が牛脂で、その主成分である油脂を脱炭酸して得られた軽油レンジの直鎖パラフィンを改質(水素添加、異性化)して得られたものである。

JetA-1とHEFA燃料を比較すると、動粘度と表面張力に大きな差は無く、噴霧粒径に差が生じにくいことが分かる。また、蒸留性状にも大きな差が無いことから、液滴の蒸発にも差が出にくいと考えられる。一方、潤滑性(BOCLE値: 小さい方が潤滑度が高い)を見ると、HEFA燃料の潤滑性がJetA-1より悪いことが分かる。これにはJetA-1は少ないながらも硫黄分が含まれるが、HEFA燃料には全く硫黄分が無いことが関係していると考えられる。最も大きな差異は芳香族成分で、JetA-1で2割程度含まれる芳香族が、HEFA燃料にはほとんど無く、不飽和分も少ない。これらよりHEFA燃料は、熱安定度が高くコーティングしにくくこと、また、HEFA燃料は、析出点が非常に低いことから、高度に異性化したパラフィンが主成分であることが分かる。また、JetA-1の芳香族は大半が1環のものであることも分かる。

現状では、民間航空機へのHEFA燃料の混合は体積比で50%までに制限されており、また、混合後の芳香族成分については、技術的な根拠については今後の課題と注記しつつも、体積比で8%以上とするよう規定されている⁽⁶⁾。その根拠の一つとして、燃料配管のOリングのシール性への影響が指摘されている⁽⁵⁾。

このため、エンジン試験に先立って、フッ素ゴムのOリング(本エンジン試験で使用)とニトリルゴムのOリングを、70時間、JetA-1およびHEFA燃料に含浸させて、性状の変化を確認した。その結果を表2に示す。表より、今回のエンジン試験で使用するフッ素ゴムのOリングに関しては燃料による変化はあまり無く、当該時間内のエンジン試験であれば、HEFA燃料でJetA-1と同様な試験をしても問題が無いことが確認できた。一方、ニトリルゴムのOリングは、燃料による強度の低下と膨張が大きく、JetA-1の方がHEFA燃料よりその傾向が大きい。ニトリルゴムでの体積の増加傾向は別の文献⁽⁵⁾等でも報告されているが、文献⁽⁵⁾では引張強さにはあまり差はないとしており、今回の結果と異なる。原因として、含浸時間や、使ったニトリルゴムの種類の違いなどが考えられるが、今後、燃料が多様化する中、使用するOリングの耐燃性確認が一つの課題となると考えられる。

また、JP4は、ケロシンにガソリン留分を混合したもので⁽⁷⁾、表1に示す通り、初留点が他よりも低く、炭素鎖が短く蒸発しやすい軽質の成分を一定量含むことが

Table 1 Fuel property

Measured properties	JET A-1	HEFA	JET A-1:HEFA 50:50 blend	JP-4	HDF	Test method
Freezing point [°C]	- 48.0	- 58.5	- 51.5	- 63.0	- 61.0	JIS K 2276
Dynamic viscosity [15°C, mm ² /s]	1.655	1.963	1.786	0.9967	3.531	JIS K 2283
Surface tension [mN/m]	23.6	22.5	23.1	21.2	31.4	JIS K 2241
Density [15°C, g/cm ³]	0.7886	0.7554	0.7732	0.7573	0.9386	JIS K 2249-1
Net heat of combustion [MJ/kg]	43.380	44.140	43.730	43.610	42.120	JIS K 2279
Physical distillation						
Initial boiling point [°C]	148.5	146.5	148.5	59.5	175.5	
10% recovered temp [°C]	164.5	165.0	165.0	95.5	181.5	
50% recovered temp [°C]	193.5	208.0	198.5	153.0	182.0	
90% recovered temp [°C]	237.5	253.5	247.0	219.5	182.0	
Final boiling point [°C]	259.0	269.0	262.0	250.0	194.5	
Lubricity(BOCLE) [mm]	0.83	1.04	0.87	0.58	0.84	ASTM D5001
Carbon [mass %]	86.1	84.7	85.4	85.8	88.3	
Hydrogen [mass %]	13.8	15.2	14.5	14.1	11.6	JPI-5S-65
Sulfur [mass %]	0.0006	< 0.0001	0.0003	0.0006	<0.0001	JIS K 2541-6
Composition						
Paraffin [vol %]	79.1	98.4	89.1	85.9	96.9	
Olefin [vol %]	3.0	0.9	1.6	1.3	2.0	
Total aromatics [vol %]	17.9	0.7	9.3	12.8	1.1	
Aromatics						
Benzenes [mass %]	21.3	< 0.1	11.6	17.0	0.2	
Naphthalenes [mass %]	0.2	< 0.1	0.1	0.1	< 0.1	
Total [mass %]	21.5	0.1	11.8	17.2	0.2	

Table 2 Impact of fuels on O-rings

		Fluoro carbon	Nitrile rubber
Specification		M83248/1	MS29513
Initial value	Hardness IRHD-M	71	62
	Tensile strength [MPa]	14.7	14.1
	Elongation	199%	329%
JetA-1 70 hours sink test	Hardness	+0%	-12%
	Tensile strength	+2%	-49%
	Elongation	+4%	-26%
	Volume expansion	+0.3%	+24.8%
HEFA 70 hours sink test	Hardness	+0%	-5%
	Tensile strength	-4%	-16%
	Elongation	-4%	-6%
	Volume expansion	+0.4%	+6.5%

分かる。また、動粘度や表面張力も小さいため、着火性が良いと考えられる。芳香族成分はJetA-1より少ない。HDFは、10%留出温度と90%留出温度に0.5°Cしか差がないことから分かる通り、ほぼ単一の種類の分子、具体的には、大半がexo-tetra-hydro-di-cyclo-pentadiene C₁₀H₁₆からなるが、分子中の炭素の結合図を図3に示す⁽⁸⁾。他の燃料と比べると、高密度で、単位体積あたりではエネルギー密度が高いことが分かる。また、動粘度や表面張力が大きく、微粒化しにくいと予想できる。芳香族は含まれていない。また、初留点が高く、炭素鎖が短く着火しやすい軽質分を含まないため、着火性は悪いと考えられる。

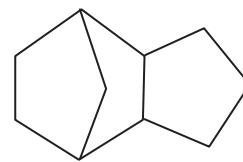


Fig. 3 Exo-tetra-hydro-di-cyclo-pentadiene

Table 3 Combustor inlet temperature, pressure and air/fuel ratio

JetA-1				HEFA			
XN [%]	T3 [K]	P3 [kPa]	AFR	XN [%]	T3 [K]	P3 [kPa]	AFR
80	100%	100%	100%	80	99%	103%	99%
85	100%	100%	100%	85	99%	101%	97%
90	100%	100%	100%	90	100%	104%	101%
95	100%	100%	100%	95	100%	100%	98%
100	100%	100%	100%	100	100%	100%	98%

JetA-1+HEFA				JP4				HDF			
XN [%]	T3 [K]	P3 [kPa]	AFR	XN [%]	T3 [K]	P3 [kPa]	AFR	XN [%]	T3 [K]	P3 [kPa]	AFR
80	99%	102%	98%	80	99%	104%	99%	80	99%	103%	97%
85	99%	101%	97%	85	100%	101%	96%	85	100%	101%	91%
90	100%	103%	101%	90	100%	102%	100%	90	100%	101%	95%
95	100%	101%	97%	95	100%	98%	97%	95	100%	98%	92%
100	100%	99%	98%	100	100%	100%	98%	100	101%	99%	91%

2.3 試験条件とエンジン運転状態

試験は、地上静止状態で、回転数80%, 85%, 90%, 95%, 100%の5つの条件で行った。燃焼器も対応する地上静止でのエンジン運転状態と同じとなるが、JetA-1燃料で運転した場合を基準として各燃料での各回転数XN [%]における燃焼器入口温度T3 [K]、燃焼器入口圧力P3 [kPa]、空燃比AFRの比率を表3に示す。表3より、多少のばらつきはあるものの、バイオジェット燃料HEFAを用いても、JetA-1とほぼ同じ運転状態が実現できていることが分かる。Blend燃料やJP4燃料でも同様であった。HDFでは、同じ回転数でも空燃比が低めになる傾向が見られた。表1に示す通りHDFは発熱量がJetA-1に比べて3%程少なく、その影響も考えられるが、それを考慮してもなお空燃比は低目になる傾向が見られた。

2.4 排気ガス分析結果

2.4.1 JetA-1, HEFA燃料およびブレンド燃料の比較

図4～6に、JetA-1, HEFA燃料、および、両者を体積比で50%ずつ混合したブレンド燃料使用時のエンジン排気ガスの、CO濃度 [ppm : wet], NOx濃度 [ppm : wet], PMの質量密度 [mg/m³N] の計測結果を示す。CO濃度とNOx濃度は、エンジンの排気ガスを100%として希釈せずに直接計測したモル分率であり、O₂濃度換算等は行っていない（以下同様）。THC (total hydrocarbon) の濃度測定も行ったが、どの場合も10ppm未満でほとんど検出されなかった。表1より燃料の発熱量の差が小さく、表3より各回転数で燃焼器の入口条件や空燃比にも大きな差が無いため、横軸は回転数XN [%]として比較した。図4～5より、HEFA燃料を用いても、COの排出とNOxの排出にはほとんど影響が無いことが分かる。一方、図6より、排出PMの質量密度は、HEFA燃料の方が明らかに少なくなることが分かる。

排出PMの質量密度は、ICAOの指定するSmoke Number⁽⁹⁾とほぼ連動しており、民間航空エンジンの排出PMの質量密度は数mg/m³N以下に収められていることが多い。本試験で言えば80%回転数程度の場合に相

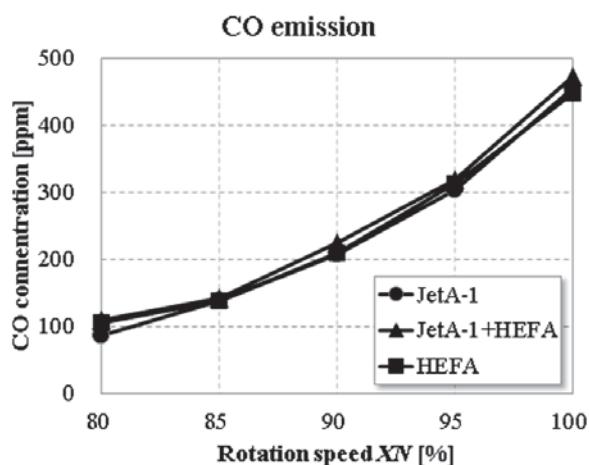


Fig. 4 CO emission (JetA-1, HEFA, Blend)

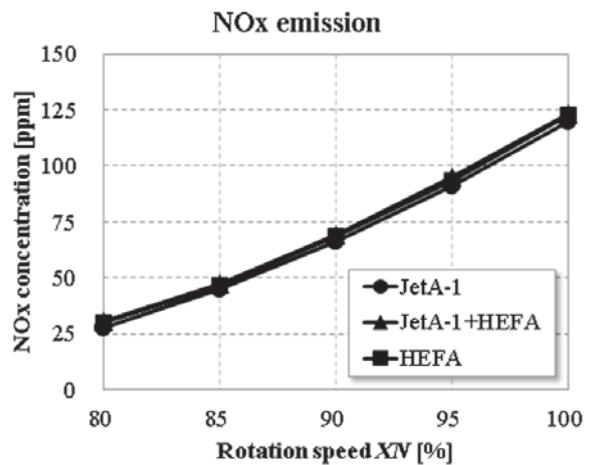


Fig. 5 NOx emission (JetA-1, HEFA, Blend)

当し、図からはHEFA燃料によるPMの減少量が分かりにくいので、具体的な質量密度の値と削減率を表4に示す。80%回転数の場合は、HEFA燃料でのPM排出はJetA-1と比べて1/5以下となっている。詳細は省略するが、別途行った燃焼器リグ試験では、ケロシン燃料で1～2 mg/m³N程度のPMを排出する場合に、HEFA燃料に置き換えるとPM排出は1/10以下となり、ほとんど

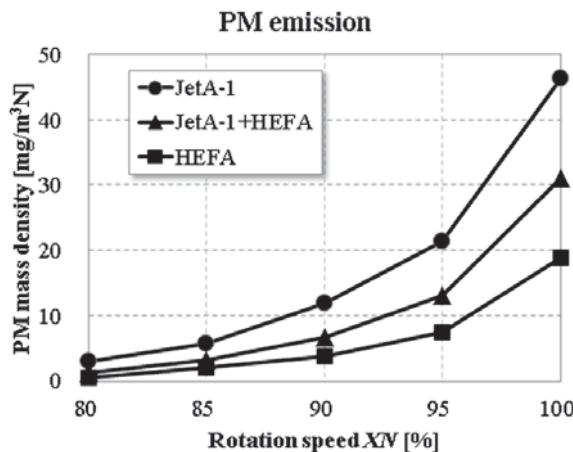


Fig. 6 PM emission (mass density)
(JetA-1, HEFA, Blend)

Table 4 PM mass density [mg/m³N] (JetA-1, HEFA, Blend)

Rotation speed XN	Jet A-1	JetA1 +HEFA	HEFA
80%	2.9 (100%)	1.4 (47%)	0.52 (18%)
85%	5.9 (100%)	3.1 (56%)	2.0 (35%)
90%	11.9 (100%)	6.7 (56%)	3.8 (32%)
95%	21.4 (100%)	13.0 (61%)	7.5 (35%)
100%	46.3 (100%)	31.1 (67%)	18.9 (41%)

PMは排出しなくなった。一方、本試験における高負荷条件のように、かなりPM排出が多い場合でもPMは6割減と、バイオ燃料によるPM削減効果は十分認められるが、その削減率は、元々JetA-1でのPM排出量が少なめの場合の方がさらに大きくなる傾向が見られた。

PM排出がHEFA燃料で削減される原因については、オレフィン分の差異の可能性もあるが、HEFAには芳香族が入っていないことが最も大きな原因と考えられる¹⁰⁾。また、ガスタービンに限らない大気圧等での一般的な火炎での芳香族を含む燃焼によるPM生成増加に関する研究も多数報告されており、燃料噴霧の粒径分布のPM生成過程への影響¹¹⁾、芳香族の層流拡散火炎において発生するPM構成成分の分析¹²⁾、PM発生の化学反応の分析および多環芳香族炭化水素PAHの重要性が指摘されている¹³⁾。また、シクロパラフィンによるPMへの影響に関する研究¹⁴⁾もあるが、本HEFA燃料の場合、シクロパラフィンの質量割合は少ないことが別の分析で分かっており、その影響は小さいと考えられる。

2.4.2 JetA-1, JP4およびHDFの比較

次に、JetA-1, JP4, HDFと燃料を変えた場合の排気ガスの中のCOとNOxの変化を図7～8に示す。JetA-1とJP4にはそれほど大きな差異は見られなかったが、HDFはCOの排出が多くなった。またNOxやPMの排出量が多い。これらより、HDFの場合は、表3に示した通り、空燃比も低めで、燃焼状態が他のものと異なっていた可能性が高いと考えられる。原因としては、表1から分かる通り、動粘度や表面張力が大きく、微粒化が悪化して噴霧の粒径が大きくなったり、炭素鎖が短い揮発性の高い分子が無く、蒸発過程が異なること、特殊な分子構造をしており、燃焼の化学反応が異なること等があげられる。PM排出（図9、表5）に関しては、JP4は、低回転数では、JetA-1とHEFAのブレンドと似た値となっており、芳香族炭化水素の割合が低いことが関係していると考えられるが、高回転数では、JetA-1と同レベルに達している。HDFは、芳香族は含まないものの、PM排出はJetA-1の2倍近くに達している。これより、芳香族に限らず、炭素同士の結合割合が多い炭化水素はすすを生じやすいと推測される。

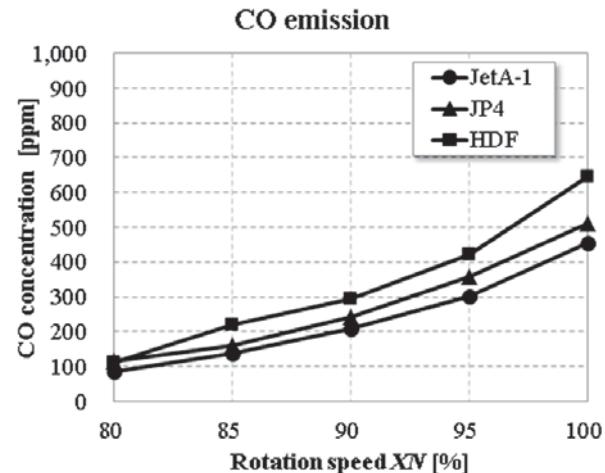


Fig. 7 CO emission (JetA-1, JP4, HDF)

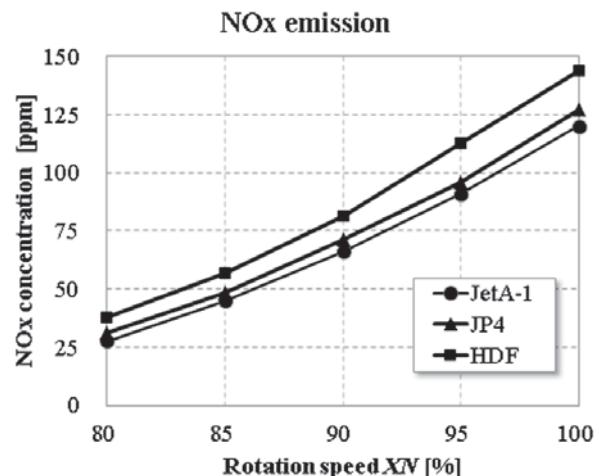


Fig. 8 NOx emission (JetA-1, JP4, HDF)

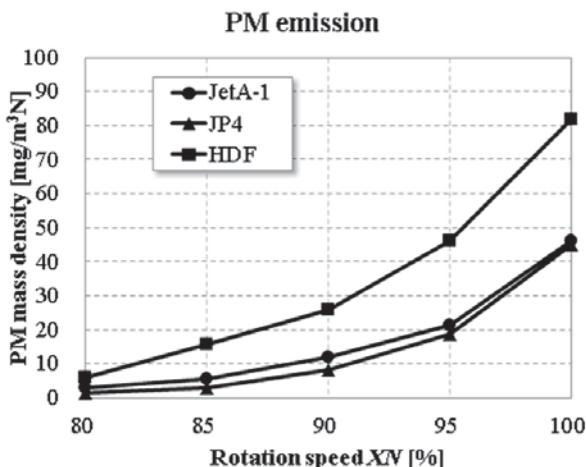


Fig. 9 PM emission (mass density)
(JetA-1, JP4, HDF)

Table 5 PM mass density [mg/m³N] (JetA-1, JP4, HDF)

Rotation speed XN	Jet A-1	JP4	HDF
80%	2.9 (100%)	1.4 (49%)	6.0 (205%)
85%	5.9 (100%)	2.9 (52%)	15.7 (280%)
90%	11.9 (100%)	8.2 (69%)	25.9 (217%)
95%	21.4 (100%)	18.6 (87%)	46.3 (216%)
100%	46.3 (100%)	45.1 (96%)	81.6 (176%)

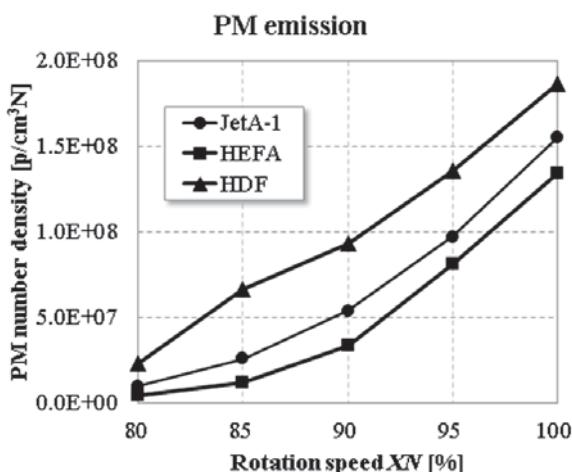


Fig. 10 PM emission (number density)
(JetA-1, JP4, HDF)

2.4.3 nvPMの排出個数

ガスタービン燃焼器の不揮発性PM(nvPM)の個数については、直径数十nmオーダーの、かなり小さな粒子が多く、配管への付着や、PMの結合等の影響が大きいとされており、エンジン出口での正確な個数を求めるについて、未だ技術が成熟していない段階と言える。本研究では、国内でガスタービンのエンジン試験での計測例の無いnvPMの個数のオーダを知ることを主眼におき、付加的に燃料の違いによる影響を調べることとした。本試験で計測したJetA-1,HEFA,HDFの場合のnvPMの個数の測定結果を図10に示す。80%回転数の場合、JetA-1では、PMの数密度は、およそ 1.0×10^7 個/cm³Nであった。通常の民間航空エンジンのPMの個数は、この程度のオーダと推測できる。燃料の違いによる影響については、HDFでは個数も多いことが分かる。HEFA燃料では、80%回転数で、およそ 4.0×10^6 個/cm³N (JetA-1の約4割)で、他の回転数の場合も合わせて、JetA-1からHEFA燃料に変更した場合のPM排出量は、質量に比べると個数の方が削減率が小さくなっている。このことから、HEFA燃料では相対的に大きめのPMの発生が少なくなったと考えられる。

3. 結言

本論文では、航空用バイオジェット燃料HEFA100%を含め各種燃料での小型ガスタービンのエンジン試験を行った結果について報告した。詳細な燃料分析を行った結果、HEFA燃料は、JetA-1と比べて、動粘度や表面張力、密度などの物理的な性状に大きな差は無く、噴霧の微粒化はほぼ同様であることが推測された。また、蒸留性状にも大きな差は無いことから、蒸発過程の違いも出にくくと考えられた。実際に、両方の燃料でエンジン試験を行った結果、同じ回転数では、燃焼器入口温度・圧力、空燃比に大きな差異は無く、ほぼ同じ運転状態が実現できることが分かった。排気ガスについては、NOx、COの排出がほぼ同じであったのに対し、HEFA燃料では排出PMの質量は最大で1/5以下にまで減少することが分かった。また、その減少率は、排出PMの質量密度が小さい時ほど大きくなる傾向があった。排出PMの個数密度も計測したところ、質量密度よりHEFA燃料による減少率が小さく、HEFA燃料では比較的大きめのPM粒子が減少していると推測された。その他、燃料による影響の知見を高めるためJetA-1とHEFAの50:50ブレンド燃料、JP4、HDFでも試験を行ったところ、HDFではJetA-1よりNOx、CO、PM共に増加した。これには、HDFが微粒化しにくいことや、炭素鎖が短い軽質成分が全く入っておらず、炭素同士の結合の多い単一の分子から構成されていることが関係していると推測された。

ガスタービンでのバイオジェット燃料利用の実用面で重要な、燃料の潤滑性やO-ringとの相性についても調べた。HEFA燃料では、硫黄が全く入っていないこと

から、潤滑性がJetA-1より悪くなっていることが分かった。また、エンジン試験で用いたフッ素ゴムのO-ringをJetA-1とHEFA燃料に70時間含浸させて性状の変化を見た所では、あまり大きな変化は見られなかったが、ニトリルゴムでは両者とも強度の低下を伴う膨張が見られ、むしろ、JetA-1の方がHEFA燃料よりもその傾向が大きいことが分かった。燃料のシール方法は、エンジンによって多種多様であるため、今後多様化する燃料のシール性への影響について、過去の事例の検討や、より多くの種類のシール材での長時間の含浸試験、実際のエンジン試験等を行っていく必要があると考えられる。

本論文で示したような試験を積み重ね、各種エンジンでのデータや知見を蓄積することが、より環境保全効果が高く、安全で安価なガスタービン用バイオジェット燃料の開発や、その普及、および、混合率の向上につながると考えられる。

謝辞

本エンジン試験の実施においては、AVL Japan、日本揮ユニバーサル、日本海事検定協会、およびNASA関係各位の多大なご協力を頂いたことを付記し、深く謝意を表する。

参考文献

- (1) 中島陸博, “航空用バイオジェット燃料の最新動向”, 日本エネルギー学会誌, Vol. 93 (2014), pp.52-55.
- (2) 谷春樹, 藤元薰, “高品位バイオディーゼル燃料の製造技術 – HiBDプロセスとその製品”, 日本エネルギー学会誌, Vol. 93 (2014), pp. 62-68.
- (3) 隅部和弘, “Fischer-Tropsch合成を経由したバイオマスおよび石炭からの代替航空燃料の製造”, 日本エネルギー学会誌, Vol. 93 (2014), pp. 69-76.
- (4) 久保田裕詠, 大橋 洋, “藻類オイルからのジェット燃料の製造”, 日本エネルギー学会誌, Vol. 93 (2014), pp. 77-80.
- (5) “Honeywell CLEEN Program”, CLEEN Consortium Meeting, November 2012, No.21-15207.
- (6) “Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons”, D7566-12, ASTM International.
- (7) 星文乃, 藤原慶二, 田辺正和, “製油所におけるジェット燃料の製造方法と品質規格”, 日本エネルギー学会誌, Vol. 93 (2014), pp. 56-61.
- (8) T.J.Bruno, M.L.Huber, A.Laesecke, E.W.Lemmon & R.A.Perkins, “Thermo-chemical and Thermo-physical Properties of JP-10”, National Institute of Standards and Technology, NISTIR6640 (2006), pp.1-67.
- (9) International standards and recommended practices, Annex 16 to the Convention of International Civil Aviation, Environmental Protection Vol.II “Aircraft Engine Emissions” (2008), ICAO.
- (10) 西田啓之, 橋本望, 小沢靖, “新種液体燃料のガスタービンへの適用性評価”, 日本ガスタービン学会誌, Vol.39, No.6 (2011), pp.394-399.
- (11) 林潤, 赤松史光, 安鐵朱, 瀬尾健彦, 渡邊裕章, 黒瀬良一, “噴霧火炎中におけるすす生成過程に関する研究”, 日本機械学会論文集B編, 74巻, 738号 (2008), pp.429-437.
- (12) 小林佳弘, 新井雅隆, “ベンゼンの層流拡散火炎の内外におけるPM構成成分の分析”, 日本機械学会論文集 (B編), 76巻, 768号 (2010), pp.1305-1311.
- (13) 井本靖志, 他 5名, “逆拡散火炎近傍におけるタールの分解および重合挙動の解明”, 第19回動力・エネルギー技術シンポジウム (2011), F101.
- (14) 高島芳樹, 他 5名, “軽油性状がディーゼル排気に及ぼす影響 第3報: シクロパラフィンがベンゼンおよびすす生成に及ぼす影響”, 自動車技術会論文集, 30巻, 2号 (1999), pp.69-73.