┫技術論文 ┣━

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

下平 一雄*1

SHIMODAIRA Kazuo

中村 将治^{*2} NAKAMURA Masaharu

> **廣田 雅***² HIROTA Masashi

冷水 陵馬*2 HIYAMIZU Ryoma

岡井 敬一*3 OKAI Keiichi

ABSTRACT

YAMADA Hideshi

秀志*1

山田

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

		原稿受付 20	15年11月20日
		校閲完了 20	16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

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。

^{*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℃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。

NOx, 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, マイクロスートセンサ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。



open to atmosphere

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:<u>H</u>ydro-treated <u>Ester and Fatty Acid</u>, 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 定度が高くコーキングしにくいこと、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0 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⁶⁾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 耐燃料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

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	JIS K 2254
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	JP1-38-03
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	A STM D1210
Olefin [vol %]	3.0	0.9	1.6	1.3	2.0	ASTM D1319
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	Λ STM D(270
Naphthalenes [mass %]	0.2	< 0.1	0.1	0.1	< 0.1	ASTNI D03/9
Total [mass %]	21.5	0.1	11.8	17.2	0.2	

Table 1 Fuel property

Table 2 Impact of fuels on O-rings

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

	Jet	A-1		HEFA				
XN[%]	<i>T3</i> [K]	P3 [kPa]	AFR	XN[%]	<i>T3</i> [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%	

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

			100	100%	100%	100%	100	100%	100%	98%		
JetA-1+HEFA				JP4				HDF				
	XN[%]	<i>T3</i> [K]	P3 [kPa]	AFR	XN[%]	<i>T3</i> [K]	<i>P3</i> [kPa]	AFR	XN[%]	<i>T3</i> [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







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 1-2mg/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



(JetA-1, HEFA, Blend)

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

Rotation	T-4 A 1	JetA1	LIDEA	
speed XN	Jet A-1	+HEFA	ΠΕΓΑ	
800/	2.9	1.4	0.52	
80%	(100%)	(47%)	(18%)	
950/	5.9	3.1	2.0	
83%	(100%)	(56%)	(35%)	
000/	11.9	6.7	3.8	
90%	(100%)	(56%)	(32%)	
050/	21.4	13.0	7.5	
93%	(100%)	(61%)	(35%)	
1000/	46.3	31.1	18.9	
100%	(100%)	(67%)	(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こと、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。





- 42 -



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	1.4	6.0
0070	(100%)	(49%)	(205%)
850/	5.9	2.9	15.7
8370	(100%)	(52%)	(280%)
0.00/	11.9	8.2	25.9
90%	(100%)	(69%)	(217%)
050/	21.4	18.6	46.3
93%	(100%)	(87%)	(216%)
1000/	46.3	45.1	81.6
100%	(100%)	(96%)	(176%)



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こ とについては、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1.0×107 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4.0×10⁶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 にくいと考えられた。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 重要になる,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 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

- 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,藤元薫,"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) 隈部和弘, "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.
- 林 潤,赤松史光,安鐡朱,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.