

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

### 気流微粒化燃料ノズルの空気流制御に用いる 流体素子の水流試験PIV測定

吉田 征二, 山本 武, 黒澤 要治, 下平 一雄

2013年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# 気流微粒化燃料ノズルの空気流制御に用いる流体素子の 水流試験 P I V 測定\*

吉田 征二\*<sup>1</sup> 山本 武\*<sup>2</sup> 黒澤 要治\*<sup>2</sup> 下平 一雄\*<sup>1</sup>

## PIV measurements of the flow field in fluidic elements for controlling the air flow in air blast fuel nozzle

Seiji YOSHIDA\*<sup>1</sup>, Takeshi YAMAMOTO\*<sup>2</sup>, Yoji KUROSAWA\*<sup>2</sup> and Kazuo SHIMODAIRA\*<sup>1</sup>

### ABSTRACT

低 NO<sub>x</sub> 化に有望な方法のひとつである希薄予蒸発予混合 (LPP) 燃焼方式は、安定して燃焼する当量比の範囲が狭く、燃焼効率の低下や不安定燃焼の発生を招きやすいという問題がある。ジェットエンジンの全作動領域で安定した燃焼を実現するために、LPP 燃焼方式では燃料流量配分の制御が行われているが、燃料流量配分だけではなく、燃焼室内へ流入する空気流量の配分を制御することで、低 NO<sub>x</sub> 性と燃焼安定性の更なる向上が期待できる。航空機用ジェットエンジン燃焼器で空気流量制御を行うには、制御機構は小型軽量で信頼性が高いことが必要であり、このような条件を満たす制御機構として流体素子を用いることが提案されている。本研究では流体素子を用いて、気流微粒化燃料ノズルのパイロット燃料ノズルとメイン燃料ノズルに流入する空気の流量配分の制御を行うことを目指し、その実現可能性の確認を行った。まず、流体素子の形状を決めるために二次元模型を用いた水流試験を行った。この試験によって決定した流体素子を用いて、次に円環形の流体素子の水流試験を行い、円環形流体素子の動作特性を調べた。さらに、気流微粒化燃料ノズルに流体素子を取り付けた燃焼試験模型を製作し、大気圧試験及び高圧試験によりその動作を確認した。燃焼試験により明らかとなった問題点を解決するための情報を得るため、また流体素子の動作特性をより詳細に調べるために、さらに二次元形状の模型を用いた水流試験と三次元形状の模型を用いた水流試験を行った。その結果、流体素子により気流微粒化燃料ノズルの空気流量の配分を制御することができることが確認できた。また、空気流量配分を制御するための流体素子の動作特性に関するデータを得た。

**Keywords:** ジェットエンジン, 気流微粒化燃料ノズル, 空気流量配分制御, 水流試験, 屈折率整合法, 流体素子

## 1. 研究の概要

### 1.1. 研究の背景, 目的

航空機用ジェットエンジンからの排出物によ

る環境負荷を低減するために、燃焼器からの窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) 排出低減が求められており、種々の方式を用いた低 NO<sub>x</sub> 燃焼器の研究開発が行わ

\* 平成 24 年 9 月 14 日受付 (Received 14 September, 2012)

\*1 研究開発本部 ジェットエンジン技術研究センター  
(Jet Engine Technology Research Center, Aerospace Research and Development Directorate)

\*2 航空プログラムグループ 環境適合エンジン技術チーム  
(Environmentally Compatible Engine Technology Team, Aviation Program Group)

れている。NO<sub>x</sub>は燃焼器内の高温部分で多く生成されるため、NO<sub>x</sub>生成量は燃焼器内の火炎温度に影響を受ける。そこで、NO<sub>x</sub>生成量を低減する方法の一つとして、燃料の希薄予混合燃焼を行うことにより火炎温度を下げ、NO<sub>x</sub>の生成を抑制する方法がある。この場合には均一な混合気を燃焼させることで、局所的な高温領域が無くなり、低NO<sub>x</sub>化に非常に有利になる。このようなコンセプトの燃焼方式は、希薄予蒸発予混合（LPP）燃焼と呼ばれており、低NO<sub>x</sub>化に有望な方法のひとつである。しかし、混合気の均一化を進めると、安定して燃焼する当量比の範囲が狭くなり、燃焼効率の低下や不安定燃焼の発生を招きやすいという問題が生じる。そのため、ジェットエンジンの全作動領域において安定燃焼させるための対応技術が必要となる。

低NO<sub>x</sub>性と燃焼安定性を両立させるために、安定な拡散燃焼を行うパイロットバーナと希薄予混合で低NO<sub>x</sub>燃焼を行うメインバーナを組み合わせ、負荷に応じて各バーナに供給する燃料流量配分を調節するステーキング型燃料ノズルや、あるいは、出力に応じて燃料を供給するバーナを増減する方法などが用いられている。これらの方法は、エンジンの負荷に応じて各燃料ノズルへの燃料流量配分を制御するものである。

燃料流量配分を制御すると共に、燃焼室内へ流入する空気流量の配分を制御することで、低NO<sub>x</sub>性と燃焼安定性のさらなる向上を期待することができる。産業用ガスタービンでは、燃焼器の尾筒部にバイパス流路を設けて燃焼領域に流入する空気量を調節したり<sup>1)</sup>、一部のバーナに空気流量を制限する機構を設けて燃焼領域の空燃比を適正範囲に収めたりすることが行われている<sup>2)</sup>。このように、産業用のガスタービンでは、機械的なバルブを用いた空気流量配分の制御が試みられており、一部では実用化されている。しかし、航空機用ジェットエンジンの燃焼器では、このような空気流量の制御機構が組み込まれた例はない。

燃焼器に流入する空気流量を制御するためには、低圧損で高温高圧の環境下でも動作するバルブが必須である。また航空機用ジェットエンジン燃焼器で空気流量配分制御を行うには、制御機構は小型軽量で信頼性が高いことが必要である。このような条件を満たす制御機構として流体素子を用いることが提案されており、要素レベルでの研究が行われている。この方法では壁面からの制御用空気の噴出しや吸い込みにより流量配分の制御を行うので、燃焼器内に機械的な可動部が無い。そのため、燃焼器内の高温高圧環境下でも使用することができ、高い信頼性が期待できる。

流体素子を用いて航空機用ジェットエンジンの空気流量の制御を行うことを目的として、流体素子を気流微粒化燃料ノズルに組み込んだ模型の大気圧での非燃焼試験が、Brundishら<sup>3)</sup>によって行われた。この研究では、燃焼領域と希積領域の空気流量配分の制御を行っており、燃焼領域に流入する空気を制限するためにvortex valveを用いている。しかし、vortex valveはその原理上小型化が困難であり、航空機用ジェットエンジンの燃焼器に組み込むことは難しいと考えられる。

またSunら<sup>4)</sup>によって、2次元の流体素子単体の模型による要素試験が行われている。この研究でもBrundishらの研究と同様に、燃焼領域と希積領域の空気流量配分の制御を試みている。Sunらは、燃焼領域に流入する空気を制限するために、流れを分岐させる流体素子の、一方の出口面積を狭くする方法を取っているが、流量変化量は10%程度であり、十分な流量変化量は得られていない。

いずれの研究も、非燃焼試験の段階であり、燃焼試験により空気流量配分制御の効果を実証した例は報告されていない。流体素子を用いて流量制御を行うこれらの研究は、燃焼領域に流入する空気流量を増減し、燃焼空気と希積空気の配分を制御しようとするものである。しかし、この方法は流体素子の大きさや制御によって変化させることができる流量範囲の点から、現実的とは言い難い。

そこで燃焼空気と希釈空気の配分を制御するのではなく、いずれも燃焼空気であるパイロット燃料ノズルに流入する空気とメイン燃料ノズルに流入する空気の配分を制御することを考えた。

本研究では流体素子による気流微粒化燃料ノズルの空気流量配分制御の実現可能性を確認するため、流体素子の動作特性を調べるための水流試験と、流体素子の実際の動作を調べるための燃焼試験を行った。

## 1.2. 本報告書の概要

本報告では、まず第2章で空気流量配分制御燃料ノズルの動作原理などを示し、第3章で屈折率整合法を用いた可視化水流試験装置について説明し、第4章から第8章で水流試験及び燃焼試験について結果と考察を述べ、最後に第9章でまとめを行う。

試験は次のように進めた。二次元モデルによる可視化水流試験を行い、流体素子の形状の違いによる動作特性を調べ、以後使用する流体素子の基本形状を決めた(第4章)。二次元モデル可視化水流試験で得られた結果をもとに、可視化用円環形流体素子モデルを製作し、可視化水流試験により動作特性を調べた(第5章)。次に、気流微粒化燃料ノズルに流体素子を取り付けた燃焼試験モデルを製作し、大気圧試験及び高圧試験によりその動作を確認した(第6章)。流体素子の動作特性をより詳細に調べ、燃焼試験により明らかとなった問題を解決するための知見を得るために、二次元モデルを用いた可視化水流試験(第7章)と円環形流体素子モデルを用いた三次元モデル可視化水流試験(第8章)をさらに行った。

## 2. 空気流量配分制御

### 2.1. 流体素子

本研究では気流微粒化燃料ノズルの空気流量配分の制御を行うために、流体素子の一つである **fluidic diverter** を用いた。 **fluidic diverter** は主流

の入口と二つの出口、二つの制御口を持っている。 **fluidic diverter** のうち、高速の流れが壁面に付着して流れるコアンダ効果を利用して、制御流を止めた後も主流の流れる向きを保つもの、すなわち制御流に対して主流の流出する流量配分がヒステリシス特性を持っているのが **bistable switch** である。 **bistable switch** は少量の制御流によって、より大きな流れの向きの二つの状態を切り替えることができる。図2-1に **bistable switch** の動作を示す。(a)主流入口から入ってきた流れはコアンダ効果により、どちらか一方の壁面に付着して流れる。(b)制御口から少量の流体(制御流)を流出させるか、あるいは流入させることにより、主流が反対側の壁面に付着し、流れの向きが変わる。(c)制御流を止めても主流の向きは前の状態を保つ。図2-1(b)では上側の制御口から制御流が流出することにより主流の向きが切り替わる様子を示しているが、下側の制御口から制御流を流入させることによっても主流の向きを切り替えることができる。一般的には流体素子の制御は制御流を流入させることにより行い、この場合には制御流の流量の5倍から30倍の流量の主流の流れを切り替えることができる。 **fluidic diverter** には、流路の形状や流体素子出口の圧力の影響などにより主流が壁面に完全に付着せず、制御流を止めると主流が中立の位置に戻るものがある。このようなヒステリシス特性を持たないものは **flow amplifier** と呼ばれることがあり、常に制御流を流すことにより主流の流量配分の制御が可能となる。

燃焼器内に流体素子を設けることを考えると、制御流を流入させることにより制御を行うには、エンジン内で最も圧力の高い部位である燃焼器よりもさらに圧力の高い空気源を用意しなければならず現実的ではない。それに対して、制御流を流出させることにより制御を行うには、より圧力の低い場所に接続するだけでよいので、容易に実現することができる。そのため、本研究では流体素子の制御はすべて制御流を流出させることにより

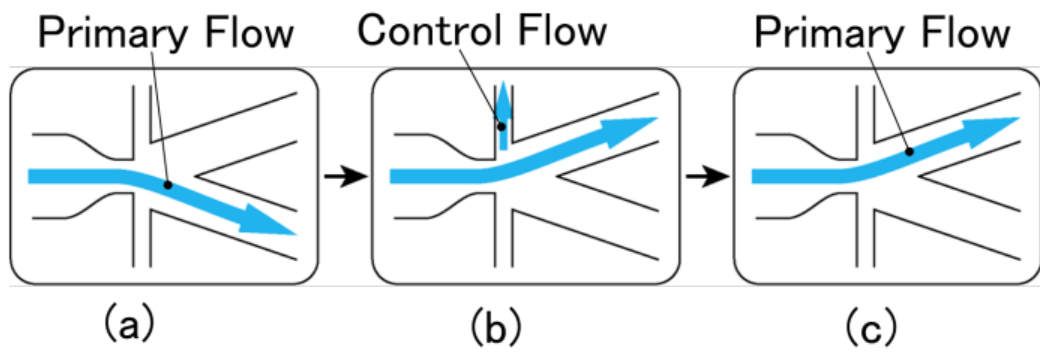


Fig.2-1 : Fluidic Diverter

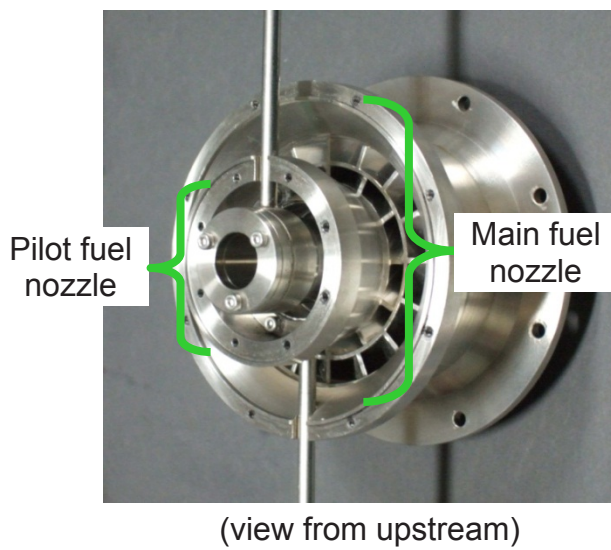


Fig.2-2 : Air blast type staging fuel nozzle

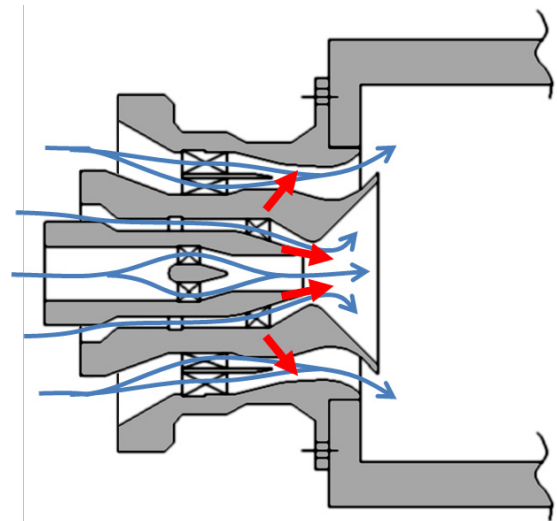


Fig.2-3 : co-axial fuel nozzle

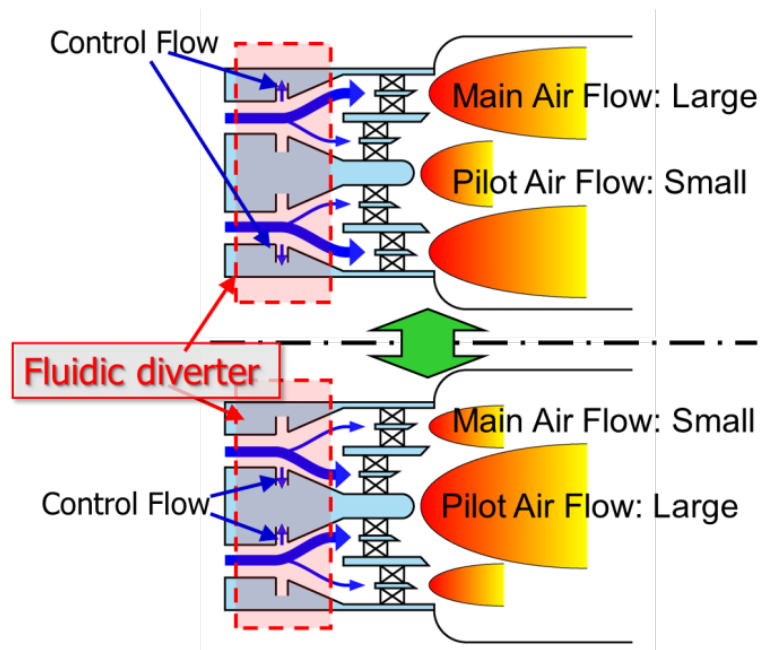


Fig.2-4 : Air flow split control

行っている。

## 2.2. 空気流量配分制御燃料ノズル

図 2-2 に LPP 燃焼器用の気流微粒化燃料ノズルを上流側から見た写真を示す。この燃料ノズルでは、中心にパイロット燃料ノズルがあり、その外側を囲むようにメイン燃料ノズルが配置されている。図 2-3 に気流微粒化燃料ノズルの断面の概略図を示す。中心のパイロット燃料ノズルと外側のメイン燃料ノズルのそれぞれに空気の流路があり、この空気によって液体燃料を微粒化するとともに、燃料との混合気を形成し、予混合気の状態でパイロットバーナとメインバーナにそれぞれ流入する。パイロット燃料ノズルの燃料噴射位置は比較的燃焼室に近く、拡散燃焼的な燃焼をすることを意図している。これに対してメイン燃料ノズルの燃料噴射位置は燃焼室までに距離があり、均一な混合気として燃焼室に流入し、予混合燃焼することを意図している。

本研究では、図 2-2、図 2-3 に示すような、パイロット燃料ノズルとメイン燃料ノズルが同軸に配置された気流微粒化燃料ノズルを対象とし、パイロット燃料ノズルとメイン燃料ノズルへ流入する空気流量配分の制御を、流体素子を用いて実現する方法について研究を行う。その燃料ノズルの動作を図 2-4 に示す。気流微粒化燃料ノズルの空気流路の上流に流量配分を制御するための流体素子を取り付けている。この流体素子は燃料ノズルの形状に合わせて円環形になっている。流体素子の外側の制御口から内部の空気を吸い出すことによって外側の流路つまりメイン燃料ノズル側の空気流量が増え、逆に内側の制御口から空気を吸い出すことによって内側の流路つまりパイロット燃料ノズル側の空気流量が増加する。このようにして、それぞれの燃料ノズルに流れる空気流量配分を制御する。

## 3. 水流試験

水流試験に用いた可視化回流水槽を図 3-1 に示す。この水槽はポンプ（エバラポンプ 40LPS6.75A）から吐出した液体が流量計を通過したのち、180 度流れの向きを変えてから整流格子および整流ネットを通過し、アクリル製の観察部に流入するようになっている。ポンプの回転数をインバータ（三菱電機 FR-E510W0.75KW）により変化させ、流量の制御をおこなう。観察部を通過した液体は、その下流の脱気タンクに流入し、再びポンプに吸入される。観察部にアクリル製の模型を設置して、模型内部の流れの可視化計測を行う。流量計は当初オリフィスと浮子を用いた流量計（日本フローセル、FLT-40N）を用いていたが、途中改修により電磁流量計（KEYENCE FD-UH25G）に交換した。流体素子内の流れを制御するための制御流の配管系統図を図 3-2 に示す。制御流は、回流水槽の外に設けたケミカルポンプ（イワキ マグネットポンプ MD-70RZ）により、流体素子の制御口から吸い出される。ケミカルポンプの回転数はインバータ（OMRON 3G3EV）により制御され、制御流の流量を調節することができる。また、流体素子の制御口とケミカルポンプの間にはテフロン製の電磁弁（CKD EMB51-15-5）があり、制御流の ON/OFF を切り替えることができる。制御口から吸い出された流体は電磁流量計（KEYENCE FD-M10T）により流量を計測した後、回流水槽の脱気タンクに戻される。また、流体素子につながる二つの電磁弁を両方同時に閉じたときに、脱気タンクから流体を吸い込むための流路を設けている。

図 3-3 に可視化回流水槽の観察部と PIV 計測装置の写真を示す。PIV 計測装置は主に TSI 社のシステムを使用した。三次元模型可視化水流試験（2）（第 8 章）の一部は LaVision 社のシステムを使用した。取得した粒子画像から速度分布を算出する画像解析は、すべて LaVision 社の Davis を使用して行った。

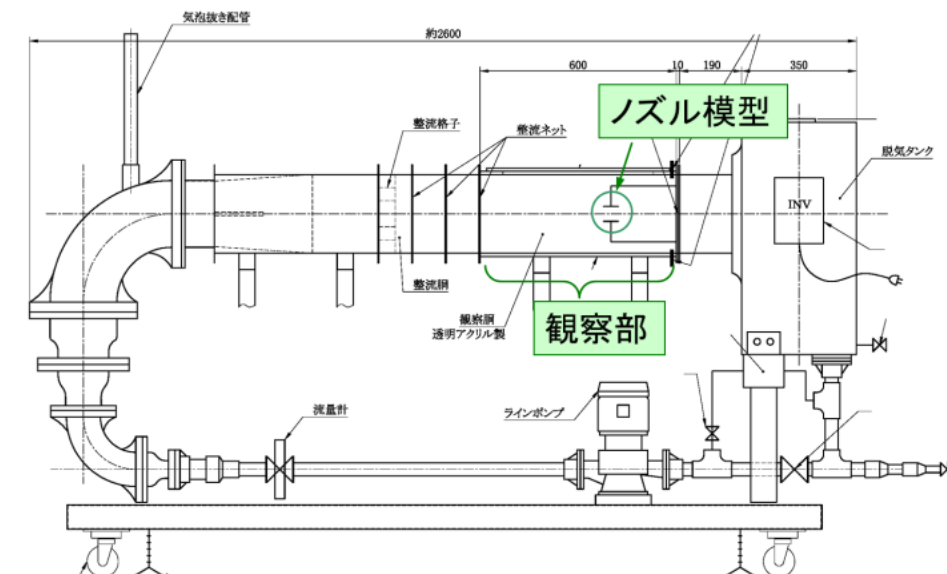


Fig.3-1 : 可視化回流水槽

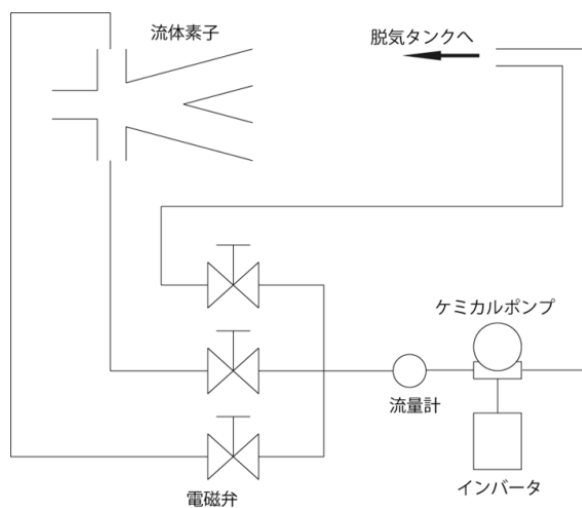


Fig.3-2 : 制御流系統図

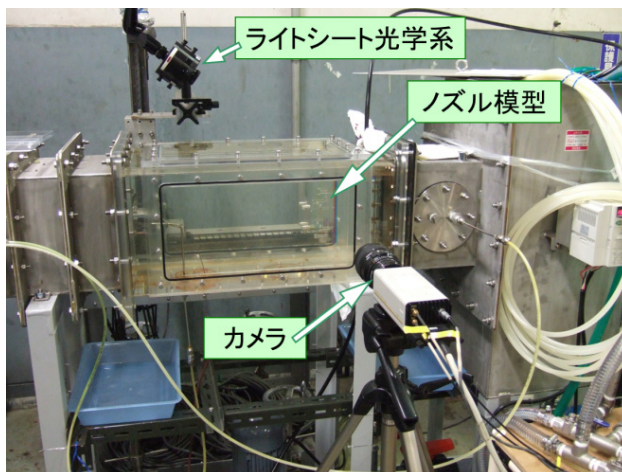


Fig.3-3 : PIV 計測装置

燃料ノズルのような複雑な形状をした模型の内部を可視化計測する際に、流体として普通の水を用いると、屈折率の異なる模型表面での屈折のために画像にゆがみが生じたり、反射のために計測できない領域ができてりする。このような屈折や反射を防ぐために、流体と模型の屈折率を合わせて試験を行う屈折率整合法を用いた。本試験では、流体に 64wt% ヨウ化ナトリウム水溶液を用い、可視化模型の材料としてアクリルを用いて、屈折率を合わせた<sup>5,6)</sup>。アクリル製の容器の中にアクリル製のプリズムを置き、その容器を純水で満たした場合とヨウ化ナトリウム水溶液で満たした場合の、光の透過する様子を図 3-4 に示す。Nd:YAG レーザの第 2 高調波(波長 532nm)をシリンドリカルレンズに通してラインビームを形成し、その左側半分がアクリル製プリズムを通過し、残る右側半分はプリズムの横を通過した後、壁面に照射されるように配置した。図 3-4(a)は容器内を純水で満たした場合であり、ラインビームの左半分がプリズムを通過している。プリズムを通過していないレーザー光とプリズムを通過したレーザー光とで壁面に照射される位置が大きく異なっており、プリズムを通過するときにレーザー光が屈折して曲げられていることが分かる。図 3-4(b)は容器内を 64wt% ヨウ化ナトリウム水溶液で満たした場合であり、(a)と同じようにレーザー光の左半分がプリズムを通過しているが、プリズムを通過していない右半分と同じ位置に照射されており、プリズムを通過してもレーザー光が屈折により曲げられていないことが分かる。

64wt% ヨウ化ナトリウム水溶液は密度が約 1.9g/cm<sup>3</sup> であるが、使用した浮子式の流量計は通常の水用に検定されたものを用いた。そのため、流体としてヨウ化ナトリウム水溶液を用いた時には、次式により流量計の読み値を換算した。

$$Q_1 = Q_0 \sqrt{\frac{\rho_0(\rho_f - \rho_1)}{\rho_1(\rho_f - \rho_0)}} \quad (3-1)$$

$Q_1$  : 実流量

$Q_0$  : 目盛上の流量

$\rho_f$  : フロートの密度(g/cm<sup>3</sup>)

$\rho_1$  : 流体の密度(g/cm<sup>3</sup>)

$\rho_0$  : 水の密度(g/cm<sup>3</sup>)

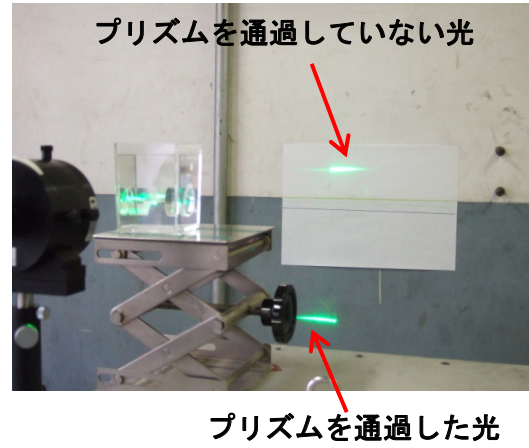
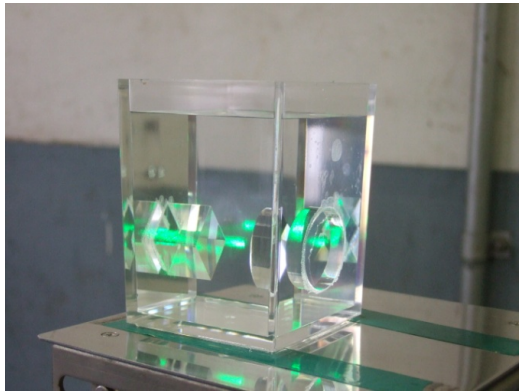
水の密度として 1.0 g/cm<sup>3</sup>, フロートの密度として 7.98 g/cm<sup>3</sup> (SUS316)を使用した。

ヨウ化ナトリウム水溶液は、粉末のヨウ化ナトリウムを、航空推進 7 号館に設置されている純水製造装置により製造した純水に溶かして作成した。まず、ヨウ化ナトリウムの粉末と純水の重量を測定し、ヨウ化ナトリウムの重量濃度が 64% となるように混合し、ヨウ化ナトリウム水溶液とした。また、ヨウ素の析出を防ぐために、チオ硫酸ナトリウムを重量濃度で約 0.1% 混合した。ヨウ化ナトリウム水溶液の屈折率は濃度によって変わるので、アクリルと屈折率が同じになるように濃度を調整する必要がある。濃度の調整は、PIV 計測に用いるのと同じ 532nm のレーザー光を、ヨウ化ナトリウム水溶液中に置かれたアクリル製のプリズムに透過させ、その屈折具合を確認して行った。その様子を図 3-5 に示す。レーザーポインタから発せられた波長 532nm の光をシリンドリカルレンズに通してラインビームを形成した後に、ヨウ化ナトリウム水溶液中に置かれたアクリル製のプリズムを透過させ、プリズムから約 2m 離れた壁面に照射した。レーザーのラインビームの左側半分がプリズムを通過し、残りの右側半分はプリズムを通過しないように配置しているため、両方の光の照射位置を比較することにより、アクリルに対するヨウ化ナトリウム水溶液の屈折率の大小を知ることができる。このようにして試験に用いるヨウ化ナトリウム水溶液の屈折率を検査し、屈折率がアクリルと同じになるように、純水またはヨウ化ナトリウムを追加し、溶液の濃度を調整した。

トレーサ粒子は、中空ガラス粒子(Glass Hollow Spheres, 粒子径 9~13 μm, 比重 1.10)を用いた。



(a)純水を通過するレーザー光



(b)屈折率を合わせた液体(ヨウ化ナトリウム水溶液)を通過するレーザー光

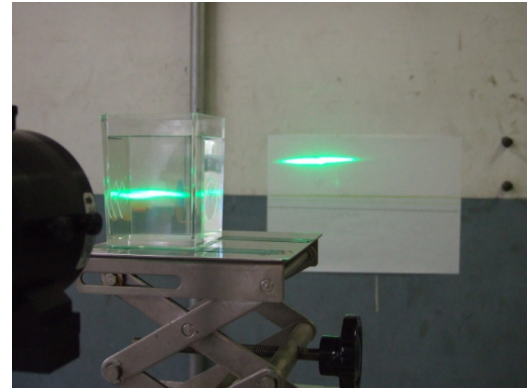
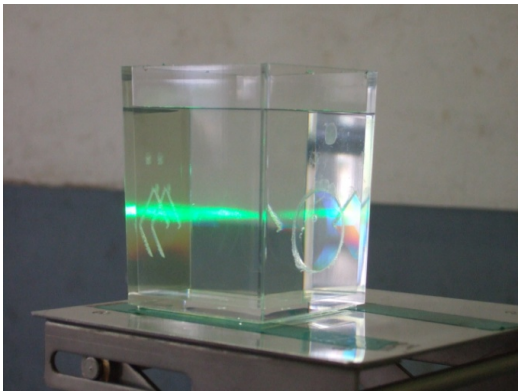
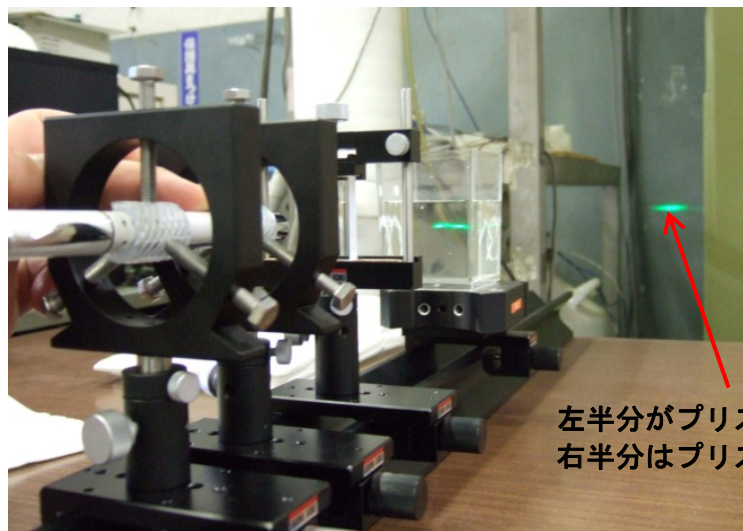


Fig.3-4 : 屈折率整合法



左半分がプリズムを通過し、  
右半分はプリズムの横を通過

Fig.3-5 : ヨウ化ナトリウム水溶液の屈折率の検査

#### 4. 二次元模型可視化水流試験 (1)

流体素子の形状を決定するために二次元形状の流体素子の動作特性を調べた。試験に用いた模型はアクリルで製作されており、奥行き方向に同一の流路形状をしている。可視化回流水槽の観察部に取り付けられた試験模型の断面図を図 4-1 に、観察部の写真を図 4-2 に示す。この模型は、図 4-3 に示す側壁角度、側壁のオフセット、スプリッター先端位置が変更可能であり、奥行き方向の幅は 136mm である。試験を行った模型の形状は図 4-4 の 2D01-1 から 2D01-3 の 3 種類である。各試験模型の主要寸法を表 4-1 にまとめた。これらの形状の主な違いは側壁角度である。

流体素子の全長を短くし、燃料ノズルを小型にするためには側壁角度は大きい方がよい。そこでまず、図 4-4 (a) に示す側壁角度 30 度の模型 2D01-1 について試験を行った。その結果、制御流を吸い出している間は主流の向きが変わるが、制御流を止めると主流は側壁に沿って流れず、直進してスプリッターで二つに分けられて両方の出口から出ていくことがわかった。

制御流の流量をできるだけ少なくするには、主流が側壁に付着した状態で安定し、制御流を止めても主流がどちらか一方の出口から流出する状態になること、すなわちヒステリシス特性を持つことが望ましい。2D01-1 がヒステリシス特性を持たないのは、主流が側壁に再付着する位置が遠いためであると考え、再付着距離を短くするために、側壁角度を 15 度に小さくすると共にオフセットも小さくした図 4-4(b) 2D01-2 の試験を行った。PIV 法を用いて計測した 2D01-2 の内部の流れ場を図 4-5 に示す。この図は、主流の体積流量  $Q_a$  を 150 リットル/min とし、奥行き方向の中心断面での 100 回の計測結果から計算した平均流速分布である。図 4-5 は(a)から(d)まで順に制御口から吸い出す流体の流量を変化させている。(a)は下側の制御口から内部の流体を 10 リットル/min 吸い出している状態、(b)は制御口から流体を吸い出

すのを止めた状態、(c)は上側の制御口から内部の流体を 10 リットル/min 吸い出している状態、(d)は制御口から流体を吸い出すのを止めた状態である。これらの図から、制御口から内部の流体を吸い出すことにより、入口から入った主流の流れる方向を変え、主流が流出する出口流路を切り替えることができること、また制御口から内部の流体を吸い出すのを止めても、前の流れの状態を保ち、主流が一方の出口から選択的に流出する状態を保つことができることが分かる。

主流流量を 100 リットル/min とした時の流体素子入口の流速分布を図 4-7 に示す。この図は流体素子模型の側方 (図 4-5 と同じ方向) から主流に沿った断面上の流速分布を、奥行き方向に 10mm 間隔で計測し、これらの測定結果から、流体素子入口ステップの上流 10mm ( $x=-10\text{mm}$ ) の位置の軸方向流速を抜き出して、並べて表示したものである。各断面で 100 回計測を行い、その平均値を示している。さらに流路の中心  $y=0\text{mm}$  の軸方向流速分布を示したのが図 4-8 である。図 4-7、図 4-8 より、流体素子入口の流速はほぼ一様であり、入口部分では二次元流れとなっていることが分かる。なお、図 4-7 の流速分布から流量を計算すると 110 リットル/min となる。流量計で計測した流量は 100 リットル/min であり、約 10% の誤差がある。

側壁角度をさらに小さくし、 $\alpha=0\text{deg}$  としたのが図 4-4 (c) 2D01-3 である。ただし、この場合にはオフセットが(a) 2D01-1 よりも大きくなっている。(b) 2D01-2 と同じように、中心断面上で測定した平均流速分布を図 4-6 に示す。(a)と(c)がそれぞれ下側と上側の制御口から内部の流体を吸い出している状態である。この時には主流の向きがわずかに、下側あるいは上側に偏向しているものの、(b)と(d)に示すように制御流を止めると、主流の向きは中立の位置にもどり、この流体素子はヒステリシス特性を持たないことが分かる。

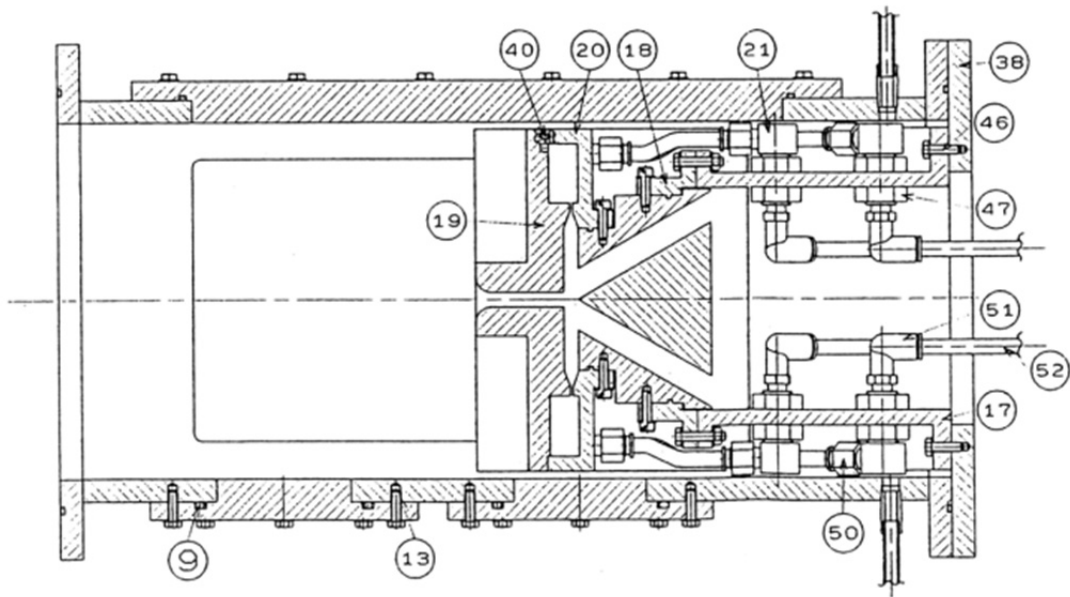


Fig.4-1 : 二次元模型可視化水流試験 (1)  
 観察部断面図  
 (2D01-1)

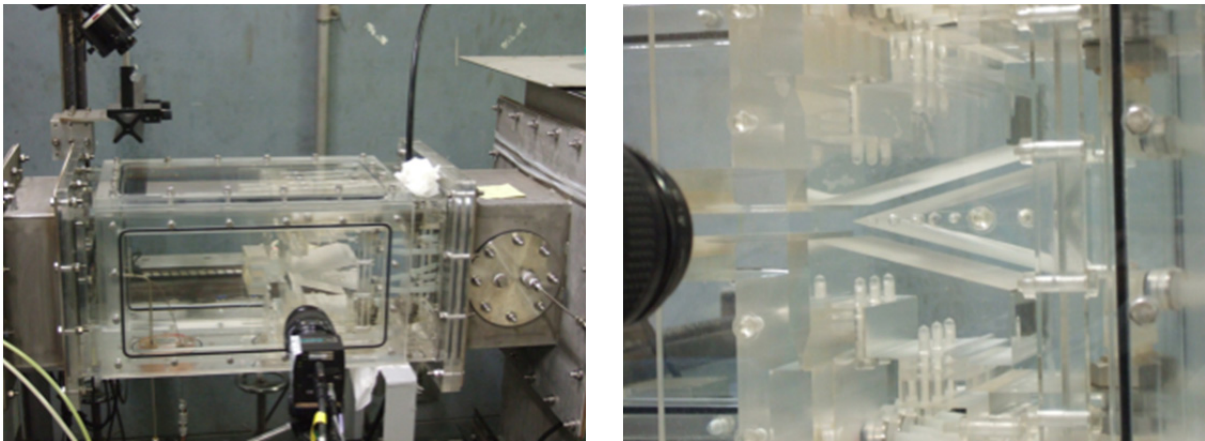


Fig.4-2 : 二次元模型可視化水流試験 (1)  
 観察部写真  
 (2D01-2)

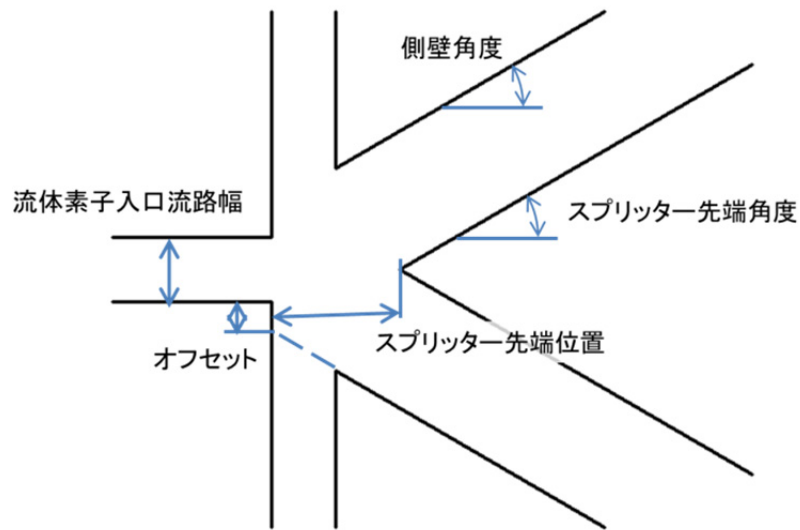


Fig.4-3 : 試験模型形状

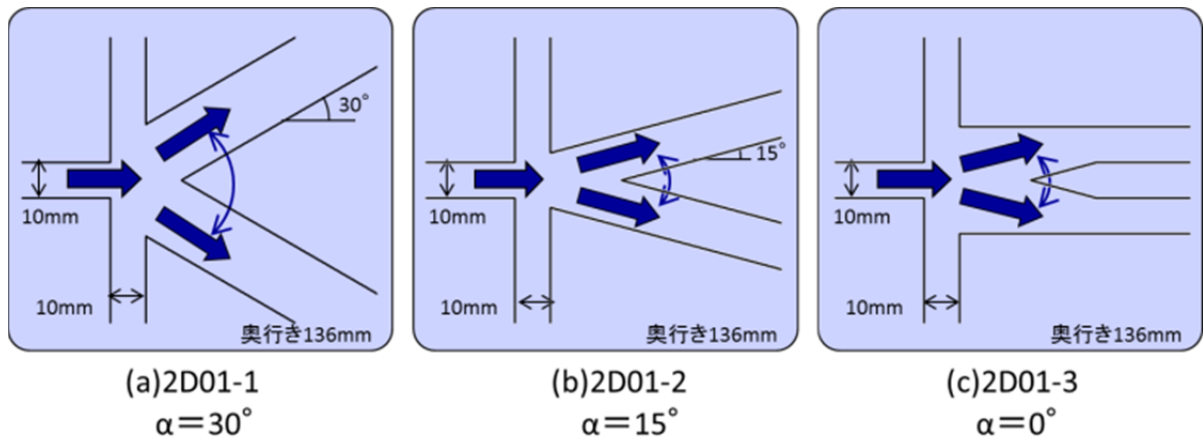
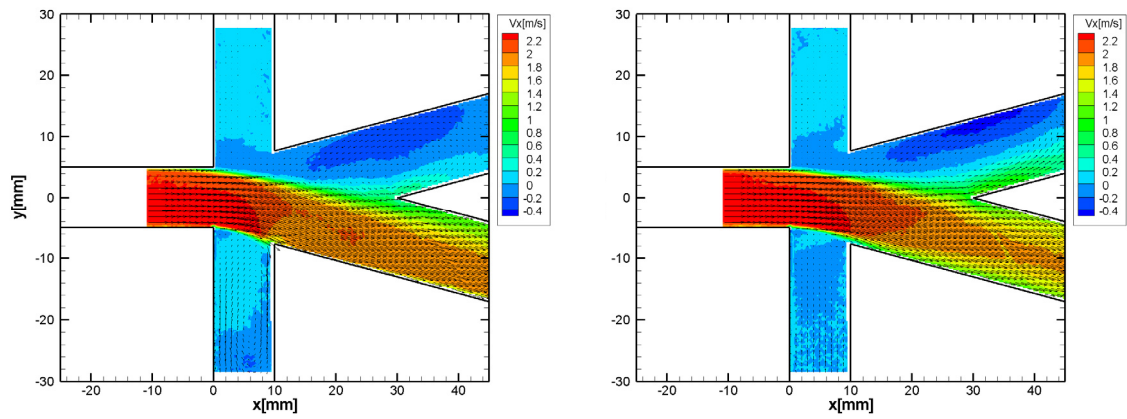


Fig.4-4 : 二次元模型可視化水流試験 (1)  
試験模型概略図

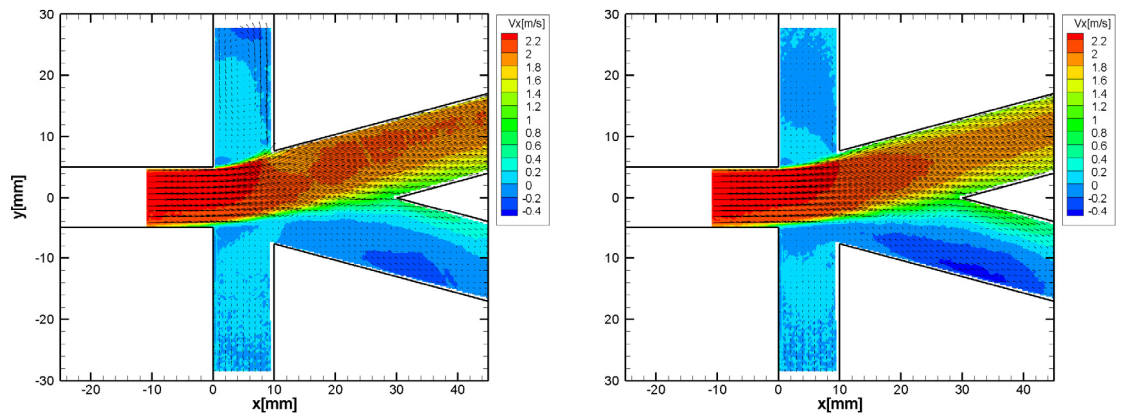
Table4-1: 二次元流体素子可視化模型 (1) 主要寸法

供試体 No.	流体素子入口 流路幅 [mm]	側壁角度 $\alpha$ [deg.]	オフセット [mm]	スプリッター 先端位置 [mm]	スプリッター 先端角度 [deg.]
2D01-1	10	30	5	20	30
2D01-2 (Fig.4-5)	10	15	0	30	15
2D01-3 (Fig.4-6)	10	0	10	30	0



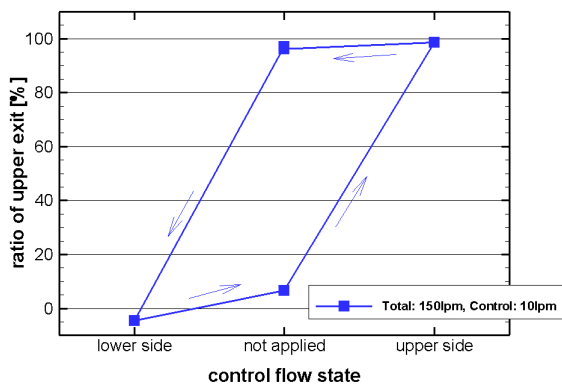
(a) Control: lower side

(b) Control: not apply



(c) Control: upper side

(d) Control: not apply



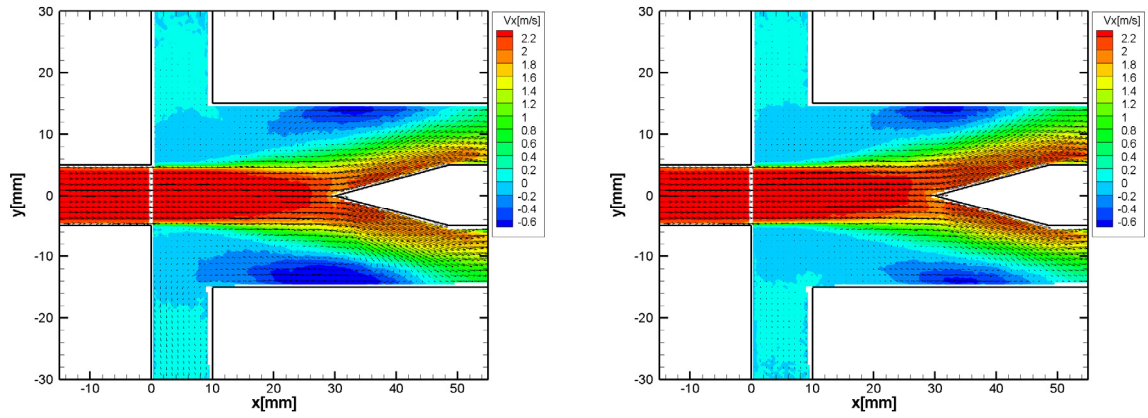
(e) Flow Split Ratio

Fig.4-5 : 平均流速分布と流量配分(Model 2D01-02)

Side wall angle: 15deg., side wall offset: 0mm, splitter distance:30mm

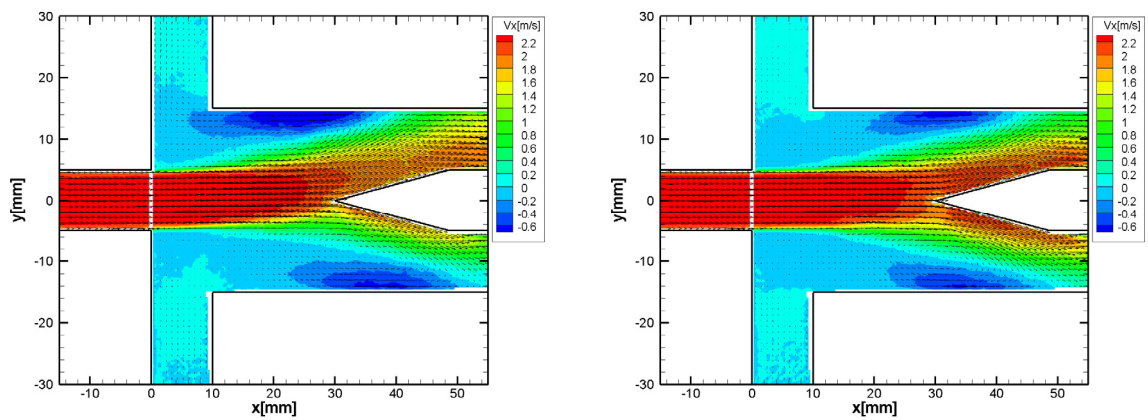
Main flow rate (a)-(d): 150liter/min.

Control flow rate (a), (c): 10liter/min.



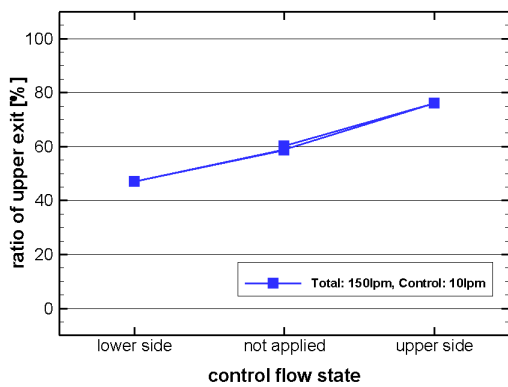
(a) Control: lower side

(b) Control: not apply



(c) Control: upper side

(d) Control: not apply



(e) Flow Split Ratio

Fig.4-6 : 平均流速分布と流量配分(Model 2D01-03)

Side wall angle: 0deg., side wall offset: 10mm, splitter distance:30mm

Main flow rate (a)-(d): 150liter/min.

Control flow rate (a), (c): 10liter/min.

奥行き方向の流速分布が一様であると仮定し、PIVで計測した流速分布から、流体素子の各出口流路の流量を計算した。各出口の流量の合計に対する上側の出口の流量の割合をそれぞれ図 4-5(e)、図 4-6(e)に示す。これらの図からも 2D01-2 が大きな流量変化量とヒステリシス特性を持っていること、また 2D01-3 は流量変化量が小さくヒステリシス特性を持っていないことが分かる。試験を行った流体素子は上下対称な形状であるが、流量配分特性は上下対象にはなっていない、これは供試体の微小な製作誤差に起因していると考えている。また、2D01-2 の流体素子で、下側の制御口から制御流を吸い出したときに、上側の出口の流量割合がマイナスになっているが、これは出口から流体素子内へ逆流が生じていることを表している。

次に、ヒステリシス特性を示した 2D01-2 の流体素子について、主流の向きを切り替えるために必要な制御流の流量を測定した。その結果を図 4-9 に示す。(a)は主流が上側の出口流路に向かって流れていて、かつ制御流を止めた状態から、下側の制御口から制御流を吸い出して主流の向きを

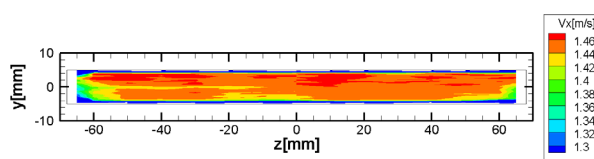


Fig.4-7 : 流体素子入口流速分布

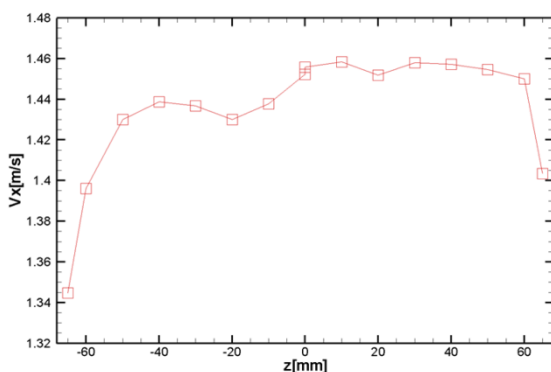
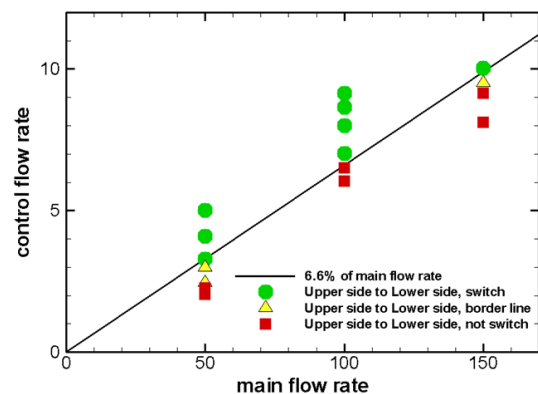
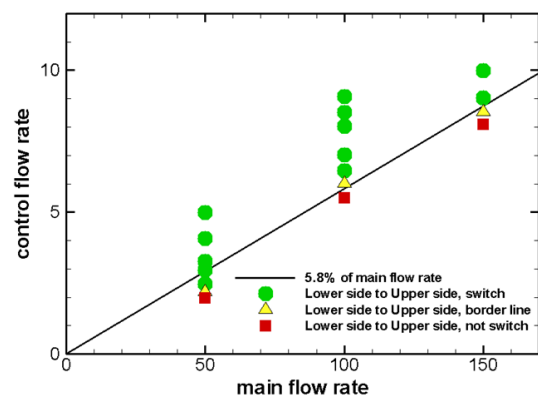


Fig.4-8 : 流体素子入口中心軸上の流速

下側の出口流路に切り替えるため (図 4-5 の(d) から(a)) に必要な制御流の流量を示しており、(b) は主流が下側の出口流路に向かって流れていて、かつ制御流を止めた状態から、上側の制御口から制御流を吸い出して主流の向きを上側の出口流路に切り替えるため (図 4-5 の(b)から(c)) に必要な制御流の流量を示している。図中の緑丸は制御流を吸い出し始めた後即座に (10 秒以内に) 主流の向きが変わった場合、黄色い三角は制御流を吸い出し始めたあとしばらく時間が経過してから主流の向きが切り替わった場合、赤四角は制御流を流し始めた後 1 分以上経過しても主流の向きが切り替わらなかった場合を示している。これらの図からわかるように、主流の向きを切り替えるために必要な制御流の流量は主流の流量に比例している。切り替えに必要な制御流の流量は、下側に切り替



(a) Upper→Lower の切り替え



(b) Lower→Upper の切り替え

Fig.4-9 : 切り替えに必要な制御流の流量

える場合と上側に切り替える場合とでわずかに異なっているが、それぞれ主流流量の約 6.6%と 5.8%であった。流量配分(図 4-5(e), 図 4-6(e))と同様に供試体の製作誤差により、対称な特性になっていないと考えられる。

試験を行った 3 種類の形状のうち 2D01-2 の形状が燃料ノズルの空気の流量配分制御を行うために十分な性能を持っていると判断し、以後の試験においてこの形状を用いることにした。

### 5. 三次元模型可視化水流試験 (1)

パイロットノズルとメインノズルが同軸に配置された気流微粒化燃料ノズルの空気流量配分が制御できることを確認するために、入口と出口が円環状になっている流体素子模型を製作し、水流試験を行って、流体素子内部の流れ場を PIV 法により計測した。試験模型は図 5-1 に示す形状をしており、燃焼試験に用いる燃料ノズルとほぼ同じ形状をしている。流体素子入口流路の内径は 26.2mm, 外径は 35.4mm であり、流体素子入口の流路幅は 4.6mm である。流体素子の部分は図 4-4 (b) と同じく、側壁角度は 15 度で、流体素子の入り口からスプリッター先端までの距離は流体素子入口の流路幅の 3 倍の 13.8mm になっている。この流体素子部分は図 5-2 の写真に示すようにアクリルでできており、内部を可視化計測することができる。パイロットノズルとメインノズルに流れる流体の流量を調節するために、流体素子を通らずに、直接パイロットノズルやメインノズルに至るバイパス流路も設けている。パイロットノズル側のバイパス流路は外径 7.2mm, メインノズル側のバイパスノズルは外径 69.2mm, 内径 54.4mm である。このバイパス流路は入口を塞ぐことができる。流体素子の下流には、実際の燃料ノズルと同じ形状のスワラを備えたノズル模型、またはスワラを持たない円筒形流路のダミーダクトのいずれかを取り付けられるようになっている。ノズル模型およびダミーダクトはステンレス

で製作されている。図 5-1 の点線の枠で囲んだ部分の流速分布を PIV により計測し、100 回計測した結果から平均流速分布を計算した。

試験を行った模型の形状を表 5-1 にまとめた。まず流体素子の下流にノズルを取り付けた場合とダミーダクトを取り付けた場合、そしてバイパスダクトを開けた場合と閉じた場合を組み合わせ、4 形態(3D01-1~3D01-4)の模型について計測を行った。さらに、最外周のスワラ(メインアウター・スワラ)の入口に薄いプラスチック製の板を取り付けることにより最外周のスワラを塞いで(図 5-3)流体素子下流の流路面積を減少させた場合(3D01-5, 3D01-7)について試験を行った。また、流体素子を取り外して(図 5-4)、ノズル模型のみにした場合(3D01-6, 3D01-7)についても試験を行った。

試験を行った模型の内、3 個の模型については、試験模型上流の全圧を測定し、有効開口面積を計算した。これらの全圧は、三次元模型可視化水流試験(2)(第 8 章)に述べる対策を行った後に計測した。これら以外の試験模型については、この対策を行う前に試験を行っており、圧力の計測方法が適切ではなく、有効開口面積は得られなかった。

供試体 3D01-1 の PIV 計測結果を図 5-5(a)~(d) に示す。各図の右上側の流路がメインノズルに通じる流路で、右下側がパイロットノズルに通じる流路である。(a)は内側(パイロットノズル側)の制御口から制御流を流出させている状態、(b)は内側に流していた制御流を止めた状態、(c)は外側(メインノズル側)の制御口から制御流を流出させている状態、(d)は外側に流していた制御流を止めた状態である。制御流を流している間は、流体素子入口から入った流れはパイロット側あるいはメイン側の出口に向かって流れるが、制御流を止めると中立の位置になり、スプリッターにぶつかった後二つに分かれて流れていることが分かる。また、制御流をパイロットノズル側にしたとき(図



5-5(a) には、流体素子内の流れはパイロットノズル側に向かって流れるが、パイロットノズル側のバイパス流路の流速が減少し、メインノズル側のバイパス流路の流速が増加している。逆に制御流をメインノズル側にしたとき(図 5-5 (c))には、流体素子内の流れはメインノズル側の出口に向かって流れているが、メインノズル側バイパス流路の流速は減少し、パイロットノズル側バイパス流路の流速が増加している。つまり、流体素子でメインノズルとパイロットノズルに流れる流量配分を切り替えても、それを打ち消すようにバイパス流路の流量が変化している。PIV 測定の結果から、各出口の流量を計算した。メインノズル側の流量割合を図 5-5(e)に示す。この図から流量変化の大きさは 5%程度と小さく、ヒステリシス特性も無いことが分かる。

次に流体素子下流にダミーダクトを取り付けた 3D01-2 の結果を図 5-6 に示す。流体素子下流の流路をダミーダクトに替えることにより、流体素子下流の圧力損失が極めて小さくなる。図 5-6 から制御流をメインノズル側にしたときのみ、流体素子内の流れはメインノズル側に流れ、それ以外の場合にはパイロットノズル側に流れていることが分かる。流体素子下流にスワラを取り付けた場合と同じように、制御流をメインノズル側にしたときにはメインノズル側バイパス流路の流速が減少している。制御流を切り替えたときのメインノズル側出口の流量割合を図 5-6(e)に示す。この図からもわかるとおり、ヒステリシス特性は無く、制御流を止めた場合と制御流をパイロットノズル側にした場合の流量配分はほぼ同じで、制御流をメインノズル側にするとメインノズル側の流量配分が増加する。流量配分の変化量は約 10%と、下流にノズル模型を取り付けた場合よりも大きくなっている。

図 5-5 および図 5-6 には、流体素子内の流れの上下の非対称性を確認するために、流体素子全体を計測した結果も示している(図 5-5(f), 図 5-6(f))。

この測定結果を検討した結果、顕著な上下の非対称性は見られなかったため、今回の計測では、より高い解像度を得るために、上側半面のみを計測範囲とした。

3D01-1 および 3D01-2 では、バイパス流路の流量が、流体素子による流量配分の変化を打ち消すように変化しているために流量配分の変化量が大きくなかった。そこで、3D01-3 および 3D01-4 では、バイパス流路の入口を塞ぎ、流体素子のみを通してノズルに流体が流れるようにした。

3D01-3 はバイパス流路の入口を塞ぎ、流体素子の下流にスワラを取り付けている。3D01-3 の PIV 測定結果を図 5-7(a)~(d)に示す。バイパス流路が開いている 3D01-1 では、制御流を流していないときには流体素子内の流れはほぼ中立の位置であったのに対して、バイパス流路を塞いだ 3D01-3 では、制御流を止めるとメインノズル側出口に向かって流れている。パイロットノズル側から制御流を吸い出すと、流体素子の分岐部の直下流では流れはパイロットノズル側を向いているが、すぐにパイロットノズル側の壁面から剥離し主流はメインノズル側出口から流出している。図 5-7(e)に制御流を切り替えたときのメインノズル側出口の流量割合を示す。この図からも流量配分はメインノズル側に大きく偏っていることがわかる。制御流をパイロット側とメイン側にしたときの流量配分の変化は約 15%である。

さらに、バイパス流路を塞ぎ流体素子下流にダミーダクトを取り付けた 3D01-4 について試験を行った。PIV 計測の結果を図 5-8(a)~(d)に示す。3D01-1~3D01-3 とは異なり、制御流の切り替えによって流体素子内の流れが明確に切り替わり、制御流を止めても流れの向きは前の状態を保っており、ヒステリシス特性を持っていることが分かる。流量配分の変化を図 5-8(e)に示す。この図からも 100%を越える大きな流量配分変化と、ヒステリシス特性を持っており、二次元流体素子の特性に近いことが分かる。

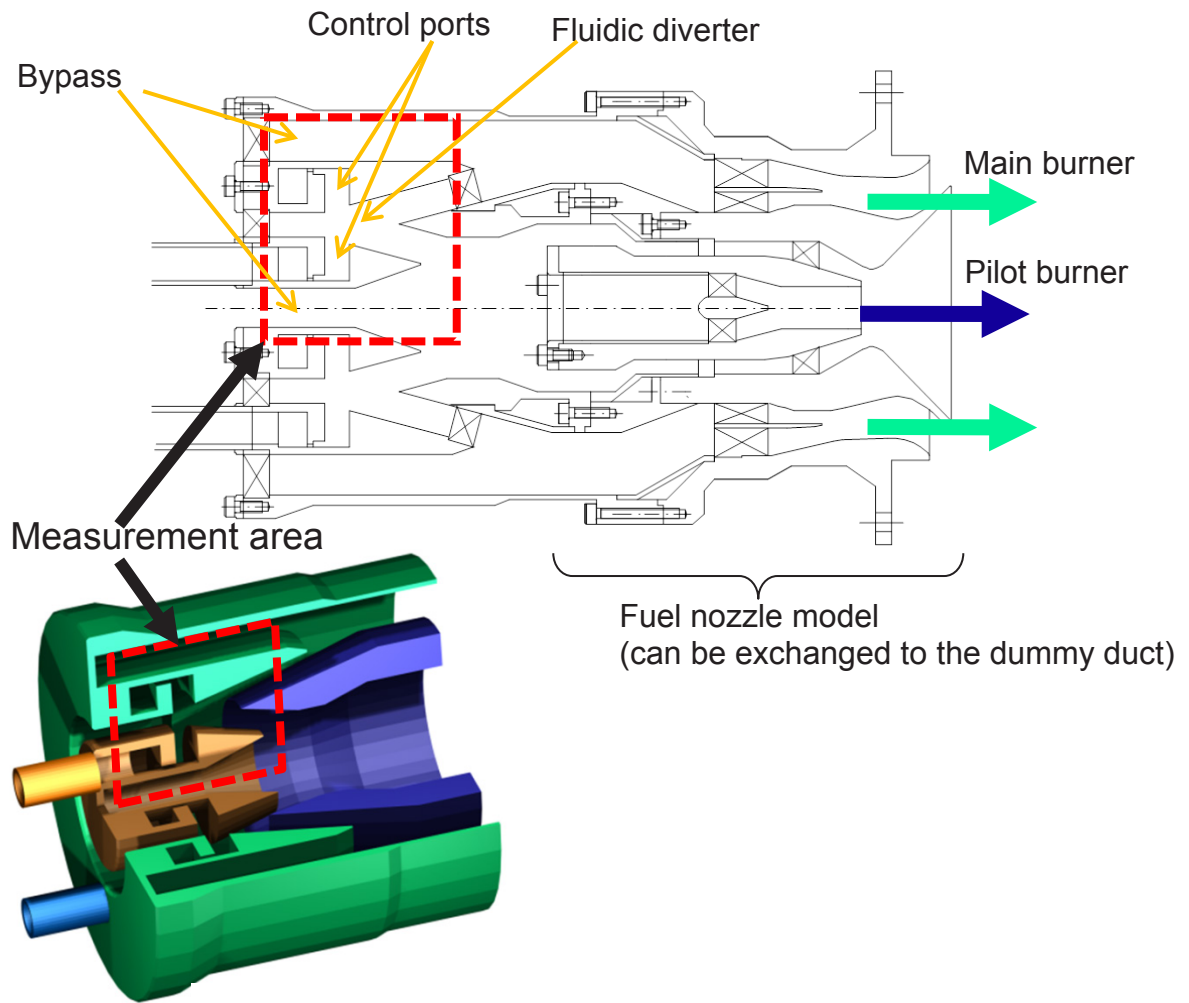


Fig.5-1 : 三次元流体素子可視化模型 (1) 概略図



Fig.5-2 : 三次元流体素子可視化模型 (1) 外観

透明のプラスチックの薄板

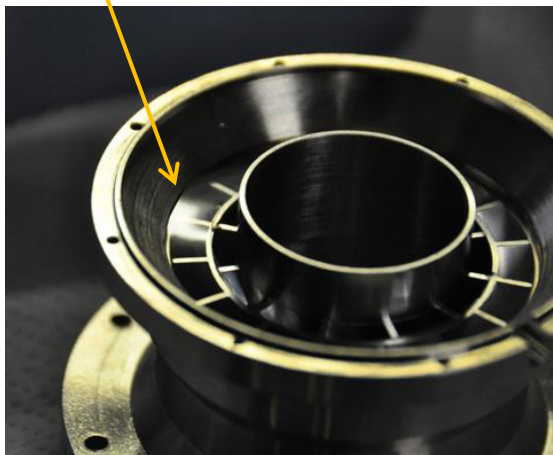


Fig.5-3 : メインアウター・スワーラを閉鎖  
(3D01-5, 3D01-7)

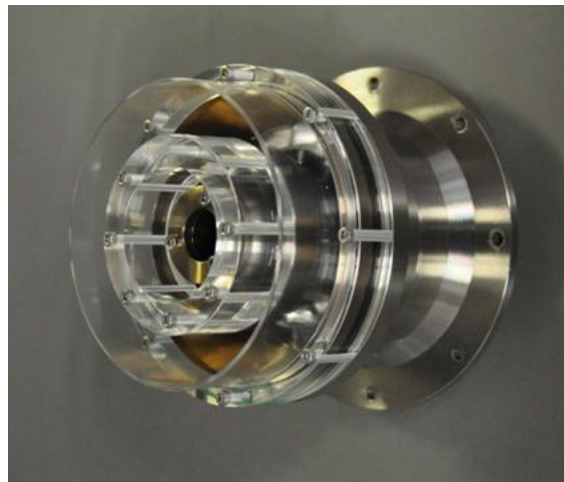


Fig.5-4 : 流体素子部を取り外した模型  
(3D01-6, 3D01-7)

Table5-1:三次元流体素子可視化模型 (1) 供試体形態

供試体名	流体素子部	ノズル部	バイパス 入口	メインアウター スワーラ	有効開口 面積 [mm <sup>2</sup> ]
3D01-01 (Fig.5-5)	流体素子	ノズル	開	開	
3D01-02 (Fig.5-6)	流体素子	ダミーダクト	開	開	
3D01-03 (Fig.5-7)	流体素子	ノズル	閉	開	391.5
3D01-04 (Fig.5-8)	流体素子	ダミーダクト	閉	開	
3D01-05 (Fig.5-9)	流体素子	ノズル	閉	閉	253.3
3D01-06 (Fig.5-10)	無	ノズル	-	開	
3D01-07 (Fig.5-11)	無	ノズル	-	閉	293.1

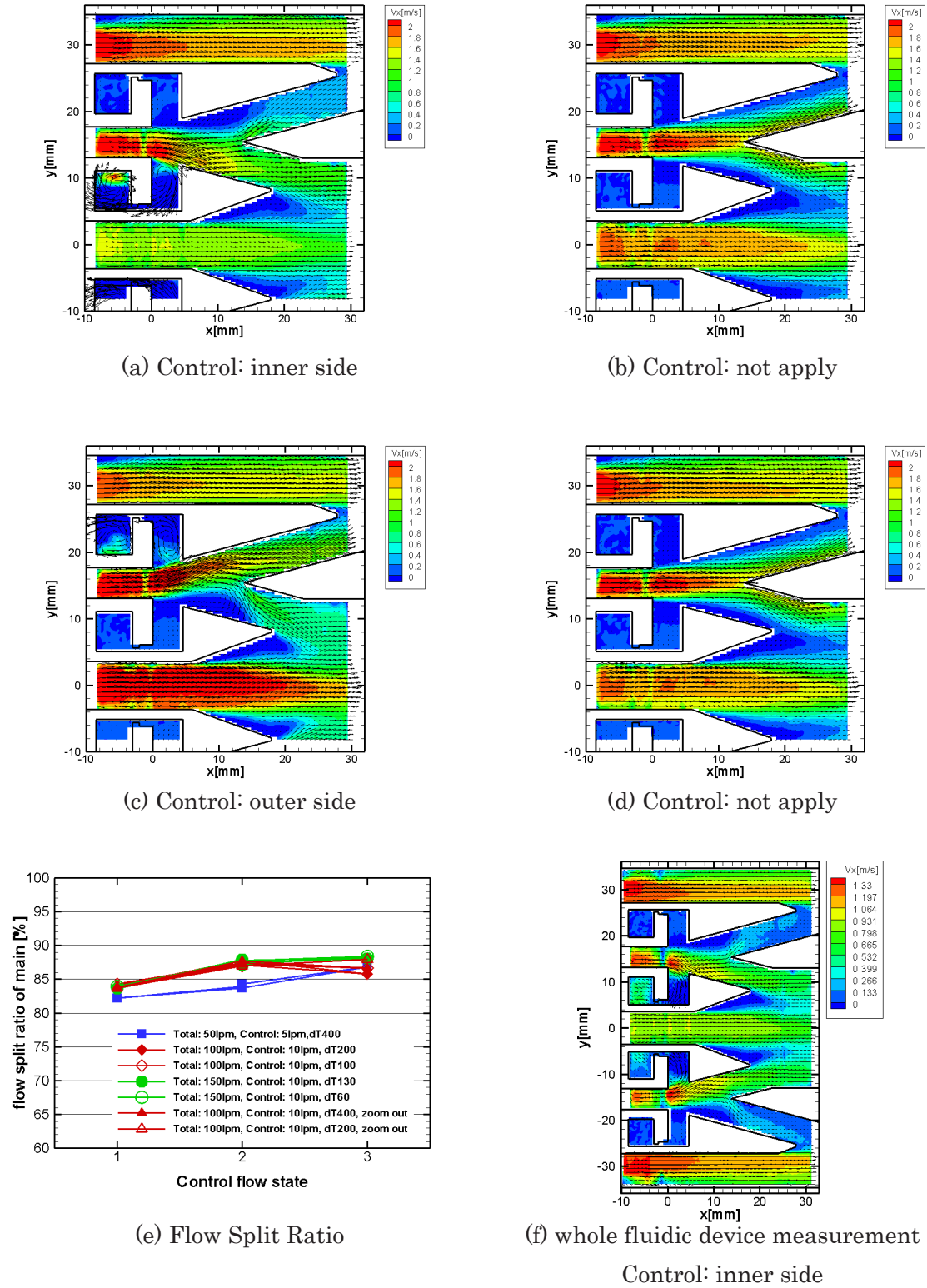


Fig.5-5 : 平均流速分布、流量配分 (Model 3D01-01)

Bypath: open, Splitter edge: sharp, downstream part: nozzle

Main flow rate (a)-(d): 150liter/min.

Control flow rate (a), (c): 10liter/min.

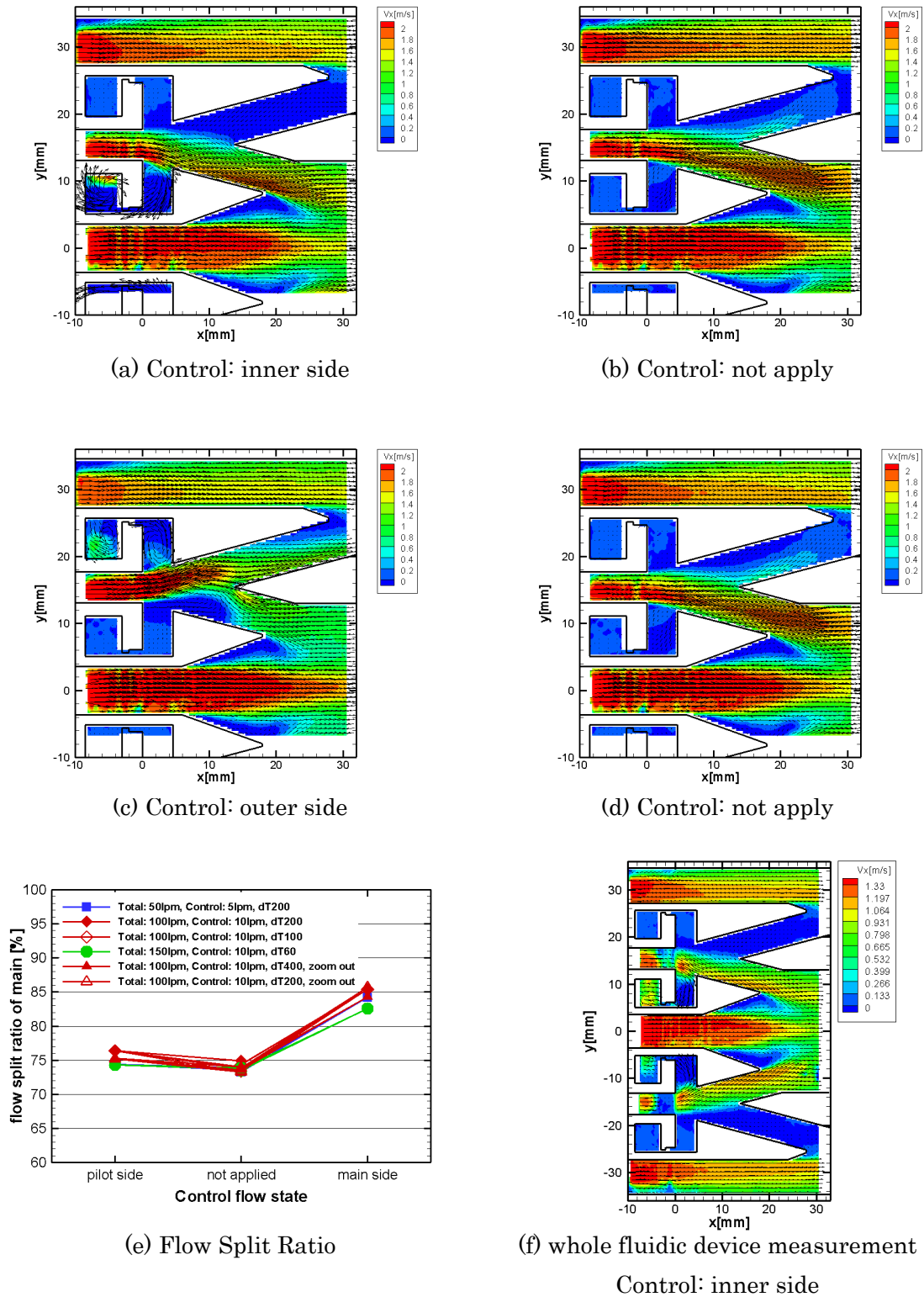


Fig.5-6 : 平均流速分布、流量配分 (Model 3D01-02)

Bypath: open, Splitter edge: sharp, downstream part: dummy duct

Main flow rate (a)-(d): 150liter/min.

Control flow rate (a), (c): 10liter/min.

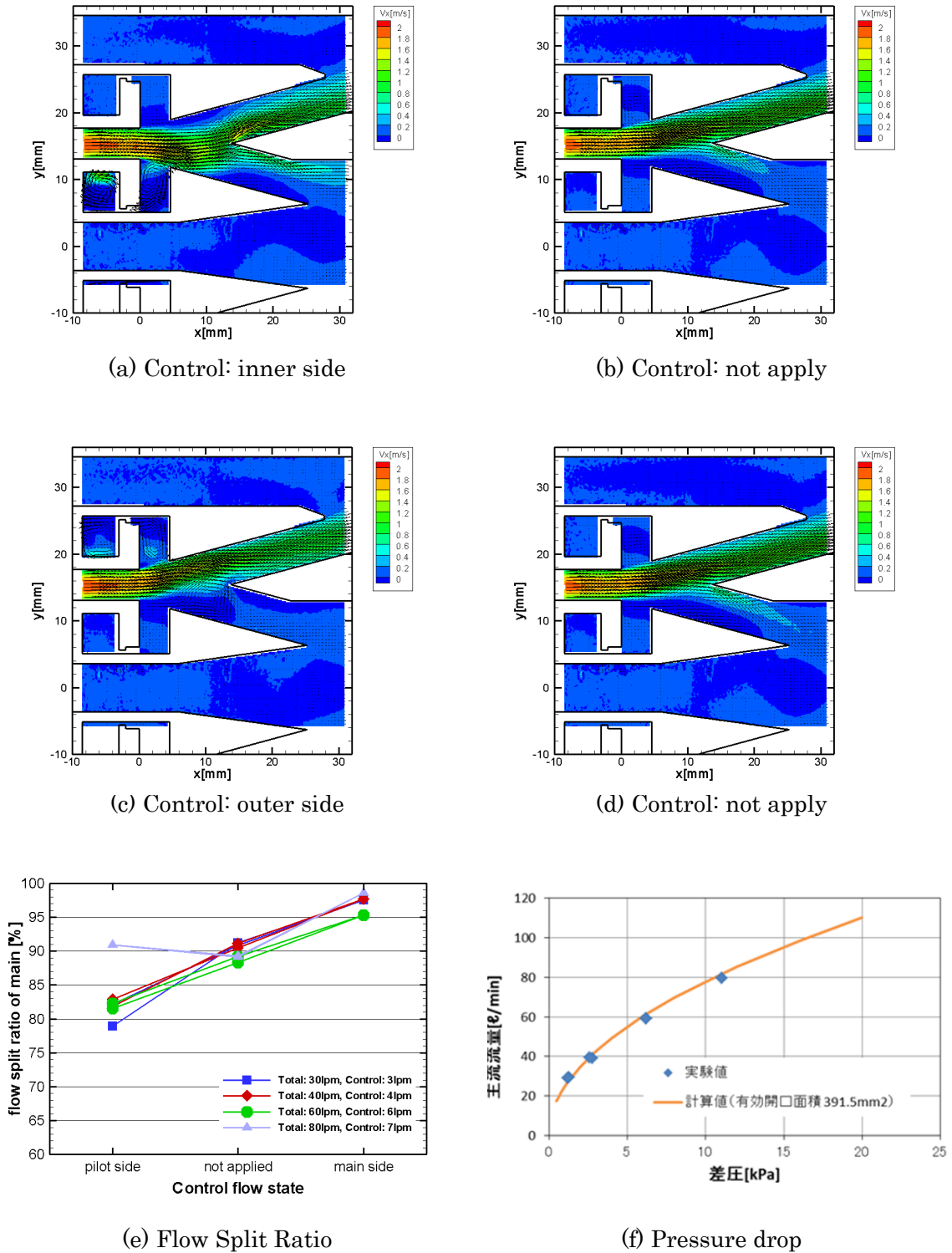
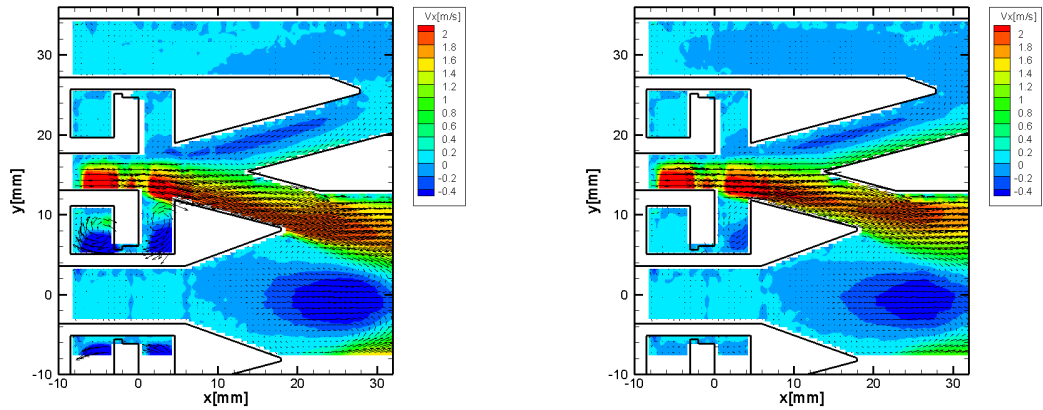


Fig.5-7 : 平均流速分布、流量配分 (Model 3D01-03)

Bypass: close, Splitter edge: sharp, downstream part: nozzle

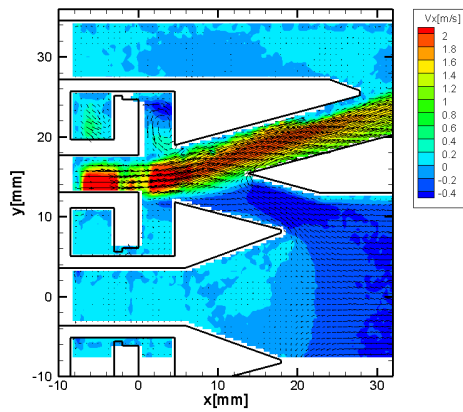
Main flow rate (a)-(d): 40liter/min.

Control flow rate (a), (c): 4liter/min.

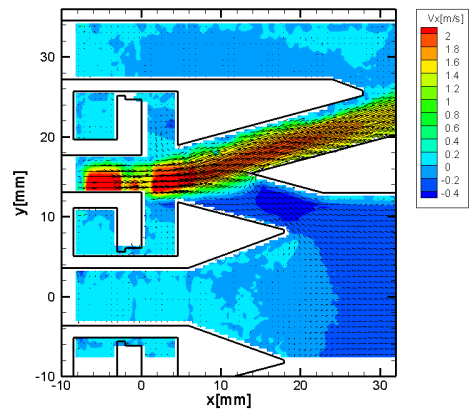


(a) Control: inner side

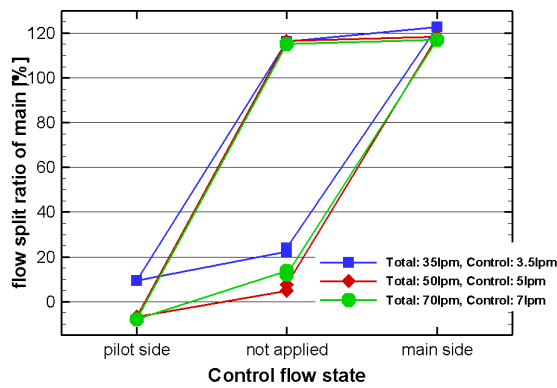
(b) Control: not apply



(c) Control: outer side



(d) Control: not apply



(e) Flow Split Ratio

Fig.5-8 : 平均流速分布、流量配分 (Model 3D01-04)

Bypass: close, Splitter edge: sharp, downstream part: dummy duct

Main flow rate (a)-(d): 50liter/min.

Control flow rate (a), (c): 5liter/min

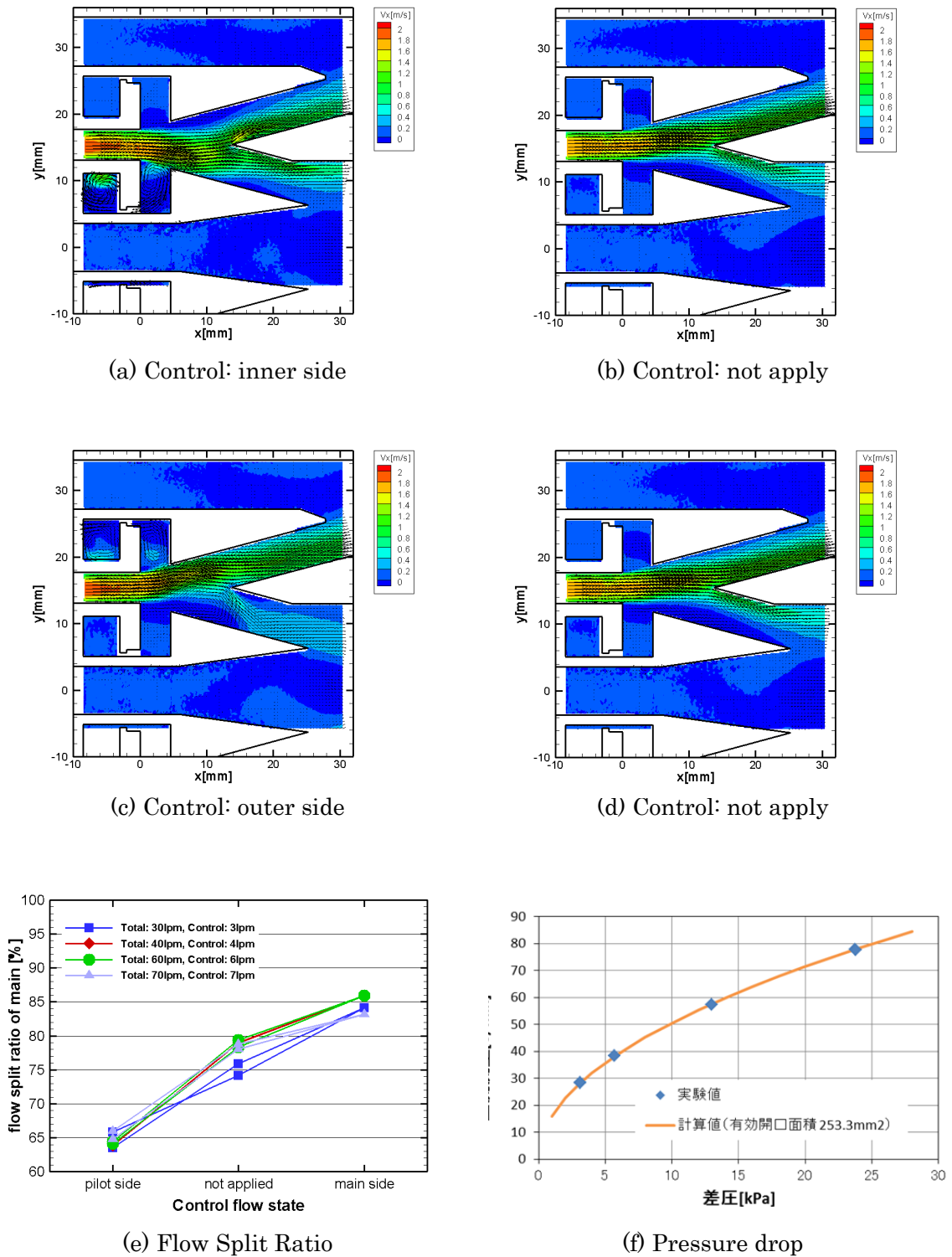


Fig.5-9 : 平均流速分布、流量配分 (Model 3D01-05)

Bypass: close, Splitter edge: sharp, downstream part: nozzle, main outer swirler: close

Main flow rate (a)-(d): 40liter/min.

Control flow rate (a), (c): 4liter/min.



3D01-1 から 3D01-4 の 4 形態の試験結果から次のことが分かる。まず、バイパスダクトを設けると、バイパスダクト内の流量が流体素子による流量配分の変化を打ち消すように変化し、結果として流量配分の変化が小さくなる。また、流体素子下流の流路形状は流量配分特性に大きな影響を与える。

バイパスダクトを設けた 3D01-1 と 3D01-2 ではバイパスダクト内の流れが流体素子による流量配分変化を打ち消すので、その変化はスワラを取り付けた場合(3D01-1)で約 5%、ダミーダクトの場合(3D01-2)で約 10%であった。バイパスダクトを塞いだ 3D01-3 と 3D01-4 では、流体素子による流量配分変化がより明確に現れており、スワラを取り付けた場合(3D01-3)の流量配分変化は約 15%であるのに対して、ダミーダクトを取り付けた場合(3D01-4)には 100%を超えている。

バイパスダクトを取り付けたのは、流量配分の変化が過度に大きくならないようにするためであった。燃料ノズル内の空気流量配分を制御することを考えると、空気流量が極端に少なくなること、まして 3D01-4 で見られるように逆流が生じることは望ましくない。しかし、上記の結果は、流体素子下流にスワラを取り付けて、下流（流体素子出口流路）の圧力損失を大きくすることで流量配分の変化が小さくなることを示しており、過度な流量配分変化を防ぐためにバイパスダクトを設けることはあまり意味が無いと言える。

次に、流体素子を取り付けていない場合の流量配分との比較を行った。3D01-1, 3D01-3 の試験模型で流体素子の下流に取り付けたスワラすなわち燃料ノズルを模擬した流路のみ(3D01-6)の、入口部分の流速分布計測を行った。また、ノズル部分のみの流量配分特性と、流体素子を取り付けた場合の流量配分特性を比較するために、ノズル部分の最外周のスワラ（メイン・アウタースワラ）を塞いで、ノズルのみの場合(3D01-7)とバイパス流路を塞いだ流体素子を取り付けた場合

(3D01-5)で計測を行った。まず、ノズルのみの場合の流速分布の計測結果をそれぞれ図 5-10 (3D01-6)と図 5-11 (3D01-7)に示す。これらの計測結果から、メインノズルとパイロットノズルの流量配分を計算した。3D01-6 では、メインノズルに 85%、パイロットノズルに 15%流れており、3D01-7 では、メインノズルに 70%、パイロットノズルに 30%流れている。3D01-6 と流体素子を

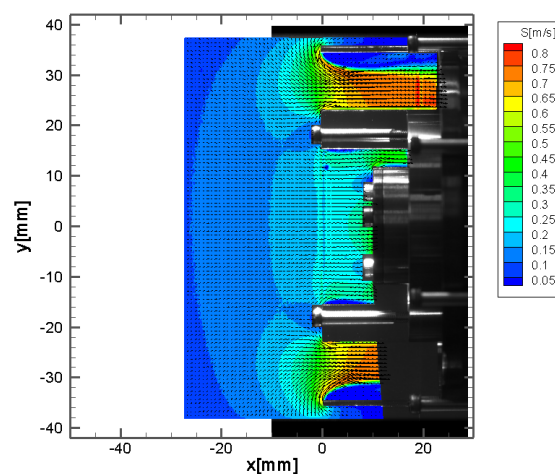


Fig.5-10 : 平均流速分布(Model 3D01-06)  
without fluidic device  
Main flow rate: 80little/min.

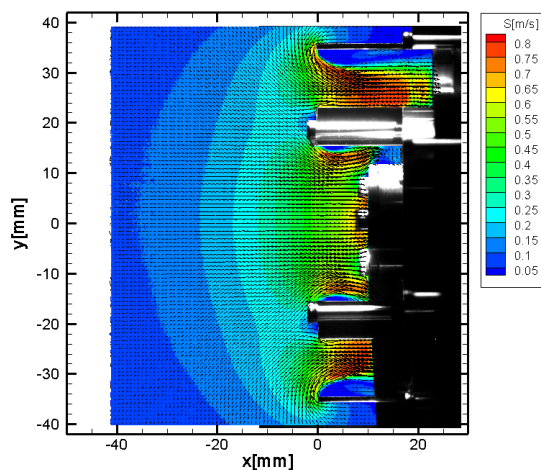


Fig.5-11 : 平均流速分布(Model 3D01-07)  
without fluidic device,  
main outer swirler: close  
Main flow rate: 80little/min.

取り付けた 3D01-3 を比較すると、3D01-3 で制御流を流していないときの流量配分は、メインノズル側 90%、パイロットノズル側 10%であり、流体素子を取り付けていない場合よりもメインノズル側に多く流れている。3D01-5 の計測結果も同様に図 5-9 に示す。メインアウター・スワローを塞いだ 3D01-5 と 3D01-7 を比較すると、3D01-7 で制御流を流していないときの流量配分は、メインノズル側 80%、パイロットノズル側 20%であり、3D01-6、3D01-3 の場合と同様に流体素子を取り付けた場合の方がメインノズル側の流量は多い。

3D01-3 と 3D01-5 の流量配分変化量を比較すると、3D01-3 では制御流をメインノズル側とパイロットノズル側にしたときで、流量配分が約 15%変化するのに対して、3D01-5 では約 20%変

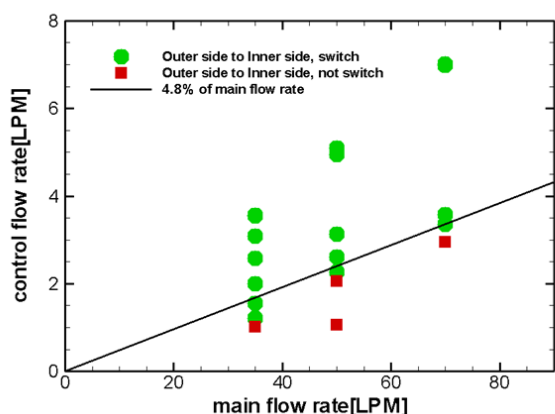
化している。有効開口面積は 3D01-5 のほうが小さく、流体素子下流の圧力損失は 3D01-5 のほうが大きいにもかかわらず、流量配分の変化は大きくなっている。3D01-3 と 3D01-4 の計測結果では流体素子下流の圧力損失が小さくなると、流量配分の変化量が大きくなっているが、流量配分の変化量は単純に流体素子下流の圧力損失だけでなく、両出口の圧力損失のバランスなどによっても影響を受けることが考えられる。

3D01-1~3D01-5 の中で唯一ヒステリシス特性を有していた 3D01-4 について、流体素子内の流れの向きを切り替えるのに必要な制御流量を調べた。結果を図 5-12 に示す。図中のシンボルの意味は図 4-9 と同じである。図 5-12(a)はメイン側に向いている流れをパイロット側に向けるために必要なパイロット側の制御流量で、図 5-12(b)はパイロット側に向いている流れをメイン側に向けるために必要なメイン側の制御流量である。二次元形状の流体素子の場合と同様に、必要な制御流量は主流流量に比例しており、パイロット側に向けるためには主流の 4.8%、メイン側に向けるためには 3.5%の制御流量が必要である。

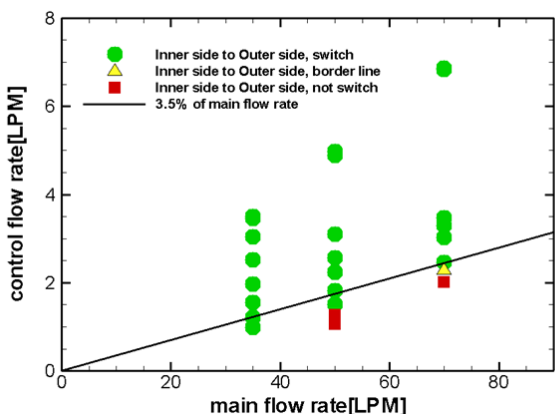
## 6. 燃焼試験

### 6.1. 大気圧燃焼試験

円環状の流体素子を、パイロットノズルとメインノズルが同軸に配置された燃料ノズルの上流に取り付け、大気圧燃焼試験を行った<sup>8)</sup>。燃料ノズル部分は JAXA が行っている TechCLEAN プロジェクトにおいて開発を進めている希薄予混合燃料ノズル<sup>9) 10) 11) 12)</sup>の形状をそのまま使用した。燃焼試験モデルの断面図を図 6-1 に示す。また、下流側（燃料ノズル出口側）から見た外観の写真を図 6-2 に、テストリグに取り付けた状態で上流側（流体素子入口側）から見た外観の写真を図 6-3 に示す。燃料ノズルの空気流路は 4 重のスワローで構成されており、内側の二つがパイロット燃料ノズル、外側の二つがメイン燃料ノズルの空気流路で



(a) Main→Pilot の切り替え



(b) Pilot→Main の切り替え

Fig.5-12 : 主流の切り替えに必要な制御流量

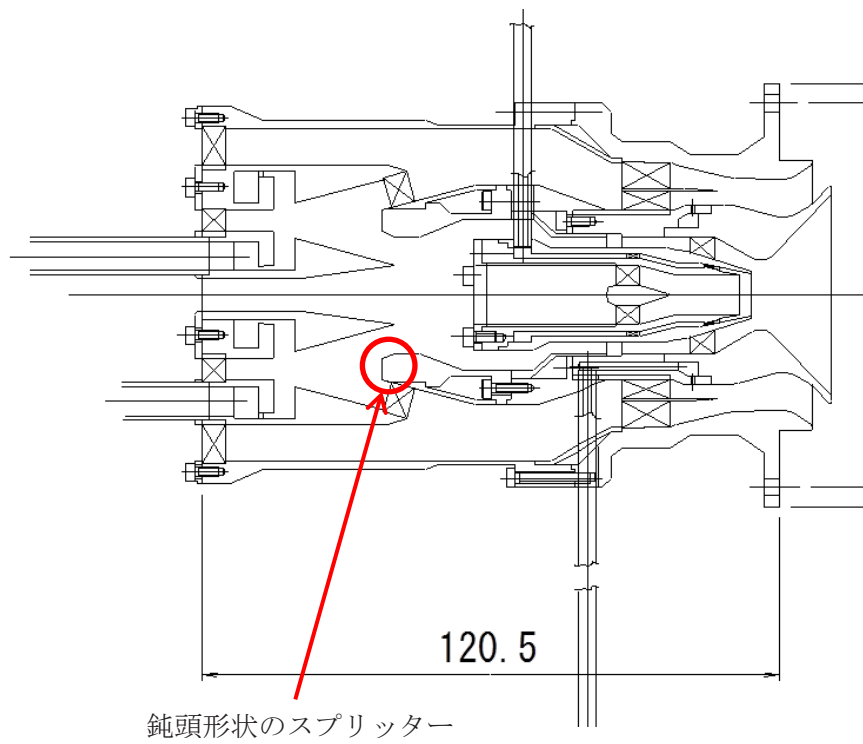


Fig.6-1 : 燃焼試験模型概略図

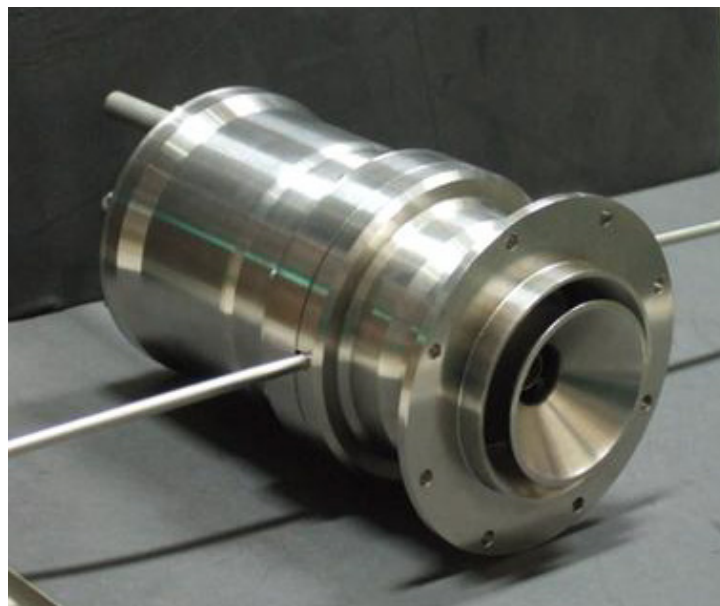


Fig.6-2 : 燃焼試験模型外観

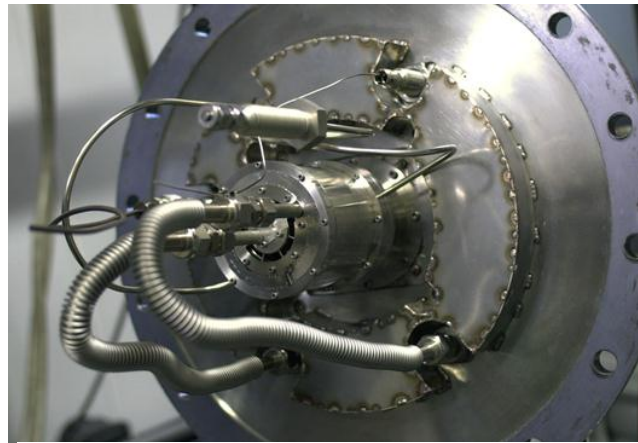


Fig.6-3 : 燃焼試験模型取り付け状況

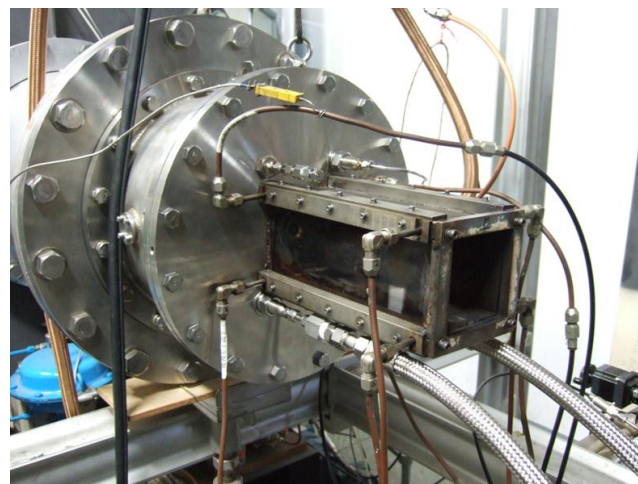


Fig.6-4 : 大気圧試験用燃焼器

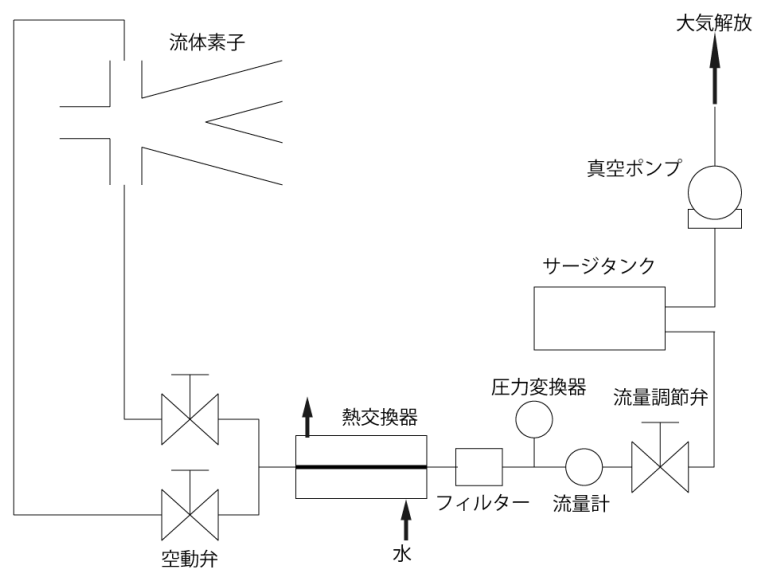


Fig.6-5 : 制御流系統図 (大気圧試験)

ある。パイロット燃料ノズルはプレフィルミング型のエアブラストノズルで、燃料は二つのスワール流路の間にフィルム状に噴射される。メイン燃料ノズルでは、燃料は空気流路の内側の壁面の円形の噴射孔から噴射するプレインジェットを用いており、空気流を貫通した燃料ジェットはプレフィルマーに当たり円環状のプレフィルムを形成する。ただし、本試験では、パイロット燃料のみを用いた。流体素子は三次元模型可視化水流試験(1)に用いたのと同じく、流体素子入口流路の内径は26.2mm、外径は35.4mm、流体素子入口の流路幅は4.6mm、側壁角度は15度になっている。燃焼試験模型にも流体素子を通る流路のほか、流体素子を通らずにパイロットノズルやメインノズルに通じる流路も設けているが、本試験ではどちらも入り口を塞いでいる。

水流試験では、流体素子下流にノズルを取り付けた時には流体素子がヒステリシス特性を持たないという結果であった。燃焼試験では、流体素子にヒステリシス特性を持たせることを狙って、先端が平坦な鈍頭形状のスプリッター(図6-1赤丸で囲んだ部分)を用いた。その結果、燃焼試験においては、流体素子がヒステリシス特性を有していることが確認できた。しかし、制御流を止めている時に、流れの状態が変化してしまうことがあった。これは、ノズルの上流あるいは下流からの外乱による影響によるものと考えている。この意図していない状態変化を防ぐために、燃焼試験では常にパイロット側あるいはメイン側のどちらかの制御流を流しながら試験を行った。

燃焼用空気はブロワから供給され、電気ヒータで加熱されたあと流体素子と燃料ノズルを通過して燃焼室に流入する。燃焼室は、内寸が83mm×83mm×274mmで、3面が石英ガラス、1面がステンレスでできており、出口は大気開放されている。燃焼室部分の写真を図6-4に示す。制御流は、真空ポンプにより流体素子の制御口から吸い出され、大気中に放出される。制御流の系統図を図6-5

に示す。流体素子の二つの制御口はそれぞれ空動弁(Swagelok SS-T63MS8-33DHT)につながっており、この空動弁で制御流のON/OFFが切り替えられる。空動弁を動作させるための空気の制御は電源のON/OFFによって動作する切り替えバルブ(CKD 4GA310-C6-E23-1)で行う。制御流は空動弁の下流で一つに合流し、熱交換器(藤産業 SHE-80)を通過して温度を下げられた後、流量計(山武 CMS0200BTSN210000)、流量調節弁(日本バルブコントロールズ PAXMV-105UUP-015)、サージタンクを通過し、真空ポンプ(ULVAC DSB-151)により大気に放出される。

## 6.2. 試験結果(大気圧燃焼試験)

火炎の直接写真を図6-6に示す。(a)はメインノズル側に制御流を流しているとき、(b)はパイロットノズル側に制御流を流しているときである。ノズル入り口での空気の体積流量を燃焼室断面積で除した燃焼室の断面平均流速  $U_c$  は9.2m/s、ノズル入り口空気温度  $T_{ia}$  は460K、全体空燃比  $A/F$  は58である。制御流をメインノズル側にした時には、火炎のほとんどが輝炎であり、また燃えながら下流に流れていく液滴のような物が観察でき、燃料の微粒化が進んでいないと考えられる。それに対して、制御流をパイロットノズル側にした時には、一部に輝炎が形成されているが、火炎は青色の部分が多く、燃料噴霧の分布に偏りがある等の原因により燃料の濃い領域が存在するが、燃料の微粒化と混合は良好に行われていると考えられる。

大気圧燃焼試験における燃料ノズルの圧力降下と空気流量の関係を図6-7に示す。この結果から、有効開口面積は370mm<sup>2</sup>であることがわかる。この開口面積には燃料ノズル取り付け面の遮熱版を冷却するための空気孔の面積を含んでいる。また、流体素子内の流れを変化させ、燃焼状態を切り替えるために必要な制御流の流量を図6-8に示す。制御流を流す制御口を空動弁により切り替え

た後即座に状態が変わる場合 (青いプロット), 制御口の切り替えからやや遅れるが 10 秒以内に状態が変わる場合 (黄色いプロット), 10 秒以上経過しても状態が変わらない場合 (赤いプロット) に分けて結果を示している. 制御流が少ないと流れを切り替えることができないが, ある程度制御流が増えると流れを切り替えることができるようになり, その最小の流量は主流の流量に比例している. つまり, 主流流量の約 3%よりも制御流が多いと, 流れが切り替わる.

### 6.3. 高圧燃焼試験

次に, 大気圧燃焼試験に用いたのと同じ燃料ノ



(a) 制御流 : メインノズル側



(b) 制御流 : パイロットノズル側

Fig.6-6 : 大気圧燃焼試験 火炎直接写真

ズルを高温高圧燃焼試験設備において燃焼試験を行った<sup>13)</sup>. 高圧ケーシングに取り付けた燃焼器ライナーと流体素子制御燃料ノズルを図 6-9 に示す. 燃焼器ライナーは側壁がガラス窓になっており, 燃焼器内部の火炎の状態を観察することができる. また, 燃焼器出口に取り付けたガスサンプルプローブにより採取した燃焼ガスをガス分析し, 排出ガス特性の計測を行った. 制御流は高圧ケーシング内の圧力と大気圧との差圧により制御口から流出する. 制御流の配管系統図を図 6-10 に示す. 流体素子の制御口はそれぞれ空動弁 (Swagelok SS-T63MS8-33DHT) につながっており, この空動弁で制御流の ON/OFF が切り替えられる. 空動弁を動作させるための空気の制御は電源の ON/OFF によって動作する切り替えバルブ (CKD 4GA310-C6-E23-1) で行う. 空動弁の下流の配管は一つにまとまり, 流量調節弁 (日本バ

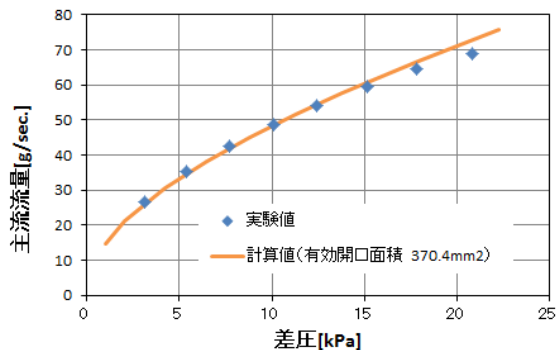


Fig.6-7 : 圧力降下と空気流量 (大気圧燃焼試験)

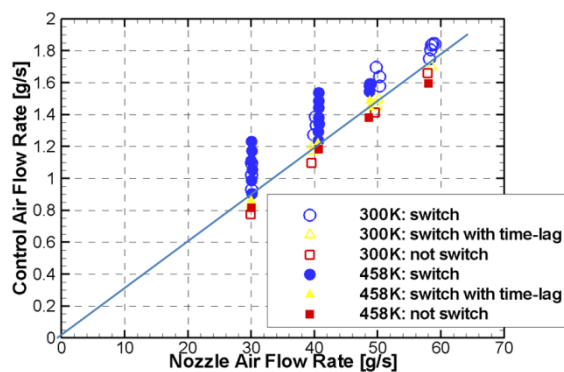


Fig.6-8 : 空気流の切り替えに必要な制御流量

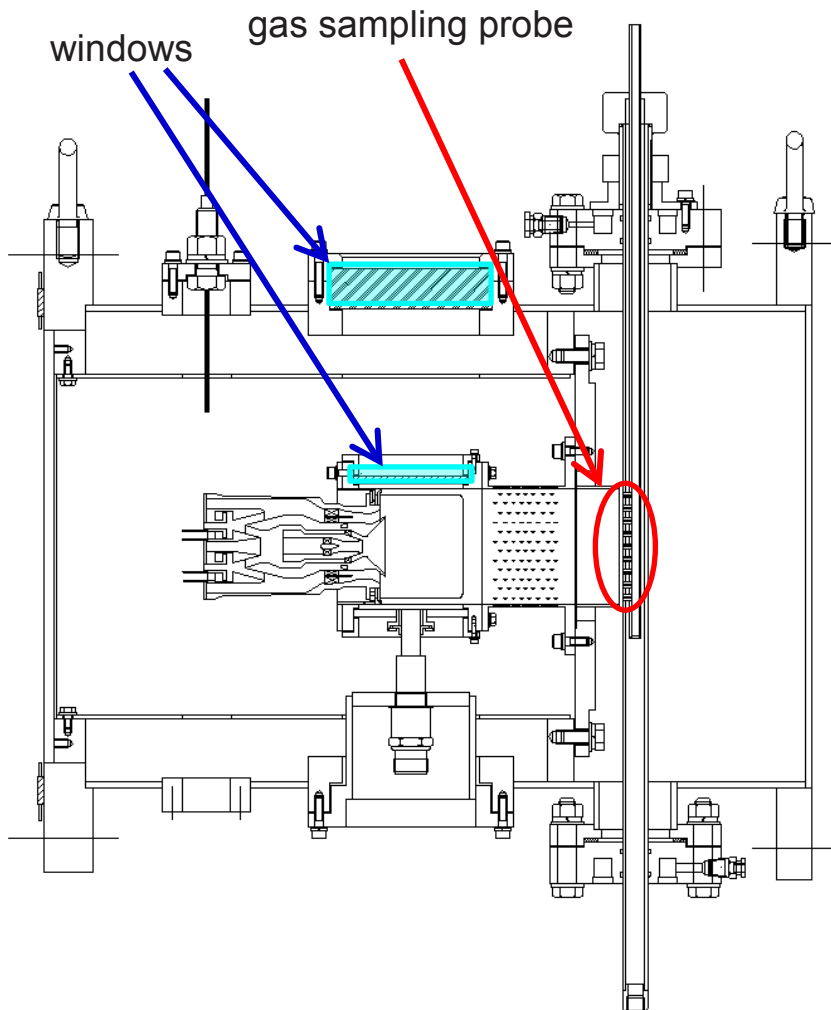


Fig.6-9 : 1MPa 燃焼試験リグ

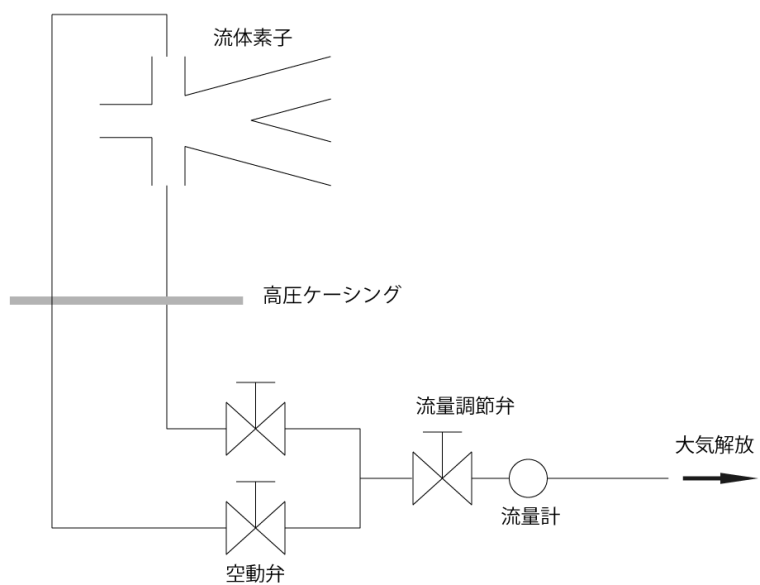


Fig.6-10 : 制御流系統図 (高圧試験)

ルブコントロールズ PAXVR-101UUG-015-X1) とオリフィス式の流量計 (ROSEMOUNT 3095MFCPS020N065R31CA1CBQC1Q4M5) を通過したのち、大気中に放出される。

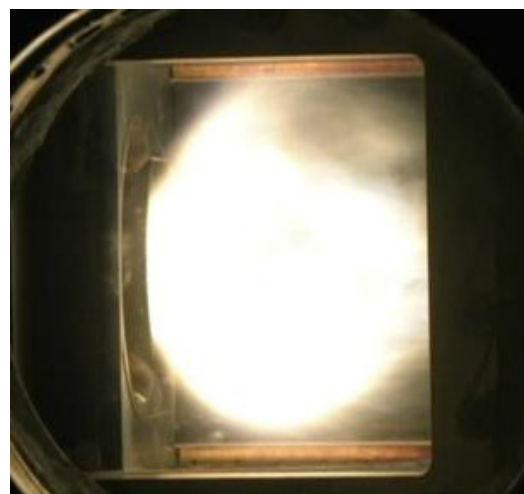
#### 6.4. 試験結果 (高圧燃焼試験)

燃焼試験の際に撮影した火炎の画像の例を図 6-11 に示す。燃焼器入口の空気温度は 690K、圧力は 800kPa である。(a)はメイン側制御流を流しているとき、(b)はパイロット側制御流を流しているときである。これらの図は空気流量 ( $W_a=530g/s$ ) およびパイロット燃料流量 ( $W_{fp}=5g/s$ )、メイン燃料流量( $W_{fm}=5g$ )は同一で、制御流を流している制御口が異なっているだけである。カメラの露出を自動にして撮影したため火炎の明るさの違いが画像からはわからないが、制御流をメイン側にしたときには輝炎の多い火炎であり、制御流をパイロット側にしたときには青炎となっており、制御流を切り替えることにより燃焼状態が変化していることがわかる。

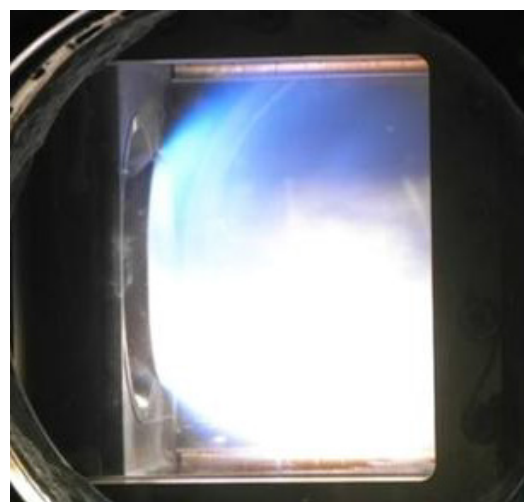
燃焼器出口で採取した燃焼排ガスをガス分析した結果の一例を図 6-12 に示す。燃焼器入口の温度と圧力は図 6-11 の場合と同じく、690K と 800kPa である。図 6-12 はパイロット燃料流量  $W_{fp}$  を 5g/s で固定し、メイン燃料流量を変化させたときの結果である。図中の青色の縦線は図 6-11 を撮影した条件である  $W_{fm}=5g/s$  を表している。この図から、どちらの制御口から制御流を抽気しても、燃焼効率はほとんど変わらないが、NOx 排出量の空燃比に対する変化の傾きが異なっていることがわかる。すなわち、制御流を切り替えることにより燃焼排ガス特性も変化している。

#### 7. 二次元模型可視化水流試験 (2)

大気圧燃焼試験に用いた流体素子制御燃料ノズルの有効開口面積は 370mm<sup>2</sup>であった。しかし、想定している推力 5 トン程度の実機で使用するためには有効開口面積を 700mm<sup>2</sup>程度 (ライナー冷



(a) 制御流：メインノズル側



(b) 制御流：パイロットノズル側

Fig.6-11：高圧燃焼試験 火炎直接写真

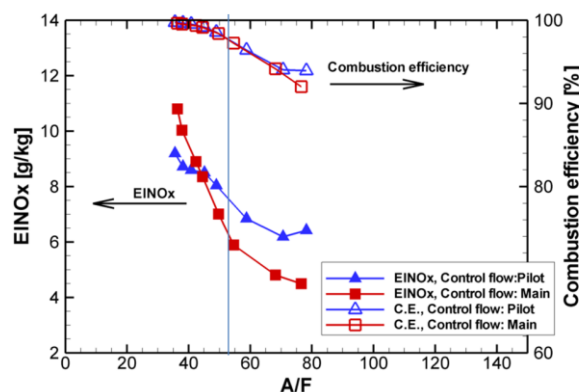


Fig.6-12：高圧試験ガス分析結果



却空気孔を含めて1000mm<sup>2</sup>)にする必要がある。そこで、流体素子の動作特性と開口面積の関係を水流試験により調べた。

この試験では、二次元模型可視化水流試験(1)と同様にアクリル製の二次元模型の内部を、屈折率整合法を用いたPIV法により計測し、流速分布を調べた。試験模型の上流と下流に設けた全圧管により圧力を計測し、流体素子での圧力降下を計測したが、全圧管から圧力変換器までの配管が適切ではなかったため、圧力を正しく計測することはできなかった。試験模型を図7-1に示す。試験に用いた流体素子模型の断面図を図7-2に示す。流体素子部分の主要な形状は変えずに、流体素子下流の流路に流路面積を狭めるための板を取り付けることにより、下流部分の圧力降下を変化させた。また、スプリッターの先端を鈍頭形状(cusp形状)についても試験を行った。流体素子の形状は図4-4(b)と相似な形状で、側壁角度 $\alpha=15$ 度、流体素子入口流路高さ $w_i=5\text{mm}$ 、オフセット $B=0\text{mm}$ 、スプリッター先端位置 $x_s=15\text{mm}(3w_i)$ である。奥行き方向の形状は同一の二次元形状をしており、奥行き方向の幅は100mmである。スプリッター先端を鈍頭形状とするときには、鋭角形状のスプリッターの先端から9.3mmの位置(先端の平坦部の幅が5mmになる位置)で切り落とした形状とした。計測を行った流路形状の組み合わせを表7-1に示す。計測を行った全形態について、PIVにより計測した流速分布、流速分布から算出した流体素子出口の流量配分を図7-3から7-13に示す。

先端形状が鋭角のスプリッターを用いて、流体素子の二つの出口の流路面積を等しく減少させたのが2D02-1(図7-3)から2D02-4(図7-6)である。出口流路幅を最大の6.6mmとしたのが2D02-1(図7-3)である。この時の出口流路の流量配分(図7-3(e))は制御流を流しているときには約110%対10%、制御流を流していないときでも約100%対0%と、その変化量は大きく、またヒステ

リシス特性を持っている。出口流路幅を5.5mmとしたのが2D02-2(図7-4)である。この時の出口流路の流量配分(図7-4(e))は制御流を流しているときには約100%対0%と2D02-1よりもやや小さいが、大きな変化量となっている。しかし、制御流を止めると、40%対60%あるいは20%対80%と両出口の流量の差は比較的小さくなっていて、ヒステリシスもほとんどなくなっている。2D02-1と比べると出口面積を17%減少させただけであるが、ヒステリシス特性は大きく変わっており、下流の出口面積に大きく影響されることが分かる。制御流を流していないとき(図7-4(b),(d))には、流体素子入口から流入した流れは、いずれの場合にも下側の出口に偏って流出している。これは、模型の微小な製作誤差により、模型の形状が完全には上下対称ではないことが原因と考えている。出口流路幅をさらに狭く4.4mmとしたのが2D02-3(図7-5)である。出口の流量配分(図7-5(e))は制御流を流した時に約20%対80%と変化量はさらに小さくなっており、また制御流を流していないときには約50%対50%とほぼ同じ量の流量が両出口から流出している。出口流路幅をさらに狭く2.2mmとしたのが2D02-4(図7-6)である。この時には、制御流を流した時でも両出口の流量配分(図7-6(e))は約40%対60%で、変化量は極めて小さくなっていて、制御流を流しているとき(図7-6(a),(c))には、流体素子入口から流入した流れは、制御流を流している方に向きを変えるが、すぐに壁面から離れて一部の流れが、制御流を流している方とは反対の出口から流出している。制御流を止めると(図7-6(b),(d))、流体素子入口から流入した流れはそのまま直進し、スプリッターにぶつかって二つに分割され、そのまま両出口から流出している。流体素子の二つの出口の流路面積を等しく減少させたとき(2D02-1から2D02-4)の流体素子下流流路面積と流量変化量の関係を図7-14に示す。すでに述べたように、流体素子下流の流路面積が減少すると流量変化量は減少する。制御流

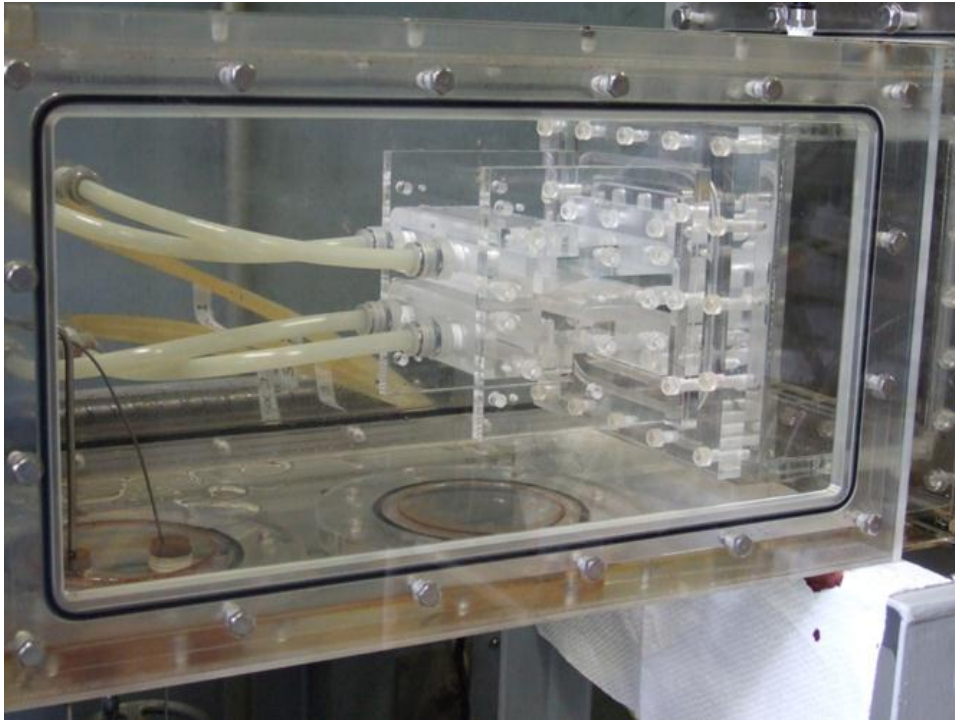


Fig.7-1 : 二次元模型可視化水流試験 (2) 試験模型

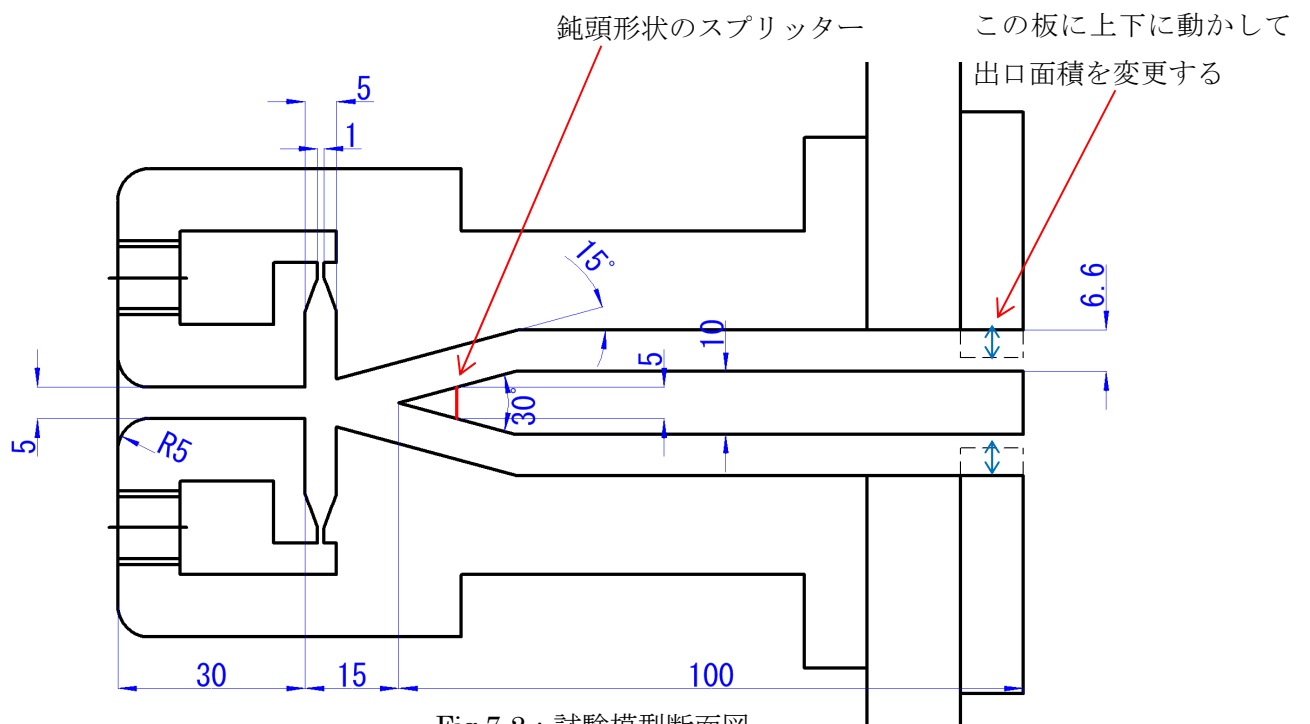


Fig.7-2 : 試験模型断面図

を止めた時の流量配分（図中の三角のプロット）が大きく2か所に離れているのは、ヒステリシス特性を持っていることを示している。

流体素子の二つの出口流路のうちの下側のみの流路面積を減少させて、出口流路面積が非対称の場合の特性を調べたのが2D02-5(図7-7)、2D02-6(図7-8)である。2D02-5(図7-7)は、上側の出口流路は6.6mmとし、下側の流路面積を5.5mmに狭めている。制御流を上側の制御口に流し、流路面積を制限していない上側の出口流路から主流を流出させる(図7-7(c))と、両出口の流量配分は約120%対20%であり、両方の出口流路の面積を制限していない場合(2D02-1)とほぼ同じである。制御流を下側の制御口に流し、流路面積を狭くした下側の出口流路から主流を流出させる(図7-7(a))と、出口流路の流量配分は約0%対100%で、両方の出口流路幅を5.5mmとしたとき(2D02-2)とほぼ同じ配分となっている。制御流を止めると、PIVの測定結果を示した主流流量80リットル分の場合には、制御流を止める前の流れ場の状態を保っており、流れ場の状態にヒステリシスがある。しかし、他の流量条件(40リットル分、120リットル分)では、制御流を止める前の流れ場の状態にかかわらず、出口流路の流量配分は約110%対10%となっており、ヒステリシスが無いことを示している。これは、主流流量によってヒステリシス特性を持ったり持たなかったりするのではなく、試験を行った模型の形状（出口面積）が、ヒステリシス特性を持つか持たないかの境界に近い形状であるため、微小な擾乱によってヒステリシス特性を示したり示さなかったりすると考えている。上側の出口流路幅を6.6mmにしたまま、下側の出口流路幅をさらに狭くし4.5mmとしたのが2D02-6(図7-8)である。この場合も出口流路幅を制限していない上側の出口流路から主流を流出させる(図7-8(c))と、出口流路の流量配分は両方の出口流路幅を制限していない場合(2D02-1)とほぼ同じ約120%対20%となっている。

また、下側の出口流路から主流を流出させると、両方の出口流路幅を4.4mmとしたとき(2D02-3)とほぼ同じ配分の約20%対80%となっている。制御流を止めると、止める前の流れ場の状態に関わらず、出口流路幅の大きな上側の出口流路から主流は流出しており、ヒステリシスは無い。流体素子の二つの出口流路のうちの下側のみの流路面積を減少させた時(2D02-1, 2D02-5, 2D02-6)の、下側の出口の流路幅と流量変化量の関係を図7-15に示す。すでに述べたように、一方の流路面積のみを制限すると、制御流を上側の制御口から流し、流路面積を制限していない上側の出口に主流が向いているときには、出口面積を全く制限していない時と同様に120%の流量が上側の出口から流出している。また、下側の制御口から制御流を流し、出口流路幅を制限した下側の出口へ主流が向いているときには、下側流路の出口面積が狭くなるにつれて上側の出口から流出する流量が増える、つまり、この場合には下側の出口から流出する流量が減少する。

スプリッターの先端を平坦な鈍頭形状とし、流体素子の二つの出口の流路面積を等しく減少させたのが2D02-7(図7-9)から2D02-9(図7-11)である。出口流路幅を6.6mmとしたのが2D02-7(図7-9)である。この時の出口流路の流量配分(図7-9(e))は、鋭角のスプリッターを用いた2D02-1(図7-3)とほぼ同じである。出口流路幅をさらに狭く4.4mmとしたのが2D02-8(図7-10)である。制御流を流した時の出口の流量配分(図7-10(e))は約20%対80%であり、鋭角のスプリッターを用いて出口流路幅を4.4mmとした2D02-3(図7-5)とほぼ同じである。しかし、制御流を流していないときには、40リットル分の場合を除いて制御流を止める前の状態を保っており、流れ場にヒステリシスがある。すなわち、鈍等のスプリッターを用いることによって、ヒステリシス特性を得やすくなっている。40リットル分の場合にヒステリシスが無いのは、2D02-5(図7-7)と同様に、主流流

量によって特性が変わるのではなく、微小な擾乱が影響を与えていると考えている。出口流路幅をさらに狭く 2.2mm としたのが 2D02-9(図 7-11)である。この時には、制御流を流した時でも両出口の流量配分(図 7-11(e))は約 40%対 60%かそれ以下で、変化量は極めて小さくなっている。鋭角のスプリッターを用いた 2D02-4(図 7-6)と同様に、制御流を流しているとき(図 7-11(a),(c))には、流体素子入口から流入した流れは、制御流を流している方に向きを変えるが、すぐに壁面から離れて一部の流れが、制御流を流している方とは反対の出口から流出している。制御流を止めると(図 7-11(b),(d))、いずれの場合にも流体素子入口から流入した流れは上側の流路に向かって流れている。これは、模型の製作誤差が原因と考えている。ただしこの場合でもスプリッターの手前で一部の流れが下側の出口に向かって流れ、両出口の流量配分はほぼ半々である。スプリッターの先端を平坦な鈍頭形状とし、流体素子の二つの出口の流路面積を等しく減少させたとき(2D02-7 から 2D02-9)の、流路出口面積と流量変動量の関係を図 7-16 に示す。すでに述べたとおり、スプリッター先端が鋭角の場合(図 7-14)には、出口幅を 5.5mm としたときにはすでにヒステリシス特性が無くなっているが、スプリッター先端を鈍頭形状にすると出口流路幅が 4.4mm の場合でもヒステリシス特性を示しており、流体素子下流の流路面積が減少(圧力損失が増加)しても、ヒステリシス特性を得やすくなることがわかる。

スプリッターの先端を平坦な鈍頭形状とし、流体素子の二つの出口流路のうちの下側のみの流路面積を減少させて、出口流路面積が非対称の場合の特性を調べたのが 2D02-10(図 7-12)、2D02-11(図 7-13)である。下側の出口流路幅を 4.4mm とした時のそれぞれの出口流路の流量配分(図 7-12(e))を、鋭角のスプリッターを用いた時(図 7-8(e))と比較すると、上側および下側の制御口から制御流を流している時の流量配分はほぼ同じ

である。また、上側の制御口から制御流を流した後には制御流を止めた時の流量配分もほぼ同じである。鋭角のスプリッターを用いた場合にはヒステリシス特性は無く、制御流を止めると同じ状態に遷移するのに対して、鈍頭のスプリッターを用いた場合には、いくつかの主流流量の場合にヒステリシス特性を示しており、下側の制御口から制御流を流した後に制御流を止めても、流れの状態を保ち主流は下側の出口に向かって流れている(図 7-12(b))。下側の流路幅をさらに狭くして 2.2mm としたのが 2D02-11(図 7-13)である。この場合には、流れ場にヒステリシスは無く、制御流を止めると同じ状態(図 7-13(b),(d))に遷移する。下側の制御口から制御流を流している時(図 7-13(a))の出口流路の流量配分(図 7-13(e))は 40%対 60%あるいは 60%対 40%程度で、両方の出口流路幅を 2.2mm にした時の流量配分(図 7-11(e))と近い値になっている。上側の制御口から制御流を流している時(図 7-13(c))の出口流路の流量配分は約 120%対 20%程度あり、両出口の流量の差は非常に大きい。この流量配分は両方の出口流路幅を 6.6mm とした時(図 7-9(e))とほぼ同じである。スプリッターの先端を平坦な鈍頭形状とし、流体素子の二つの出口流路のうちの下側のみの流路面積を減少させた場合(2D02-7, 2D02-10, 2D02-11)の、流路出口面積と流量変動量の関係を図 7-17 に示す。上側の制御口から制御流を流し、面積を制限していない出口に主流を向けた場合の両出口の流量配分は、両方の出口とも面積を制限していない場合の流量配分とほぼ同じである。また、下側の制御口から制御流を流し、面積を制限した出口に主流を向けた時の出口流路の流量配分は、両方の出口流路幅を同じ幅に制限した場合(図 7-16)とほぼ同じである。また、鋭角のスプリッターを用いた場合(図 7-15)と比較すると、片方の流路幅を 4.4mm とした場合に、鋭角のスプリッターを用いた場合にはヒステリシス特性が無くなっているのに対して、鈍頭のスプリッターではヒステリ

シス特性があり、出口流路幅を等しく制限した場合と同様に、鈍頭のスプリッターを用いることでヒステリシス特性を得やすくなることが分かる。

以上より、三次元模型可視化水流試験（1）（第5章）の結果と同様に、流量配分の変化量を大きくするためには、流体素子下流の有効開口面積を大きくすればよいことがわかる。逆に、流体素子下流の有効開口面積に対して、流体素子部分の有効開口面積を小さくする、すなわち流体素子部の流路面積を小さくして、内部の流速を上げることによって流量配分の変化が大きくなると考えら

れる。先に行った燃焼試験（第6章）に用いた燃料ノズルは、従来から用いている燃料ノズルの上流に流体素子を取り付けたため、十分な流量配分変化量とするために、流体素子部を小さくする必要があり、全体として圧力損失が大きく（有効開口面積が小さく）なってしまった。十分な流量配分変化量を保ったまま、有効開口面積を大きくし、圧力損失を小さくするためには、流体素子部の流路面積を大きくするとともに、その下流の燃料ノズル部の有効開口面積も大きくする必要がある。

Table7-1：二次元流体素子可視化模型（2）供試体形態

Model No.	出口流路幅 (mm)		スプリッター先端形状
	上	下	
2D02-01 (Fig.7-3)	6.6	6.6	Sharp
2D02-02 (Fig.7-4)	5.5	5.5	Sharp
2D02-03 (Fig.7-5)	4.4	4.4	Sharp
2D02-04 (Fig.7-6)	2.2	2.2	Sharp
2D02-05 (Fig.7-7)	6.6	5.5	Sharp
2D02-06 (Fig.7-8)	6.6	4.5	Sharp
2D02-07 (Fig.7-9)	6.6	6.6	Flat
2D02-08 (Fig.7-10)	4.4	4.4	Flat
2D02-09 (Fig.7-11)	2.2	2.2	Flat
2D02-10 (Fig.7-12)	6.6	4.4	Flat
2D02-11 (Fig.7-13)	6.6	2.2	Flat

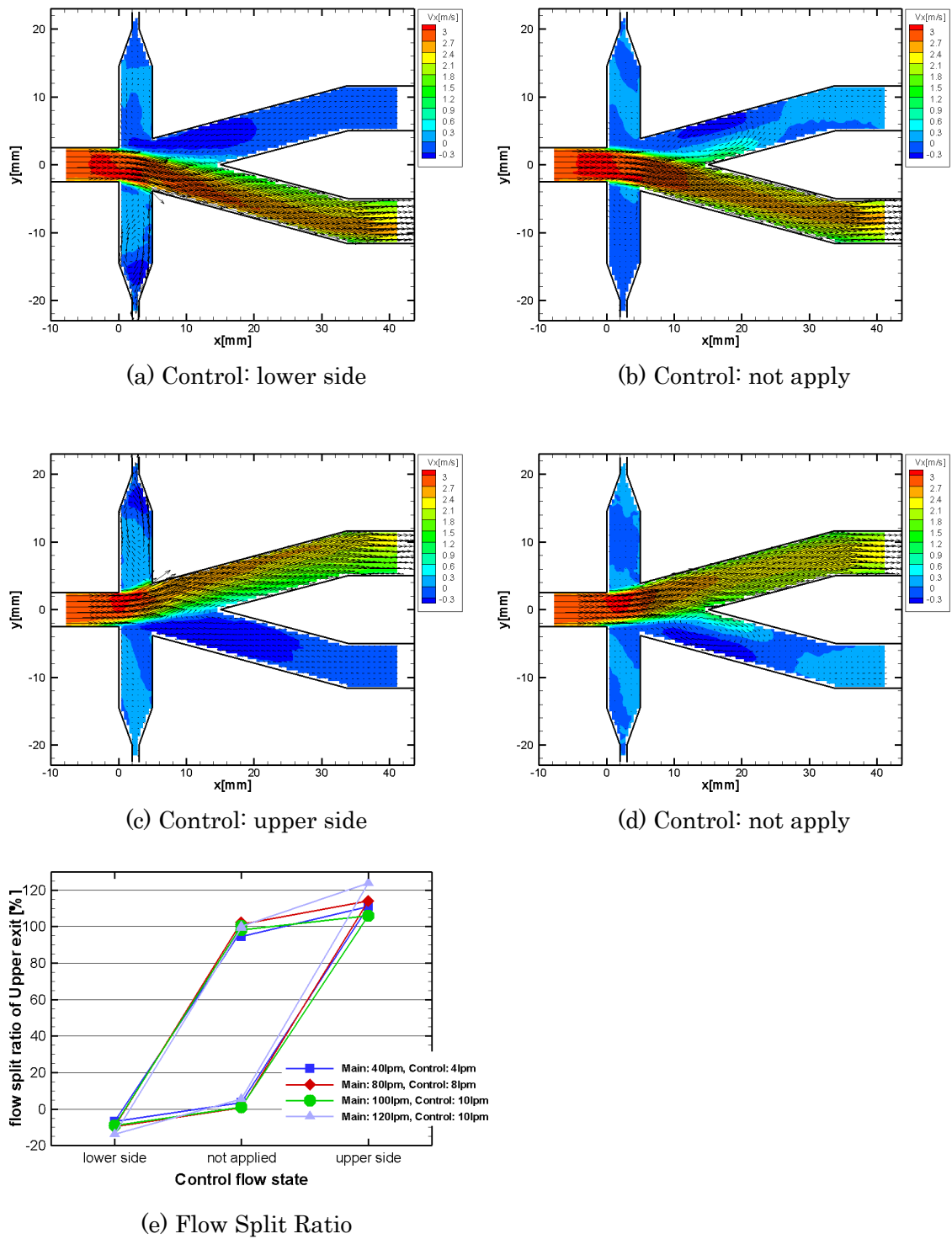
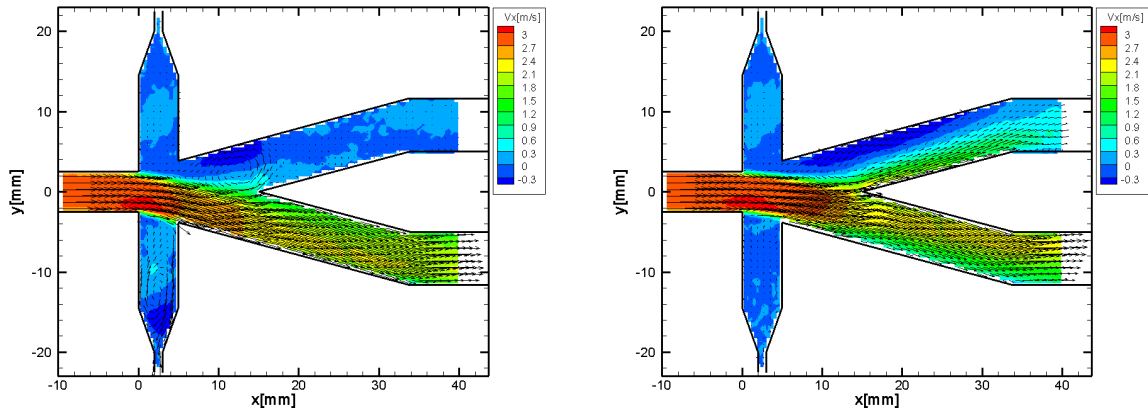


Fig.7-3 : 平均流速分布と流量配分(Model 2D02-01)

Exit path height (upper): 6.6mm, (lower):6.6mm, Splitter edge: sharp

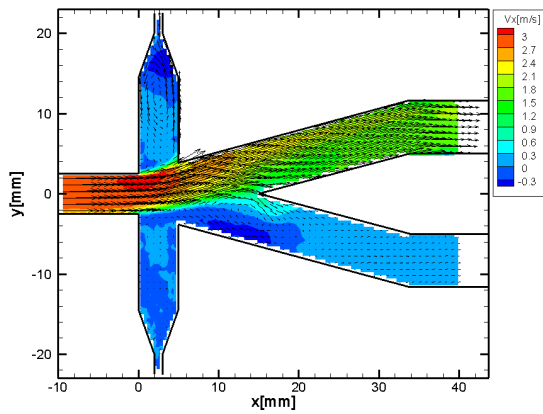
Main flow rate (a)-(d): 80liter/min.

Control flow rate (a), (c): 8liter/min.

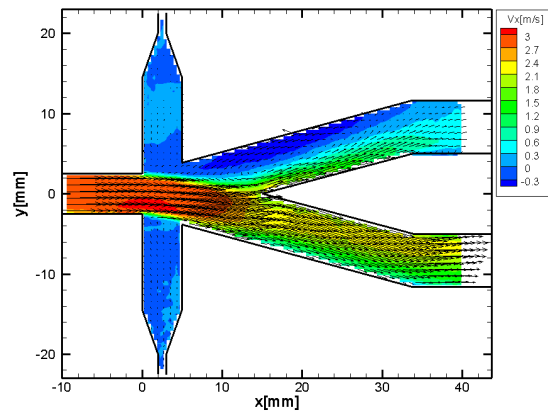


(a) Control: lower side

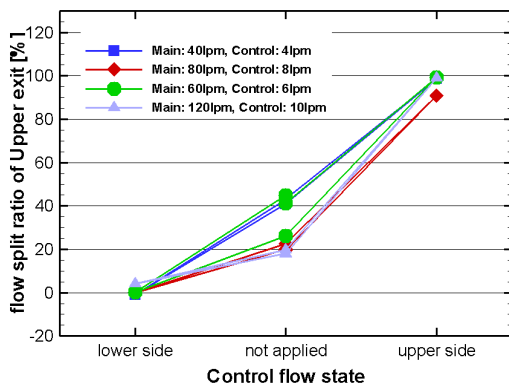
(b) Control: not apply



(c) Control: upper side



(d) Control: not apply



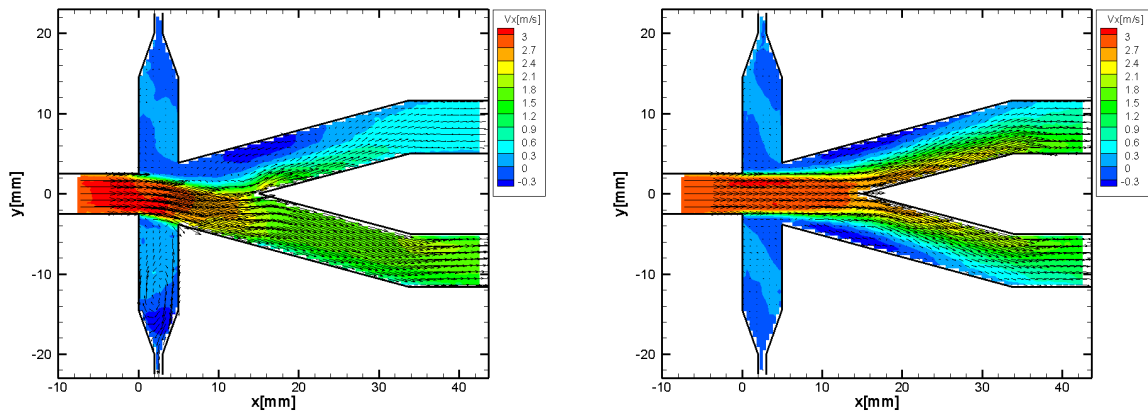
(e) Flow Split Ratio

Fig.7-4 : 平均流速分布と流量配分(Model 2D02-02)

Exit path height (upper): 5.5mm, (lower):5.5mm, Splitter edge: sharp

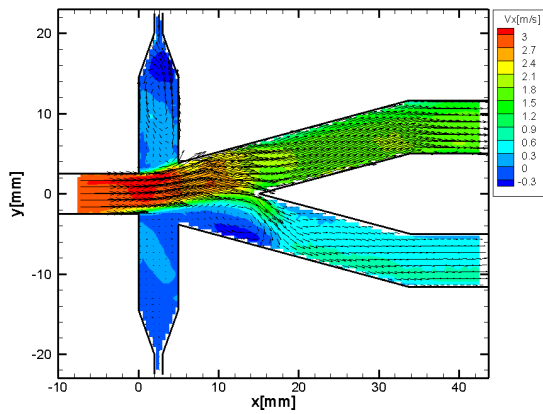
Main flow rate (a)-(d): 80liter/min.

Control flow rate (a), (c): 8liter/min.

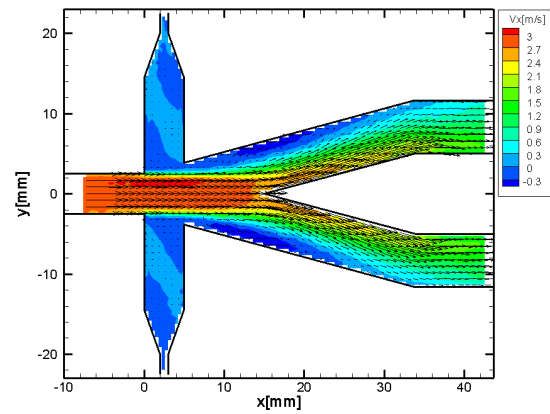


(a) Control: lower side

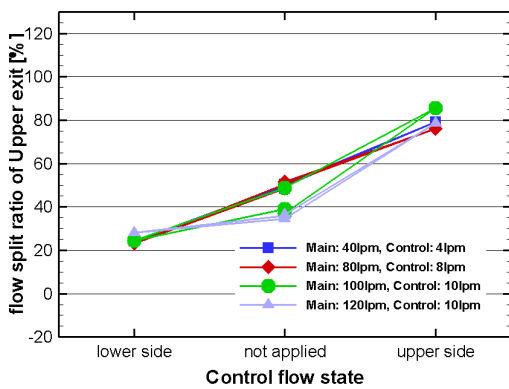
(b) Control: not apply



(c) Control: upper side



(d) Control: not apply



(e) Flow Split Ratio

Fig.7-5 : 平均流速分布と流量配分(Model 2D02-03)

Exit path height (upper): 4.4mm, (lower):4.4mm, Splitter edge: sharp

Main flow rate (a)-(d): 80liter/min.

Control flow rate (a), (c): 8liter/min.



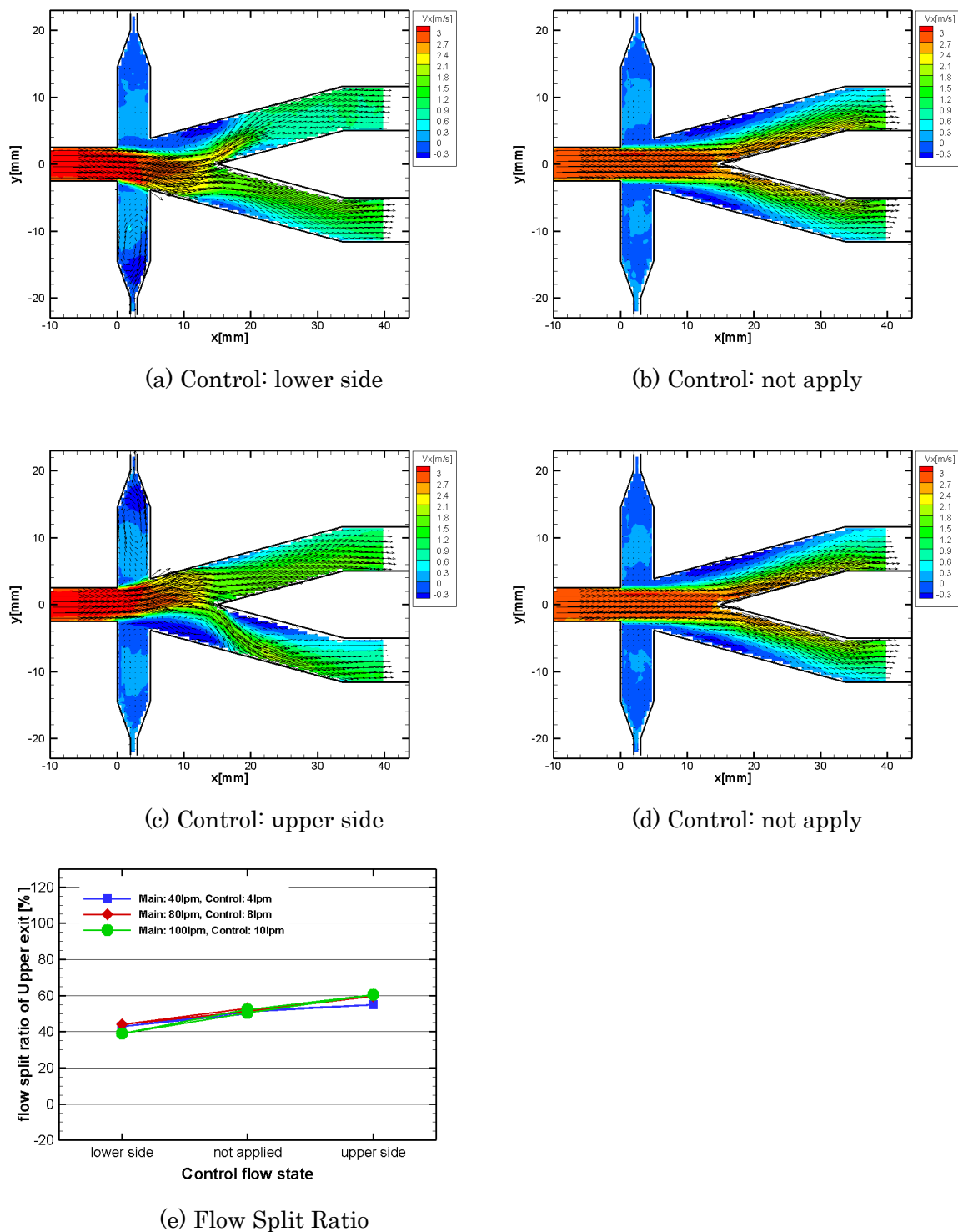
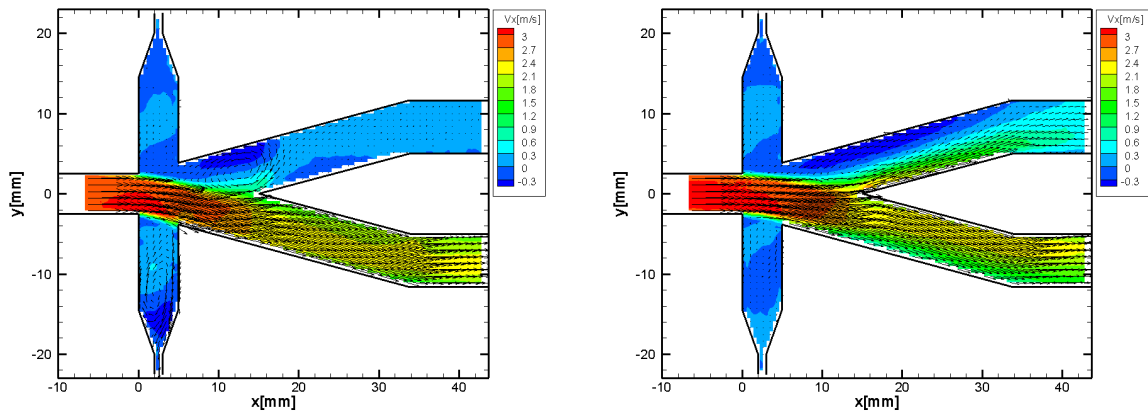


Fig.7-6 : 平均流速分布と流量配分(Model 2D02-04)

Exit path height (upper): 2.2mm, (lower):2.2mm, Splitter edge: sharp

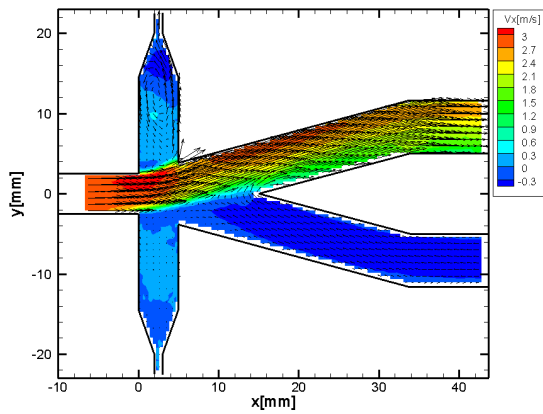
Main flow rate (a)-(d): 80liter/min.

Control flow rate (a), (c): 8liter/min.

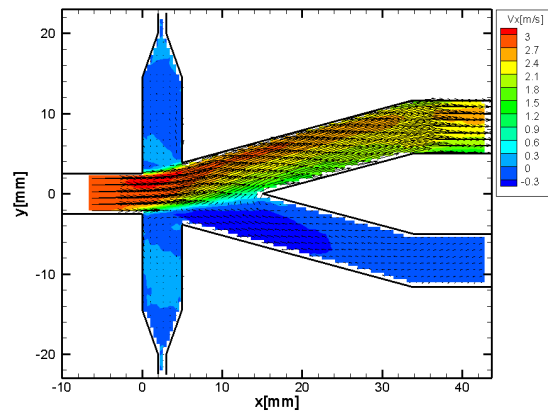


(a) Control: lower side

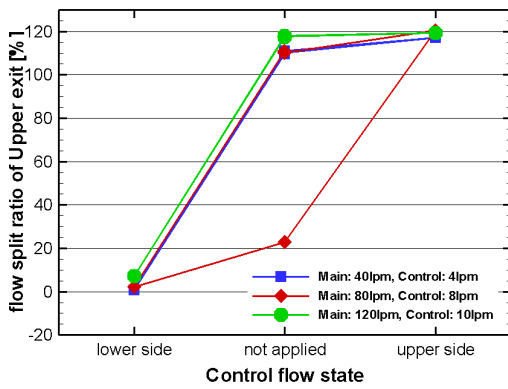
(b) Control: not apply



(c) Control: upper side



(d) Control: not apply



(e) Flow Split Ratio

Fig.7-7 : 平均流速分布と流量配分(Model 2D02-05)

Exit path height (upper): 6.6mm, (lower):5.5mm, Splitter edge: sharp

Main flow rate (a)-(d): 80liter/min.

Control flow rate (a), (c): 8liter/min.

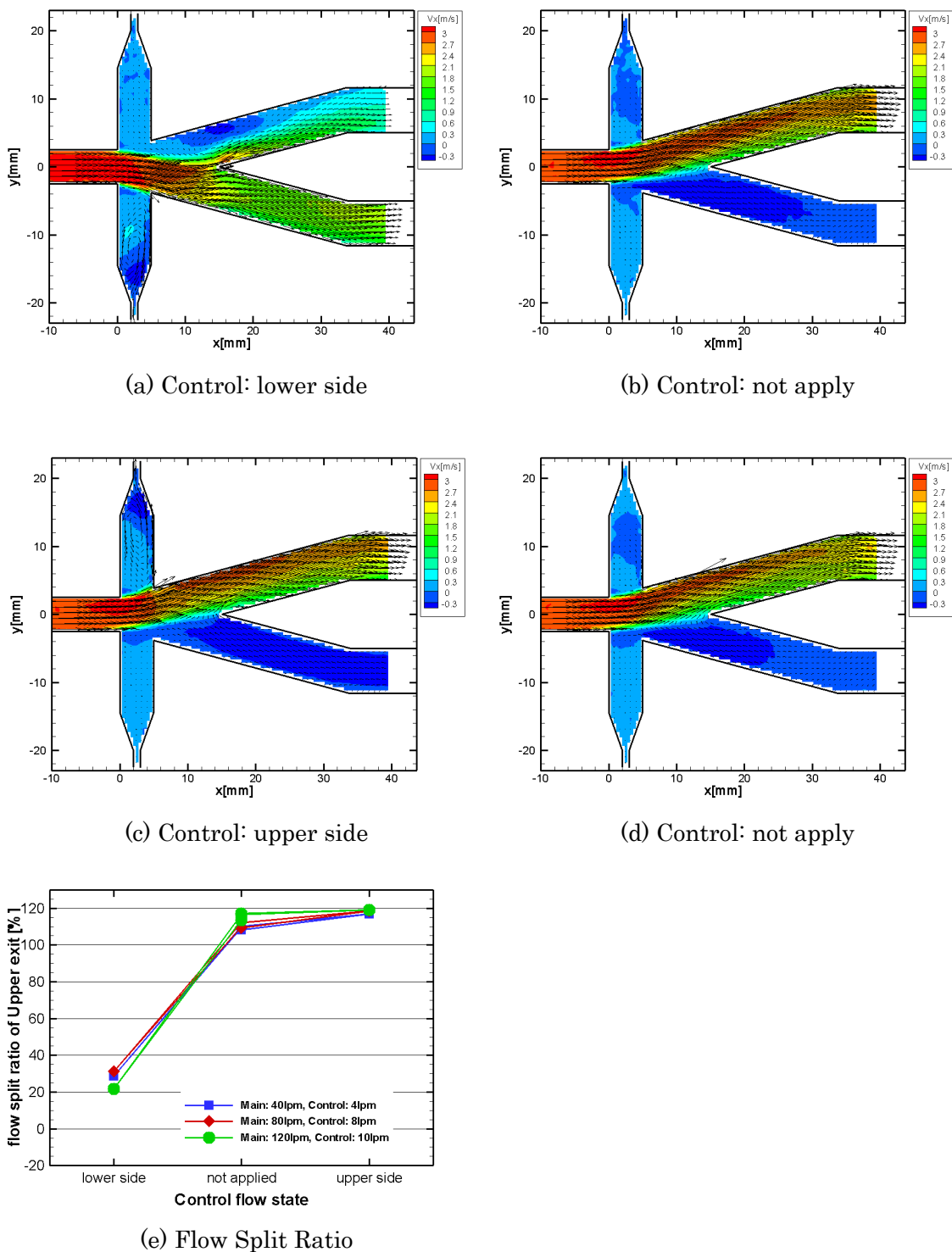


Fig.7-8 : 平均流速分布と流量配分(Model 2D02-06)

Exit path height (upper): 6.6mm, (lower):4.5mm, Splitter edge: sharp

Main flow rate (a)-(d): 80liter/min.

Control flow rate (a), (c): 8liter/min.

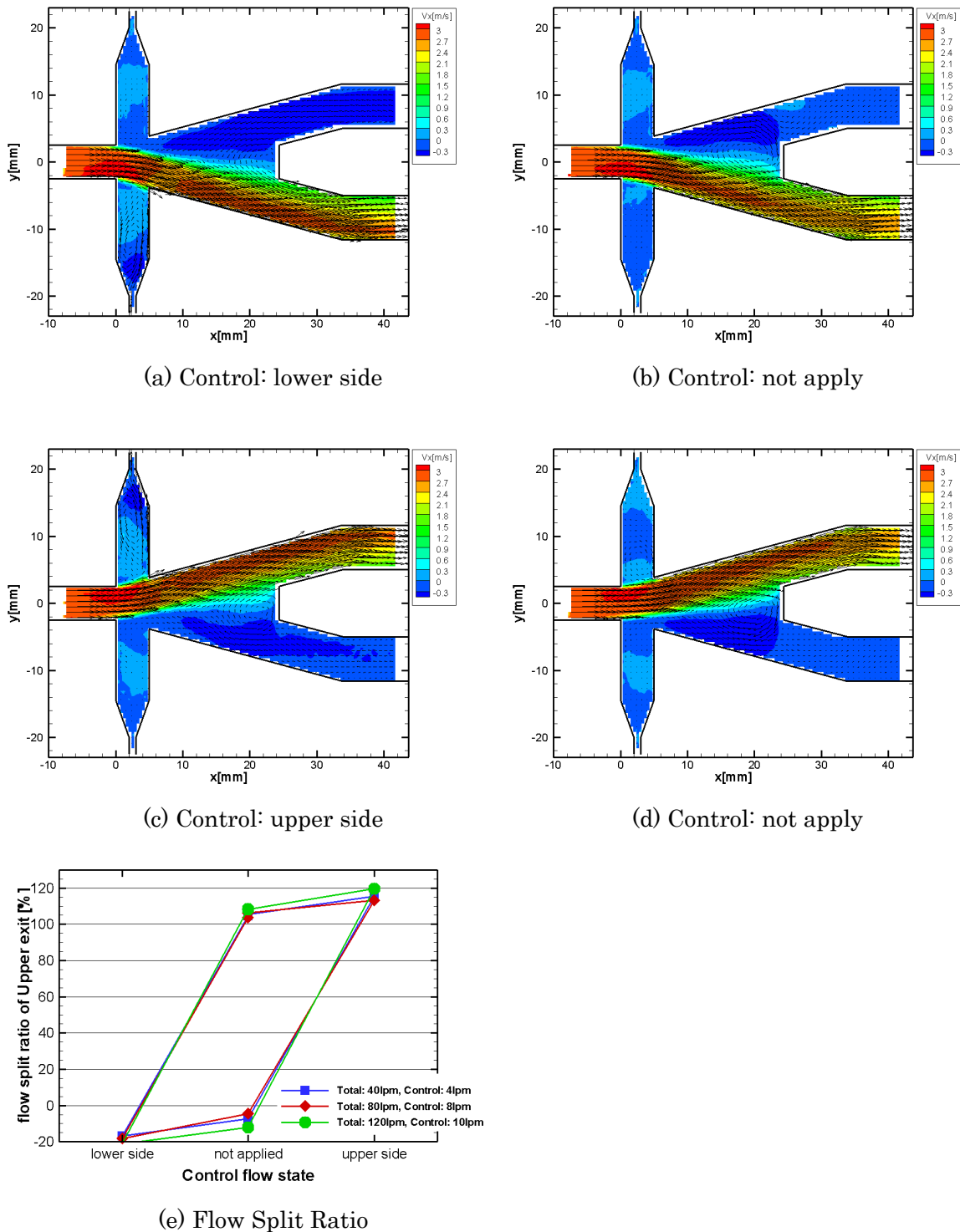
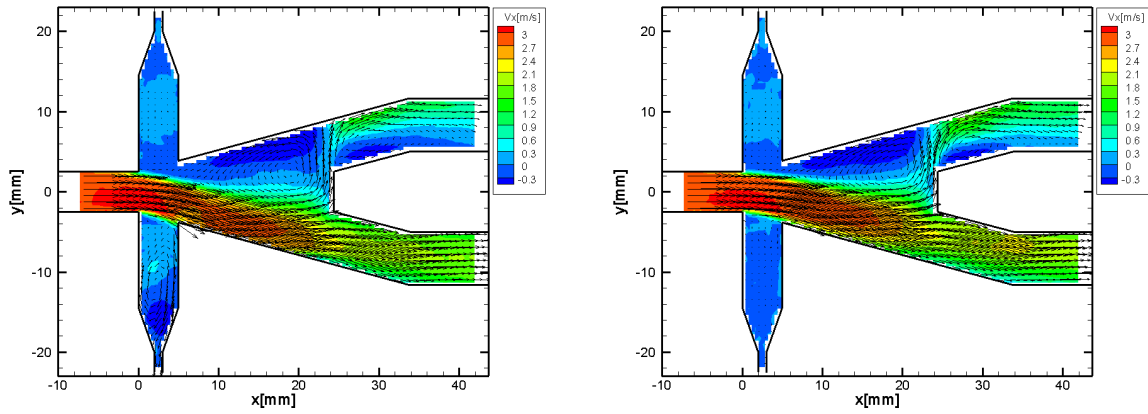


Fig.7-9 : 平均流速分布と流量配分(Model 2D02-07)

Exit path height (upper): 6.6mm, (lower):6.6mm, Splitter edge: flat

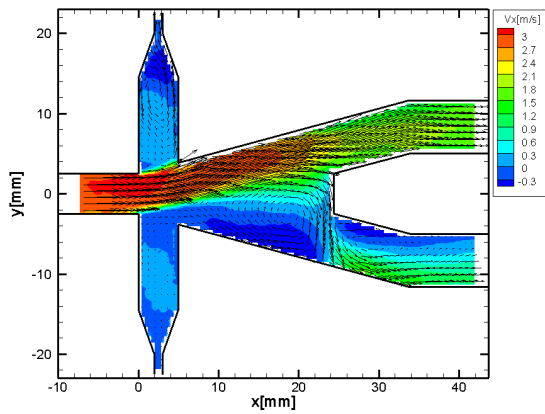
Main flow rate (a)-(d): 80liter/min.

Control flow rate (a), (c): 8liter/min.

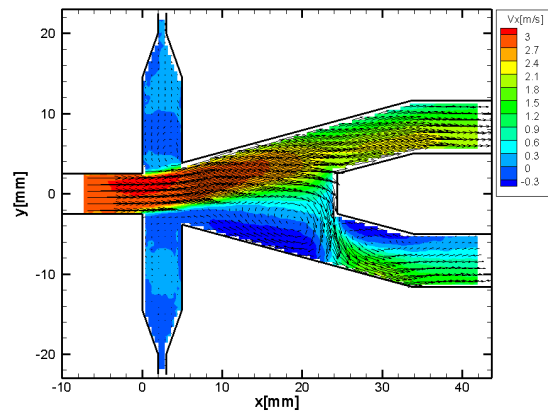


(a) Control: lower side

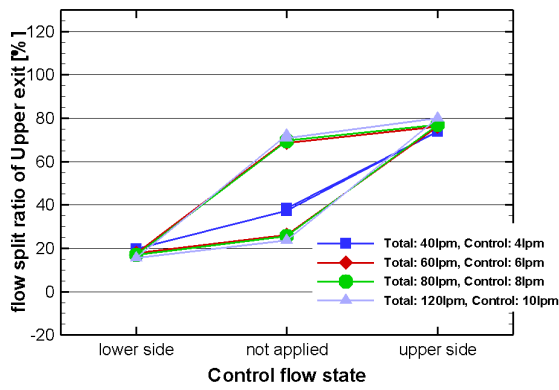
(b) Control: not apply



(c) Control: upper side



(d) Control: not apply



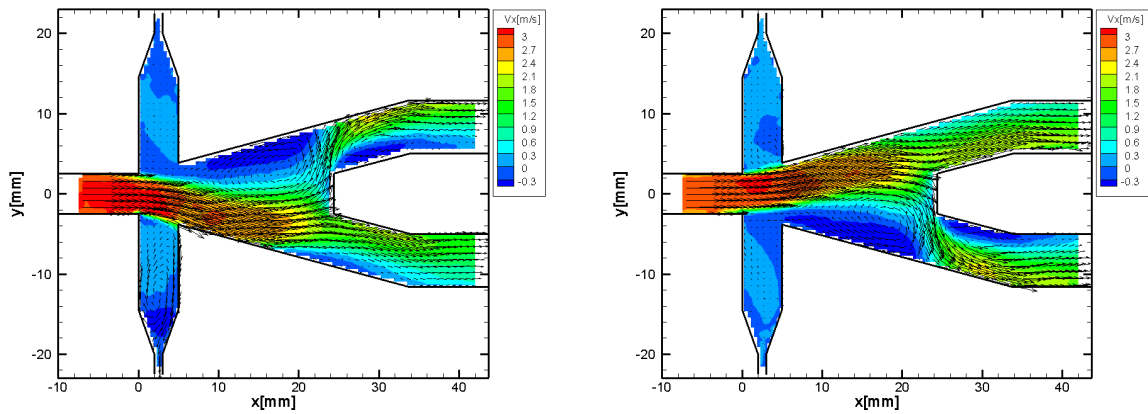
(e) Flow Split Ratio

Fig.7-10 : 平均流速分布と流量配分(Model 2D02-08)

Exit path height (upper): 4.4mm, (lower):4.4mm, Splitter edge: flat

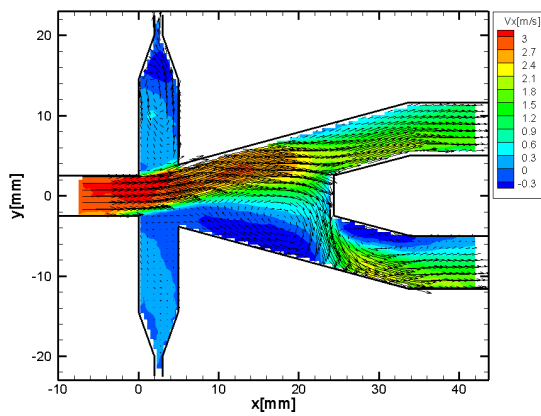
Main flow rate (a)-(d): 80liter/min.

Control flow rate (a), (c): 8liter/min.

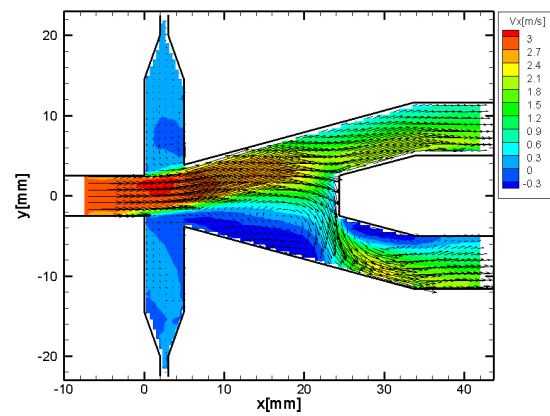


(a) Control: lower side

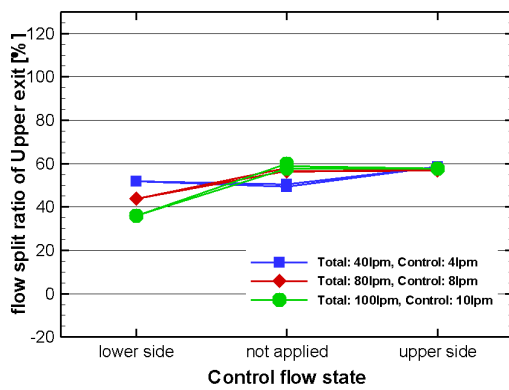
(b) Control: not apply



(c) Control: upper side



(d) Control: not apply



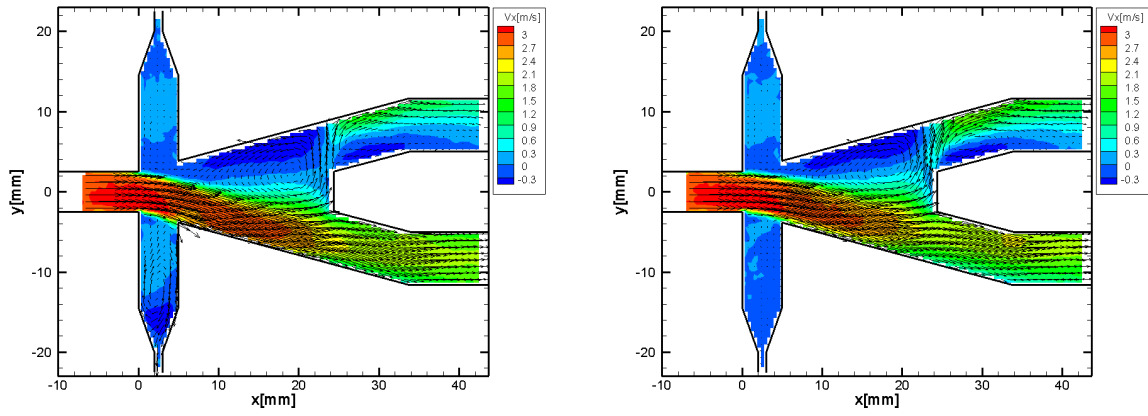
(e) Flow Split Ratio

Fig.7-11 : 平均流速分布と流量配分(Model 2D02-09)

Exit path height (upper): 2.2mm, (lower):2.2mm, Splitter edge: flat

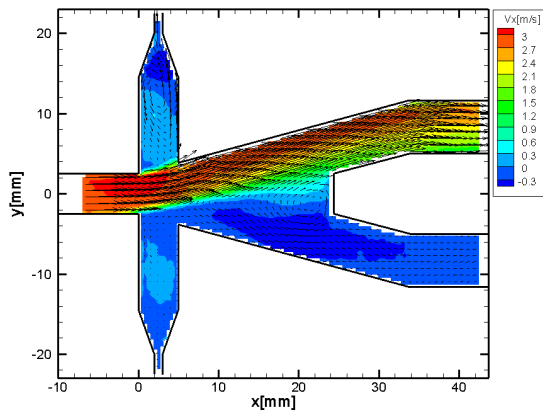
Main flow rate (a)-(d): 80liter/min.

Control flow rate (a), (c): 8liter/min.

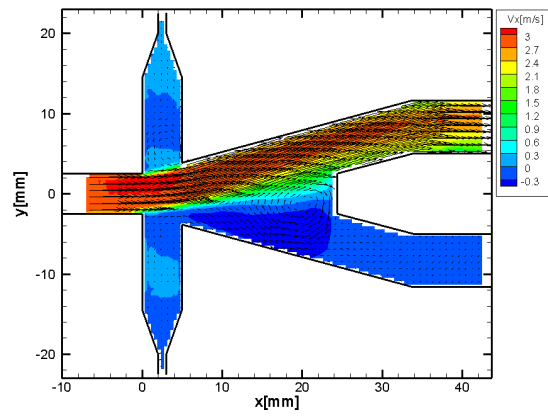


(a) Control: lower side

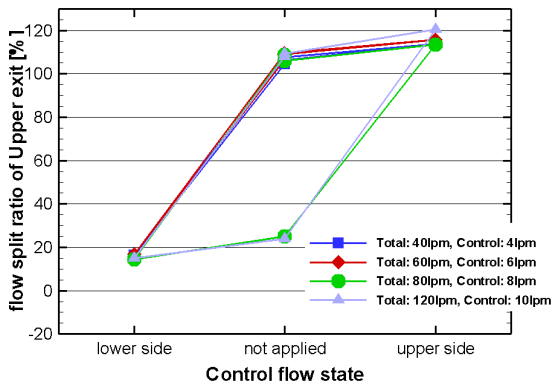
(b) Control: not apply



(c) Control: upper side



(d) Control: not apply



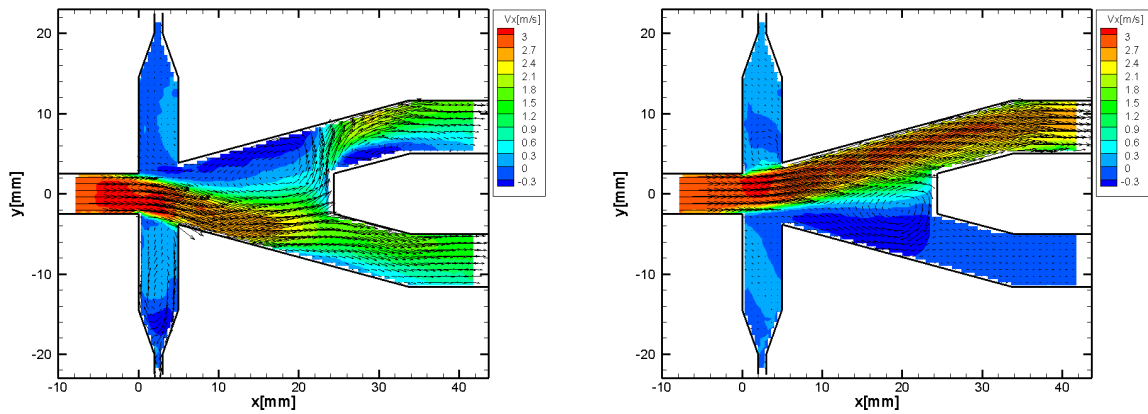
(e) Flow Split Ratio

Fig.7-12 : 平均流速分布と流量配分(Model 2D02-10)

Exit path height (upper): 6.6mm, (lower):4.4mm, Splitter edge: flat

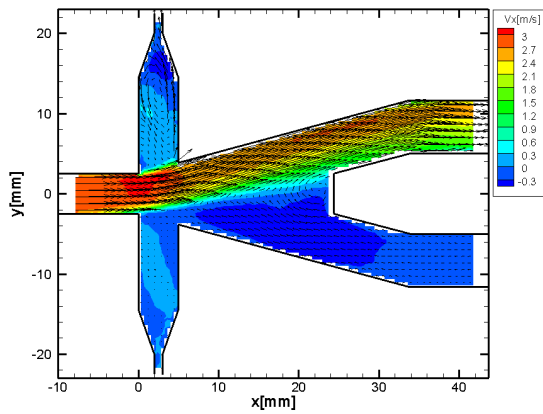
Main flow rate (a)-(d): 80liter/min.

Control flow rate (a), (c): 8liter/min.

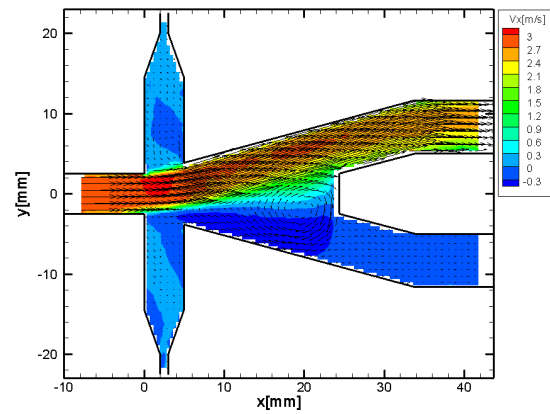


(a) Control: lower side

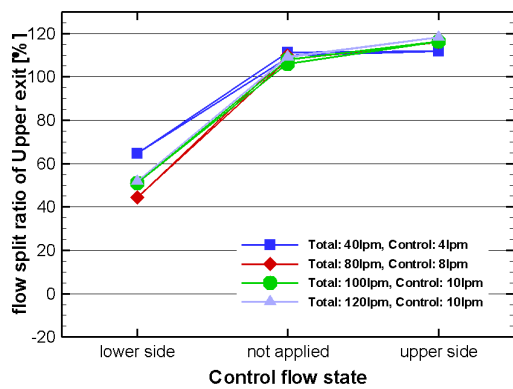
(b) Control: not apply



(c) Control: upper side



(d) Control: not apply



(e) Flow Split Ratio

Fig.7-13 : 平均流速分布と流量配分(Model 2D02-11)

Exit path height (upper): 6.6mm, (lower):2.2mm, Splitter edge: flat

Main flow rate (a)-(d): 80liter/min.

Control flow rate (a), (c): 8liter/min.



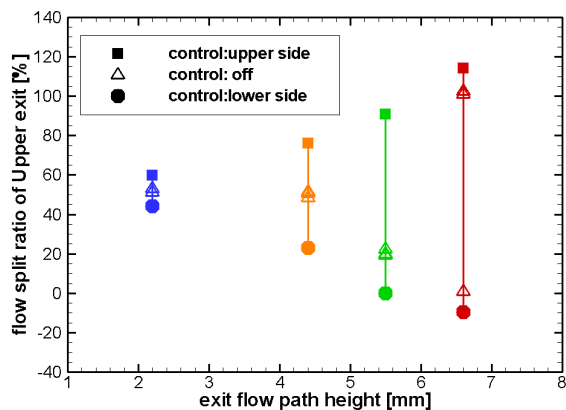


Fig.7-14 : 流体素子下流の出口流路幅と  
出口流路の流量配分  
Main flow rate: 80liter/min.  
Control flow rate: 8liter/min.

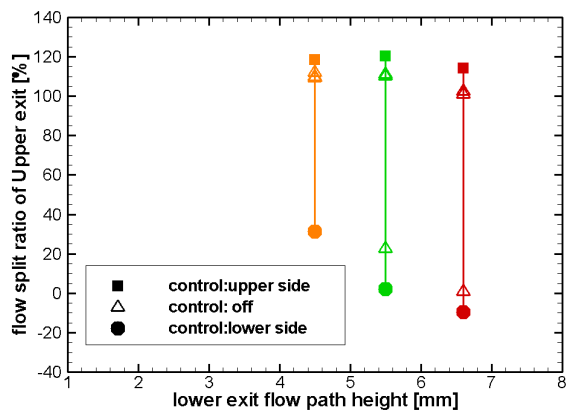


Fig.7-15 : 一方の出口流路面積を制限した  
時の出口流路幅と出口流路の流量配分  
Main flow rate: 80liter/min.  
Control flow rate: 8liter/min.

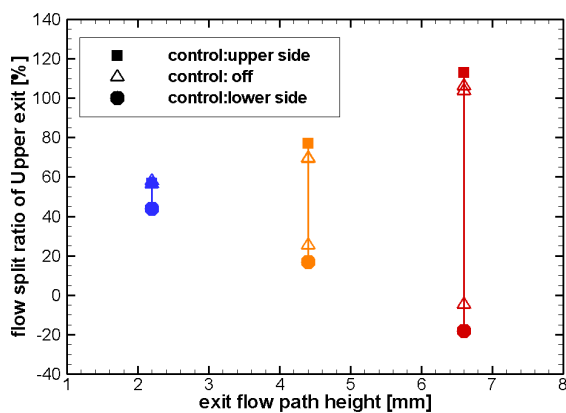


Fig.7-16 : 鈍頭スプリッターを用いた時の出  
口流路幅と出口流路の流量配分  
Main flow rate: 80liter/min.  
Control flow rate: 8liter/min.

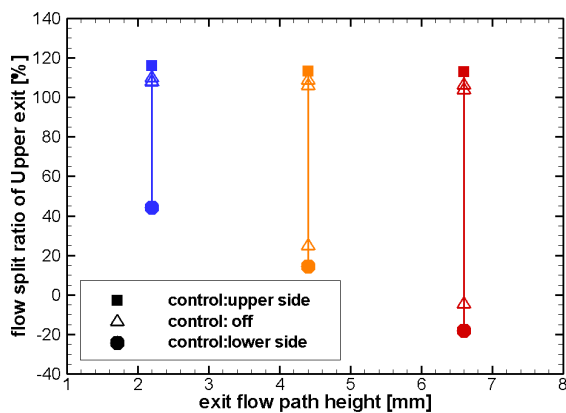


Fig.7-17 : 鈍頭スプリッターを用い一方の出  
口流路面積を制限した時の出口流路幅と出  
口流路の流量配分  
Main flow rate: 80liter/min.  
Control flow rate: 8liter/min.

## 8. 三次元模型可視化水流試験（2）

円環型の流体素子模型について、流体素子下流の有効開口面積（圧力損失）と流量配分変化量の関係を調べるために、アクリル製の流体素子模型を製作し、屈折率整合法を用いたPIV法により流体素子内部の流速分布を計測した<sup>14)</sup>。

二次元模型可視化水流試験（2）（第7章）において、流体素子模型の上流と下流での全圧計測を行うことができなかったのは、全圧管から圧力変換器までの間の配管に気泡が混入したためであり、本試験においては気泡が混入しないように注意するとともに、配管の終端付近を水平に設置し、また気泡が混入した場合でもこの水平部分に気泡が集まるよう配管を設置して、気泡の影響が小さくなるようにした。また、本試験の前に可視化回流水槽の改修を行い、流量計を電磁流量計に交換した。流体素子模型の上流と下流で計測した全圧と流体素子模型を通過する流体の流量から有効開口面積を計算した。また、PIVにより200回計測した流速分布から時間平均流速分布をもとめ、その流速分布から流体素子の二つの出口流路を通過する流量の配分を求めた。図8-1から図8-3に試験に用いた模型の写真、概略図、流体素子部の概略寸法を示す。流体素子部の形状は二次元可視化試験に用いたのと相似な側壁角度 $\alpha=15$ 度、流体素子入口流路高さ $w_i=4.6\text{mm}$ 、オフセット $B=0\text{mm}$ 、スプリッター先端位置 $x_s=13.8\text{mm}(3w_i)$ を基本の形状としている。流体素子入口流路の外径および内径は、 $35.4\text{mm}$ および $26.2\text{mm}$ である。流体素子の下流の出口流路には、流路面積を制限するための板および実際の燃料ノズルと同様に流れに旋回を与えるためのスワールベーンを取り付けることができる。流路面積を制限していないときの出口流路の外径および内径は、外側出口流路が $43\text{mm}$ および $35.8\text{mm}$ 、内側出口流路が $24.6\text{mm}$ および $6.2\text{mm}$ である。従って、入口流路の流路面積は $445\text{mm}^2$ 、外側出口流路の流路面積は $446\text{mm}^2$ 、内側出口流路の流路面積は

$445\text{mm}^2$ である。実際の燃料ノズルにおいて、流体素子下流の圧力損失の多くはスワールベーンによって生じている。そのため、流体素子下流の圧力損失を小さくするために、下流に取り付けてあったスワールベーンを流体素子上流に取り付けることを考えた。こうすることにより、流れに旋回を与えつつ、流体素子下流の圧力損失を下げることができる。しかし、流体素子上流で旋回を与えることにより、流体素子部での流れが外側に偏ることが予想されたため、流体素子出口流路を基本形状から外側に傾けた形状（図8-3(b))の模型も制作し、試験を行った。試験を行った模型の形状を表8-1に示す。表中のSwirlerの欄で、strutと記載しているのはスワラの代わりに $0.8\text{mm}$ 角の四角柱の棒（支柱）を用いていることを表しており、 $0\text{deg.}$ は中心軸と平行にスワラと同じ長さの平板が取り付けられていることを表している。流体素子角度をストレートとし、スプリッター先端形状を鋭角、入口スワラ角度 $0$ 度、出口流路はスワラではなく支柱により支持し、出口流路面積を制限していない形態（3D02-01）を基本の形態とし、各部の形状を変えて試験を行った。計測を行った全形態について、PIVにより計測した流速分布、流速分布から算出した流体素子出口の流量配分、流量と圧力損失の関係を図8-4から8-21に示す。

流体素子下流での圧力損失を以下のように求



Fig.8-1 : 三次元流体素子可視化模型（2）

めた。流体素子下流の流路の面積を制限していない時の有効開口面積，差圧，流量の関係は次式であらわされる。

$$Q = A_{eff} \sqrt{2 \frac{\Delta P}{\rho}} \quad (8-1)$$

流体素子下流の面積を制限することにより，同じ流量  $Q$  を流した時の差圧が  $\Delta P + \Delta P_2$  に増加し，有効開口面積が  $A_{eff,2}$  になったとすると，差圧と流量の関係は

$$Q = A_{eff,2} \sqrt{2 \frac{\Delta P + \Delta P_2}{\rho}} \quad (8-2)$$

となる。これに式(8-1)を代入すると，流体素子下流における圧力損失の増加分  $\Delta P_2$  と有効開口面積の関係は次式となる。

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P} = \frac{A_{eff}^2}{A_{eff,2}^2} - 1 \quad (8-3)$$

基本形態 (3D02-01) で制御流を流していない時の有効開口面積を基本の開口面積として，この状態からの圧力損失の増加分を，式(8-3)を用いて計算した。基本形態から出口流路面積を50%(3D02-02)および25%(3D02-03)に制限し圧力損失の増加分と流量配分の関係を示したのが，図8-22である。この図から，流体素子下流での圧力損失が増加するにつれて，流量配分変化が小さくなることがわかる。また，制御流を吸い出すと流体素子下流の流路に流れる流量が減少するため，制御流を吸い出していない時と比べて圧力損失が減少している。

流量配分の変化量，すなわち制御流を内側の制御口から吸い出した時の流量配分と制御流を外側の制御口から吸い出した時の流量配分の差と，圧力損失の増加割合の関係を図8-23に示す。圧力損失の増加割合は，制御流を上側の制御口から吸い出した時の値を用いている。この図には，基本形態から出口流路面積を50%(3D02-02)および

25%(3D02-03)に制限した物，流路面積を制限する代わりに0度のストラット(3D02-04)および45度のスワラ(3D02-05)を取り付けることで出口流路の有効開口面積を制限した物，および，スプリッター先端形状の影響を調べるために，基本形態からスプリッターの先端形状を鈍頭型に変えたもの(3D02-06)，さらに出口流路に45度のスワラを取り付けた形態(3D02-07)について，流量配分の変化が示されている。これらの形態に共通しているのは，流体素子上流のスワラ角度が0度で，流体素子角度がストレートとなっていることである。スプリッターの先端を鋭角とした場合(図の塗りつぶしのプロット)について見ると，流体素子下流流路での圧力損失の増加が流路面積を制限したことによって生じていても，流路にスワラを取り付けることによって生じていても，圧力損失の増加割合と流量配分の変化の関係はほぼ同じ曲線上に乗ることがわかる。スプリッターの先端を平坦にすると(図中の中抜きのプロット)，圧力損失が若干増加し，流量配分の変化がわずかに増加する。

次に，流体素子下流での圧力損失を小さくするために，スワールベーンを流体素子の上流に設けた形態について試験を行った。流体素子入口に30度のスワールベーンを取り付けたのが3D02-8(図8-11)，45度のスワールベーンを取り付けたのが3D02-10(図8-13)である。流体素子入口に30度のスワールベーンを取り付け，さらに出口流路面積を50%に制限したのが3D02-9(図8-12)である。これらの図も見てわかるとおり，流体素子上流で旋回を与えられた流れは，流体素子の外側の出口に偏って流れており，流量配分の変化は極めて小さい。流体素子上流のスワラ角度を0度としたときの基本形態からの圧力損失の増加割合と流量配分変化の関係を，流体素子上流にスワールベーンを設けた場合について示したのが図8-24である。図中には比較のために，上流のベーンの角度を0度とした場合についても示している。この図からわかるとおり，流体素子上流にスワラを設

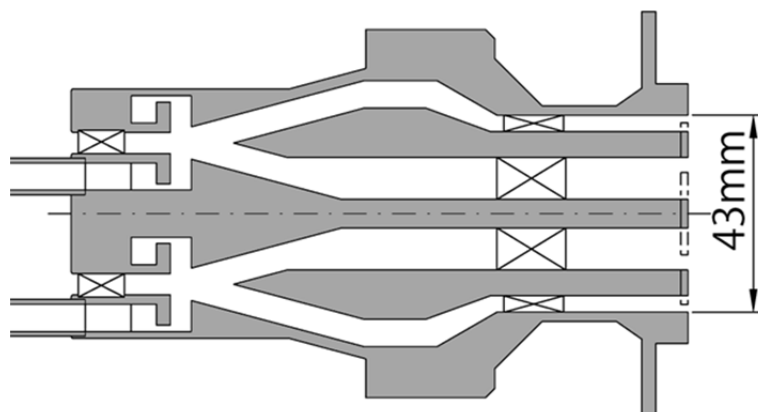
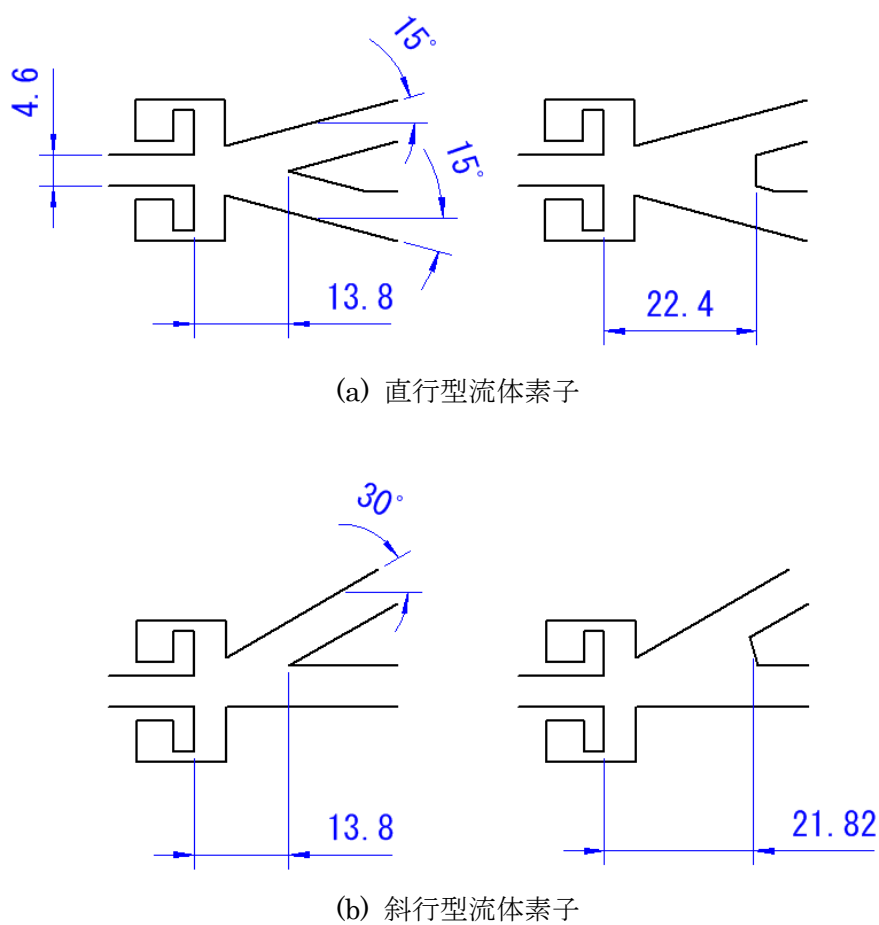


Fig.8-2 : 三次元流体素子可視化模型 (2) 断面図



(a) 直行型流体素子

(b) 斜行型流体素子

Fig.8-3 : 流体素子部概略寸法

けると圧力損失が高くなるが、この圧力損失の増加は流体素子入口のスワラによって起きており、流体素子の出口流路の圧力損失は基本形態(3D02-01)と変わっていない。従って、出口面積を制限することによって圧力損失が増加している場合とは圧力損失の増加する場所が全く異なっている。圧力損失が増加すると流量配分の変化が小さくなるという定性的な傾向は、流体素子下流の圧力損失が増加している場合と同じであるが、定量的には両者の傾向は異なっている。流体素子上流にスワラを取り付けた場合の方が、流量配分変化の減少は大きく、また、スワラ角度を45度としたときには、流量配分の大小関係が逆転して、変化量がマイナスになっている。

この流れの偏りを解消するために、出口流路全体を外側に傾けたのが3D02-11(図8-14)から3D02-18(図7-21)である。入口流路のスワラの角度を0度(3D02-11)、30度(3D02-13)、45度(3D02-15)とした場合、およびそれぞれのスワラ角度で出口流路面積を50%に制限した形態(3D02-12, 3D02-14, 3D02-16)について試験を行った。また、流体素子先端形状を鈍頭とし、入口スワラの角度を30度とした形態(3D02-17)、さらに出口流路面積を50%に制限した形態(3D02-18)について試験を行った。基本形態から流体素子の角度のみを外傾させた形態(3D02-11)の流れ場を見ると、流体素子入口から流入した流れはほとんど曲がらずに出口に向かって流れている。外側の制御口から制御流を流出させた場合であっても制御口近傍の流れ場はほとんど影響を受けていないように見える。これは制御口が主流から離れすぎているためと考えられる。このため、流体素子を直行型とした場合(3D02-1)と比較すると流量配分変化は極めて小さくなっている。その他の形態について、PIVにより測定した流れ場および流量配分の計算結果を見ると、出口流路全体を外側に傾けることにより流れの偏りは若干解消されているが、流量配分変化は小さいままであ

る。この場合についても、圧力損失の増加割合と流量配分変化の関係を図8-25に示す。流体素子を外傾させても、圧力損失や流量配分変化の傾向は流体素子を直行させた場合とほとんど変わらないことが分かる。また、流体素子を外傾させてさらにスプリッター先端を平坦にしても、同様に圧力損失や流量配分変化には大きな影響は与えない。また、入口流路にスワラを取り付けて、さらに出口面積を制限すると、圧力損失はさらに増加し、流量配分変化も減少することが分かる。

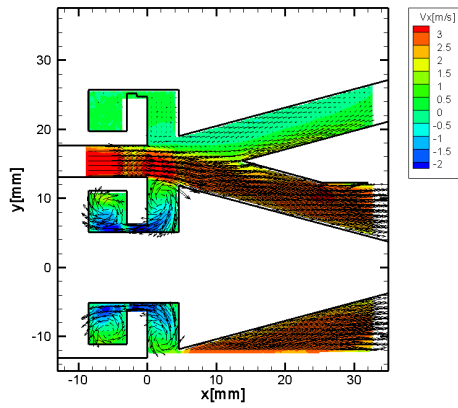
流体素子下流の圧力損失が増加することにより流量配分の変化が小さくなることは二次元流体素子モデルでの結果と同様である。流体素子下流での圧力損失を小さくするためにスワラを流体素子の上流に取り付けると、流体素子内の流れが旋回流となり出口での流量配分が外側の流路に偏るため、流体素子出口の圧力損失を小さくしたとしても流量配分の変化が小さくなる。そのため、当初期待していた効果は得られなかった。今回試験を行った範囲では、出口流路で圧力損失が生じている場合よりも流量配分の変化は小さくなっている。

## 9. まとめ

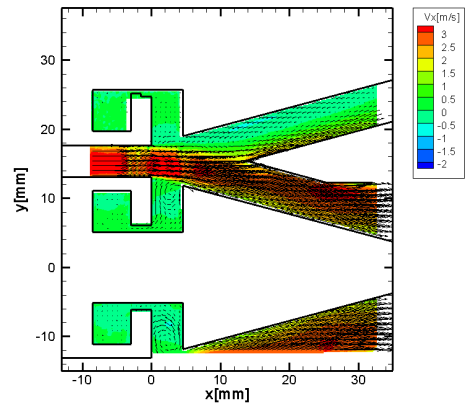
気流微粒化燃料ノズル内の空気流を制御するための制御機構として用いる流体素子の動作特性を調べるために、水流試験を行い、流体素子内部の流れ場をPIV法により計測した。まず、3種類の二次元可視化モデルの内部の流れ場を計測し、出口流路から流出する流量の変化量が大きく、かつ流れ場にヒステリシスがあり、制御流を止めた後にも流れ場の状態を保つことができる流体素子の形状を選定した。燃料ノズルの空気流量配分の制御では、円環形の流体素子を用いることを想定しているため、次にこの選定された流体素子形状を用いた円環形の流体素子について、内部の流れ場の計測を行った。その結果、円環形の流体素子でも流量配分の制御が可能であることが確認できた。

Table8-1：三次元流体素子可視化模型（2）供試体形態

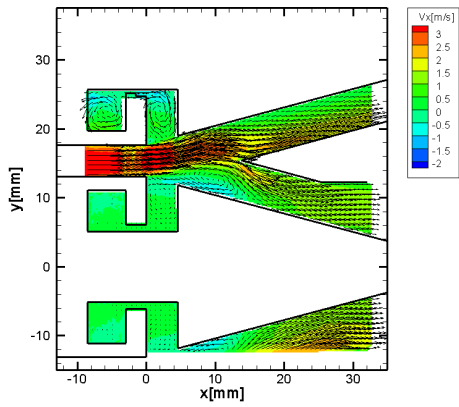
Model No.	流体素子		Swirler			出口流路面積(%)	
	角度	スプリッター 先端形状	Inlet	Inner exit	Outer exit	Inner exit	Outer exit
3D02-01 (Fig.8-4)	直行	Sharp	0deg.	strut	strut	100	100
3D02-02 (Fig.8-5)	直行	Sharp	0deg.	strut	strut	50	50
3D02-03 (Fig.8-6)	直行	Sharp	0deg.	strut	strut	25	25
3D02-04 (Fig.8-7)	直行	Sharp	0deg.	0deg.	0deg.	100	100
3D02-05 (Fig.8-8)	直行	Sharp	0deg.	45deg.	45deg.	100	100
3D02-06 (Fig.8-9)	直行	Flat	0deg.	strut	strut	100	100
3D02-07 (Fig.8-10)	直行	Flat	0deg.	45deg.	45deg.	100	100
3D02-08 (Fig.8-11)	直行	Sharp	30deg.	strut	strut	100	100
3D02-09 (Fig.8-12)	直行	Sharp	30deg.	strut	strut	50	50
3D02-10 (Fig.8-13)	直行	Sharp	45deg.	strut	strut	100	100
3D02-11 (Fig.8-14)	斜行	Sharp	0deg.	strut	strut	100	100
3D02-12 (Fig.8-15)	斜行	Sharp	0deg.	strut	strut	50	50
3D02-13 (Fig.8-16)	斜行	Sharp	30deg.	strut	strut	100	100
3D02-14 (Fig.8-17)	斜行	Sharp	30deg.	strut	strut	50	50
3D02-15 (Fig.8-18)	斜行	Sharp	45deg.	strut	strut	100	100
3D02-16 (Fig.8-19)	斜行	Sharp	45deg.	strut	strut	50	50
3D02-17 (Fig.8-20)	斜行	Flat	30deg.	strut	strut	100	100
3D02-18 (Fig.8-21)	斜行	Flat	30deg.	strut	strut	50	50



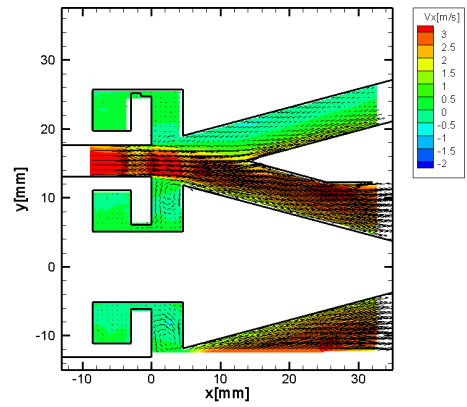
(a) Control: inner side



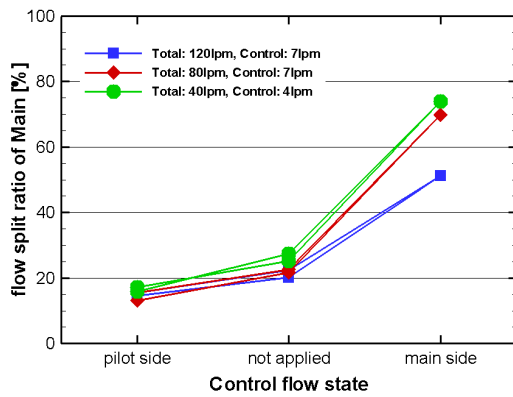
(b) Control: not apply



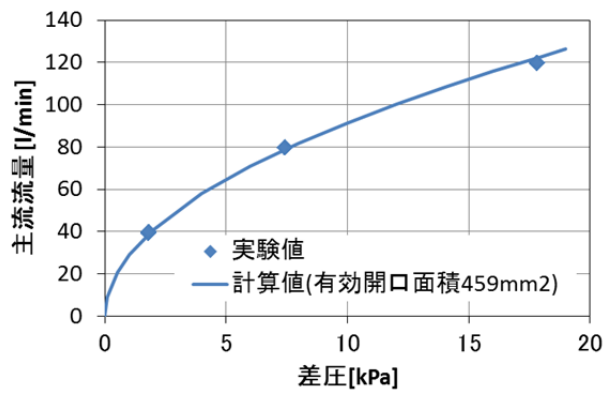
(c) Control: outer side



(d) Control: not apply



(e) Flow Split Ratio



(f) Pressure drop

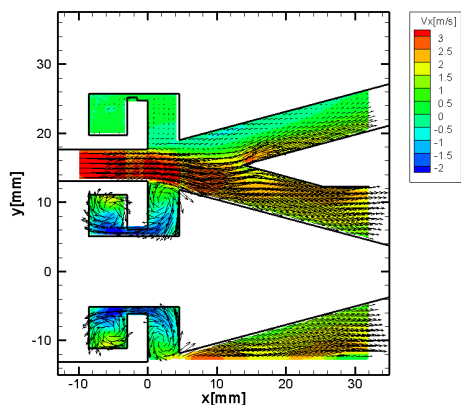
Fig.8-4 : 平均流速分布、流量配分、圧力損失(Model 3D02-01)

Fluidic device angle: straight, Splitter edge: sharp

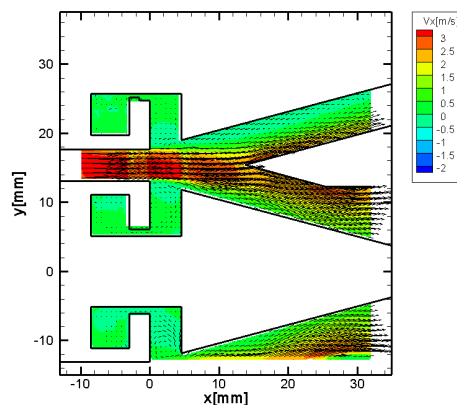
Swirler (inlet):0deg. (inner): strut, (outer): strut

Exit path area (inner): 100%, (outer):100%

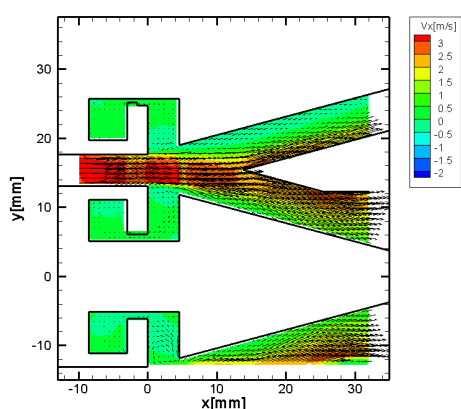
Main flow rate (a)-(d): 80liter/min., Control flow rate (a), (c): 7liter/min.



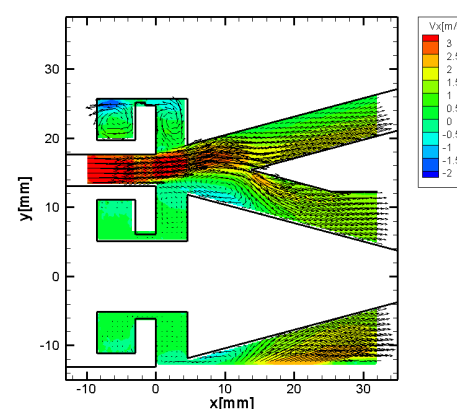
(a) Control: inner side



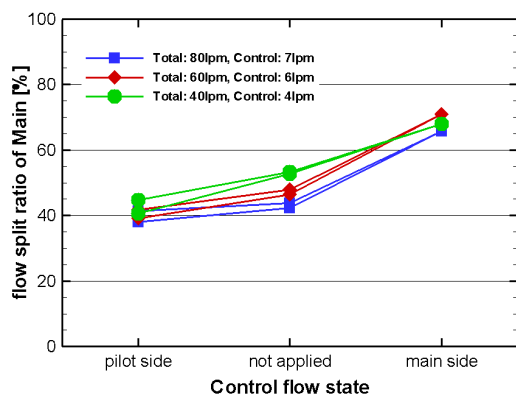
(b) Control: not apply



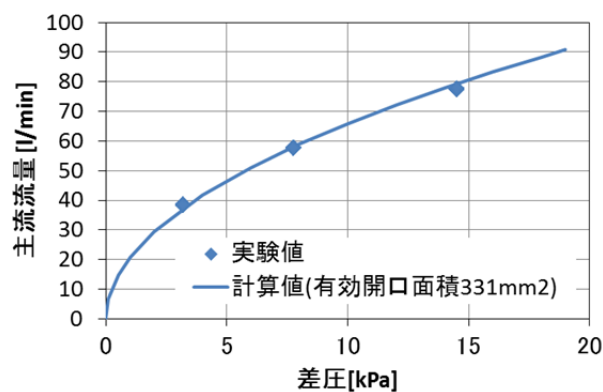
(c) Control: outer side



(d) Control: not apply



(e) Flow Split Ratio



(f) Pressure drop

Fig.8-5 : 平均流速分布、流量配分、圧力損失(Model 3D02-02)

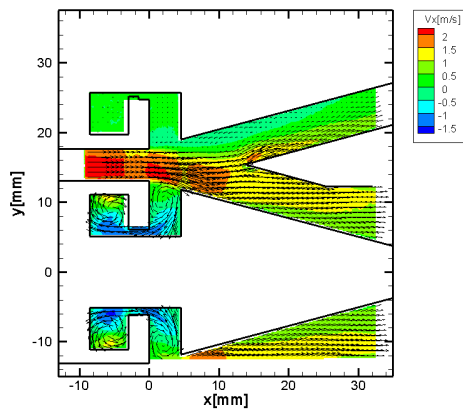
Fluidic device angle: straight, Splitter edge: sharp

Swirler (inlet):0deg. (inner): strut, (outer): strut

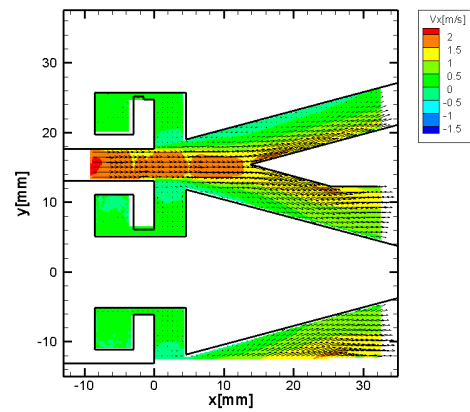
Exit path area (inner): 50%, (outer):50%

Main flow rate (a)-(d): 80liter/min., Control flow rate (a), (c): 7liter/min.

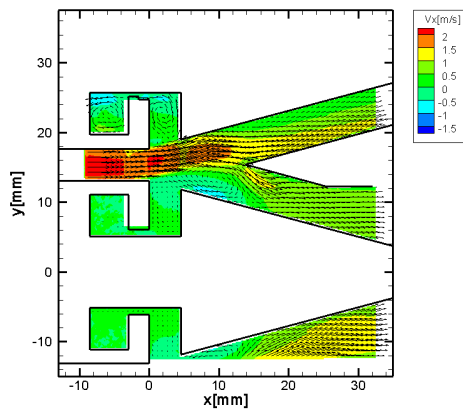




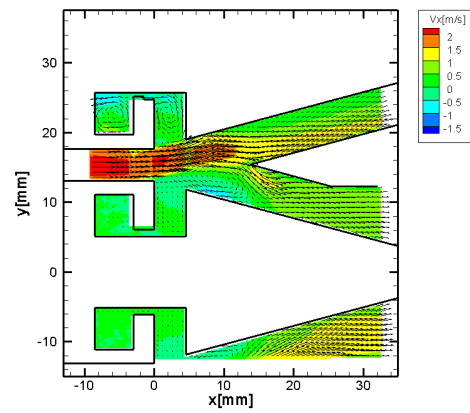
(a) Control: inner side



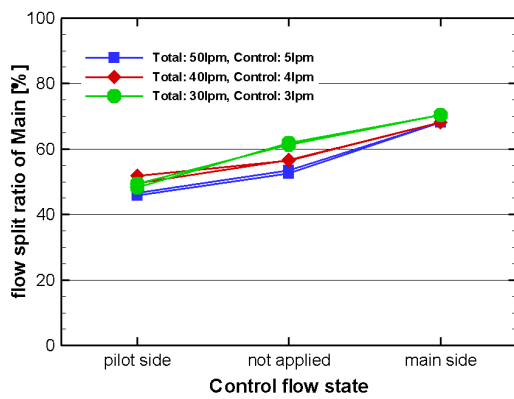
(b) Control: not apply



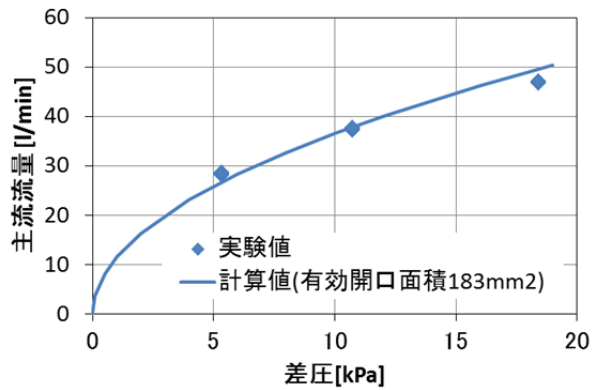
(c) Control: outer side



(d) Control: not apply



(e) Flow Split Ratio



(f) Pressure drop

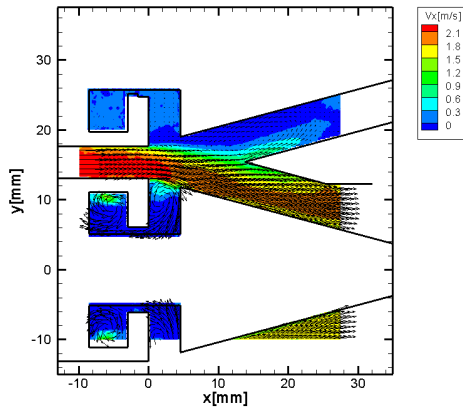
Fig.8-6 : 平均流速分布、流量配分、圧力損失(Model 3D02-03)

Fluidic device angle: straight, Splitter edge: sharp

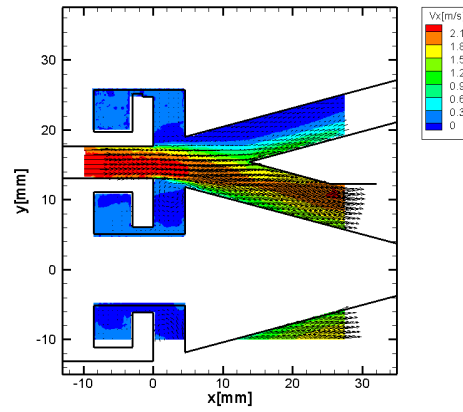
Swirler (inlet):0deg. (inner): strut, (outer): strut

Exit path area (inner): 25%, (outer):25%

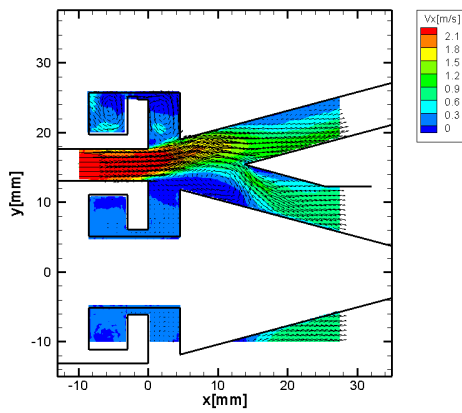
Main flow rate (a)-(d): 50liter/min., Control flow rate (a), (c): 5liter/min.



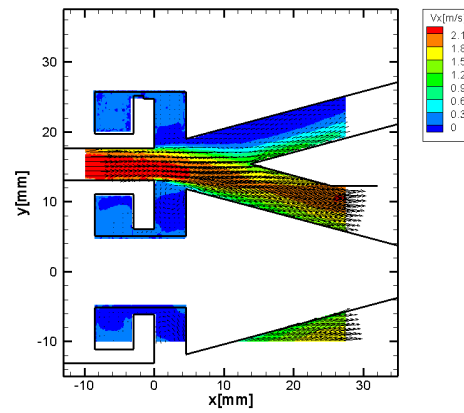
(a) Control: inner side



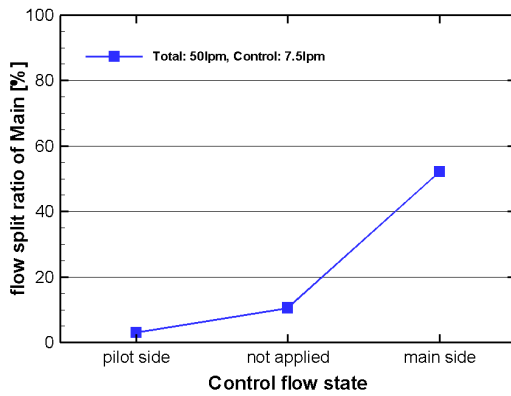
(b) Control: not apply



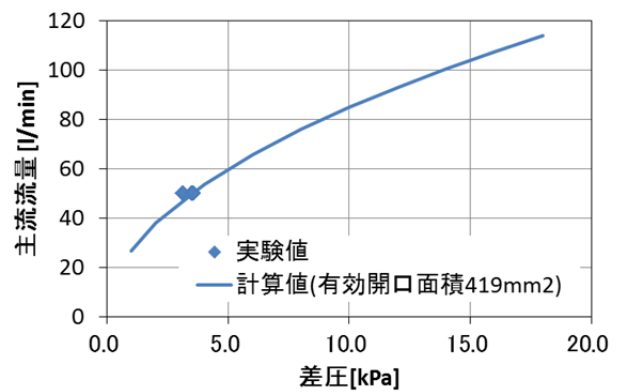
(c) Control: outer side



(d) Control: not apply



(e) Flow Split Ratio



(f) Pressure drop

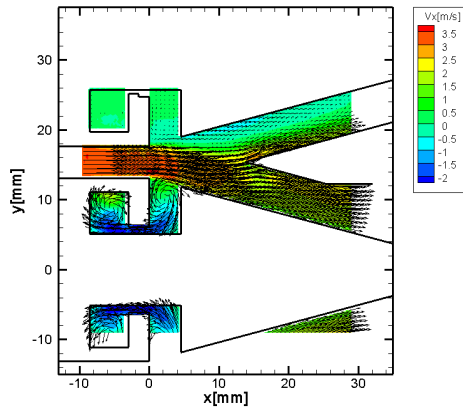
Fig.8-7 : 平均流速分布、流量配分、圧力損失(Model 3D02-04)

Fluidic device angle: straight, Splitter edge: sharp

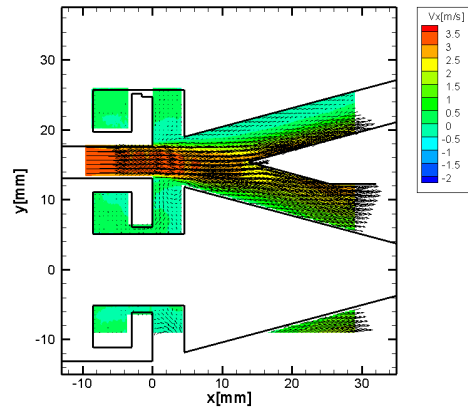
Swirler (inlet):0deg. (inner): 0deg., (outer): 0deg.

Exit path area (inner): 100%, (outer):100%

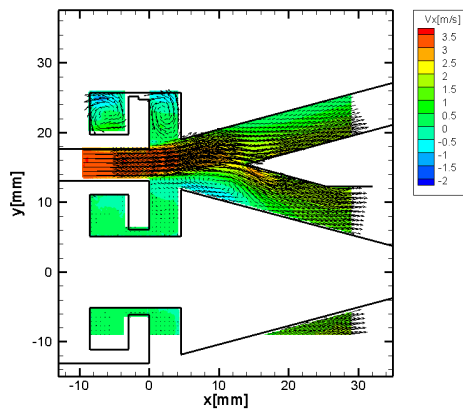
Main flow rate (a)-(d): 50liter/min., Control flow rate (a), (c): 7.5liter/min.



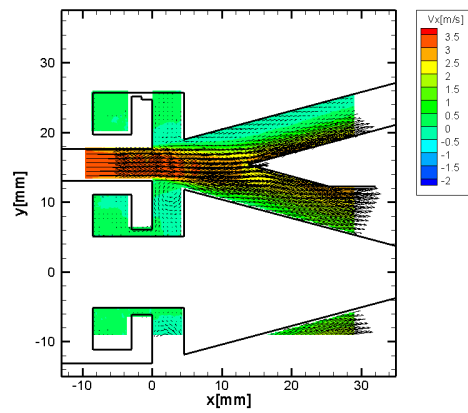
(a) Control: inner side



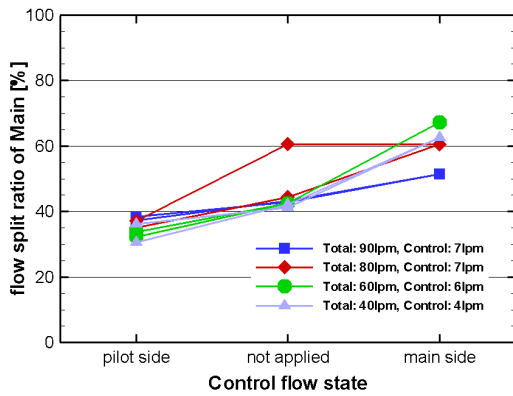
(b) Control: not apply



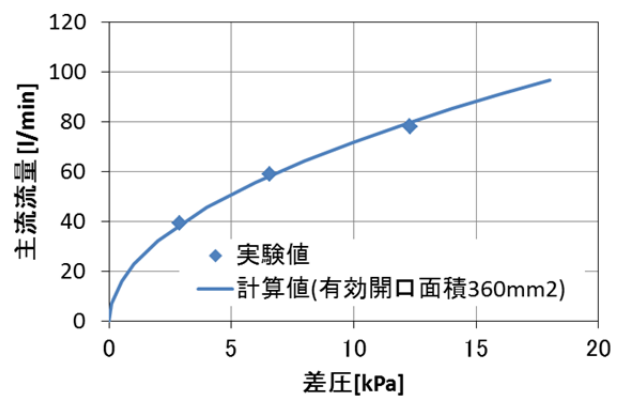
(c) Control: outer side



(d) Control: not apply



(e) Flow Split Ratio



(f) Pressure drop

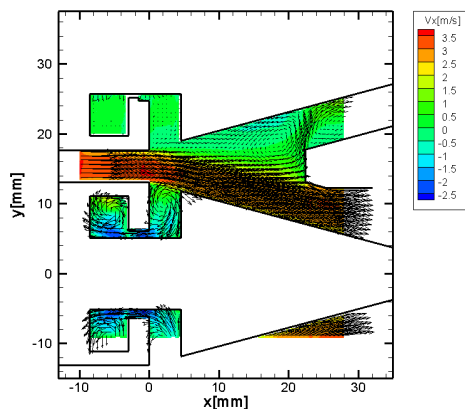
Fig.8-8 : 平均流速分布、流量配分、圧力損失(Model 3D02-05)

Fluidic device angle: straight, Splitter edge: sharp

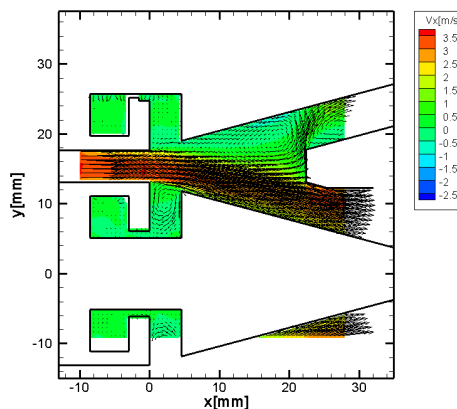
Swirler (inlet):0deg. (inner): 45deg., (outer): 45deg.

Exit path area (inner): 100%, (outer):100%

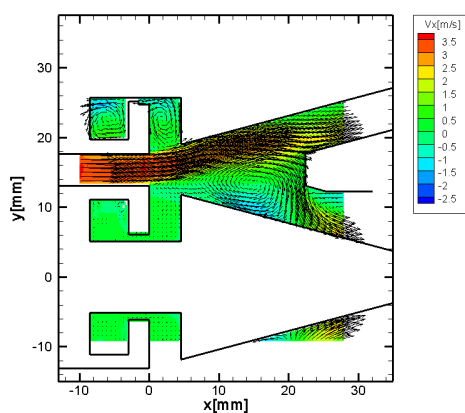
Main flow rate (a)-(d): 80liter/min. Control flow rate (a), (c): 7liter/min.



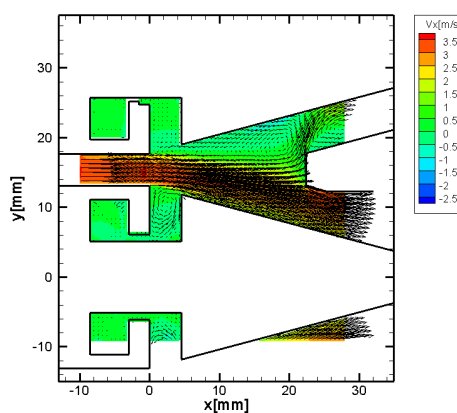
(a) Control: inner side



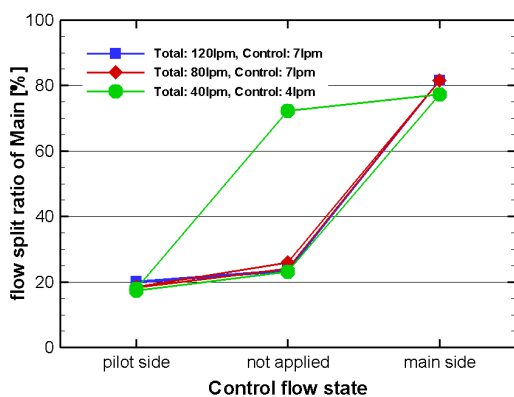
(b) Control: not apply



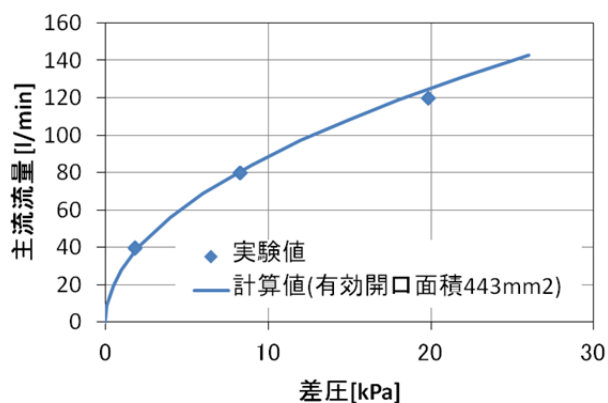
(c) Control: outer side



(d) Control: not apply



(e) Flow Split Ratio



(f) Pressure drop

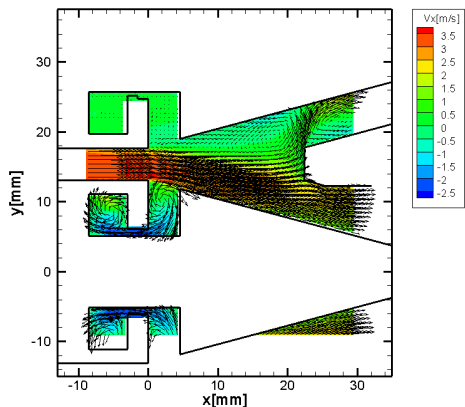
Fig.8-9 : 平均流速分布、流量配分、圧力損失(Model 3D02-06)

Fluidic device angle: straight, Splitter edge: flat

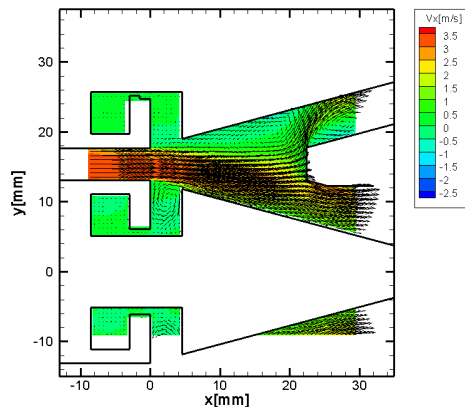
Swirler (inlet):0deg. (inner): strut, (outer): strut

Exit path area (inner): 100%, (outer):100%

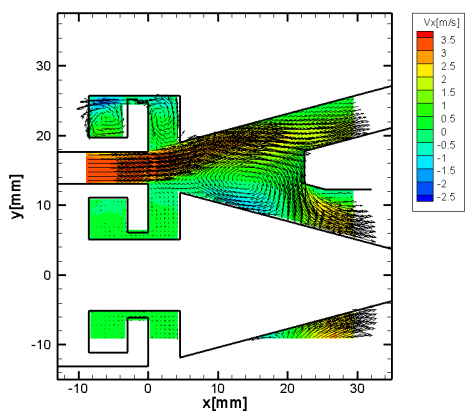
Main flow rate (a)-(d): 80liter/min., Control flow rate (a), (c): 7liter/min.



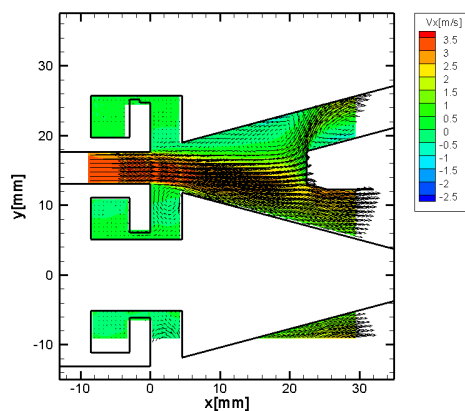
(a) Control: inner side



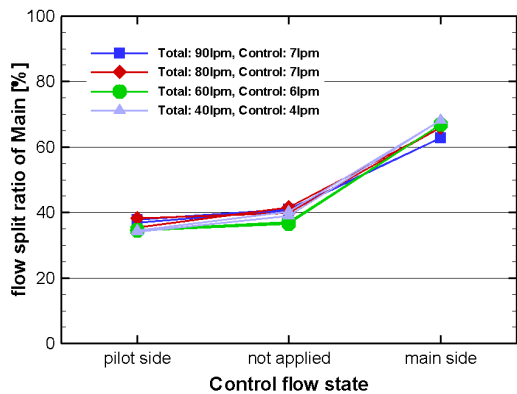
(b) Control: not apply



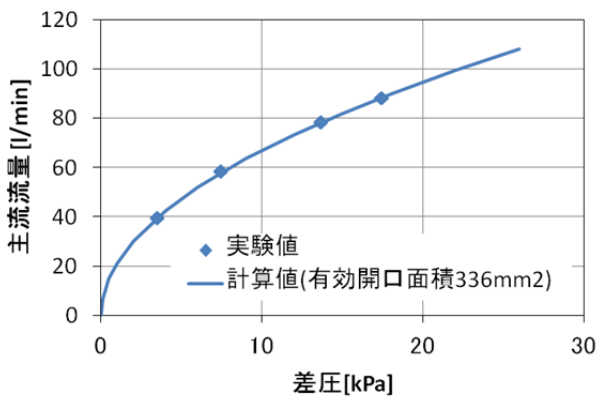
(c) Control: outer side



(d) Control: not apply



(e) Flow Split Ratio



(f) Pressure drop

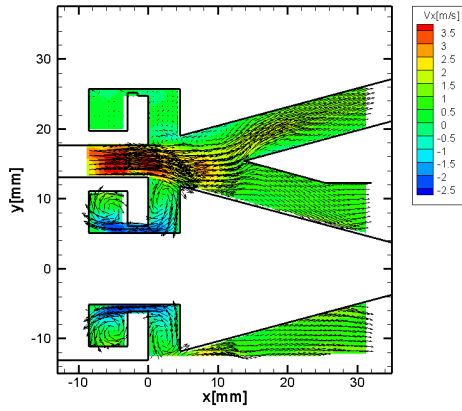
Fig.8-10 : 平均流速分布、流量配分、圧力損失(Model 3D02-07)

Fluidic device angle: straight, Splitter edge: flat

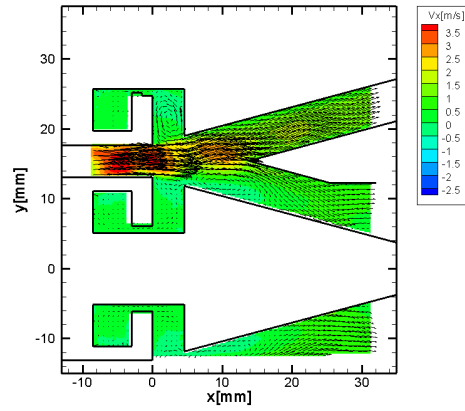
Swirler (inlet):0deg. (inner): 45deg., (outer): 45deg.

Exit path area (inner): 100%, (outer):100%

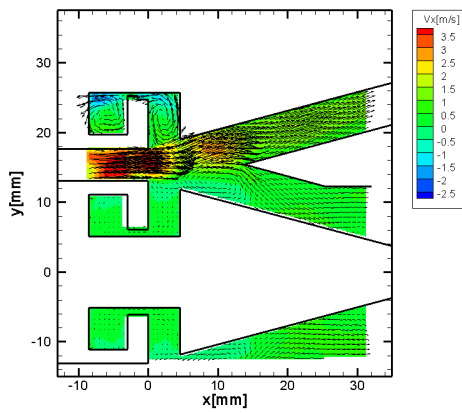
Main flow rate (a)-(d): 80liter/min., Control flow rate (a), (c): 7liter/min.



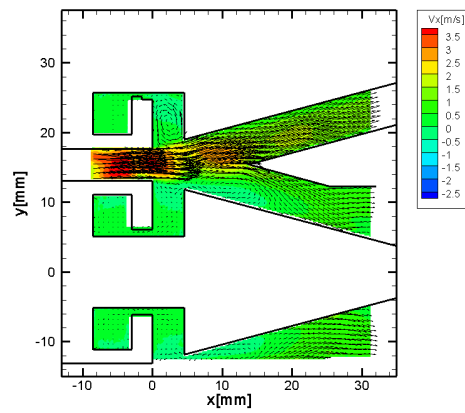
(a) Control: inner side



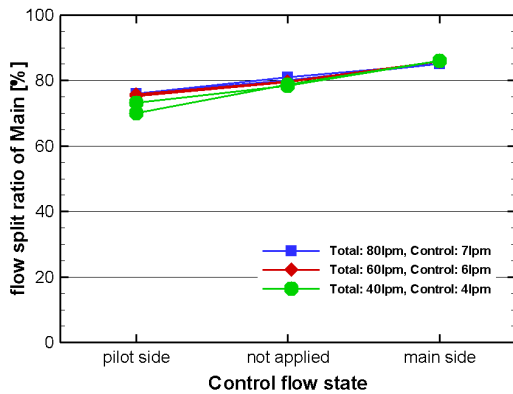
(b) Control: not apply



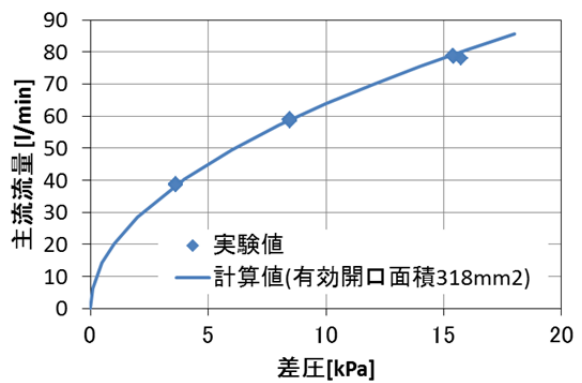
(c) Control: outer side



(d) Control: not apply



(e) Flow Split Ratio



(f) Pressure drop

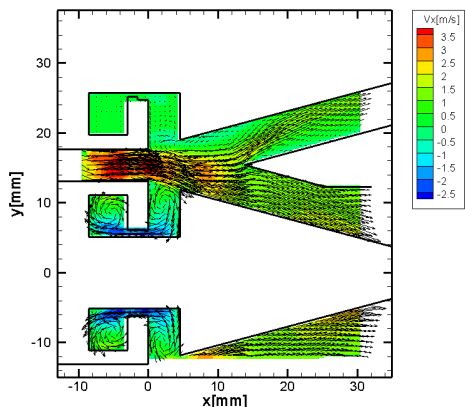
Fig.8-11 : 平均流速分布、流量配分、圧力損失(Model 3D02-08)

Fluidic device angle: straight, Splitter edge: sharp

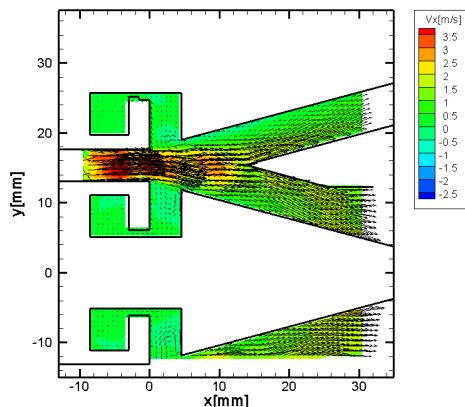
Swirler (inlet):30deg. (inner): strut, (outer): strut

Exit path area (inner): 100%, (outer):100%

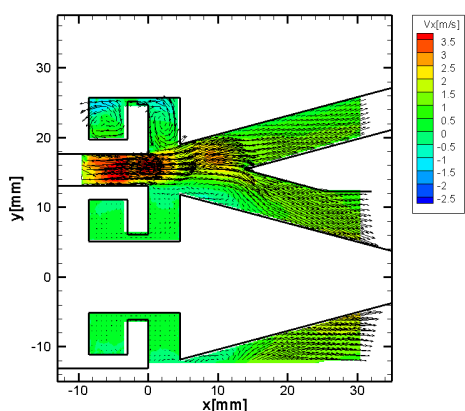
Main flow rate (a)-(d): 80liter/min. Control flow rate (a), (c): 7liter/min.



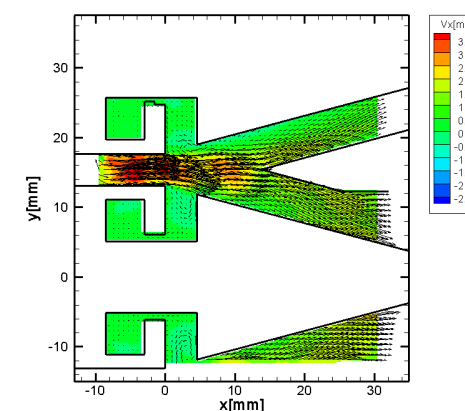
(a) Control: inner side



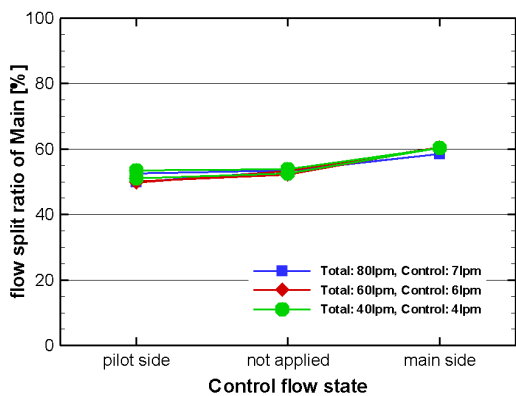
(b) Control: not apply



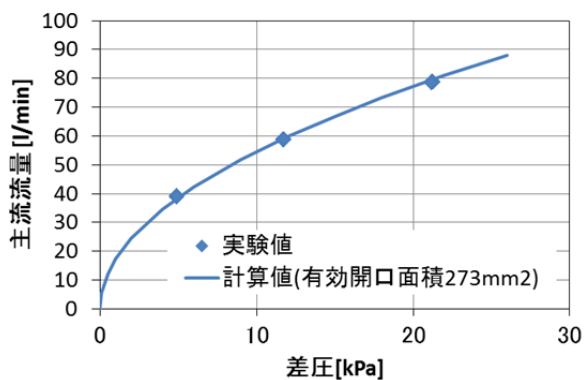
(c) Control: outer side



(d) Control: not apply



(e) Flow Split Ratio



(f) Pressure drop

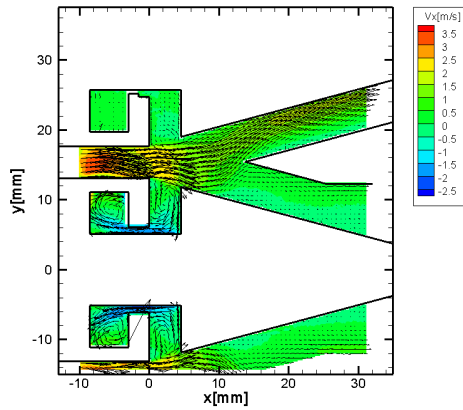
Fig.8-12 : 平均流速分布、流量配分、圧力損失(Model 3D02-09)

Fluidic device angle: straight, Splitter edge: sharp

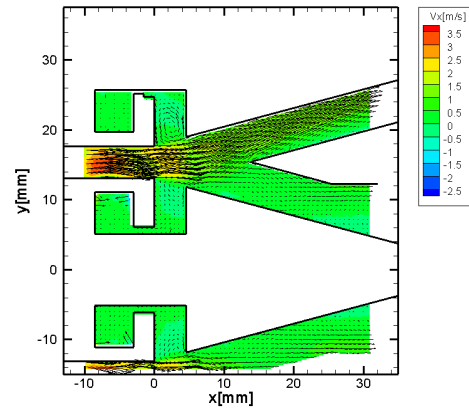
Swirler (inlet):30deg. (inner): strut, (outer): strut

Exit path area (inner): 50%, (outer):50%

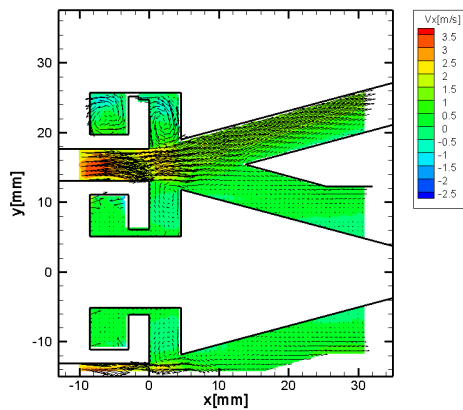
Main flow rate (a)-(d): 80liter/min., Control flow rate (a), (c): 7liter/min.



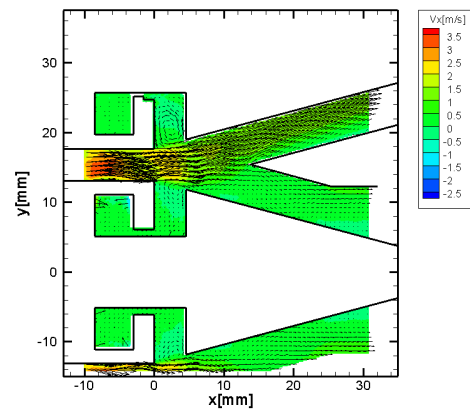
(a) Control: inner side



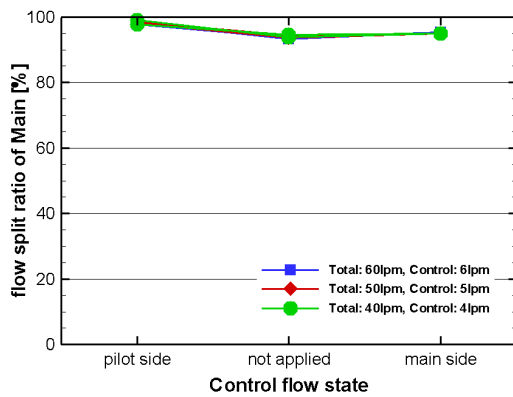
(b) Control: not apply



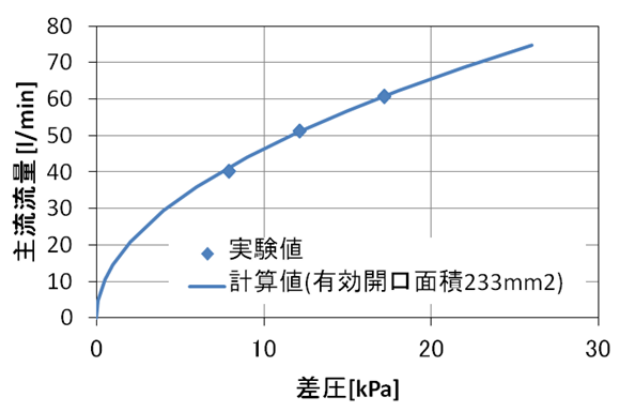
(c) Control: outer side



(d) Control: not apply



(e) Flow Split Ratio



(f) Pressure drop

Fig.8-13 : 平均流速分布、流量配分、圧力損失(Model 3D02-10)

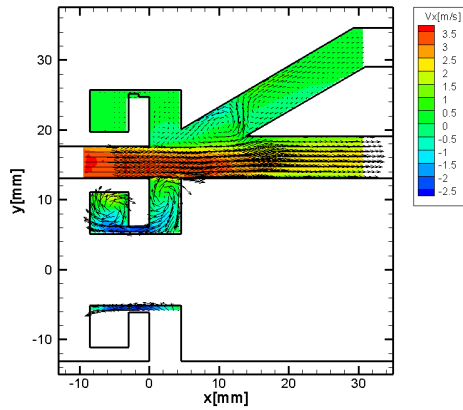
Fluidic device angle: straight, Splitter edge: sharp

Swirler (inlet):45deg. (inner): strut, (outer): strut

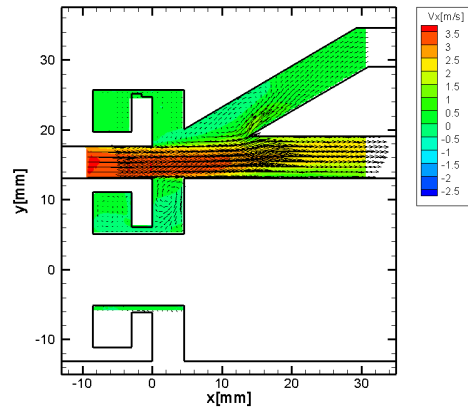
Exit path area (inner): 100%, (outer):100%

Main flow rate (a)-(d): 60liter/min., Control flow rate (a), (c): 6liter/min.

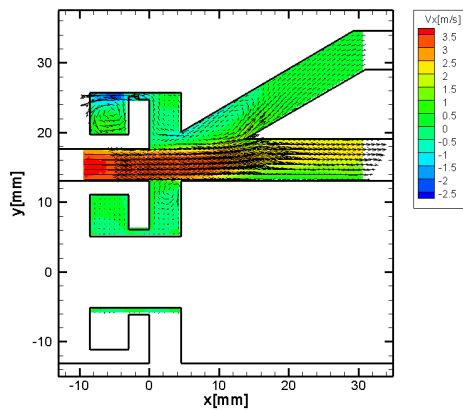




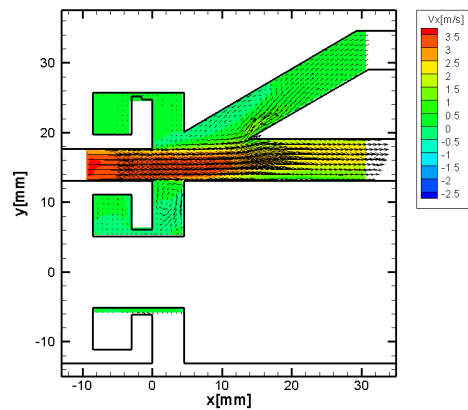
(a) Control: inner side



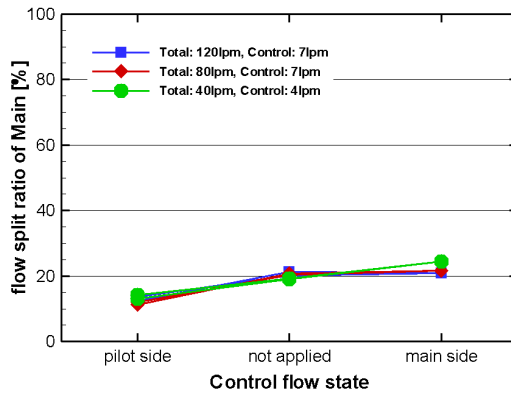
(b) Control: not apply



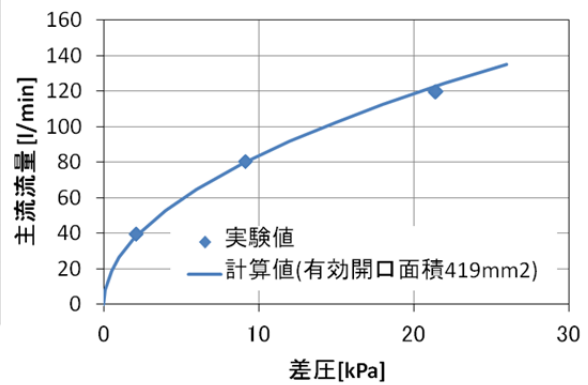
(c) Control: outer side



(d) Control: not apply



(e) Flow Split Ratio



(f) Pressure drop

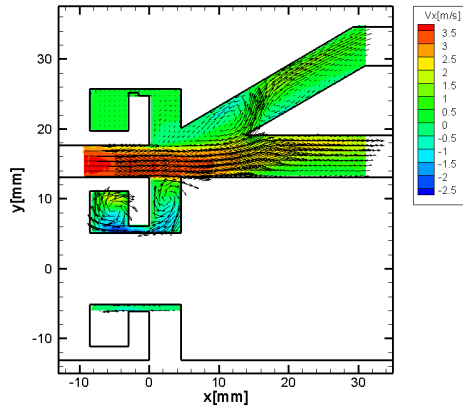
Fig.8-14 : 平均流速分布、流量配分、圧力損失(Model 3D02-11)

Fluidic device angle: inclined, Splitter edge: sharp

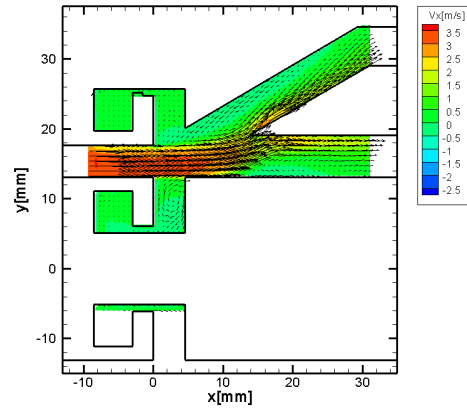
Swirler (inlet):0deg. (inner): strut, (outer): strut

Exit path area (inner): 100%, (outer):100%

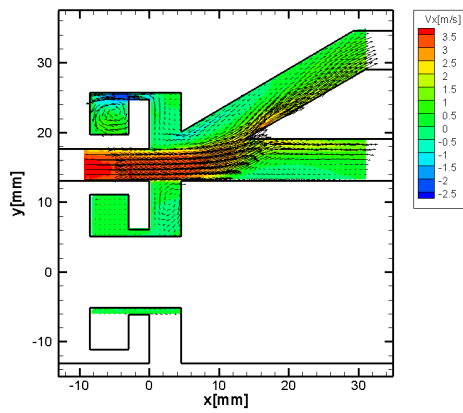
Main flow rate (a)-(d): 80liter/min., Control flow rate (a), (c): 7liter/min.



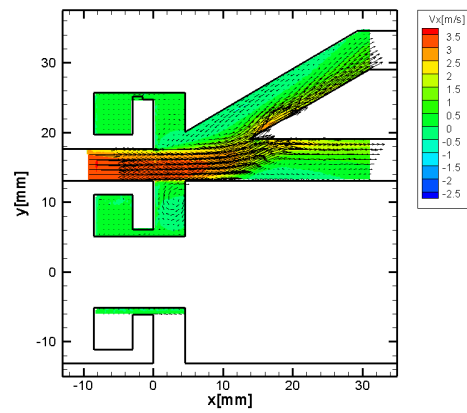
(a) Control: inner side



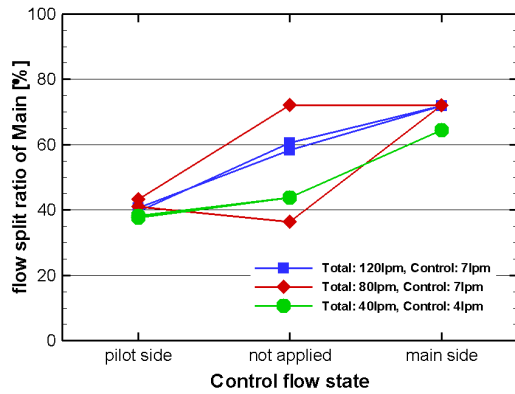
(b) Control: not apply



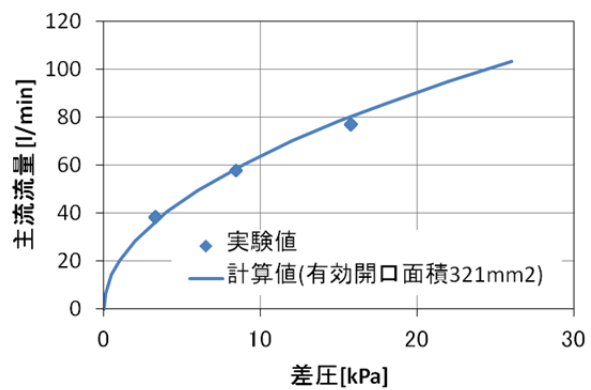
(c) Control: outer side



(d) Control: not apply



(e) Flow Split Ratio



(f) Pressure drop

Fig.8-15 : 平均流速分布、流量配分、圧力損失(Model 3D02-12)

Fluidic device angle: inclined, Splitter edge: sharp

Swirler (inlet):0deg. (inner): strut, (outer): strut

Exit path area (inner): 50%, (outer):50%

Main flow rate (a)-(d): 80liter/min., Control flow rate (a), (c): 7liter/min.

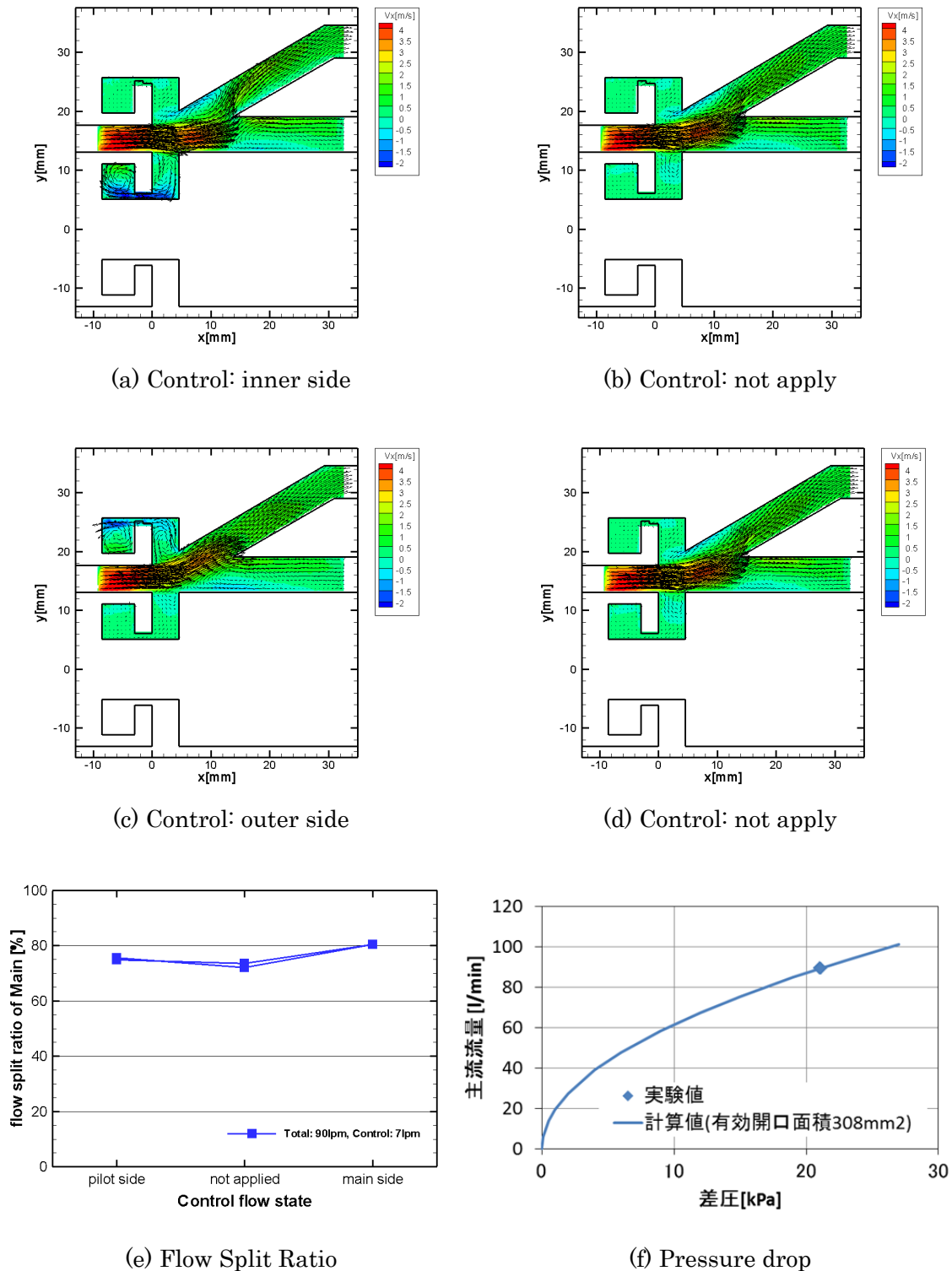


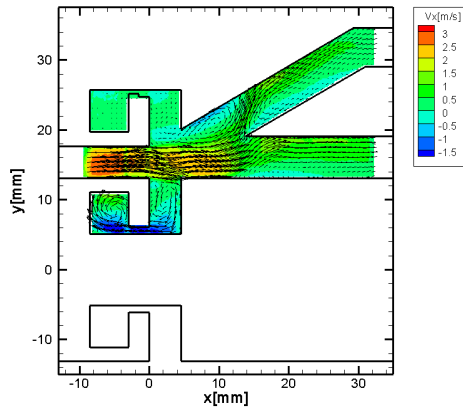
Fig.8-16 : 平均流速分布、流量配分、圧力損失(Model 3D02-13)

Fluidic device angle: inclined, Splitter edge: sharp

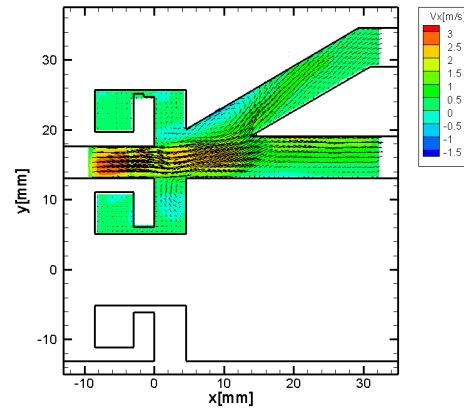
Swirler (inlet):30deg. (inner): strut, (outer): strut

Exit path area (inner): 100%, (outer):100%

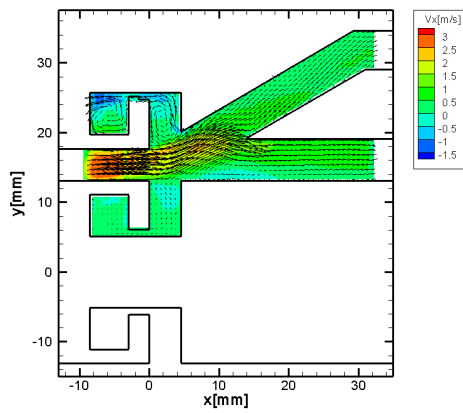
Main flow rate (a)-(d): 90liter/min., Control flow rate (a), (c): 7liter/min.



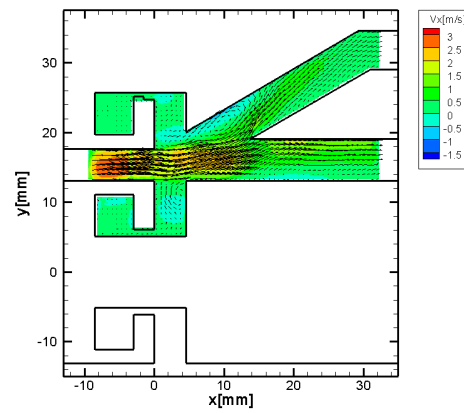
(a) Control: inner side



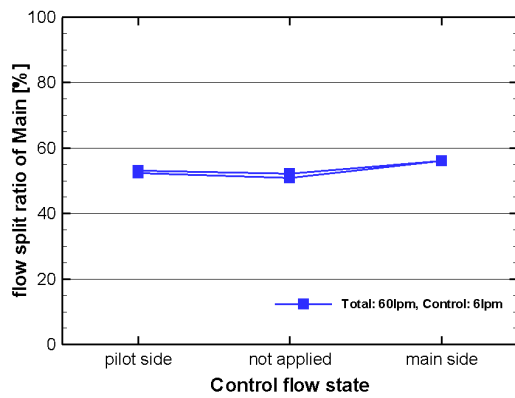
(b) Control: not apply



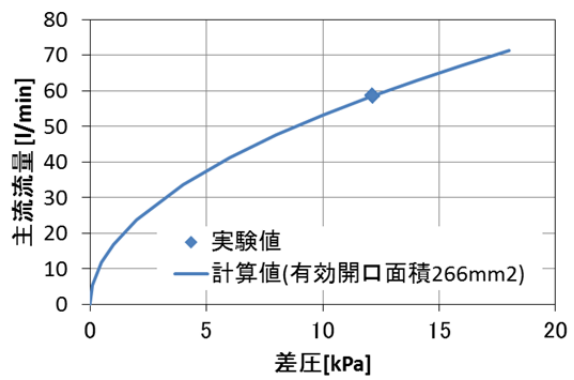
(c) Control: outer side



(d) Control: not apply



(e) Flow Split Ratio



(f) Pressure drop

Fig.8-17 : 平均流速分布、流量配分、圧力損失(Model 3D02-14)

Fluidic device angle: inclined, Splitter edge: sharp

Swirler (inlet):30deg. (inner): strut, (outer): strut

Exit path area (inner): 50%, (outer):50%

Main flow rate (a)-(d): 60liter/min., Control flow rate (a), (c): 6liter/min.

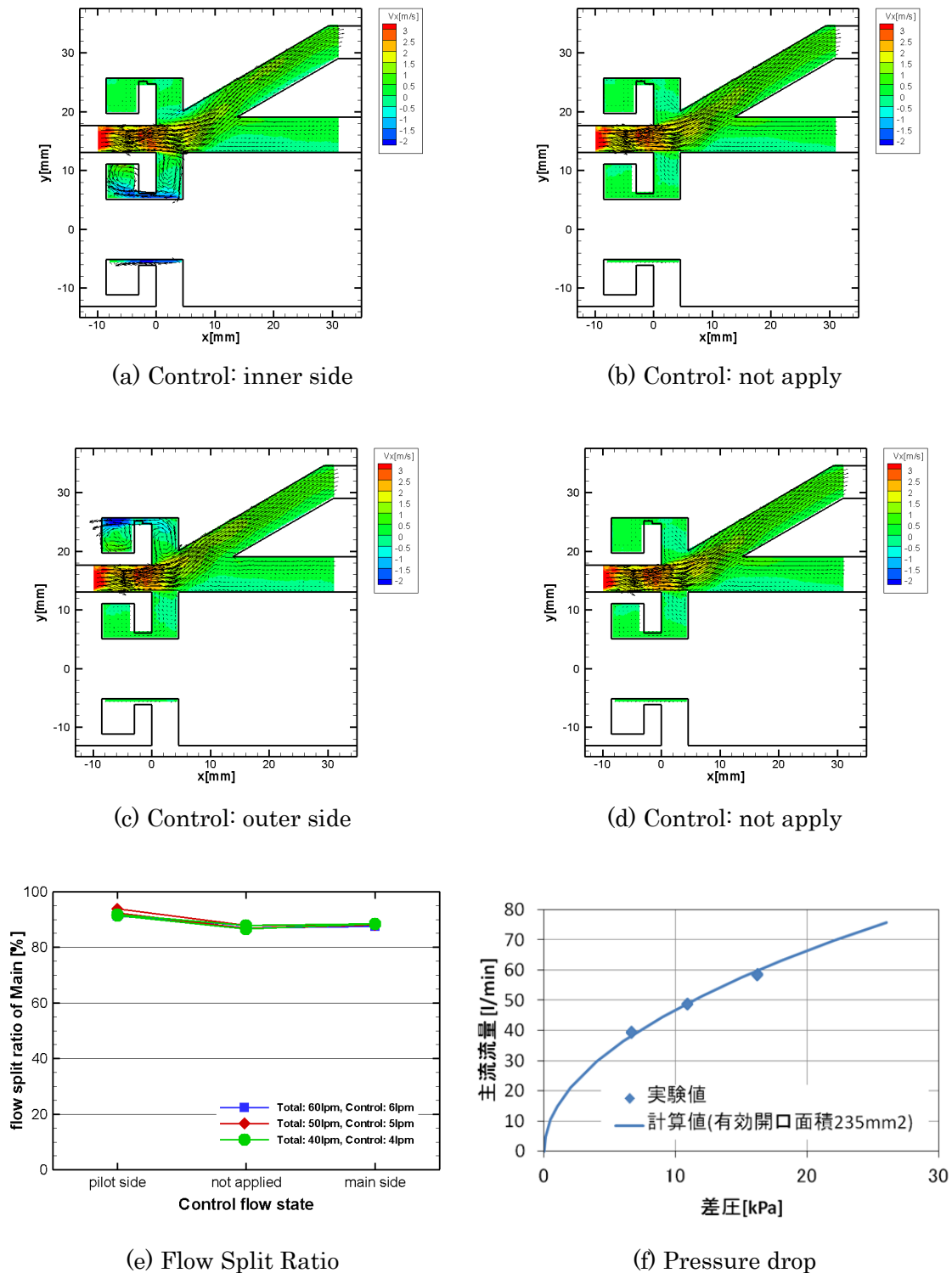


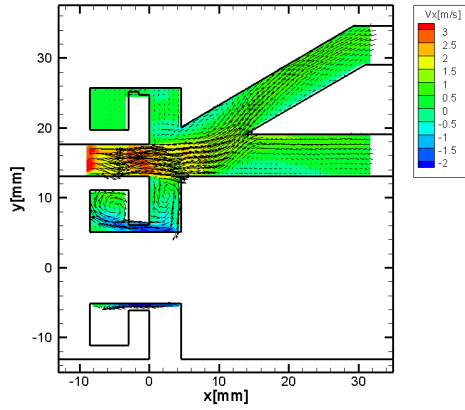
Fig.8-18 : 平均流速分布、流量配分、圧力損失(Model 3D02-15)

Fluidic device angle: inclined, Splitter edge: sharp

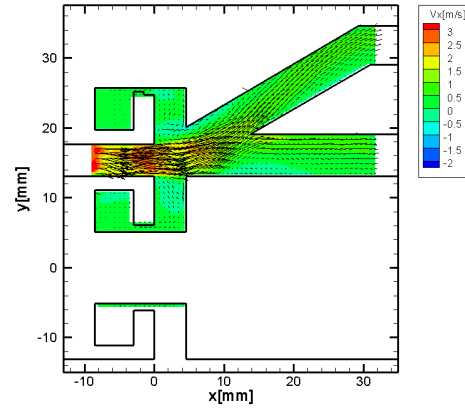
Swirler (inlet):45deg. (inner): strut, (outer): strut

Exit path area (inner): 100%, (outer):100%

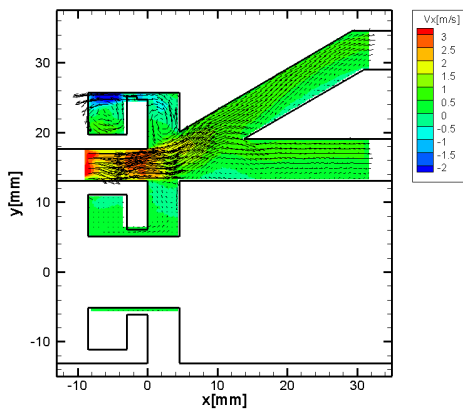
Main flow rate (a)-(d): 60liter/min., Control flow rate (a), (c): 6liter/min.



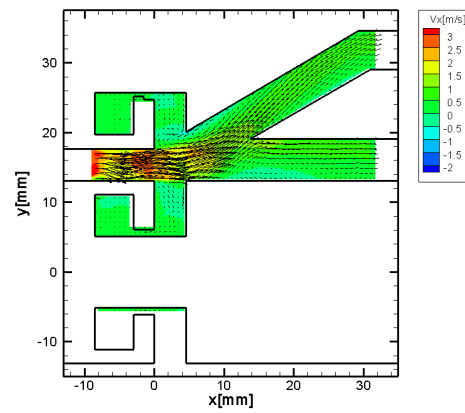
(a) Control: inner side



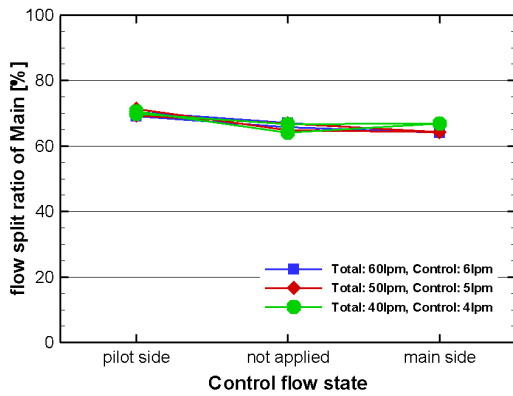
(b) Control: not apply



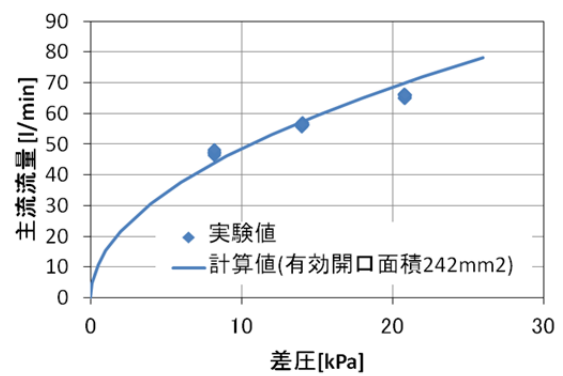
(c) Control: outer side



(d) Control: not apply



(e) Flow Split Ratio



(f) Pressure drop

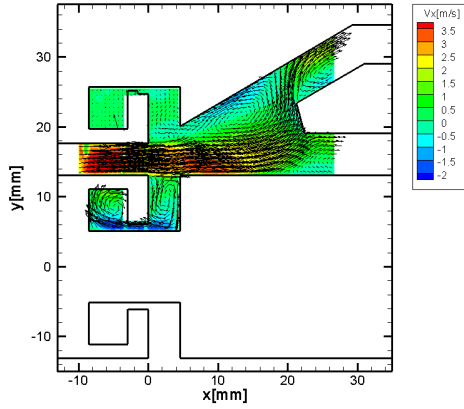
Fig.8-19 : 平均流速分布、流量配分、圧力損失(Model 3D02-16)

Fluidic device angle: inclined, Splitter edge: sharp

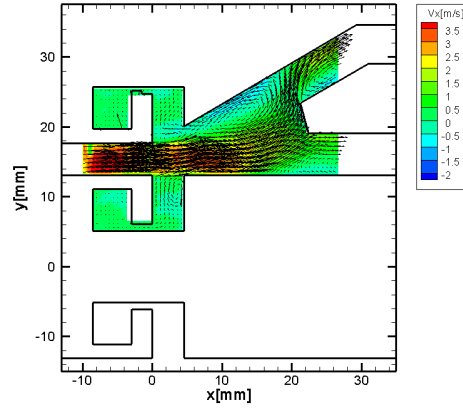
Swirler (inlet):45deg. (inner): strut, (outer): strut

Exit path area (inner): 50%, (outer):50%

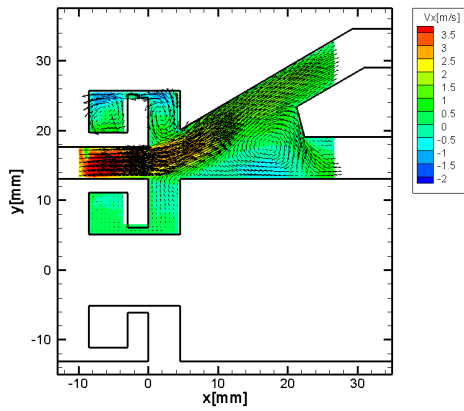
Main flow rate (a)-(d): 60liter/min., Control flow rate (a), (c): 6liter/min.



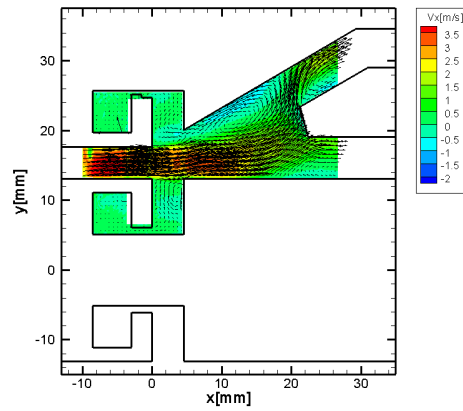
(a) Control: inner side



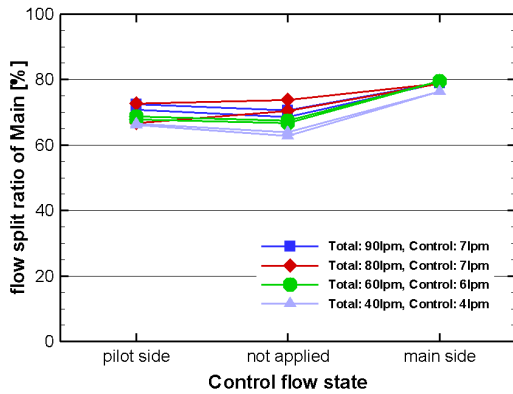
(b) Control: not apply



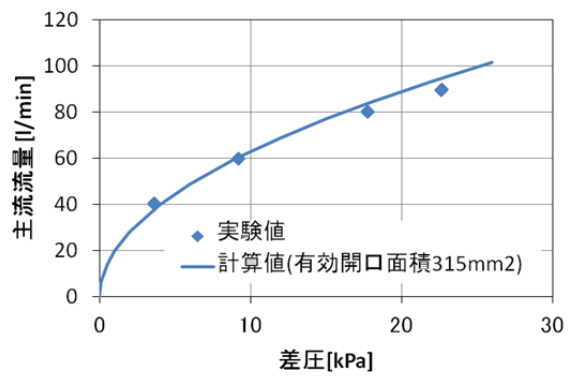
(c) Control: outer side



(d) Control: not apply



(e) Flow Split Ratio



(f) Pressure drop

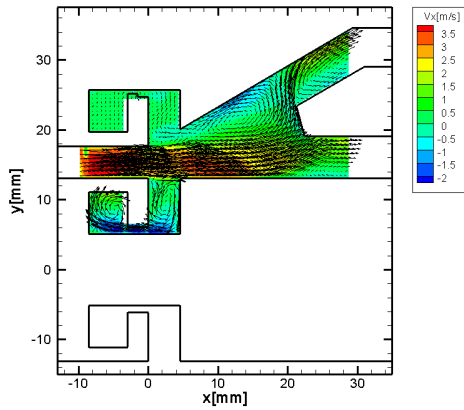
Fig.8-20 : 平均流速分布、流量配分、圧力損失(Model 3D02-17)

Fluidic device angle: inclined, Splitter edge: flat

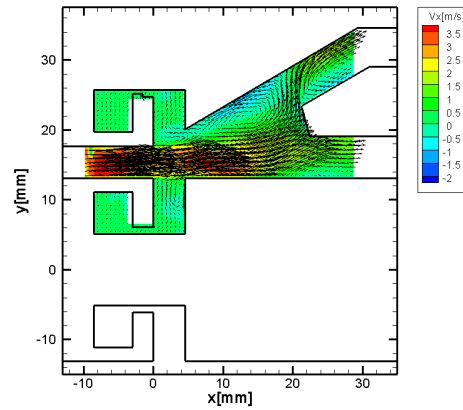
Swirler (inlet):30deg. (inner): strut, (outer): strut

Exit path area (inner): 100%, (outer):100%

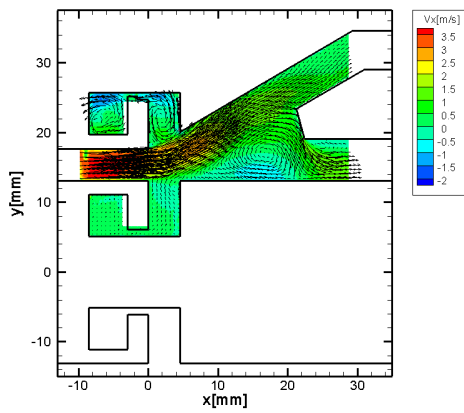
Main flow rate (a)-(d): 80liter/min., Control flow rate (a), (c): 7liter/min.



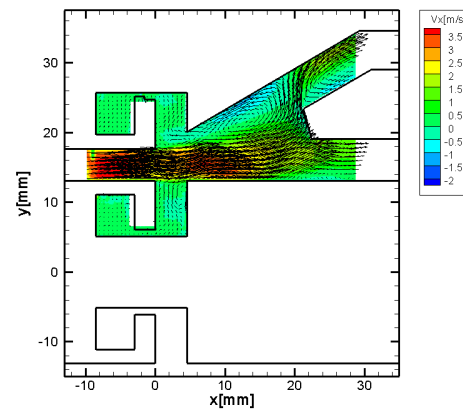
(a) Control: inner side



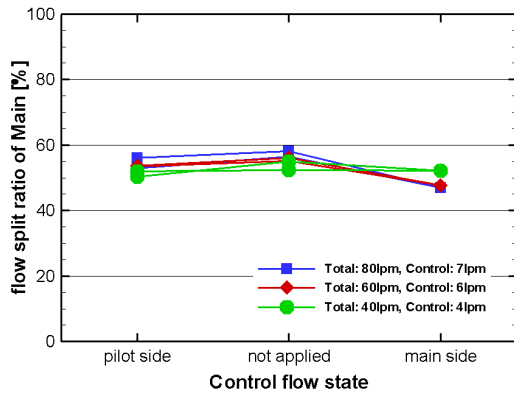
(b) Control: not apply



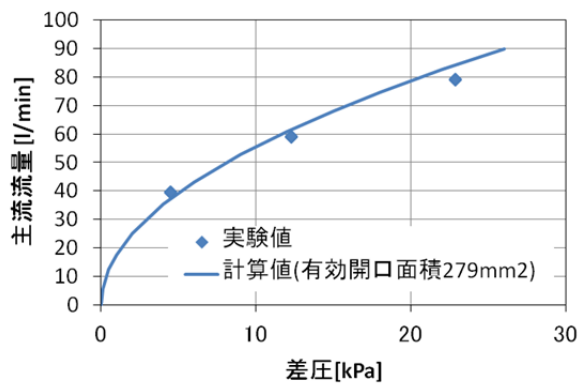
(c) Control: outer side



(d) Control: not apply



(e) Flow Split Ratio



(f) Pressure drop

Fig.8-21 : 平均流速分布、流量配分、圧力損失(Model 3D02-18)

Fluidic device angle: inclined, Splitter edge: flat

Swirler (inlet):30deg. (inner): strut, (outer): strut

Exit path area (inner): 50%, (outer):50%

Main flow rate (a)-(d): 80liter/min., Control flow rate (a), (c): 7liter/min.



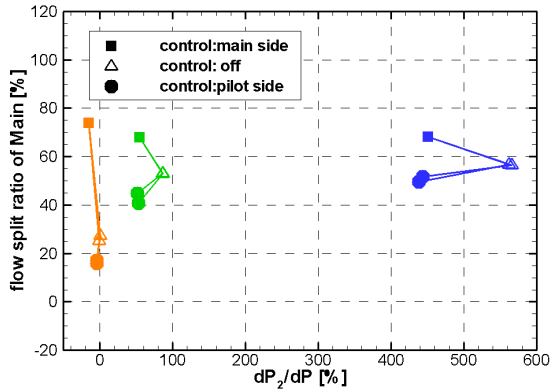


Fig.8-22 : 流体素子下流の圧力損失の増加と流量配分変化(1)

流体素子角度：ストレート  
 スプリッター：鋭角

流体素子上流のスワーラ角度：0度  
 出口面積を変える

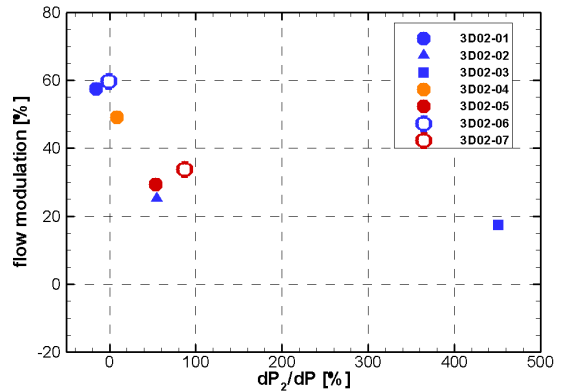


Fig.8-23 : 流体素子下流の圧力損失の増加と流量配分変化(2)

流体素子角度：ストレート  
 スプリッター：鋭角、鈍頭

流体素子上流のスワーラ角度：0度  
 出口面積、出口スワーラ角度を変える。

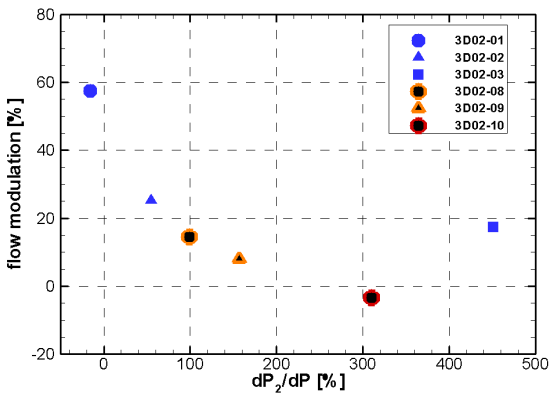


Fig.8-24 : 流体素子下流の圧力損失の増加と流量配分変化(3)

流体素子角度：ストレート  
 スプリッター：鋭角

流体素子上流のスワーラ角度を変える  
 出口面積を変える。

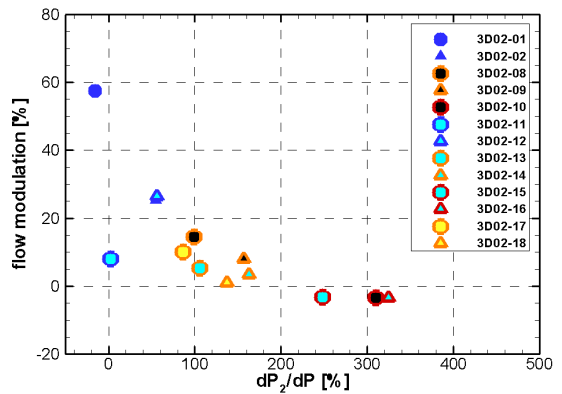


Fig.8-25 : 流体素子下流の圧力損失の増加と流量配分変化(4)

流体素子角度：ストレート、外傾  
 スプリッター：鋭角、鈍頭

流体素子上流のスワーラ角度を変える  
 出口面積を変える。

さらに、同形状の流体素子を用いた燃料ノズルの燃焼試験を行い、流体素子により空気流を制御し、燃焼器の燃焼特性を変化させることが可能であることが確認できた。しかし、この段階では、燃料ノズルの圧力損失が非常に大きく、ジェットエンジンの実条件での試験ができないという問題があった。この問題を解決するために、さらに水流試験を行い、流体素子の圧力損失と流量配分特性について調べた。本試験においては、流体素子の形状は当初決定した形状から変更せず、流体素子下流の圧力損失（有効開口面積）と出口流路の流量配分の変化量との関係のみを調べ、流体素子の形状と流量配分の変化量の関係については調べていない。二次元模型および三次元模型のどちらの試験においても、流体素子下流の圧力損失が大きくなり、相対的に流体素子の圧力損失が小さくなると、流量配分の変化量が小さくなるという結果が得られた。従って、十分な大きさの流量配分変化を得るためには、流体素子下流の圧力損失を小さくしなければならない。すなわち、流路面積を拡大する、あるいはスワールベーンの角度を小さくするといったことを行う必要がある。ただし、流路面積を拡大すると流路内の平均流速は低下し、またスワールベーンを小さくすると、スワールベーン下流で他のスワール流路を通った空気と混合する場所での相対流速が小さくなり、乱れ強さが小さくなるといったことが起こり、液体燃料の微粒化や混合に影響を与える。微粒化や混合特性の悪化は、燃焼器の燃焼特性（排出ガス特性）の悪化につながるため、流体素子を用いて空気流制御を行うことにより燃焼器の性能を向上させるためには、燃料ノズルの設計に特別に注意する必要がある。すなわち、流体素子下流の燃料ノズル部分については、圧力損失が十分に小さく、なおかつ微粒化特性、混合特性が良いことが必要である。

## 参考文献

- 1) 橋爪保夫, 土樋俊夫, 広田良夫, 森義孝, 灘井義和, 佐藤友彦, 中原崇文, 日浦治也, 福江一郎, 塚越敬三: 東北電力(株)東新潟火力発電所第3号系列, 三菱高性能大容量ガスタービン(MW-701D 形)及び新形低NO<sub>x</sub>燃焼器の開発並びに1090MW コンバインドサイクルプラントにおける試運転実績, 三菱重工技報, Vol.22 No.3(1985) pp.8-16
- 2) 小林成嘉, 井上洋, 竹原勲, 笹尾敏文: 既存の低NO<sub>x</sub>燃焼器に関して, 日本ガスタービン学会誌, Vol.32 No.1(2004) pp.10-14
- 3) K D Brundish, C W Wilson, J R Tippetts, R J Woolhouse: Initial Optimisation of a Fluidically Controlled Variable Swirl Fuel Injector, AIAA-99-2403 (1999)
- 4) F Sun, R Lin, M Haas and T Brogan: Air Flow Control by Fluidic Diverter for Low Nox Jet Engine Combustion, AIAA 2002-2945 (2002)
- 5) 西田正浩, 山根隆志, Balazs Asztalos, 遠心血液ポンプ内流れの可視化定量解析, 機械技術研究所報, Vol.52, No.3(1998) pp.16-34
- 6) 吉田征二, 牧田光正, 飯野淳, 山田秀志, 下平一雄, 山本武, 林茂: ジェットエンジン燃焼器用気流微粒化ノズル内流れのPIV計測, 第35回可視化情報シンポジウム講演論文集 (2007) pp.155-156.
- 7) 尾崎省太郎, 原美明: 純流体素子入門, 日刊工業新聞社 (1967)
- 8) 吉田征二, 山本武, 黒澤要治, 下平一雄, 流体素子により空気流制御を行う燃料ノズルの動作特性, 第36回ガスタービン定期講演会講演論文集 (2008), pp.227-232
- 9) Yamamoto, T., Shimodaira, K., Kurosawa, Y., Matsuura, K., Iino, J., Yoshida, S.: Research and Development of Staging Fuel Nozzle for Aeroengine, Proceedings of ASME Turbo

- Expo 2009, GT2009-59852.
- 10) Yamamoto, T., Shimodaira, K., Kurosawa, Y., Yoshida, S., Matsuura, K.: Investigations of a Staged Fuel Nozzle for Aeroengines by Multi-Sector Combustor Test, Proceedings of ASME Turbo Expo 2010, GT2010-23206.
  - 11) Yamamoto, T., Shimodaira, K., Kurosawa, Y., Yoshida, S.: Combustion Characteristics of Fuel Staged combustor for Aeroengines at LTO Cycle Conditions, Proceedings of ASME Turbo Expo 2011, GT2011-46133.
  - 12) Yamamoto, T., Shimodaira, Y., Yoshida, S., K., Kurosawa: Emission Reduction of Fuel Staged Aircraft Engine Combustor Using an Additional Premixed Fuel Nozzle, Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, GT2012-68590.
  - 13) Seiji YOSHIDA, Takeshi YAMAMOTO, Yoji KUROSAWA, Kazuo SHIMODAIRA, Air Flow Control on High Pressure Combustion Test by Fluidic Diverter for Air Blast Fuel Nozzle, Abstracts of Asian Joint Conference on Propulsion and Power (2010) pp.73, AJCPP2010-120
  - 14) 吉田征二, 山本武, 黒澤要治, 下平 一雄: 流量配分制御を行う円環型流体素子内流れの P I V 計測, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集 (2010)

