法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-04

希薄予混合メイン燃焼領域を備えた航空エンジン同軸ステージングバーナ用パイロットインジェクタの開発

花島, 舜 / HANAJIMA, Shun

(出版者 / Publisher)
法政大学大学院理工学研究科
(雑誌名 / Journal or Publication Title)
法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編
(巻 / Volume)
60
(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
8
(発行年 / Year)
2019-03-31
(URL)
https://doi.org/10.15002/00021981

希薄予混合メイン燃焼領域を備えた航空エンジン同軸ステージングバーナ用パイロットインジェクタの開発

DEVELOPMENT OF A PILOT INJECTOR OF AN AERO ENGINE COAXIAL STAGED BURNER WITH LEAN PREMIXED MAIN COMBUSTION ZONE

花島　舜

Shun HANAJIMA

指導教員　林　茂

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

Effects of swirl motion of air imposed on the kerosene liquid column issuing from a pressure swirl atomizer at low injection pressures from 2 to 10 kPa were investigated at air pressure drop up to 2% by a coaxial and co-rotational double swirler unit. The directions of air swirl and liquid were the same. The atomizer was designed for the pilot stage of a coaxially staged lean-premixed burner for an aero gas turbine. The liquid column changes into a cone when the pressure drop of air across the swirler unit reaches a threshold and, as a result, atomization was significantly improved. The minimum pressure drop required for the transition was 0.8 % for the lowest injection pressure of 2 kPa. The addition of a non-swirling annular air jet between the swirling air jets from the inner and outer swirlers improved lean blow out characteristics.

Key words : *Pressure Swirl Atomizer*, *Pilot Burner*, *Liquid Film*, *Coaxial Staged Burner*

1. はじめに

近年の航空輸送の増大に伴い，国際民間航空機関 ICAO は航空機の NOx 排出規制を強化してきている．その規制に対応するために，最近の大型エンジンにおいて，拡散燃焼方式の中心軸上のパイロットインジェクタに対して，上昇や巡航時に作動する希薄予混合燃焼方式のメインインジェクタを外周部に配置した図 1 に示すようなステージングバーナが実用になってきている[1]．希薄予混合燃焼方式は，予め燃料と空気を均一に混合し，燃料を希薄状態で燃焼させることにより局所的に高温となる燃焼領域を無くし，NOx 排出の低減を行うことができる．その燃焼方式は，安定燃焼と低 NOx 排出が両立する作動範囲が限られているため，作動条件に応じてパイロットインジェクタとメインインジェクタの間で適切な燃料のステージングが必要不可欠である．そのメインインジェクタには，高負荷時における NOx 排出の低減のためにエアブラストアトマイザが採用されている．一方，パイロットインジェクタにはデュアルオリフィスアトマイザが使用されており，エンジン始動から最大出力時までの燃料流量範囲を使用できるようにしている．

今後，中･小型のエンジンにも先述のステージングバーナが採用されると予想されるが，パイロットインジェクタにはコスト面やメンテナンス性の観点から、シンプレックスアトマイザの採用が好ましい．条件によってはパイロットインジェクタの単独作動で相当な高出力を発生することが求められるが、燃料噴射の最高吐出圧に制約があることから通常使用しないような超低噴射圧で良好な微粒化性能を得られると都合が良い．

噴射圧が数百 kPa を超えると，圧力スワールアトマイザから流出する液体は噴射孔から図 2 左に示すような中空の円錐形状の液膜を形成し，良好な微粒化性能が得られる．噴射圧を下げていくと，この中空の円錐状の液膜は，Tulip 形状を経て図 2 右のような Onion 形状へと遷移し，噴射圧が $\Delta P_L = 10$ kPa 以下になると，図 3 に示すように液体は噴射孔から液糸として噴出し，それが下流で分裂し液滴が発生している．したがって，微粒化性能が極端に悪化しアトマイザとして本来の性能を全く発揮しない[2],[3],[4]．

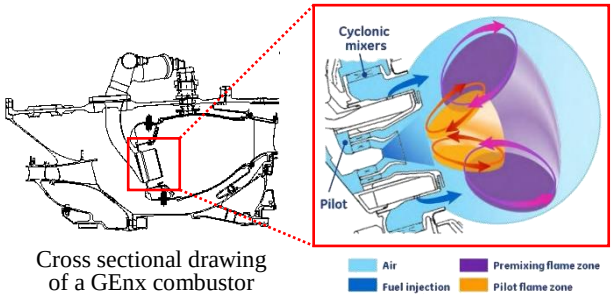

Fig.1 Example illustration of an air-blast lean premixed fuel injector with dual orifice pressure swirl atomizer for pilot fuel injector (General Electric 2014).

Bretz ら[5]の研究と同様に，著者らはこれまでの研究により，液膜が Onion 形状または Tulip 形状となる ΔP_L＝10～100 kPa において，圧力スワールアトマイザに同軸の旋回気流を付与すると，それらの液膜が Cone 形状に遷移し，微粒化性能が格段に向上することを見出している[6].

今回著者らは，さらに低い 10 kPa 以下の噴射圧においては液体は噴射孔から液糸として噴出するが，その周囲に旋回気流を付与し，微粒化性能に改善の効果があるのかを調べた．また，実機に近い運転条件を考慮し，メインインジェクタからの旋回気流が及ぼすパイロットインジェクタの希薄側保炎限界への影響を調べたので報告する．

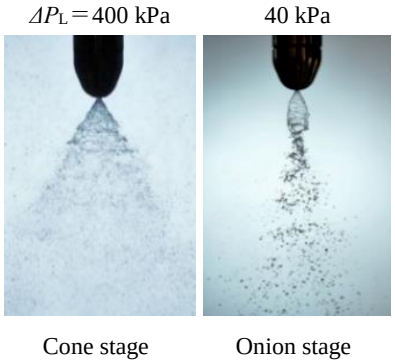

Fig.2 Photos of sprays in the Onion stage at ΔP_L＝40 kPa and Cone stage at ΔP_L＝400 kPa.

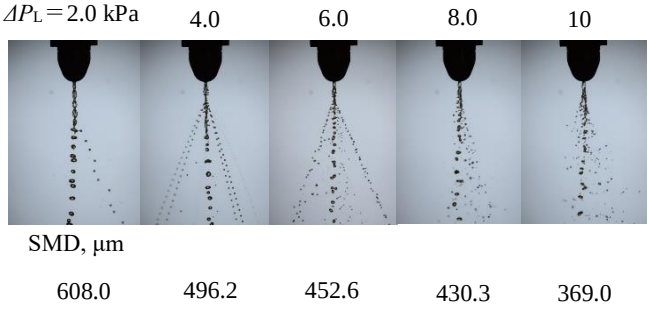

Fig.3 Showing in the effects of ΔP_L on break up of liquid column at ΔP_L lower than 10 kPa.

2. 圧力スワールアトマイザ

本研究で使用した圧力スワールアトマイザの先端部の断面図と液体に旋回を与えるインサートの外観図を図 4 に示す．このアトマイザの外径は 7 mm で噴射孔の径は 0.59 mm で，フローナンバーは FN＝15×10^{-2} mm^2 である．インサートは円錐面に 6 本の溝が切られ，液体はそれらの溝とノズル円錐壁面で形成されるポートを通り，渦室に流入し中心軸上に空洞をもつ旋回流れを形成し，円形の噴射孔から流出し，適切な噴射圧の時に円錐状の液膜を形成する．液体の旋回方向は上流側から見て時計回りである．図 5 に液体に灯油を用いた時の流量特性を示す．噴射圧 ΔP_L＝100 kPa の時，流量は約 1.2 g/s である．

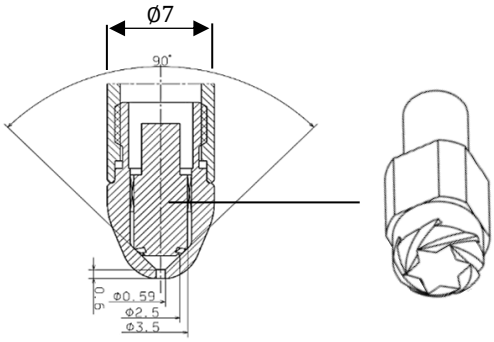

Fig.4 Cross sectional drawing of the pressure swirl atomizer (*left*) and insert with 6 tangential slots (*right*).

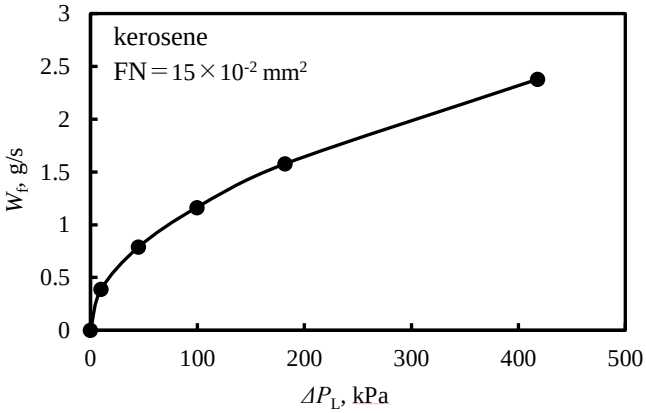

Fig.5 Flow characteristics of the pressure swirl atomizer for kerosene.

3. 空気旋回ユニット

アトマイザの周囲に旋回気流を付与するために，2 個の軸流スワラを同軸に配置した空気旋回ユニット，Type -A と Type-B の 2 種類を用意した．図 6 にそれらの軸を含む平面での断面図を示す．インナースワラ及びアウタースワラの羽根枚数は，それぞれ 4 枚 6 枚，と羽根角は，それぞれ 45 度と 40 度で，旋回気流の方向は上流から見て時計回りで，圧力スワールアトマイザ内で液に与えられる旋回と同方向である．Type-A の羽根のチップ径は，インナースワラが 13.2 mm，アウタースワラが 20 mm である．Type-B では，インナー，アウタースワラの間に非旋回環状空気の流路(0.8 mm)を設けた関係で，インナースワラの羽根だけは高さが 10 mm になっている．インナースワラの羽根に外接するインナースプリッタは，アウタースワラのハブに周方向 3 箇所で保持されている．

4. 実験装置

(1) 噴霧試験用装置

旋回気流を流した際の液膜または液糸の形状変化の観察や粒径計測においては，図 7 に示すように円筒形の空気チャンバーの下流フランジに同軸に取り付けられたシュラウド内に空気旋回ユニットと圧力スワールアトマイザが装着された．シュラウドは出口の内壁が 58 度の円錐形状で，その出口端面から 1 mm 奥まった位置に圧力スワールアトマイザの噴射孔が位置している．空気チャンバー内

には，天井にまで達する多孔板製のリングが整流のために同軸に配置され，その下部の約 2/3 を薄肉アルミ円筒で覆われている．空気は空気チャンバーの天井壁の 2 箇所に設けられた穴から流入し，多孔板リング内の空間に流入し，空気旋回ユニットを経て大気に噴出する．

(2) 燃焼試験用装置

保炎性能試験には図 8 の装置を用いた．それは石英製円筒（内径 121.5 mm，長さ 95.1 mm）が空気チャンバーの下流側フランジに取り付けられている．ヒーターにより加熱された空気は，空気チャンバーの側壁の開口から流入し，パンチングメタル製のリングにより整流され，空気旋回ユニットに流入する．バーナ入り口空気温度は K 型熱電対，空気チャンバー内部の静圧は静圧導管を用い，それらを空気チャンバー上流フランジに取り付け，パンチングメタル製のリングの内部空間で測定した．図 9 は，空気旋回ユニット Type -A, -B と圧力スワールアトマイザ、およびシュラウドの組み付けを比較して示す．シュラウドの出口は 104 度のフレア形状で，その出口端からアトマイザの噴射孔までの距離は 6.7 mm である．常温時の空気流量は空気差圧 $\Delta P/P$=2%の時，Type-A で約 7.1 g/s，Type-B で約 7.8 g/s である．

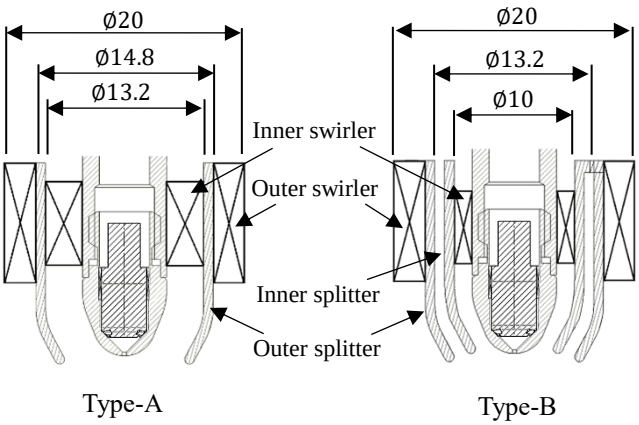

Fig.6 Air swirl generating units consisting of coaxial inner and outer axial swirlers.

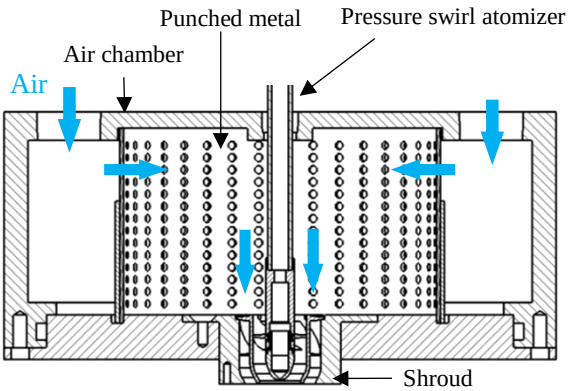

Fig.7 Schematic drawing of air chamber used for observation of liquid film and droplet size measurement.

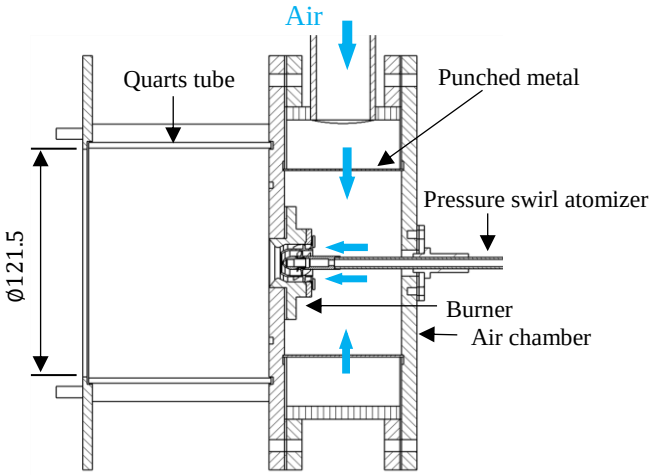

Fig.8 Schematic drawing of combustion apparatus for lean blow out measurements.

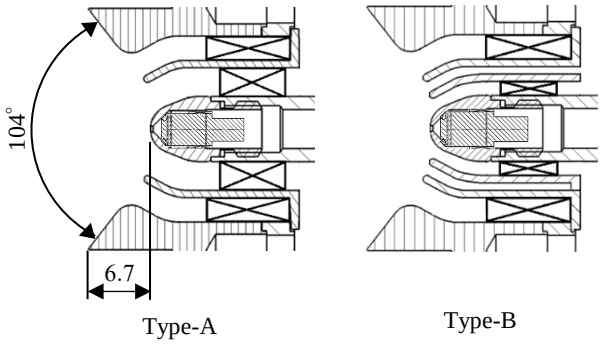

Fig.9 Schematic drawing of two types burners equipped with Type-A (*left*) and Type-B (*right*) air swirl generating units.

5. 実験方法

実験は灯油を用いて常温常圧下で行った．噴射圧 ΔP_L は 2~10 kPa とし，旋回空気の差圧は大気圧 P_a を基準にして，$\Delta P/P_a$ = 2%までの範囲とした．旋回気流を付与しない場合は，液は液糸として噴出している．噴霧形状を観察するために，Mie 散乱画像の撮影を行った．赤色（波長 640 nm）のレーザーシートを用い，斜め下からシュラウドの中心軸上を通るように照射した．撮影には Nikon D5300 を用い，噴霧の背景に黒色の暗幕を使用し，周囲からの光が撮影空間に入らないようにした．粒径計測にはレーザ回折方式の LDSA-SPR1500A (Microtrac Inc.)を用いた．この装置は噴霧粒子群にレーザービームを照射し，検出された散乱光の強度分布を解析することで粒子径分布を測定することができる．鉛直下向きに噴射された噴霧に対して，シュラウド最下端から 30 mm 下方のところに水平にレーザービーム（14 mm 径）を噴霧の中心軸を交差するように照射した．粒径計測の際には受光部に外乱光が入らないように留意した．

バーナの保炎性能の評価試験においては，バーナの入口空気温度は T_{in} = 400, 600 K とした．空気差圧を $\Delta P/P$ = 1.0 ~ 2.0%の範囲のある所定の値に設定し，燃料流量を当量比 ϕ = 1 となる値から徐々に減らし，火炎が消えたときの当量比を吹き消え限界とした．なお，当量比は灯油の理論空

燃比を 14.8 として算出した．火炎写真の撮影の際には，背景に黒色の鉄板を設け，撮影には Nikon D5300 を用いた．

6. 実験結果及び考察

(1) 液膜形状の遷移

液糸および液膜の形状の観察の際には，ΔP_L＝2～10 kPa 間の所定の値に設定し，空気差圧を旋回気流が流れない状態から徐々に増大させた．空気差圧がある値に達した時に液糸の状態から Cone 形状に遷移することが見いだされた．ΔP_L＝4～10 kPa の時には，空気差圧を増大していっても液糸は Cone 形状に遷移するまでは最初の状態を維持した．一旦遷移すると，空気差圧を徐々に下げていってもしばらくの間は Cone 形状が維持され，ある値に達すると Onion 形状に遷移した．一方，ΔP_L＝2 kPa の時は，空気差圧が増大するにつれて液糸が液滴に分裂する分裂開始位置が噴射孔に近づき，噴射孔に達した時に Cone 形状に遷移した．なお，空気差圧を下げると Onion 形状を経由せずに直ちに液糸に遷移した．

Type-A, -B における液膜遷移に必要な空気差圧と噴射圧との関係を図 10 に示す．実線は，空気差圧を上げていった時に液膜が Cone 形状に遷移した時の噴射圧に対する空気差圧を表す．Type-A，-B ともに，Cone 形状への遷移に必要な空気差圧はほぼ同様であり，噴射圧の増大と共にその遷移に必要な空気差圧は減少傾向にあることが分かる．一方，破線は空気差圧を下げていった時に Cone 形状から Onion 形状に遷移する空気差圧を示している．なお，この実験では噴射圧が非常に低いために噴霧が外部からの擾乱を受けやすいと分かったので，毎回空気を流さない状態に戻してから臨界空気差圧を求めた．3 回の測定を行ったが，それらのばらつきは数パーセント以内に収まった．Cone 形状に遷移させることが目的であるので，図 10 にはそれらの中で 1 番高い値を示している．

Cone 形状から Onion 形状に遷移する時の空気差圧は，Type-A よりも Type-B の方が高いことが分かる．これは，Type-B はインナースプリッタとアウタースプリッタの間に非旋回環状空気がアトマイザ中心軸方向に流出し，その空気が Cone 形状の液膜の下部にあたることで Onion 形状へ遷移を促したためだと考えられる．

(2) 微粒化性能

噴射圧 ΔP_L = 2, 4, 6, 10 kPa の時に $\Delta P/P$ = 0.75, 1.0, 1.5, 2.0%の空気差圧の旋回気流を付与した際の粒径分布を測定した．どの空気差圧の時においても生成された噴霧は Cone 形状である．図 11 に，これらの代表として $\Delta P/P$=1% の旋回気流を付与した際の噴霧の Mie 散乱画像を示す．撮影条件は 1/60 s，F5.6，ISO-1250 である．これらの画像を比較すると，噴霧角は Type-B の方が Type-A よりも狭いことが分かる．この違いは非旋回環状空気の有無によると考えられる．

SMD と空気差圧の関係を図 12 に Type-A, 図 13 に Type-

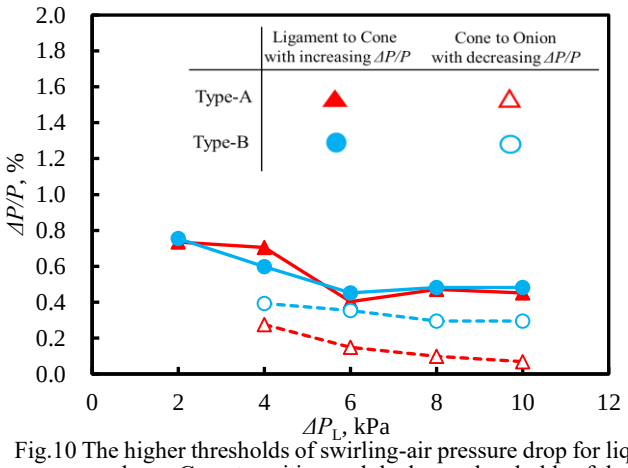

Fig.10 The higher thresholds of swirling-air pressure drop for liquid column-Cone transition and the lower thresholds of that for Cone-Onion transition for kerosene.

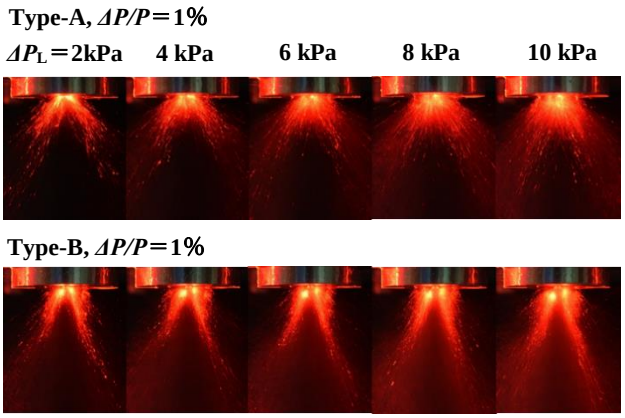

Fig.11 Mie scattering images of sprays.

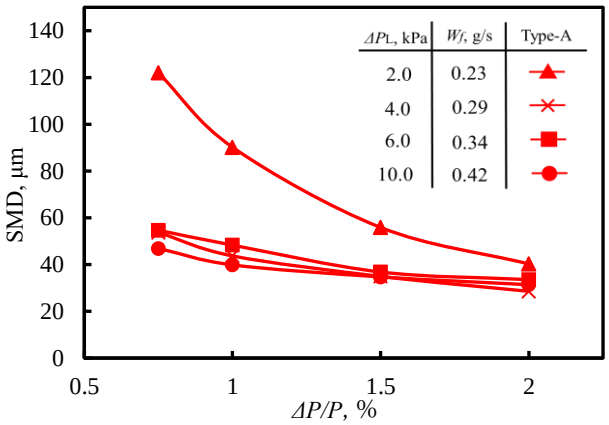

Fig.12 SMD for Type-A air swirl generating units.

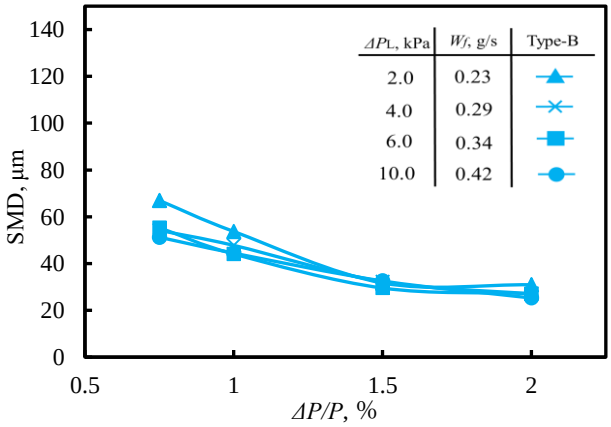

Fig.13 SMD for Type-B air swirl generating units.

B を示す．Type-A，-B ともに，どの噴射圧においても空気差圧の増大と共に SMD は減少するが，ΔP_L=4, 6, 10 kPa において，それらの差が極めて小さい．一方，ΔP_L=2 kPa の時は，SMD は他の噴射圧よりも顕著である．その噴射圧において Type-A と Type-B を比較すると，空気差圧の増大に伴う SMD の減少の傾きは，Type-B よりも Type-A の方が大きい．これは Type-B のインナースワラから流出する旋回気流によって形成された液膜が非旋回環状空気噴流により剪断されるため，SMD の減少傾向は Type-A よりも Type-B の方が低くなったと考えられる．

(3) 希薄保炎限界

a) パイロットインジェクタ単体の保炎性能評価

Type-A，B の吹き消え限界を図 14 に比較して示す．空気差圧およびバーナ入口空気温度の増大と共に，保炎範囲は希薄側に拡大していることが分かる．Type-B の方が Type-A よりも保炎範囲が広いことが分かる．

T_{in}=400 K，ϕ= 0.8 の条件での火炎写真を図 15 に示す．撮影条件は 1/60 s, F5.6, ISO-1250 とし，Type-B に限り ISO は 500 である．Type-A と Type-B の火炎写真を比較すると，Type-A はバーナ出口で燃料と空気が均一に混合し，青炎となっているが，Type-B では輝炎が発生していることが分かる．これは，Type-B の非旋回環状空気により燃料液滴が中心軸上に集まった液滴群の存在により局所的に当量比が高くなったためであると考えられる．上流側当量比が高くなることにより，希薄側の保炎性能は Type-B の方が Type-A よりも良くなったと考えられる．

次に T_{in}=600 K，ϕ= 0.7 の条件での火炎写真を図 16 に示す．撮影条件は全ての写真で 1/60 s, F5.6, ISO-1250 である． Type-B バーナにおいて火炎がアトマイザ先端部から僅かに浮き上がっていることが分かる．これは非旋回環状空気ジェットによる軸方向速度成分が増加したためだと考えられる．

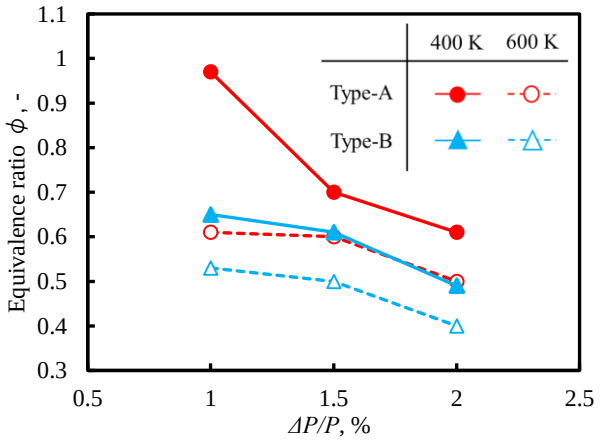

Fig.14 Lean blow out limits for Type-A and Type-B air swirl generating units.

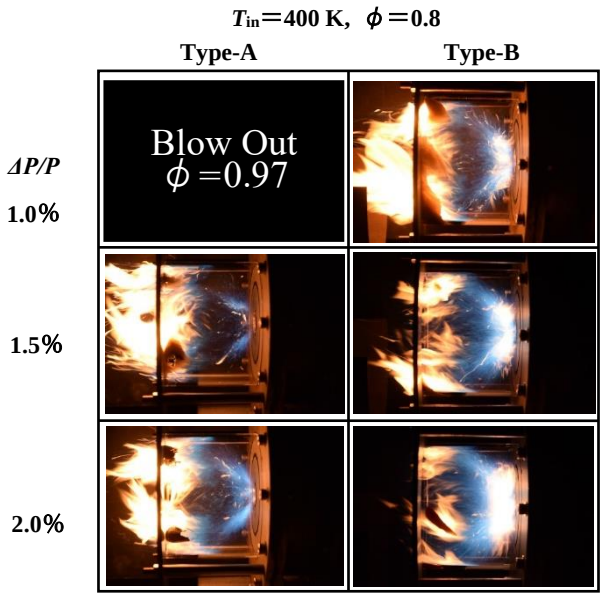

Fig. 15 Comparison of Type-A and Type-B flames at a fixed equivalence ratio ϕ = 0.8 and T_{in}=400 K.

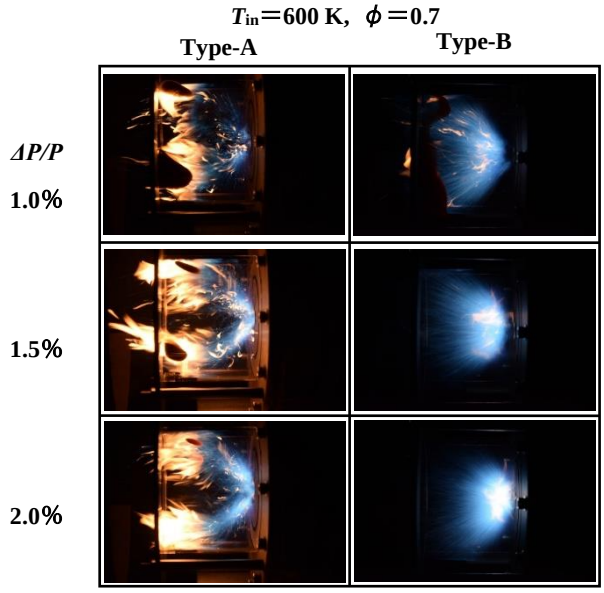

Fig. 16 Comparison of Type-A and Type-B flames at a fixed equivalence ratio ϕ = 0.7 and T_{in}=600 K.

b) メインインジェクタが付いたパイロットインジェクタの保炎性能評価

実際のエンジン作動に近い状態でパイロットインジェクタの保炎性能を評価するために，同軸ステージングバーナを想定した 4 種類のフレア形状の異なるパイロットインジェクタの周囲にメインインジェクタが組み付いたバーナ（計 4 個）を製作した．それらのメインインジェクタには燃料の吐出孔は無く，空気に旋回を与えるスワラのみが組み付いている．それを図 17 に比較して示す．図 17 のパイロットインジェクタは空気旋回ユニット Type-B が組み込まれたバーナを示している．本論文では，空気旋回ユニットと 4 種類のメインインジェクタ付きバーナの区別のために，例えば”Type-B-WS”と表記する．先の”Type-B”はパイロットインジェクタに配置する空気旋回ユニットを示しており，後の”WS”はパイロットインジェクタのフレ

ア形状を示している．その 2 文字のうちの先はフレア角を意味しており，”W”は”Wide”の略で角度は 104°，”N”は”Narrow”で 60° を示す．後はフレアの軸方向長さを示し，”S”は”Short”，”L”は”Long”を意味する．”Long”は”Short”に対して約 2 倍の長さである．WS バーナのパイロットインジェクタのフレア形状は，図 9 に示すバーナ形状と同一である．メインインジェクタの有効開口面積は空気旋回ユニットの有効開口面積の 4 倍となっている．メインインジェクタに組み付くスワラの羽根枚数は 14 枚で，羽根角は 45° である．そこから流出する旋回気流の旋回方向は上流から見て時計回りで，これは圧力スワールアトマイザ内で液に与えられる旋回方向と同一である．メインインジェクタからは旋回気流のみが流出し，パイロットインジェクタの当量比が ϕ= 2 以上となるところから着火し，そこから燃料流量を減らし火炎が吹き消えたところを希薄側保炎限界とした．その試験を図 18 に示す装置を用いて実施した．

パイロットインジェクタの保炎限界に及ぼすメインインジェクタから流出する旋回気流の影響について図 19 に T_{in}= 400 K，図 20 に T_{in}= 600 K の条件での結果を示す．縦軸の当量比は，全体当量比ではなく，パイロットインジェクタの当量比を示している．それらの保炎限界を図 14 と比較すると，どちらのグラフも希薄側保炎限界はパイロットインジェクタ単体の方が良い性能であることが分かる．なお，図 19，20 のどちらも Type-B の方が保炎性能は格段に良いことがグラフから分かる．

図 19 の T_{in}= 400 K では，Type-A-WS が空気差圧の増大に伴い保炎限界も上昇傾向であるのが分かる．図 11 の Mie 散乱画像に示しているように噴霧角は Type-A の方が Type-B よりも広い．そのため，Type-A-WS は空気差圧の増大に伴い，噴霧角も広くなり，噴霧の一部がメインインジェクタからの旋回気流と干渉することでパイロットインジェクタのフレア内部での当量比が希薄となり，火炎の吹き消えが早まったと考えられる．一方，Type-A-NS と-NL はフレア角が狭いため，噴霧の大部分がフレア部に当たり着火しなかった．それに関連して，空気旋回ユニット Type-B が組み付く 4 種類のバーナのうち，Type-B-NL のみが空気差圧の増大に伴い保炎限界も上昇傾向であることが分かる．これは，空気差圧の増大に伴い噴霧角が広くなり，噴霧の一部がフレア部に当たり，燃料の微粒化が促進されず吹き消えが早まったと考えられる．なお，$\Delta P/P$= 1.5～2.0%の範囲でパイロットインジェクタのフレア角は大きい方が保炎に優れることが分かる．

次に，図 20 では空気旋回ユニット Type-A を組み込んだ 4 種のバーナの保炎限界は，T_{in}= 600 K のために燃料液滴の蒸発促進により当量比 ϕ= 2 以下となった．一方，Type-B は全てのバーナにおいて，空気差圧の増大に伴い保炎限界は減少傾向にある．T_{in} = 400 K の条件と同様に，保炎性能はパイロットインジェクタのフレア角が大きい方が良い．これらは，フレア内部での旋回気流のインナーリサーキュレーションはフレア角が小さい方より大きい方が強いため，保炎性能が良くなったと考えられる．なお，$\Delta P/P$=2%，Type-B-WS において，バーナ全体空燃比は $AFR_{Overall}$=95 である．

図 21 に T_{in}= 600 K，ϕ = 1.8 で Type-A-WL と-WS を用いた時の火炎写真の比較を示す．WL と WS のどちらも，空気差圧の上昇に伴い青炎が濃くなっているのが分かる．WL はフレア部が WS よりも軸方向に長いため，その内部で旋回気流と燃料液滴が十分に混合し，WS よりも青炎が濃くなったと考えられる．

図 22 に T_{in}= 600 K，ϕ = 1.1 で Type-B-NS と Type-B-WS を用いた時の火炎写真の比較を示す．軸方向の火炎長さが NS の方が WS よりも長いことが分かる．なお，フレア角が狭いため，フレア内部での局所当量比は高くなり，WS よりも僅かに輝度が高いことが分かる．図 21 と図 22 の撮影条件は 1/60s，F5.6，ISO-100 である．

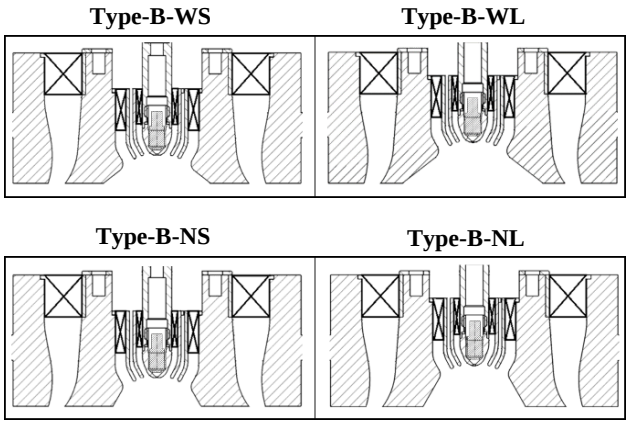

Fig. 17 Schematic drawing of 4 types coaxial staged burners.

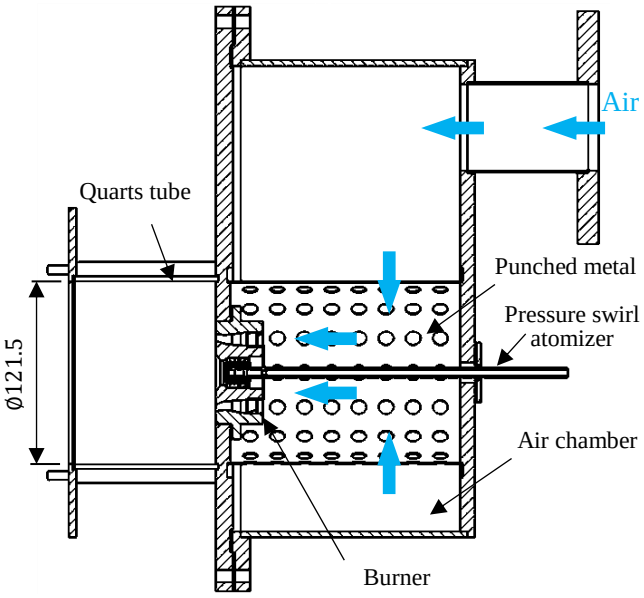

Fig. 18 Schematic drawing of combustion apparatus with coaxial staged burners for lean blow out measurements.

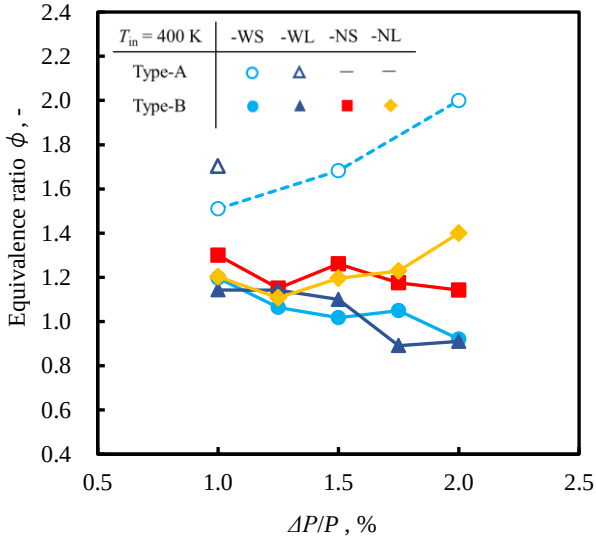

Fig.19 Lean blow out limits for Type-A and Type-B air swirl generating units with 4 types coaxial staged burners at T_{in}=400 K.

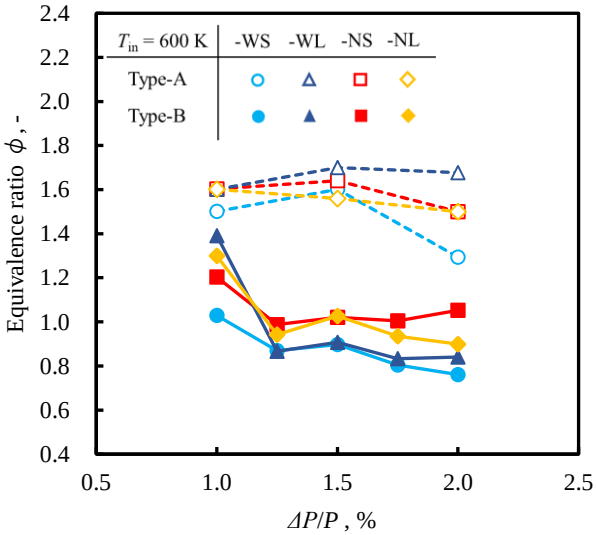

Fig.20 Lean blow out limits for Type-A and Type-B air swirl generating units with 4 types coaxial staged burners at T_{in}=600 K.

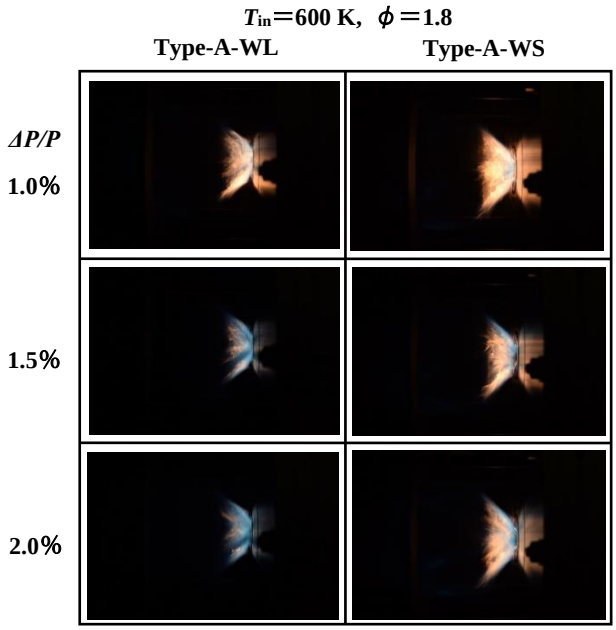

Fig.21 Comparison of Type-A-WL and Type-A-WS flames at a fixed equivalence ratio ϕ = 1.8 and T_{in}=600 K.

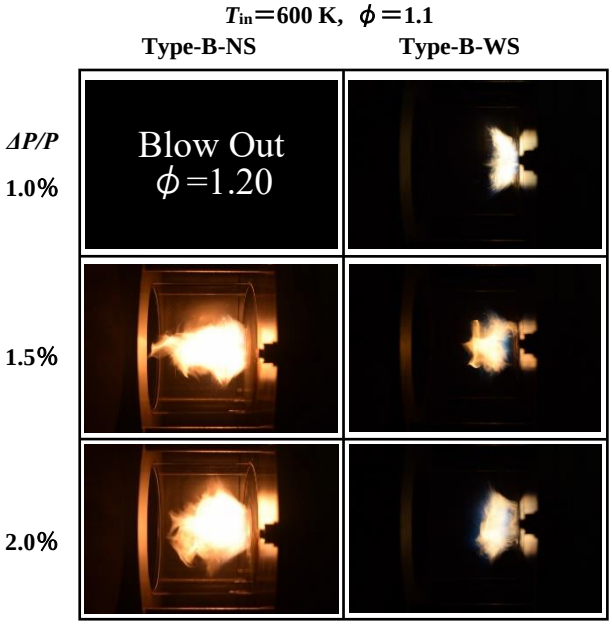

Fig.22 Comparison of Type-B-NS and Type-B-WS flames at a fixed equivalence ratio ϕ = 1.1 and T_{in}=600 K.

7. 結論

燃料が液糸として噴出する噴射圧 ΔP_L＝10 kPa 以下において，旋回気流を付与した際のインナースワラとアウタースワラからの旋回気流の間に非旋回環状空気が噴出していない Type-A と，噴出している Type-B の 2 種類の同軸の空気旋回ユニットを用いて旋回気流を付与した際の液膜形状の観察や粒径計測を行った．また，実機に近い運転条件を考慮し，パイロットインジェクタの希薄側保炎限界に及ぼすメインインジェクタからの旋回気流の影響を調べた．主な結論は以下の通りである．

(1) 圧力スワールアトマイザから液糸が流出する状態であっても，それに旋回気流を付与し空気差圧を増大させると，ある値に達した時に液糸から Cone 形状に遷移する．一旦遷移が起きた後，非常に低い空気差圧まで下げても Cone 形状が維持される，ヒステリシス性を確認出来る．

(2) 液糸の状態において，大気圧に対して 1%にも満たない空気差圧の旋回気流を付与すれば，微粒化性能は格段に向上する．

(3) 希薄側保炎性能は，非旋回環状空気噴流を設けることで向上する．

なお，同軸ステージングバーナを想定しパイロットインジェクタに Type-B を用い，メインインジェクタから旋回気流を流出させた時，

(4) 希薄側保炎性能はパイロットインジェクタのフレア角が大きい方が優れ，その時のパイロット空燃比は AFR_{Pilot}=19.5 である．

謝辞

本研究を進めるにあたり，3 年間にわたり林茂教授にご指導頂いた. 問題解決への様々な考え方やアプローチだけではなく，エンジニアとしての重要な素養を学んだ．常に学生第一で，毎日夜遅くまで対応して頂いた．ここに深く感謝の意を表す．なお，共に本研究に携わった松岡銀司先輩，笠原達也君，大塚陽奈子さん，熊谷泰三君にも御礼申し上げる．

参考文献

[1] Michael J. Foust., Doug Thomsen., Rick Stickles., Clay Cooper., and Will Dodds., *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Nashville, Tennessee, January 9-12, (2012)

[2] Arthur H.Lefebvre., Atomization and Sprays, Talor & Francis:114-115(1989)

[3] K. Ramamurthi and T. John Tharakan., *Journal of Propulsion and Power* Vol. 11, No.6: 1103-1109 (1995)

[4] K. Ramamurthi and T. J. Tharakan., *AIAA Journal* Vol. 36, No.3: 420-427 (1998)

[5] David H.Bretz., Darrel G. Bobzin., Simplex airblast fuel injection, US Patent 5,224,333 (1993)

[6] S. Hanajima, G. Matsuoka, Y. Nakagawa, H. Ohata, S. Hayashi, Onion-to-Cone Transition of the Liquid Film from a Pressure-Swirl Atomizer by Imparting Swirl Air and its Hysteresis, *14th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Chicago, Illinois, July 22-26, (2018)