

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

航空エンジン用燃料噴射弁評価のための高圧噴霧試験装置の開発

松浦 一哲, 黒澤 要治, 山田 秀志, 林 茂

2007年3月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

航空エンジン用燃料噴射弁評価のための
高圧噴霧試験装置の開発

Development of High-Pressure Spray Test Facility for Evaluation of
Aero-Engine Fuel Injector Performance

松浦 一哲^{*1} 黒澤 要治^{*1} 山田 秀志^{*1} 林 茂^{*1}
Kazuaki MATSUURA^{*1} Yoji KUROSAWA^{*1} Hideshi YAMADA^{*1} and Shigeru HAYASHI^{*1}

^{*1} 航空プログラムグループ 環境適応エンジンチーム
Clean Engine Team, Aviation Program Group

2007年3月

March 2007

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

航空エンジン用燃料噴射弁評価のための高圧噴霧試験装置の開発*

松浦 一哲*¹, 黒澤 要治*¹, 山田 秀志*¹, 林 茂*¹

Development of High-Pressure Spray Test Facility for Evaluation of Aero-Engine Fuel Injector Performance *

Kazuaki MATSUURA *¹, Yoji KUROSAWA *¹, Hideshi YAMADA *¹ and Shigeru HAYASHI *¹

Abstract

This paper describes the development of a high-pressure spray test facility for performance evaluation of aero-engine fuel injectors. The facility provides test conditions of elevated inlet air-pressure up to 1 MPa. The maximal airflow rate is 1.2 kg/s at 0.8 MPa so that the facility is even capable of evaluating the performance of the next generation low emission burners based on lean premixed pre-vaporized combustion. The facility features a test section equipped with large high-pressure windows and an auxiliary air-purge system. The former gives optical access to various measurement techniques, and the latter keeps droplets away from the window surface and thus provides a clear view of sprays for a period sufficiently long for the measurements. The paper presents features and functions of the facility, together with some of the spray measurement techniques having been applied so far, along with examples of the measurement results. Suggestions for future work are also made, including those for further improvements of the facility.

Keywords: Aero Engine Fuel Injector, Fuel Atomization, Spray Dispersion, Elevated Ambient Air Pressure, Spray Test Facility, Optical Measurements, NOx-Emission Reduction

1. はじめに

近年の航空機に関する排気規制においては、特に窒素酸化物 (NOx) に関する規制が強化される傾向にある。このため、当宇宙航空研究開発機構の推進する「クリーンエンジン技術の研究開発計画 (TechCLEAN)^(1,2)」においても、低NOx燃焼技術の研究開発⁽³⁾、及びそれを実現するための燃料噴射弁の開発は重要課題の一つとして位置づけられている。航空エンジンのNOx排出量を低減する代表的な燃焼コンセプトとしては、RQL⁽⁴⁾ (Rich burn - Quick quench - Lean burn) 方式と希薄予混合予蒸発方式⁽⁵⁾ (LPP: Lean Premixed Pre-vaporized Combustion)が挙げられるが、いずれの方式においても、混合促進により空間的に一様な燃料分布が実現できるかどうかNOx排出低減を実現するための大きな鍵となる。一方で、NOx排出と同様に重要な燃焼器特性として例えば保炎・着火特性があげられるが、逆にこれらは燃料分布に不均一性がある方が優れている場合が多い。よって、燃焼器開発の際には、このように互いに背

反する燃焼特性をも含め、要求される燃焼性能をバランスよく満たすように燃料噴霧特性を最適化する必要がある。このため燃料噴射弁特性の把握は重要な課題である。

一方、NOx排出が顕著になるのは離陸等の高負荷時であるため、低NOx噴射弁開発にあたっては、特に高負荷時における燃料噴霧の微粒化特性や分散特性を把握することが重要になる。微粒化特性の観点から言えば、近年航空エンジンで多用されている気流微粒化方式の燃料噴射弁の場合、噴霧粒径・空間濃度分布は空気密度に大きく左右され、その度合いも噴射弁の設計方式や形状に依存する⁽⁶⁾。また、保炎用のパイロット噴射弁と高負荷時のみ作動させてNOx排出低減を狙うメイン噴射弁を備えたステーキング式の燃料噴射弁の場合、メイン噴射弁用に設計された一部の液柱式気流噴射弁は、大気圧下では微粒化に必要な空気力が弱すぎて燃料微粒化装置として機能しないケースもある。このように、低NOx噴射弁の性能を正確に評価するためには、雰囲気圧を昇圧することにより、空気密度の高い状態で噴霧

* 平成19年3月1日受付 (received 1 March 2007)

*1 航空プログラムグループ 環境適応エンジンチーム (Clean Engine Team, Aviation Program Group)

試験を行う必要がある。

以上のような背景から、筆者らはTechCLEANプロジェクトの一環として、噴射弁へ流入する主流空気全圧が1MPaまでの試験を可能とする高圧噴霧試験のための専用装置の開発を行った。本装置は2005年4月に完成し、その後各種の光学計測技術適用のための改良を経て、2005年9月から本格的な運用を開始した。従って現在までの運用期間は1年半程度であるが、既に次世代の希薄予混合方式の低NO_x燃料噴射弁の評価を中心に、研究開発上貴重なデータを提供している。

本稿では、高圧噴霧試験装置の特徴、機能及び適用可能な光学計測技術について、今後の改良に関する展望も含めて報告する。

2. 高圧噴霧試験装置の概要

高圧噴霧試験装置の詳細は後述の各節に譲るが、本節においてまず装置の概要についてまとめておく。

高圧噴霧試験装置の主な仕様を表1に、概観写真を図1に、装置主要部の概要図を図2に示す。その他、付録

表1 高圧噴霧試験装置仕様

噴射弁入口空気圧力	最大1MPa
噴射弁入口空気温度	300K (常温)
噴射弁空気流量	最大1.2kg/s (0.8MPa時)
供試液体	灯油、精製水 等
適用可能な 光学計測手法	・各種写真撮影 ・レーザシート法 (Mie散乱) ・位相ドップラ法 ・レーザ回折法及び CTレーザ回折法 ・干渉画像法 等
光学計測可能範囲*1	噴射弁下0~250mm 半径方向スパン±64mm
観測窓有効径	最大φ200mm*2
トラバース機構	水平方向*3: 2軸トラバース装置 可動範囲:400mm 鉛直方向*4: 装置本体付属 可動範囲:250mm 回転方向*4: 装置本体付属 可動範囲:180deg.

*1 上記範囲は目安であり、噴射弁取付方法や利用する計測法に依存する。

*2 後述の噴霧付着防止機構を装着した場合には鉛直方向の視野は50mm幅に制限される。

*3 計測装置を噴射弁に対してトラバース移動。

*4 噴射弁を計測装置に対してトラバース移動。



図1 高圧噴霧試験装置概観写真

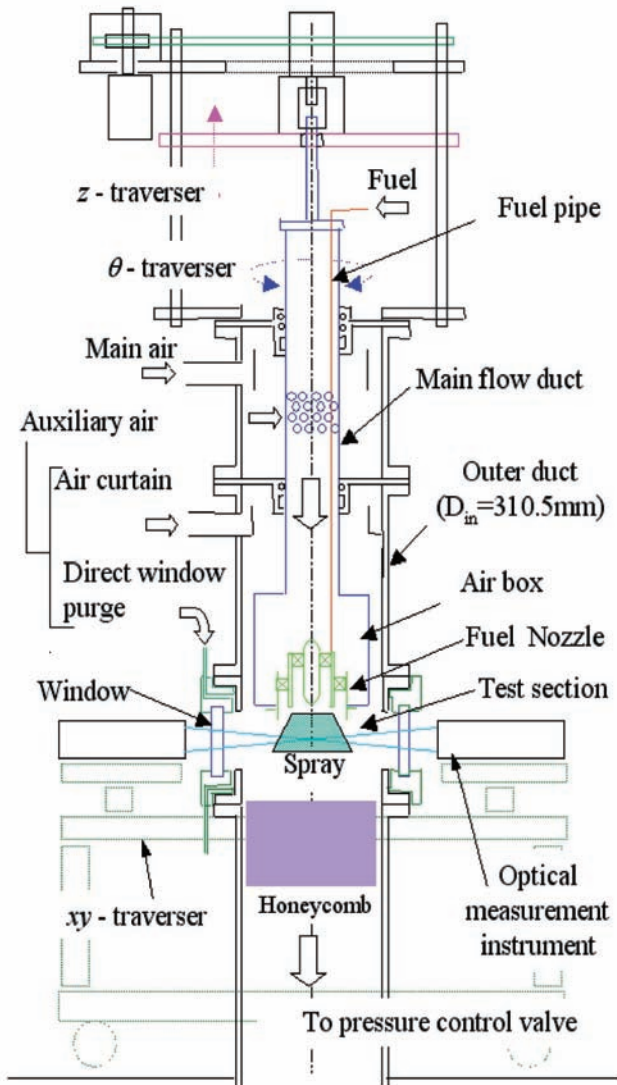


図2 高圧噴霧試験装置主要部概要図

Aの関連図面もあわせて参照されたい。

まず基本仕様についてであるが、仕様表に示す通り、燃料噴射弁へ流入する主流空気全圧(以下入口圧力)は、最大1MPaまで昇圧可能である。空気温度については、特に温度制御機構は付属していないが、300K(±10K程度)の常温で安定して試験が可能である。主流空気流量については、入口圧力0.8MPa時で最大1.2kg/sであり、大量の噴射弁空気流量が必要となる希薄予混合予蒸発方式の次世代型燃料噴射弁の評価試験も可能である。尚、最大空気流量は空気源の最大圧力(1MPa)の他に、配管の圧力損失にも制限されるため、入口圧力条件並びに後述の補助空気の必要量によって異なる。各入口圧力条件において試験可能な最大空気流量を図3に示す。

次に装置の概要を空気の流れに沿って説明する。

まず図2の装置上部において、主流空気(Main air)は装置側方から流入し、中心部の主流空気鉛直配管

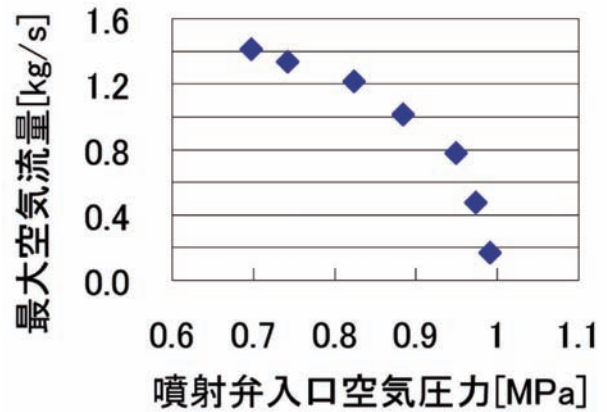


図3 噴射弁入口空気圧力と最大空気流量の関係

(Main flow duct, 内径87.6mm), 空気静定用のエアボックス(Air box, 内径278.5mm)を通して噴射弁から測定部(Test section, 内径310.5mm)へと噴射される。一方、燃料等の供試液体については、主流空気鉛直配管上部から燃料配管(Fuel pipe)により噴射弁まで導入され、測定部に噴霧を形成する。

測定部は耐圧1MPa以上の大型計測窓を備え(有効径最大φ200mm)、様々な照明方法による噴霧観察・撮影やレーザーシートによる噴霧断面像の可視化により噴霧の全体像を様々な角度から把握できる。また、噴霧計測で頻繁に利用される位相ドップラ法^(7,8)の他に、レーザ回折法^(9,10)を利用したトモグラフィ^(11,12)による噴霧断面診断、改良型レーザ干渉画像法⁽¹³⁾による面的粒径速度同時測定等、様々な噴霧光学測定を可能とするように設計に配慮がなされている。トラバースが必要な光学測定については、2軸トラバース装置による光学測定装置の水平面内トラバース機構(x,y)、及び噴射弁と一体で移動する主流空気鉛直配管・エアボックスの上下・回転トラバース機構(z,θ)によりトラバースを行う。

光学測定の際には、計測窓への噴霧の付着を防止することが重要である。このため、本装置には2つの補助空気流路が設けられており(Auxiliary air for air curtain and for direct window purge)、噴霧の状態に応じて適宜補助空気量を調節することで、噴霧への影響を最小限に押さえながら計測窓周辺の液滴を排除し、長時間の噴霧観察や光学計測を可能とするように配慮されている。

測定部通過後、気流並びに噴霧液滴は後流のハニカム、サイクロン式ミストセパレータ(後述)等の気液分離機構により分離され、燃料等の小液滴が気流と共に外気へ放出されるのを防いでいる。気液分離後、気流は下流の圧力調整弁(後述)を経て煙突に導かれ、大気に放出される。一方、液体は装置本体下部並びにミストセパレータのドレインから圧送によりドレインタンクへと

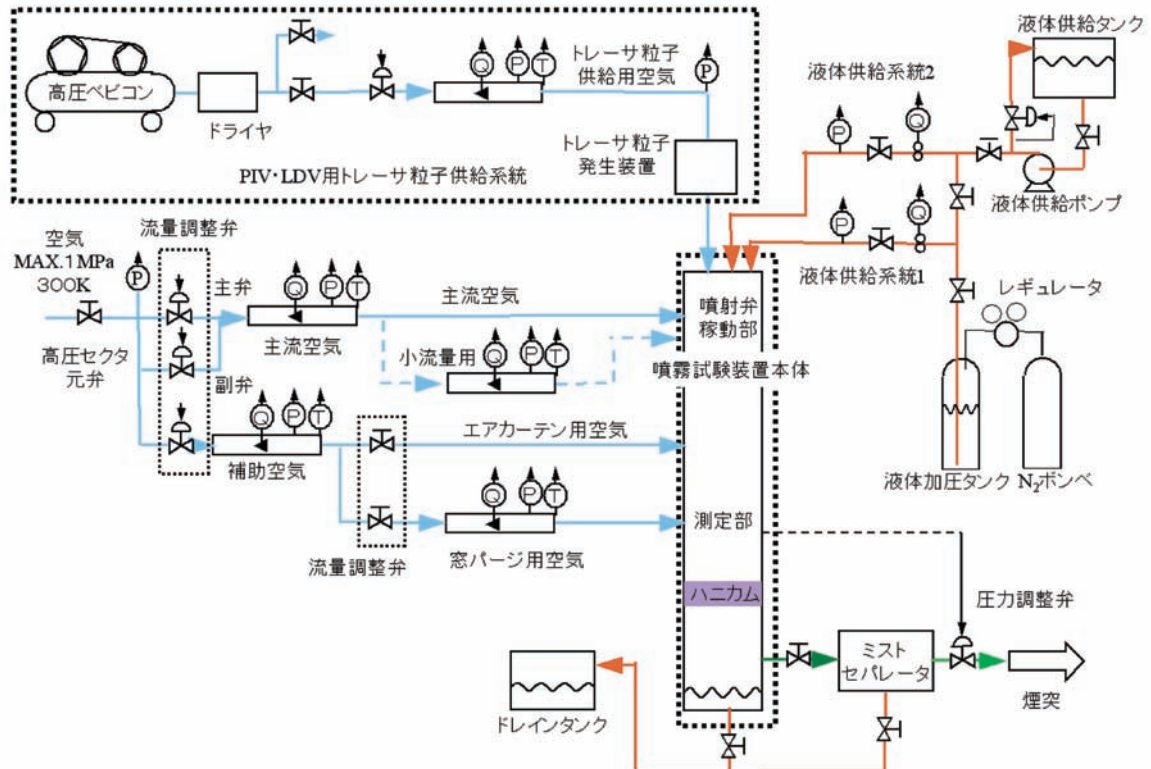


図4 高圧噴霧試験装置空気・液体系統概要図

運ばれて回収される。

3. 高圧噴霧試験装置の詳細

以下高圧噴霧試験装置の詳細について記述する。

3.1 空気・液体系統

本節では高圧噴霧試験装置の空気・液体系統について述べる。空気・液体系統概要図を図4に示す。

3.1.1 空気源及び上流空気配管

はじめに空気系統について述べる。空気源はJAXA航空宇宙技術研究センターの航空推進2号館にある連続ラム燃焼試験用空気圧縮機C号機⁽¹⁴⁾ (最大吐出圧力1MPa, 最大空気流量2.75kg/s) を主に利用している (図5, 6)。この他0.7MPaまでの試験であれば同A, B号機も利用可能であり, また現在航空推進1号館からの大気圧ライン, 並びに航空推進7号館からの1MPaラインを合わせて増設中であるが, 以下では空気圧縮機C号機利用の場合について説明する。空気源から送られた空気は屋外の配管を通り, 高圧噴霧試験装置のある高圧セクタ実験棟へと導かれる (図7)。上流の高圧セクタ元弁を通過した空気は高圧セクタ実験棟の地下へ導かれ, ここで2系統に別れ, 1系統は噴射弁に流入する主流空気, もう1系統は観測窓への噴霧液滴の付着を防ぐための補助空気として利用される。各空気系統には, 電動式



図5 航空推進2号館



図6 連続ラム燃焼試験用空気圧縮機C号機

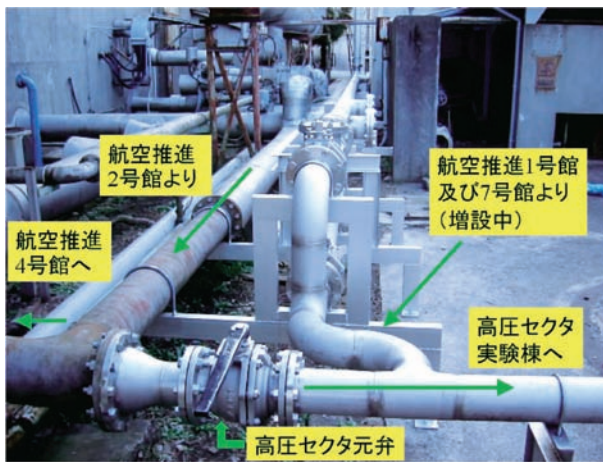


図7 高圧セクタ実験棟及び実験棟への配管導入

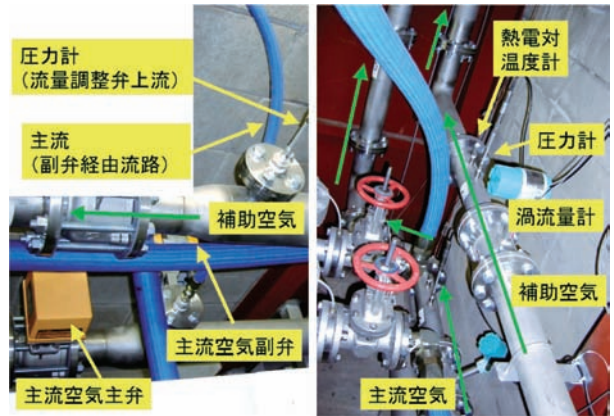
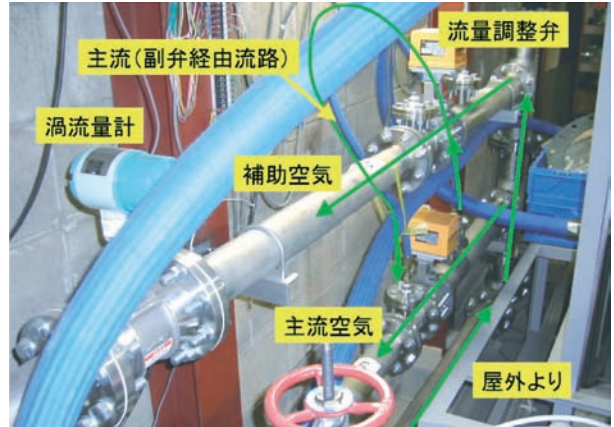


図8 高圧セクタ実験棟地下上流側配管系

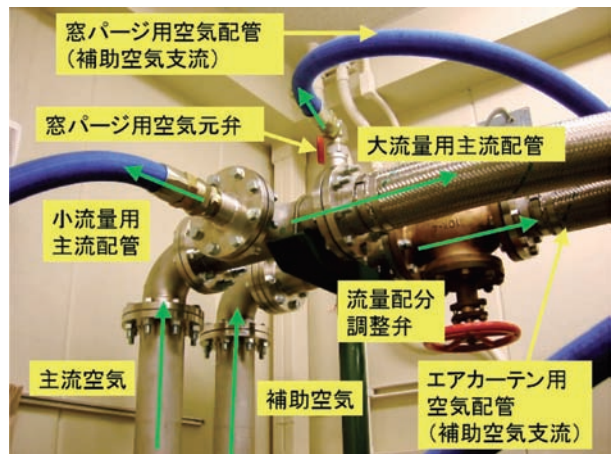


図9 高圧セクタ実験棟1階上流側配管系分岐点

の流量調整弁の後方に渦流量計及び圧力計、温度計(熱電対)が設けられ、これらの計測により各質量流量が求められる。尚、微細な調整が必要な主流空気については、主弁の他にCv値の小さい副弁が並列に設けられ、流量調整を容易にしている(図8)。この他、空気源から高圧セクタ実験棟までの配管圧力損失モニタ用として、補助空気系統側の流量調整弁上流に圧力計を設けている。

その後両空気系統の配管は同棟1階の配管分岐点へと

導かれる(図9)。この分岐点より先、主流空気は流量によって大流量用あるいは小流量用(図10参照)のどちらか一方の配管を通り装置上段から装置本体へと流入する(図11)。どちらの配管を利用するかは試験条件により事前に決定し、試験の際には通常一方の配管のみを接続した状態で使用する。小流量用主流配管を利用した場合には配管が比較的細いため大流量を流すことはできないが、小流量用流量計が別途取り付けられている



図10 小流量用主流配管及び窓パージ用空気配管



図11 主流及びエアカーテン導入部

ので、上流の主流用流量計では精度の確保できない小流量条件の試験においても空気流量を正確に計測できる利点がある。尚、上流の流量計と小流量用流量計のどちらの計測値をデータとして利用するかは、モニタ用ソフトウェア（後述）上で選択することができる。

一方、補助空気についても、分岐点においてさらに2系統に分けられた後、1系統は測定部にエアカーテン（噴霧を円管状に包む流れ）を形成するために装置中段から導入され（図11）、もう1系統はマニホールドで更に分岐された後、窓パージ用空気として各観測窓へ送られる（図12、13）。エアカーテン用空気と窓パージ用空気の流量配分、また窓パージ用空気の各観測窓間の流量配分は、図9、12に示す各流量配分調整弁の開度により調整する。エアカーテン用空気流量は、上流の流量計（図4、8）により計測される補助空気流量から図10下の窓パージ用空気配管に接続された流量計により計測される窓パージ用空気流量を差し引くことで求められる。各観測窓へ流れる個別の空気流量については現時点では計測していないが、後述の窓パージ流路出口流速のバランスが各観測窓間で著しく崩れないように流量配分調整弁で粗調整を行う。尚、特に有効開口面積の大きな噴射弁の場合、補助空気量を節約して噴射弁へまわす

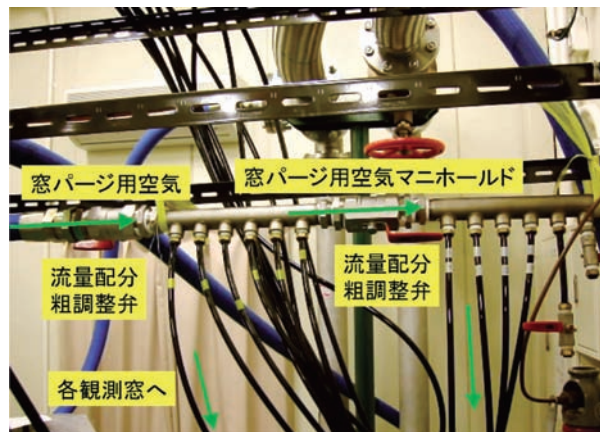


図12 窓パージ用空気系統：マニホールド部



図13 窓パージ用空気系統：観測窓導入部

空気量を増やすことが必要となるので、例えば計4箇所装着されている観測窓のうち実際に観察・計測に利用する窓が2箇所の場合には、この2箇所だけに窓パージ用空気を供給するようにしている。また、窓パージ用空気の観測窓導入部には、窓の周方向に8または12箇所（窓の有効径による）の導入口を設けることで、空気が周方向に様に導入されるよう配慮がなされているが、後述する3.2.3節の噴霧付着防止機構を利用する場合には、必ずしも窓近傍の窓パージ用空気流に高い周方向一様性が要求されないため、この場合には、図13の例のように未使用の導入口同士を接続して、導入用空気配管の数を4または6箇所減らして使用している。

尚、図11に示すように、主流空気とエアカーテンの装置本体への導入部は、水平方向に90度おきにそれぞれ4箇所ずつ装備されている。先述の通り、現状では各1箇所ずつのみ利用しているが、空気流量や利用する配管の太さ、気流の一様性に対する要求度、配管作業にかかる時間などを総合的に考慮して、実験ごとにどの導入口を利用するか適宜変更することも可能である。

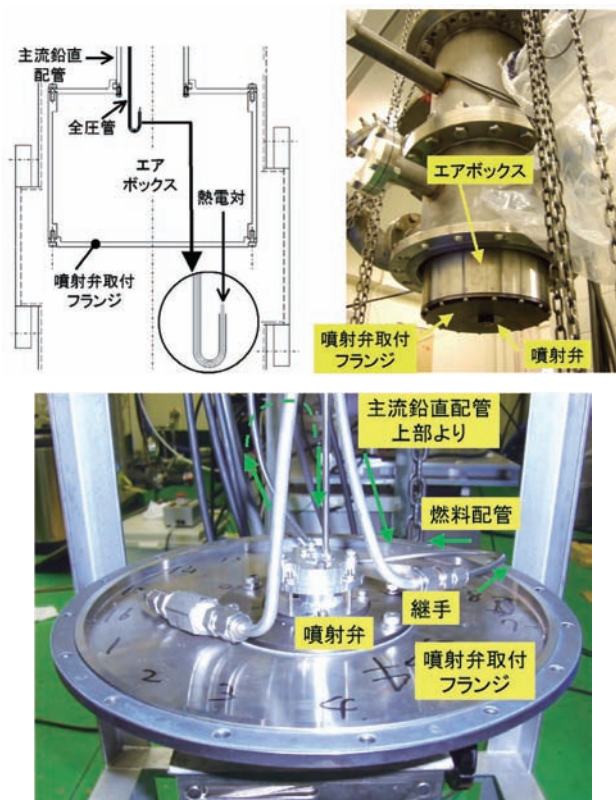


図14 エアボックス及び噴射弁取付フランジ

この他、図4上部に示すように、将来のPIV法⁽¹⁵⁾ (Particle Image Velocimetry) やLDV法^(8,16) (Laser Doppler Velocimetry) の利用を想定して、トレーサ粒子を主流空気に混入するための空気系統の増設が可能な設計となっている。この空気系統は液体供給系統と同じく、主流空気鉛直配管上部のポートから導入する構造となっている (3.1.6節の図24参照)。

3.1.2 エアボックス及び測定部周辺

噴射弁を装着するエアボックスの構造及び写真を図14に示す。エアボックスには全圧管が設置され、これにより噴射弁上流全圧(入口圧力)が計測される。また、温度計(熱電対)がこの全圧管内を通してエアボックスまで導入され、これにより噴射弁上流温度(入口温度)を計測している。いずれも、噴射弁を回転する際に邪魔にならないように、主流鉛直配管上部のポート (3.1.6節の図24参照) から装置外部へ取り出される。一方、噴射弁に燃料等の供試液体を導入するための配管も同じくこの主流鉛直配管上部ポートから主流鉛直配管内を通してエアボックスに導かれ、エアボックス内で配管継手により噴射弁と結合する(図14)。エアボックス下面の噴射弁取付フランジは脱着可能となっており、噴射弁装着の際にはこのフランジを取り外して噴射弁を装着した後、燃料配管を結合してから、再度エアボッ

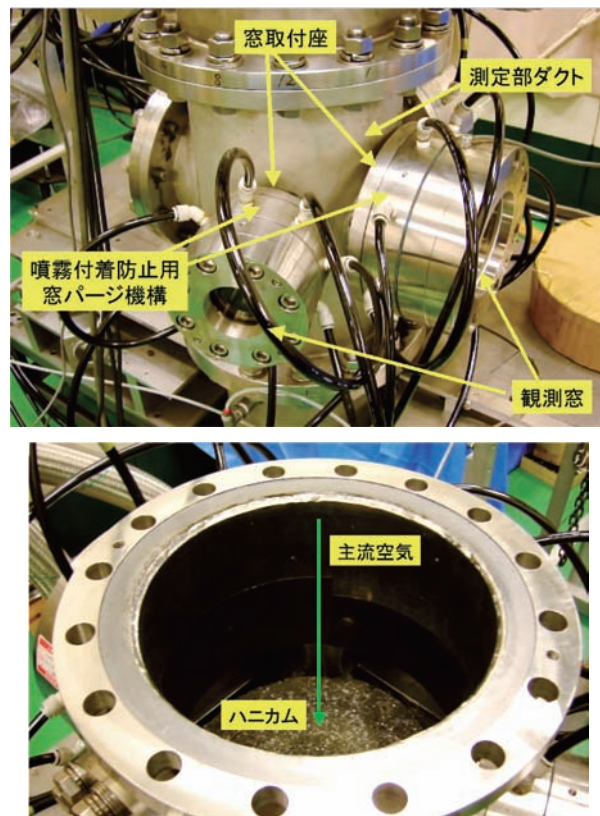


図15 測定部ダクト

クスに装着する。新しい噴射弁で試験を行う場合には、この噴射弁取付フランジを新規に製作するか、既存のものに取り付けるアダプタを製作することになる。噴射弁取付フランジの主要寸法を付録Bに、噴射弁の取付手順を付録Cに示す。

測定部はフランジ面間500mm、内径310.5mmのフランジ付ステンレス製鋼管の側面に複数の窓取付座を備えた構造となっており、ここに観測窓を取り付けて各種撮影や光学計測ができるようになっている(図15)。この測定部は、計測用途に応じて脱着可能であり、現在のところ窓の取付位置が異なる2種類の測定部ダクトが用意されている。これらの測定部ダクトの下部にはハニカムが装着可能であり、測定部ダクト内の再循環領域に起因する噴霧の巻き上りを防ぐ目的(3.2.3節参照)で適宜装着して使用される。また、先述の通り、観測窓部には噴霧付着防止用の窓パージ機構が装着されている。測定部については、3.2節においてより詳細に記述する。

3.1.3 測定部下流部及び気液分離機構

測定部ダクトの直下流には、測定部ダクトと同じ規格の後流ダクトが接続されている(図16)。このダクトは測定部ダクトと同様脱着可能であり、将来の噴霧計測系の拡張に対応可能な構造となっている。現在は側面に計



図16 後流ダクト

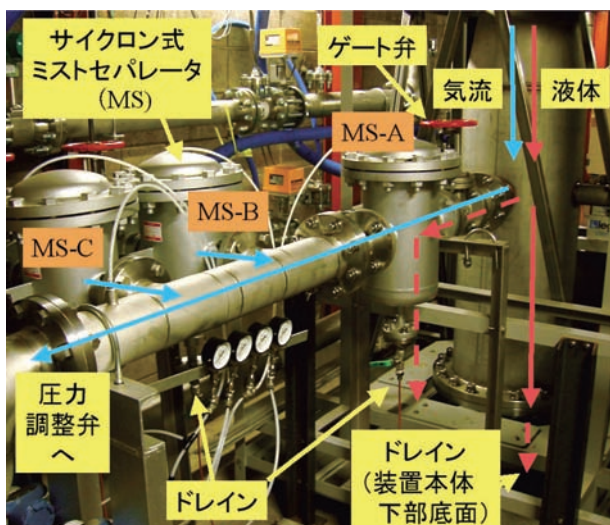
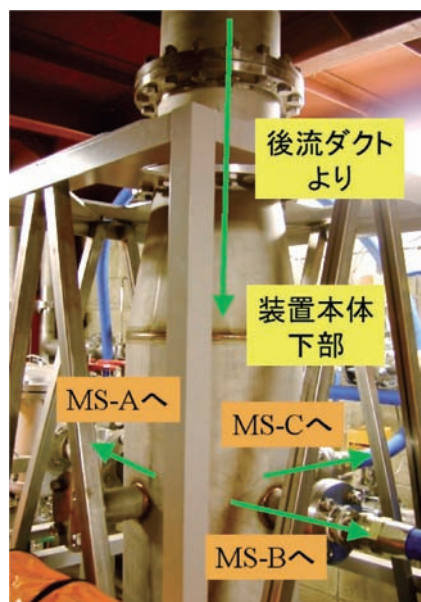


図17 噴霧試験装置本体下部及び気液分離機構



図18 ドレインタンク

測用ポートとして配管用テーパねじ付きソケットが4箇所設けられたものを利用しており、このうちの1つのポートを利用して測定部の雰囲気圧を計測している。

後流ダクトを過ぎると、配管は再び高压セクタ実験棟の地下へ導かれ、ここで空気流は噴霧試験装置本体下部の側面から出る複数の配管に分けられる (図17)。この本体下部側面には計4つの配管系統が接続可能であるが、現在はそのうちの3つを利用している。分岐された各配管にはゲート弁とサイクロン式のミストセパレータ (MS-A, B, C) が設けられている。一般に、ミストセパレータは、液体捕集効率向上の観点から、できるだけ速い気流速度で用いることが望ましい。一方で、本装置で用いているミストセパレータの場合、強度上の制限から、許容される入口配管流速は最大25m/sである。従って、試験の際には、あらかじめ想定される空気流量に応じて各配管のゲート弁を開閉することで、利用する配管とミストセパレータの数を調整しておき、これによりミストセパレータ性能が最大限発揮できるような条件で使用している。これらのミストセパレータを通過した空気流は最終的に後流にある圧力調整弁手前で再度合流する。

一方、供試液体については、まず、ハンカムで一度捕集されて大液滴となったもの、並びに壁面に付着して液膜状に装置本体下部内壁を伝うもの等は、最終的に本体下部底面に溜まり、ドレインを介してドレインタンク (図18) へ圧送されて回収される。一方、比較的小さな液滴は、気流に乗って下流へと流れるが、ミストセパレータ部にて回収され、ミストセパレータドレインからドレインタンクへと圧送される。

3.1.4 圧力調整弁

ミストセパレータ後流には、空気圧駆動式の圧力調整



図19 圧力調整弁

弁が設けられており、これにより測定部雰囲気圧力の調整を行う。現在、圧力調整弁の開度は装置運転担当者が直接指示値を与えているが、後述の通り本装置の制御システムは圧力調整弁開度のフィードバック自動制御機能が備えられているので、今後制御定数の最適化を行えば自動制御も可能である（図19）。

3.1.5 排気用煙突

圧力調整弁を通過して大気圧まで膨張減圧された空気は、最終的に配管により航空推進3号館の排気煙突に合流し、大気へと排気される（図20）。

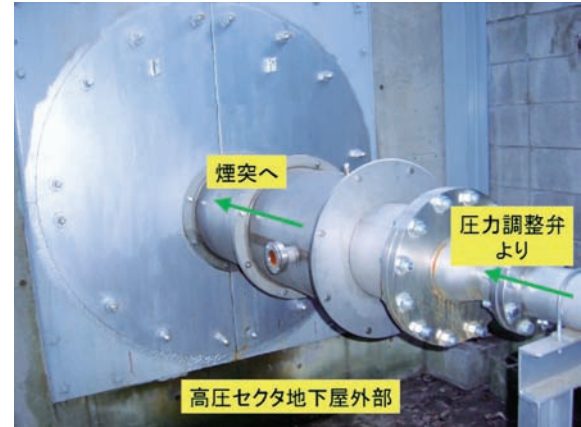


図20 排気用煙突

3.1.6 液体供給系統

現在本装置では主に灯油燃料、もしくは精製水を供試液体とした試験を行っている。装置への液体供給系統は2系統設けられている。これは、パイロット噴射弁とメイン噴射弁の2つの燃料系統を持つステージング式燃料噴射弁の試験において、パイロット・メインを同時に作動させた場合の噴霧状態の観察・計測を可能とするため、あるいは一方を灯油燃料系統、一方を水系統として利用することで供試液体の変更を容易にするためである。現状では主に後者の目的での利用が多い。

液体の供給は、窒素ガス圧送方式または低脈動ポンプを利用して行っている。図4において、液体供給系統1については窒素ガス圧送方式、低脈動ポンプの両方式が、液体供給系統2においては低脈動ポンプによる供給が可能となっている。窒素ガスによる圧送供給（図21）では、液体加圧タンク容量が現状では40lであるため、タンクへの液体充填を比較的頻繁に行う必要があり、長時間の連続試験に難があるが、液体の変更が容易であり、また短時間であれば大流量（30cc/s以上）の試験も可能である。一方、低脈動ポンプによる供給の場合（図22）

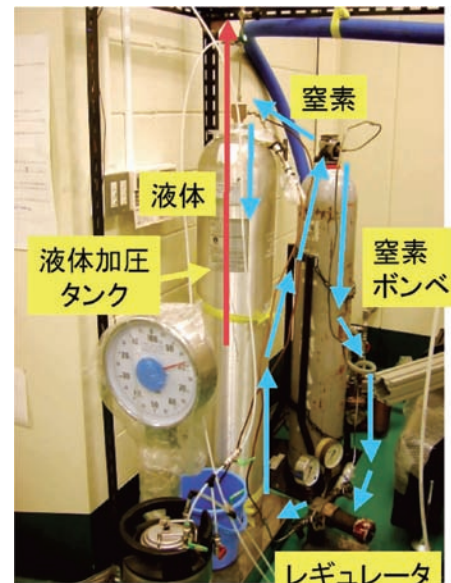


図21 窒素ガス圧送式燃料供給系統

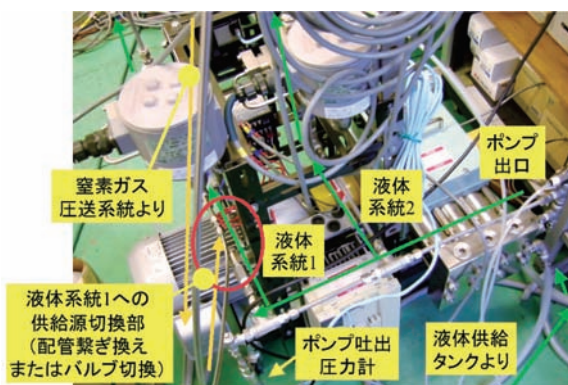
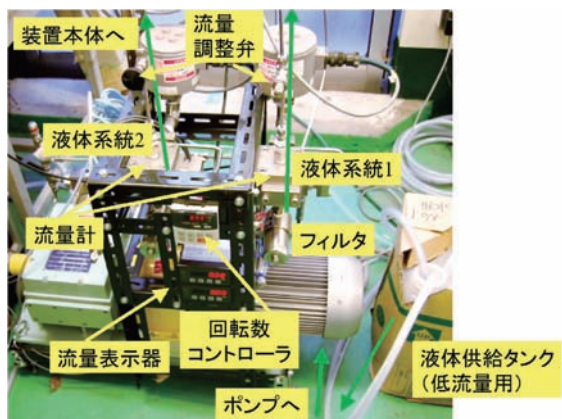


図22 低脈動ポンプによる燃料供給系統

は、大流量の試験の場合は100ℓ入りの液体貯蔵タンク、低流量の場合は20ℓ入りの小型容器等に液体を満たし、ここからポンプにより供給する。水で利用する場合は、精製水製造装置（図23）を用いて、水道水をフィルタ、イオン交換樹脂を通して精製水としたものを利用し、噴射弁の液体噴射口などの小開口部が各種成分の堆積により汚染されないように配慮している。ポンプ方式では液体の連続供給が可能であるが、現状利用しているポンプ性能の制限により、本系統の利用は約30cc/s以下の流量で試験する場合に限られる。現在は、窒素ガス圧送系統を灯油燃料を利用した試験に、低脈動ポンプによる供給系統を水を利用した試験に利用しているが、灯油燃料を利用した試験の頻度が高いため、今後はポンプの増強等により長時間大流量の灯油燃料による試験が行えるよう改良する予定である。

図22には液体供給系統の概要が合わせて示されている。この写真の例では、液体システム1が窒素ガス圧送系統、液体システム2が低脈動ポンプ系統となっているが、先述の通り双方を低脈動ポンプ系統とすることも可能である。各系統にはフィルタ、流量計、圧力計が設けられており、これらを通じた液体は金属配管により先述の主流鉛直配管上部（図24）まで導かれ、ここから主流鉛直配管内の燃料配管を通りエアボックスに導かれる。配管は



図23 精製水製造装置

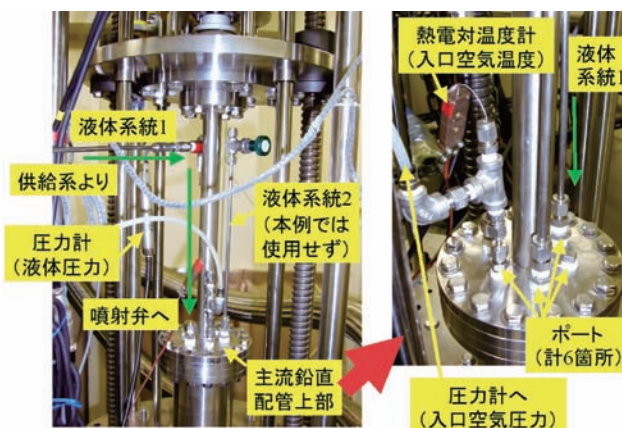


図24 主流鉛直配管上部

エアボックス内で噴射弁側の燃料供給部と継手により結合され（図14）、これにより噴射弁へ液体が供給される。

3.2 測定部及び観測窓の噴霧付着防止機構

本節では、3.1.2節で記述した測定部周辺の各要素についてより詳しく記述する。また、本装置が備える観測窓の噴霧付着防止機構についても詳述する。

3.2.1 測定部ダクト

3.1.2節で記述した通り、現状では測定部ダクトは2種類（測定部ダクト1、2）が用意されており、観察・計測の手法や目的に応じて使い分けている。

測定部ダクト1の概観については3.1.2節の図15を参照されたい。本ダクトの上面図を図25に示す。これらの図は、窓パージ空気導入部並びに観測窓が装着された状態を示しており、通常はこれに加えて窓パージ流路（3.2.3節）を取り付けた状態で使用する。測定部ダクト1は、様々な照明方法による噴霧撮影（影画像法に

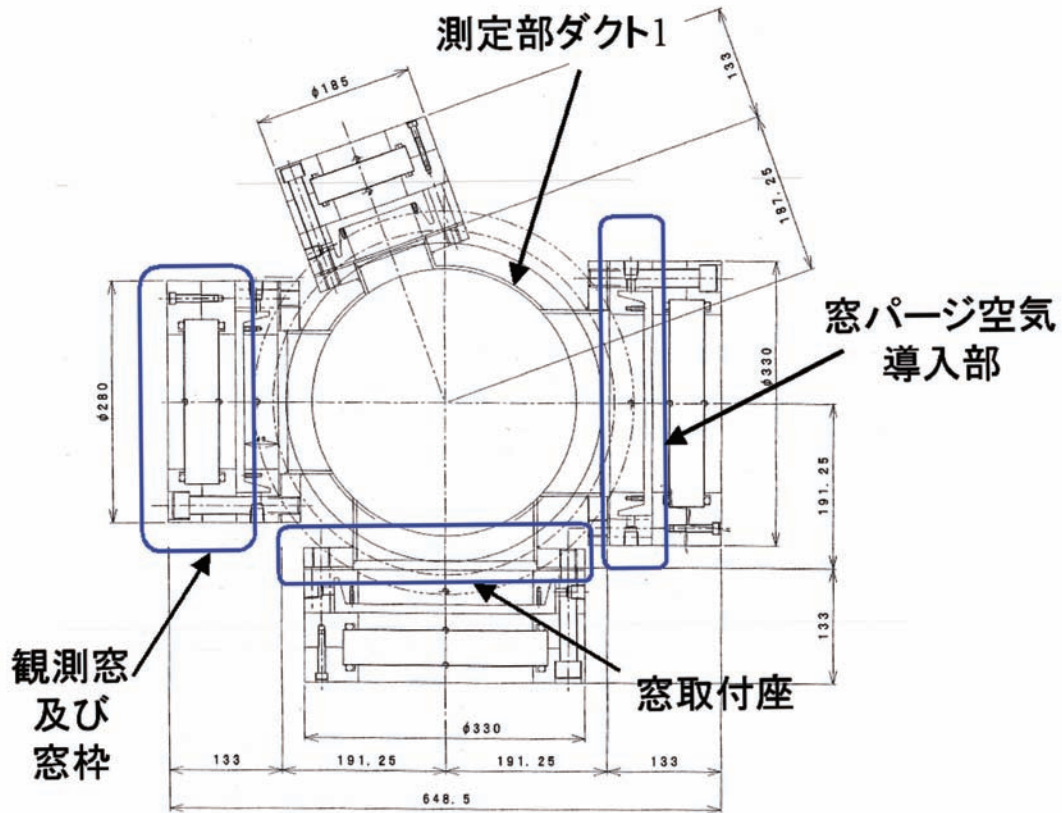


図25 測定部ダクト1

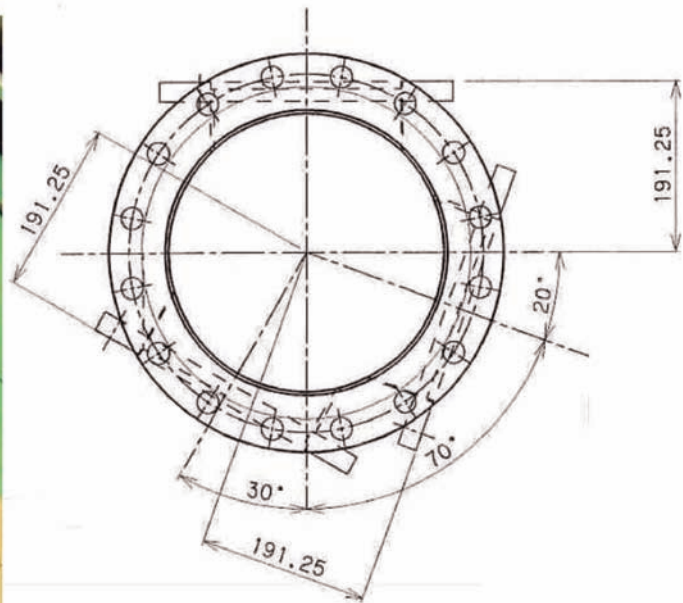
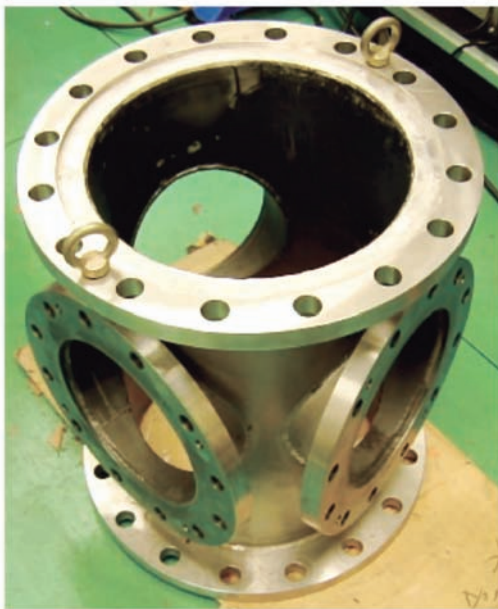


図26 測定部ダクト2

よる粒径測定含む), 側方入射のレーザシートによる噴霧断面像撮影の他に, レーザ回折法 (CT法含む), 干渉画像法などの測定法を適用する際に用いる。図25に示すような配置で, 有効径 $\phi 70\text{mm}$ の窓が1つ, 有効径 $\phi 150\text{mm}$ の窓が1つ, 有効径 $\phi 200\text{mm}$ の窓が2つの計4つ

の観測窓が装着可能である。通常これらのうちの2つのみを利用する機会が多いので, その際には利用しない窓取付座にブラインドフランジを取り付けて使用する。

測定部ダクト2の概観写真及び上面図を図26に示す。本図は窓パージ空気導入部並びに観測窓が装着されて



図27 径変換フランジ

いないダクト単体での状態の図である。測定部ダクト2は、位相ドップラ法による計測を目的として製作したダクトであるが、干渉画像法にも利用可能である。窓取付座は有効径 $\phi 200\text{mm}$ 用のものが3箇所用意されており、形状は測定部ダクト1と共通である。通常はこれらのうち2箇所を利用して計測を行うが、3箇所利用する必要がある場合には、現状では利用可能な有効径 $\phi 200\text{mm}$ の窓が2セットであるため、1箇所については窓取付座に径変換フランジ（図27）を取り付けることで、有効径 $\phi 150\text{mm}$ 用の窓パージ空気導入部及び観測窓を装着できるようになっている。

尚、窓パージ空気導入部並びに観測窓を装着した場合の測定部中心から窓枠外側までの距離は約325mmであり、上記の径変換フランジを装着した場合にはさらに40mm程度増えて約365mmとなる。従って、光学測定を行う際には、光学系の作動距離が上記の値より長いものを用いる必要がある。

3.2.2 観測窓

現在用意されている観測窓は、有効径 $\phi 70\text{mm}$ 厚み30mmの窓が1つ、有効径 $\phi 150\text{mm}$ 厚み40mmの窓が2つ、有効径 $\phi 200\text{mm}$ 厚み40mmの窓が2つの計5つの石英窓であり、これらはステンレス製の窓枠に収められている（図28）。有効径 $\phi 150\text{mm}$ 、200mmの窓のうち各1つずつは可視広帯域反射防止コーティングが両表面に施されており、特にレーザー回折法を利用する場合にはこのコーティング付き窓の利用が必須である。残りの観測窓については、紫外レーザーの利用等、将来適用する可能性のある計測法に対して柔軟に対応できるように、現時点ではコーティング等は施されていない。

有効径 $\phi 200\text{mm}$ の窓については、計測に必要な半径方向の視野を確保しつつ、装置内外の差圧による窓への荷重を低減する目的で、上下方向の有効視野が140mmの長円形状の窓枠を使用している。通常、観察・計測は

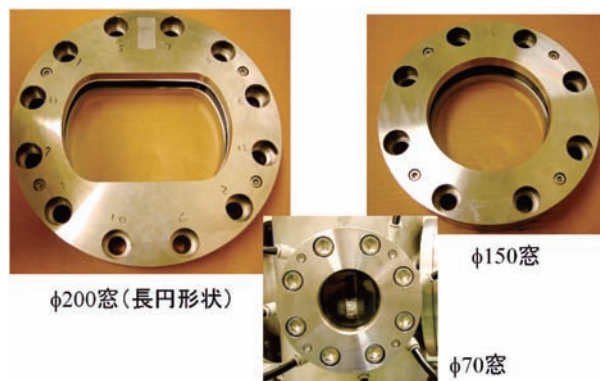


図28 観測窓及び窓枠

窓パージ流路（3.2.3節）を取り付けた状態で行うため、有効径 $\phi 150\text{mm}$ ならびに $\phi 200\text{mm}$ の窓の場合には上下方向視野は50mmに制限されることになるが、ほとんどの目的では上記の視野が確保されれば十分な観察・計測が可能である。

3.2.3 観測窓への噴霧付着防止機構

本節では、本装置で利用している観測窓への噴霧付着防止機構について、問題の背景や付着防止コンセプトも含めて詳述する。

高圧雰囲気下の試験等、窓を介した観察・計測が必要な噴霧試験の場合、観測窓への噴霧液滴の付着は最も解決の難しい問題のひとつである。この問題は、実際の航空エンジンの高負荷運転条件を模擬した試験を行う場合にはさらに顕著になる。即ち、高負荷条件では燃料流量が増加すると同時に、空気密度の上昇により微粒化が向上するので、液滴個数が飛躍的に増加する。さらに微粒化向上の効果は液滴の気流への追随性をも向上させるため、結果として、大量の小液滴が測定部の逆流領域や低速領域に長時間滞留しやすくなる（図29）。このため、液滴の観測窓への付着量もあわせて増加し、観察・計測の妨げとなる。また、このような小液滴の一部は測定部の噴射弁取付フランジ等の壁面に付着し、表面付近の流れにより集まりながらやがて大きな液滴となり、壁表面から吹き飛ばされる。このような液滴は非常に大きな運動量を有するため、窓への付着防止が特に困難である。この他、高圧下では少量であるが、噴射弁にて生成される中～大サイズの気流の影響を受けにくい液滴が、初期に得た運動量を保持したまま気流を貫通して窓に付着するケースもある。

噴霧の窓への付着を防ぐ最も単純な対策は、観測窓を噴霧から離れた位置に設置することである。但し、多くの粒径測定装置について、その標準的な作動距離は500mm程度以下であり、しかも作動距離が大きくな

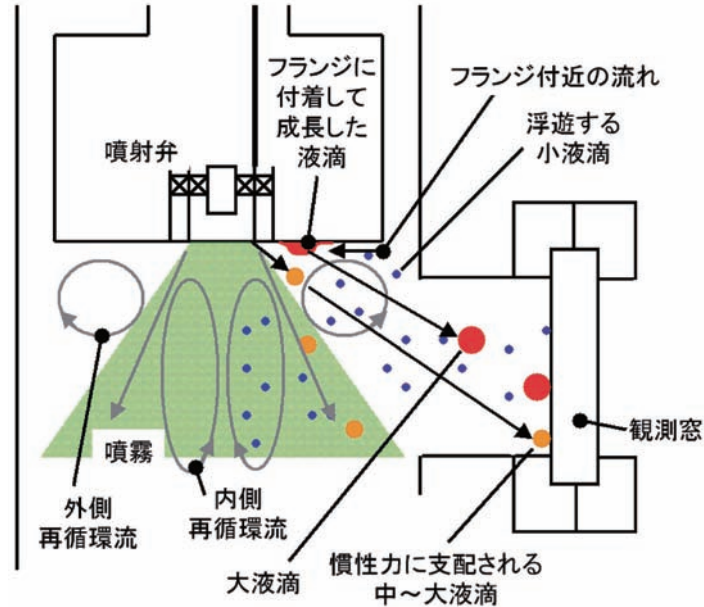


図29 観測窓への噴霧液滴の付着

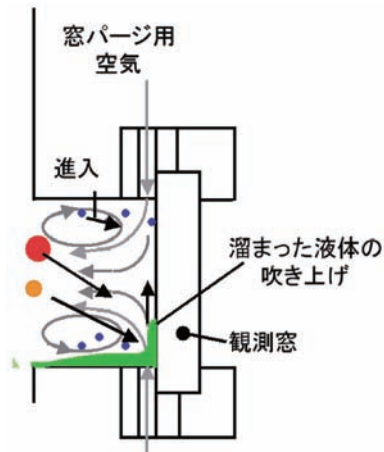


図30 窓パージ空気の利用による観測窓への噴霧付着防止機構

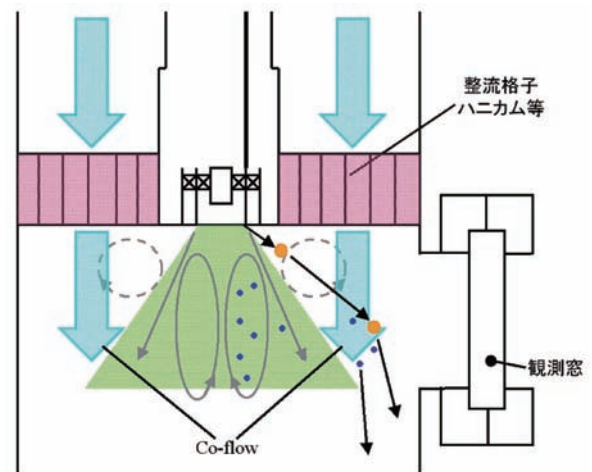


図31 Co-flowの利用による観測窓への噴霧付着防止機構

るほど小さい粒径が計測できなくなる傾向にあるため、観測窓を噴霧から大きく離すことはできない。

そこでよく試行されるのが、補助空気を利用した方法であり、窓付近に空気の流れを作って液滴の付着を防ぐ方法(図30)、あるいは測定部の噴射弁まわりに低速大流量のco-flow(噴射弁と同じ方向の気流)を流す方法(図31)が多く用いられる。これらの気流による方法は、観測視野を妨げないという決定的な利点があるが、概して空気抵抗に対して慣性力の効果が卓越する大液滴の付着が防げないことが多い。また、前者の場合は剥離領域に液滴を巻き込んで、かえって付着を助長することがあり、窓全周から気流を導入した場合には、観測窓付近に溜まった液体を窓面に向かって吹き上げるなどの

問題がある(図30)。窓パージ空気の導入方法については、窓の外周付近の形状を工夫して剥離流を抑制する方法⁽¹⁷⁾、吸引機構を併用するもの⁽¹⁸⁾、導入空気に旋回をかけて遠心力の効果により粒子を壁に押しやり、かつ絞り流路により窓から測定部内側へ向かう順流を保つもの⁽¹⁹⁾等様々な応用手段が挙げられるが、これらが有効に機能するのは概して小口径の窓、あるいは小粒子の場合のみである。一方後者の場合^(20,21)、十分な効果を得るには径の大きな測定部ダクトが必要となり、大流量の空気供給システムが必要となる(図31)。大量の噴射弁空気流量が必要となる希薄予混合予蒸発方式の次世代型燃料噴射弁の試験を行う場合、現状の装置仕様では補助空気流量を増やすと噴射弁空気流量が不足するため、この方式

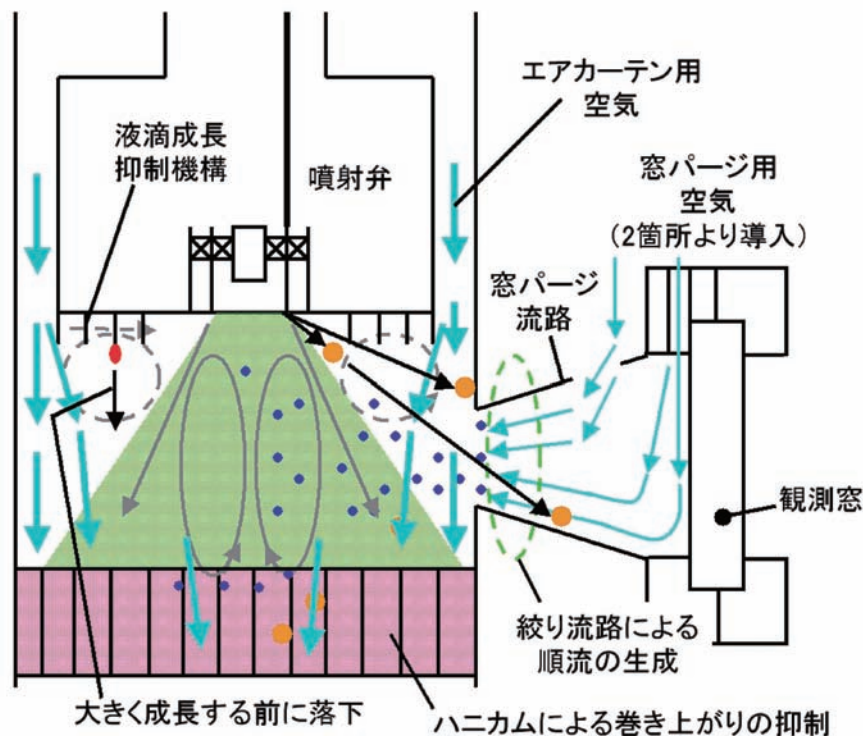


図32 高圧噴霧試験装置に適用した観測窓への噴霧付着防止機構の概念図

の導入は困難である。また、いずれの方法も付着を防ごうとして無理に気流の流速を上げれば、噴霧自体を乱すことになる。

本噴霧試験装置の開発にあたっては、以上のような背景を踏まえ、噴霧液滴の観測窓への付着防止用の補助空気をできる限り少なくし、観測窓の噴霧からの距離もできる限り短い状態で、噴霧に大きな影響を与えることなく計測窓周辺の液滴を排除し、長時間の噴霧観察や光学計測を可能とするような噴霧付着防止機構の開発を合わせて行った。上記の観点を総合して様々な試行を行った結果、図32に示すようなコンセプトに基づく機構により、噴霧の付着防止が可能となった。以下、そのコンセプトについて記述する。

図32において、まず窓パージ用の空気系統は、窓の極近傍から流入するものと、鉛直方向のみ絞られた絞り流路の途中の壁面から流入する2系統とし、これらの合流する領域から測定部ダクト内壁までの区間で、流れを加速しながら順流を保つ。このコンセプトの場合、合流領域より窓側の順流が保証されない領域に液滴を侵入させないことが理想である。また、万一液滴が侵入し、窓パージ流路の下壁に液滴が溜まった場合でも、液体を吹き上げて窓を汚さないように、下方からの空気導入は行わない。尚、絞り流路の採用は、噴射弁対称軸に対して大きな角度を持って飛行する中～大サイズの液滴の観測窓周辺への侵入を機械的に遮断する“ひさし 扉の効果”

を合わせ持っている。

次に、エアボックスの外側から流出するエアカーテン用空気(3.1.1節参照)を窓パージ空気と併用し、外側の再循環領域と干渉させ、巻き上がってくる液滴の窓パージ流路への進入を極力防ぐ。測定部ダクトにおける順流を安定した状態に保つため、これらの補助空気流量を適宜調整し、測定部ダクトへの総流入空気量が不足しないようにする。さらに、測定部ダクトの下部にハニカムを設け、これにより再循環渦に誘導される流れをある程度拘束して、一旦測定部下流へと抜けた液滴が再度戻ってくるのを防ぐ。

さらに、噴射弁取付フランジに突起状の尖った同心円状の部品(液滴成長抑制機構)を取り付け、外側再循環流に起因するフランジ面上の半径方向流れ、及びこれに起因する付着液滴の集合を防ぎ、液滴が過大に成長しない状態で突起先端からフランジを離れて落下するようにし、気流で対処できない慣性力の強い大きな液滴の生成を防ぐようにする。

以上の噴霧付着防止コンセプトに基づいて試作した実際の構造を図33に示す。試作の履歴上、窓パージ空気導入口は円形マニホールド状のものを用い(図34)、これに先述のコンセプトを実現するような横長の断面を持つ窓パージ流路(図35)を取り付け、さらに下方からの気流の流入をゴムシールにより防ぐ。ハニカムについては3.1.2節で記述した通りである。液滴成長抑

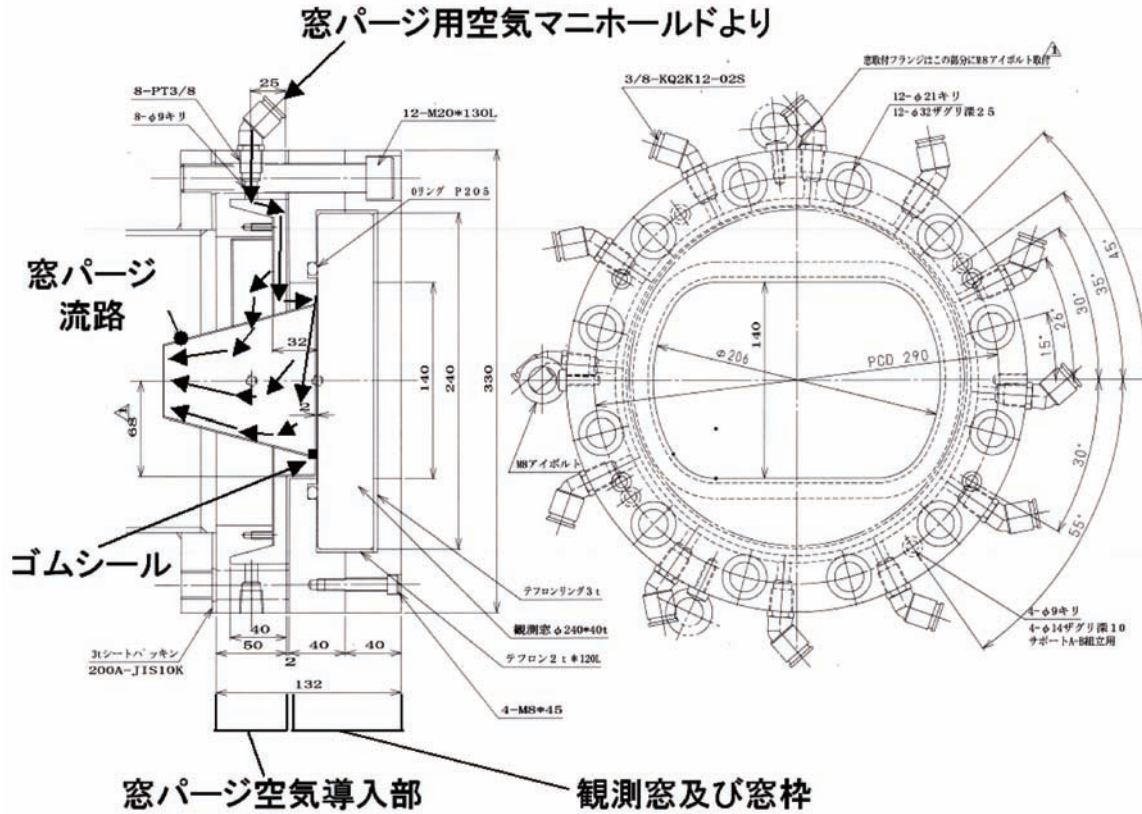


図33 観測窓噴霧付着防止機構構造図（有効径φ200mmの観測窓の例）



図34 窓パーズ空気導入部

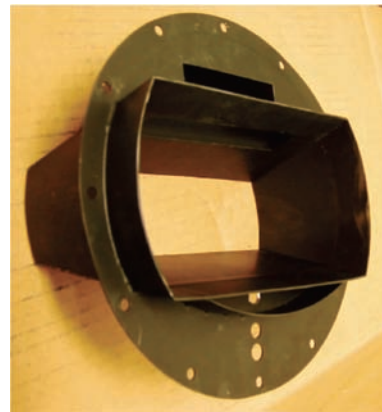


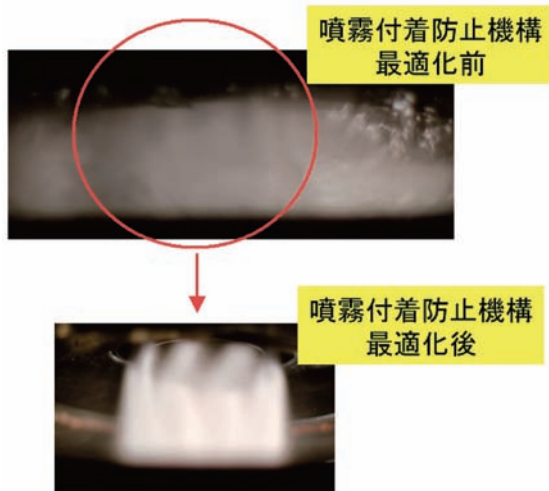
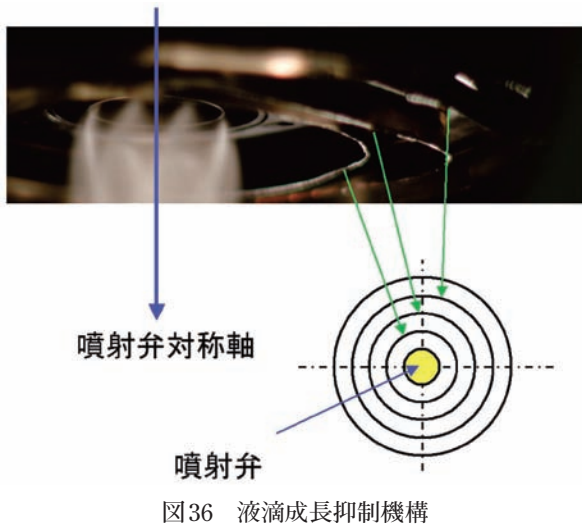
図35 窓パーズ流路

制機構は、幅5mm、厚み0.1mmのステンレス製の箔状の板をフランジに同心円状にスポット溶接したもの（図36）を用いた。尚、窓パーズ流路の形状は、表1に示す光学計測可能範囲において、光学計測機器の要求からくる有効fナンバー（5程度、集光角11.4度に相当）を十分確保できる形状となっている。

これらの噴霧付着防止機構の効果を示した写真を図37に示す。上の写真の例は噴霧付着防止機構を最適な状態に調整していない場合、下の写真の例はエアカーテンと窓パーズの空気量を調整し、噴霧付着防止機構を最適な状態とした場合であり、噴霧条件は同一である。後

述するCTレーザ回折法を適用する場合には、1断面の噴霧情報を取得するのに20分程度の時間を要するから、この間噴霧付着を防止する必要があるが、図37の試験例では噴霧像を30分以上に渡って鮮明な状態で観察することが可能であった。

この例のように、現在まで行ってきた試験においては、今回開発した噴霧付着防止機構はほとんどの場合について有効に機能することが示されている。しかしその効果は、噴射弁の設計やエアボックスと窓の鉛直位置の相対関係にも依存し、また試験目的によっては上記のコンセプト全てを同時に導入することができない場合も

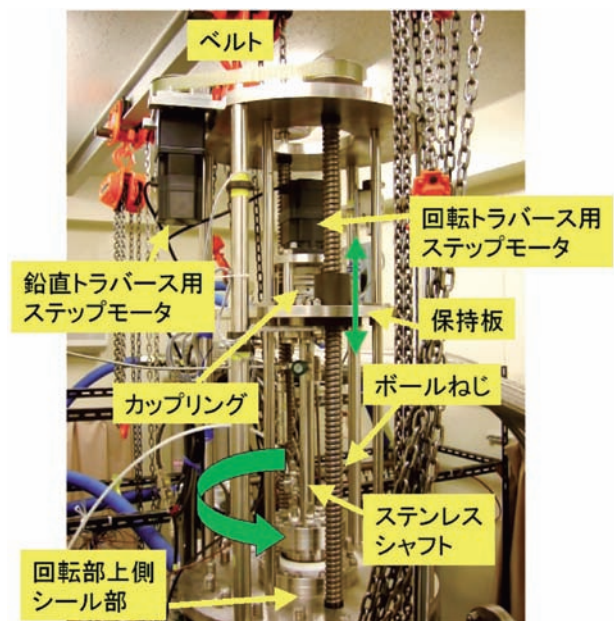
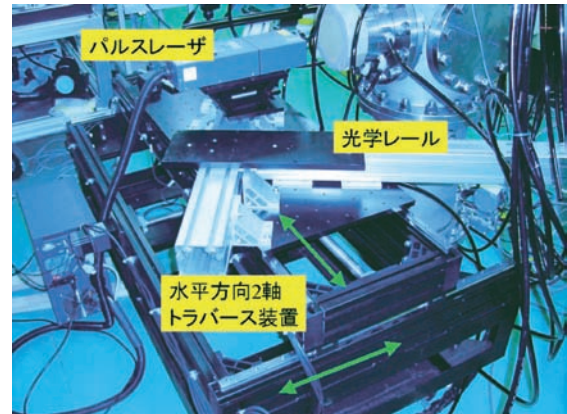


あるので、噴霧の付着を完全に防止できないケースも存在する。この場合でも、多くの計測法では問題にならないレベルであることが多いが、レーザ回折法を利用する際には計測の大きな妨げになる。従って、今後試験を重ねていく中で改良を重ねながら、よりロバストな噴霧付着防止機構を開発していくことが望ましく、同時に万一液滴が付着した場合でもすぐに排除清掃できるような機構もあわせて今後検討していく予定である。

また、現在、補助空気が噴霧に与える影響の評価については、画像などによる定性的な噴霧の非対称性の判断によっている。これまでの経験では、噴射弁下30mmまではほとんど噴霧形状に影響がないことがわかっているが、後流では若干の非対称性が見られる場合があり、今後定量的な評価を行う必要がある。

3.3 トラバース機構

本節ではトラバース機構の概要について記述する。



3.3.1 水平トラバース機構 (x方向及びy方向)

水平方向のトラバースが必要な計測を行う場合には、計測機器側を水平方向 (x, y方向) にトラバースして計測を行う。高圧噴霧試験装置用に水平方向2軸トラバース装置が用意されており (図38), x, yそれぞれ400mm幅のトラバースが可能である。トラバース装置の天板にはM6タップが50mm間隔にあげられており、様々な計測装置の取付が可能となっている。

尚、後述の通り、レーザ回折法装置による測定を行う場合には、計測装置自体に備えられている1軸のトラバース機構を利用して計測を行う。

3.3.2 鉛直及び回転トラバース機構 (z方向及びθ方向)

鉛直方向及び回転方向のトラバース機構は、噴霧試験装置本体に装備されており、これにより主流鉛直配管並びに噴射弁を保持するエアボックスが一体で移動する

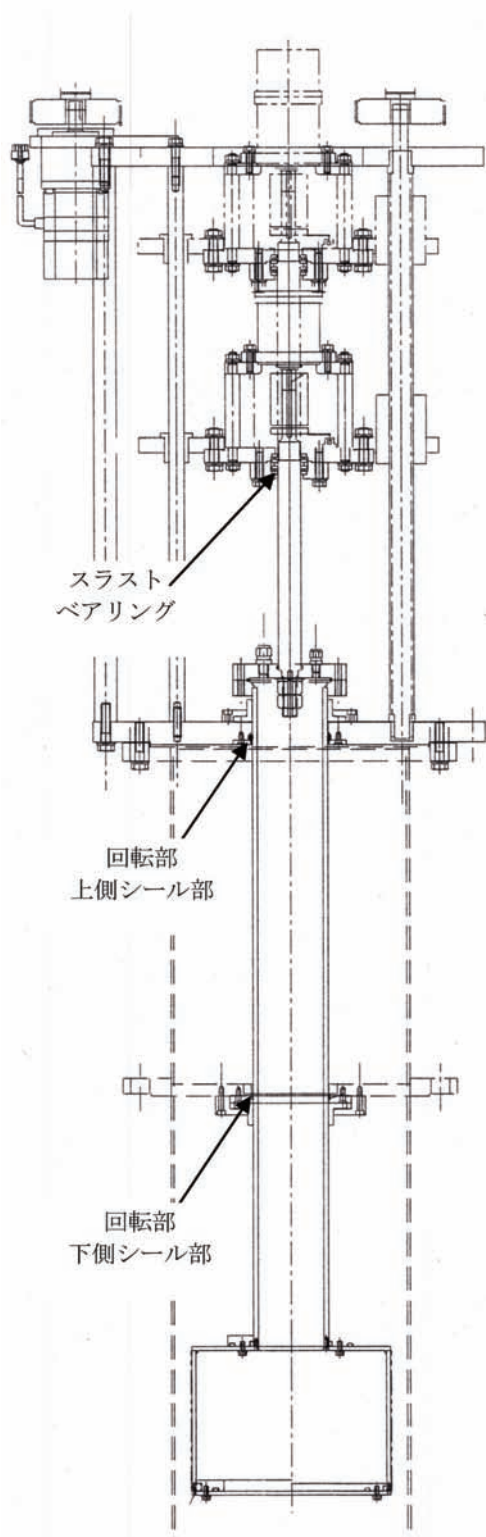


図40 鉛直・回転トラバース機構図

機構になっている（図39，40）。

鉛直方向トラバースは、ステップモータによりベルトを介してボールねじを駆動することで、回転トラバース機構及び主流鉛直配管・エアボックスを保持する



図41 高圧セクタ実験棟制御室

厚板（保持板）を上下移動できる機構となっており、ボールねじ並びにステップモータは1MPaの圧力による推力が駆動部にかかった場合でも円滑に動作できるような仕様となっている。鉛直方向トラバースの可動範囲は250mm幅である。

一方、回転トラバースは、保持板に固定されたステップモータにより、カップリング及び $\phi 30\text{mm}$ のステンレスシャフトを介して、主流鉛直配管・エアボックスを回転する機構となっている。回転部の上下2箇所のシール部はシールリングを用いて気密を保っている。また、シャフトへかかる推力は、スラストベアリングにより保持板に伝えられ、回転用ステップモータに負荷のかからない構造となっている。回転方向トラバースの可動範囲は180度である。

3.4 制御系統

装置の制御は、その大部分を高圧セクタ実験棟制御室（図41）において集中して行えるようになっており、制御・モニタ用PC及び制御盤の表示計に示される圧力、温度等の計測値を監視しながら、制御盤コントローラ、手動の液体流量調整弁、PC入力インターフェイス等を操作して、入口圧力（あるいは雰囲気圧力）、圧力損失（あるいは空気流量）、液体流量等の試験条件や、噴射弁トラバース位置の条件を設定する。図42に制御系統概念図を、また図43,44に制御盤及びPCモニタ画面を示す。以下、空気系統、液体供給系統、トラバース系統といった各系統の制御、並びに制御・モニタ用ソフトウェアについて記述する。

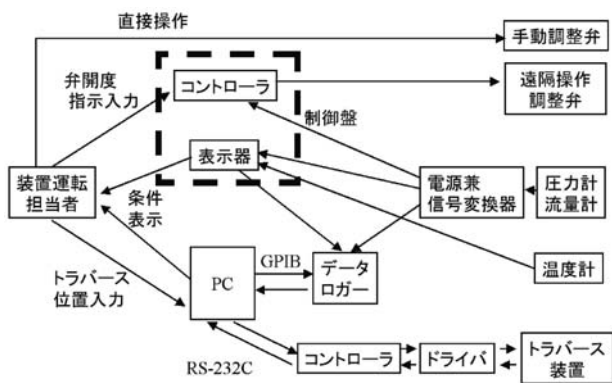


図42 制御系統概念図

3.4.1 空気系統の制御

空気系統の制御の大部分は制御盤により行う。制御盤には上流の3つの流量調整弁、並びに下流の圧力調整弁（図4参照）のコントローラが設置されており、これにより弁開度の指示値を入力することで、電気信号が各弁に送られて作動する。尚、圧力調整弁については電空ポジションを介して空気圧駆動により開度調整を行う。制御盤の各表示器並びにPCモニター画面には、各箇所における圧力計、温度計や流量計の出力等が表示され、これらを監視しながら弁開度を調整して試験条件を設定する。この他、補助空気系統のエアカーテン用空気と窓パージ用空気の空気流量のバランス、及び各観測窓の窓パージ用空気流量のバランスについては、変更の頻度が

少ないので、現状ではそれぞれの手動弁において行っている（3.1.1節参照）。また、圧力条件設定については、空気源の吐出圧力（0.55～1.0MPaの間で変更可能）によっても調整が可能である。尚、圧力が0.3MPa程度以下の試験を行う場合には、流量調整弁による流量コントロールを容易にする目的で、高压セクタ元弁の開度粗調整を行うこともある。また先述の通り、現状では弁開度などの指示値は圧力調整弁も含めて装置運転担当者が直接与えているが、将来的には圧力調整弁の開度を測定部の雰囲気圧力によりフィードバック制御できるよう、制御定数の最適化を行った上で自動制御に切り換える予定である。

3.4.2 液体供給系統の制御

液体供給系統の制御は手動で行っている。圧送方式では液体加圧タンクの圧力を窒素ポンベの調圧弁によって適当な圧力に設定し、モニター用PC及び制御盤の近くに設置された流量調整弁にて、流量を監視しながら調整する。一方、低脈動ポンプを利用する際には、インバータによるポンプ回転数設定、バイパス弁開度、及び流量調整弁開度により流量調整を行う（図4、22参照）。

3.4.3 トラバース制御

装置本体の鉛直・回転トラバース、並びに水平方向トラバース装置の制御は、操作ボックスによる手動コントロール並びにRS-232Cを介したモニター用ソフトウェアに

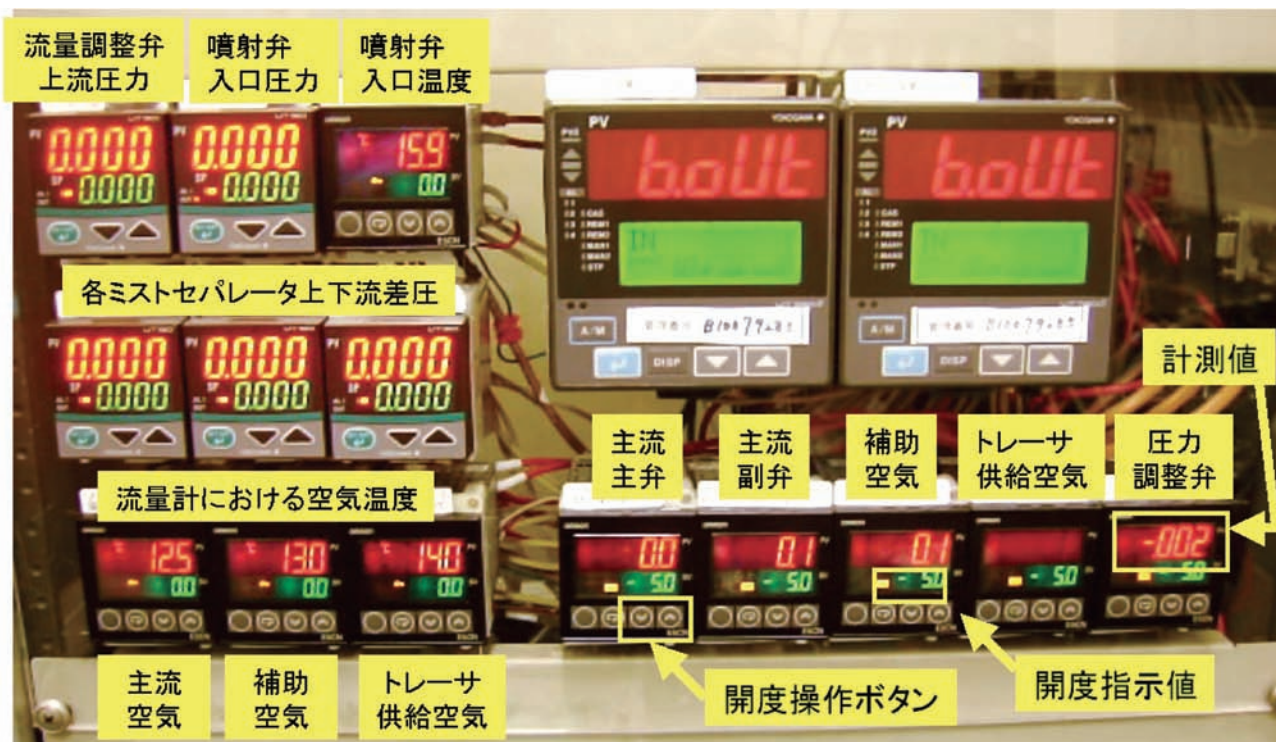


図43 制御盤

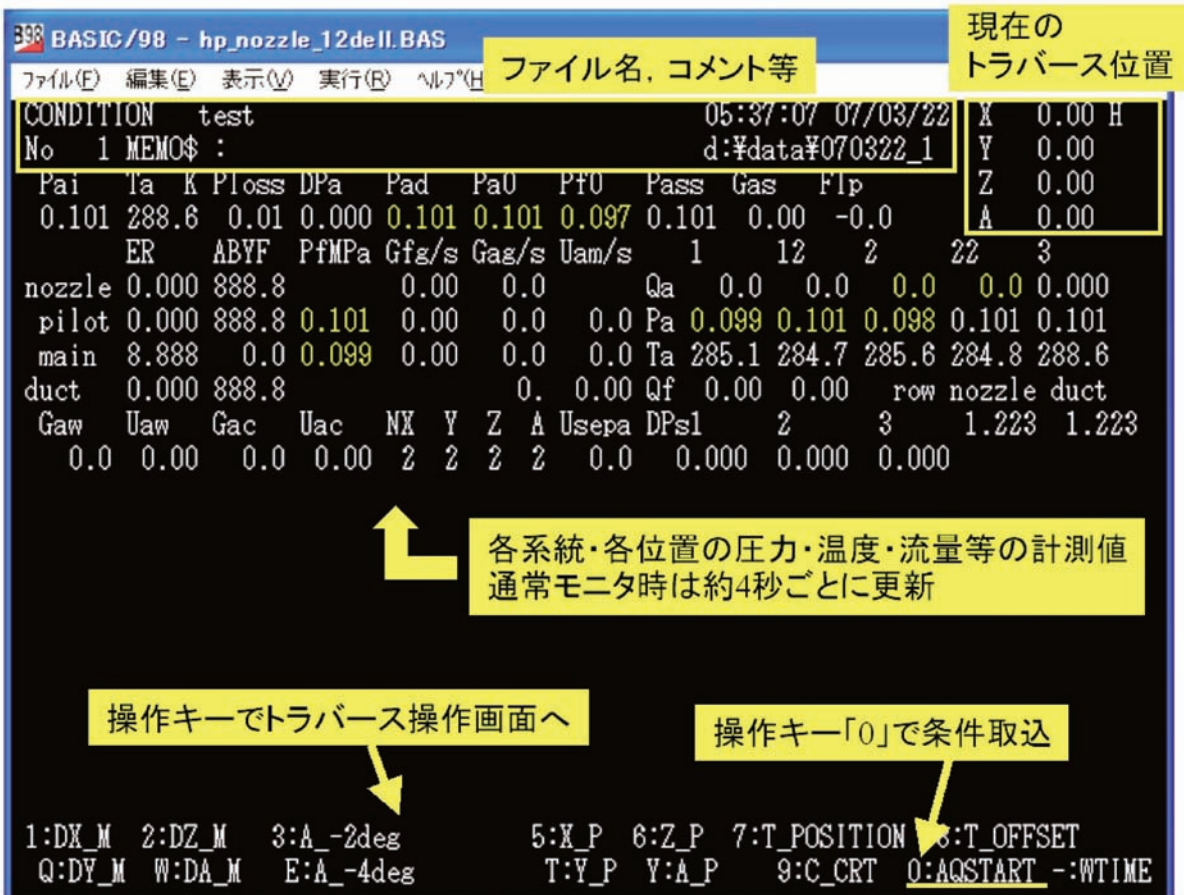


図44 PCモニタ画面

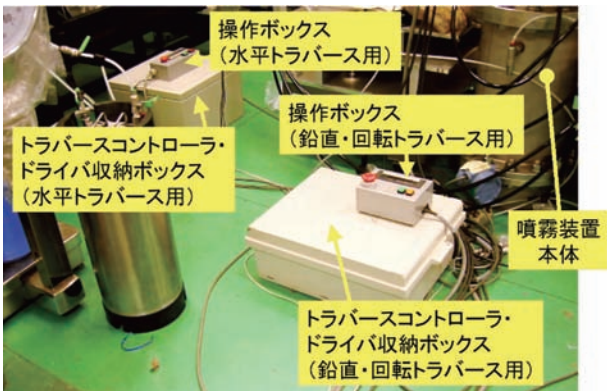


図45 トラバースコントローラ・ドライバ収納ボックス並びに手動操作制御ボックス

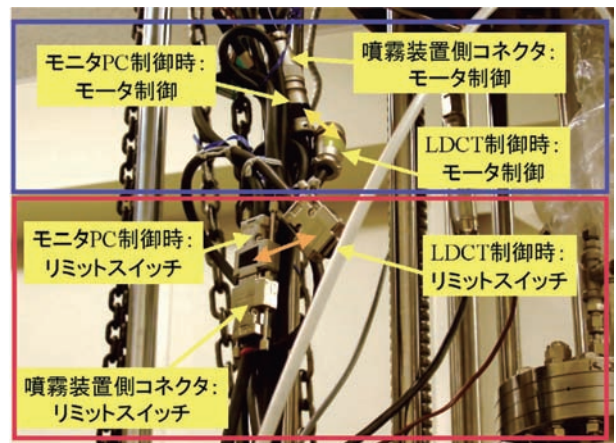


図46 回転トラバース用ステップモータケーブル類の繋ぎ替え

よる制御が可能であるが、試験中はソフトウェアにより制御を行っている。いずれの制御の場合も、トラバースコントローラ・ドライバ収納ボックスに収納されたコントローラ、ドライバを介してステップモータを制御する(図45)。尚、後述のレーザー回折法(LDSA)及びCTレーザー回折法(LDCT)による計測の際には、回転トラバース用ステップモータのケーブル類(図46)を計測装置

側の制御ボックスに接続し、計測装置側から操作を行う。回転トラバース制御をモニタ用ソフトウェアから行うか、それともレーザー回折法計測装置側から行うかの選択は、モニタ用ソフトウェア上で行うことができる。

3.4.4 制御・モニタ用PC及びソフトウェア

制御・モニタ用PCは、データロガー(図42及び3.5.1

節参照)からの出力を GPIB インターフェイスにて取り込み、圧力・温度・流量などの気流・液体供給条件を表示すると同時に、RS-232C インターフェイスによりトラバース機構を制御し、噴射弁・計測機器のトラバースを行う目的で使用する。制御・モニタ用ソフトウェアは著者の1人が開発したもので、N88-BASIC 言語で記述されているため、試験に応じて容易に変更できる。この制御・モニタ用ソフトウェアは、Microsoft Windows® 上で BASIC エミュレータを用いて実行される。ソフトウェアを起動し、計器類・トラバース装置の認識及び零点取得、大気条件や条件を保存するファイル名等の入力を終わると、気流・液体供給条件のモニタ画面へと移る(図44)。現在の設定ではほぼ4秒おきにデータロガーからの入力を表示する設定になっている。気流・液体供給条件を保存したい場合には、指定のキー(「0」キー)を入力すると、コメントと共にファイルに保存される。また、図44の下の列に示される操作キーを入力すると、一端条件モニタ表示を中止してトラバース操作画面に移行し、移動先のトラバース座標が入力できる。座標入力後トラバース装置は指定した位置へと移動し、画面表示は再びモニタ画面に戻るようになっている。

3.5 計測系

本節では、気流条件・液体供給条件の監視のための計測系、並びに高圧噴霧試験装置での噴霧評価に現在利用している各種光学計測技術・装置・計測例などについて記述する。

3.5.1 気流条件・液体供給条件の計測

圧力、温度、流量等の気流条件・液体供給条件の計測項目のリストを表2に、また、計測機器の仕様等を他の周辺機器と合わせて付録Dに示す。圧力の計測には静電容量型及び抵抗型(拡散型半導体歪ゲージ)圧力計、温度計測にはT型あるいはK型熱電対を用いている。流量計測は、気流については渦流量計により体積流量を測定し、同時に流量計部における圧力・温度を計測することで密度を求め、質量流量を算出している。一方、液体側にはピストン式流量計を用いて体積流量を計測し、液体密度は室温において既知量として文献などの値を参照して質量流量に換算している。

これらの信号は最終的にデータロガーに入力され、GPIB インターフェイスにより PC に取り込まれる。

3.5.2 噴霧計測

本節では高圧噴霧試験装置での噴霧評価に現在利用している各種光学計測技術・装置・計測例などについて記述する。尚、一般にエンジン高負荷条件に相当する模

表2 気流条件・液体供給条件計測項目表

圧力	
空気系統	
流量調整弁上流	1点
主流空気用渦流量計部(大流量用)	1点
主流空気用渦流量計部(小流量用)	1点
補助空気用渦流量計部	1点
窓パージ空気用渦流量計部	1点
噴射弁入口	1点
測定部雰囲気	1点
噴射弁上下流差圧	1点
ミストセパレータ上下流差圧	3点
トレーサ供給空気用渦流量計部*1	1点
トレーサ発生装置上流*1	1点
液体供給系統	
ポンプ吐出圧	1点
噴射弁上流(主流鉛直配管上部)	2点
温度	
空気系統	
主流空気用渦流量計部(大流量用)	1点
主流空気用渦流量計部(小流量用)	1点
補助空気用渦流量計部	1点
窓パージ空気用渦流量計部	1点
噴射弁入口*2	1点
トレーサ供給空気用渦流量計部*1	1点
流量	
空気系統	
主流空気用(渦流量計, 大流量用)	1点
主流空気用(渦流量計, 小流量用)	1点
補助空気用(渦流量計)	1点
窓パージ空気用(渦流量計)	1点
トレーサ供給空気用(渦流量計)	1点
液体供給系統	
液体用(ピストン式流量計)	2点

*1 トレーサ供給系統増設時

*2 測定部雰囲気温度は噴射弁入口温度で代用

擬条件における噴霧計測は、高濃度噴霧であるが故に、計測は困難を極める。従って計測に当たっては、各計測方法の特徴や限界を深く理解して目的にあった手法を選択する必要がある。特に定量的な情報が必要な場合には、データの吟味についても慎重を期す必要がある。

3.5.2.1 各種写真撮影

噴霧撮影は通常測定部ダクト1を利用して行う。噴霧撮影の方法、特に照明の方法は様々であるが、最も頻繁に用いているのは、噴霧に対して照明系と撮影系を対向させて配置する対向照明である。比較的容易に一様な

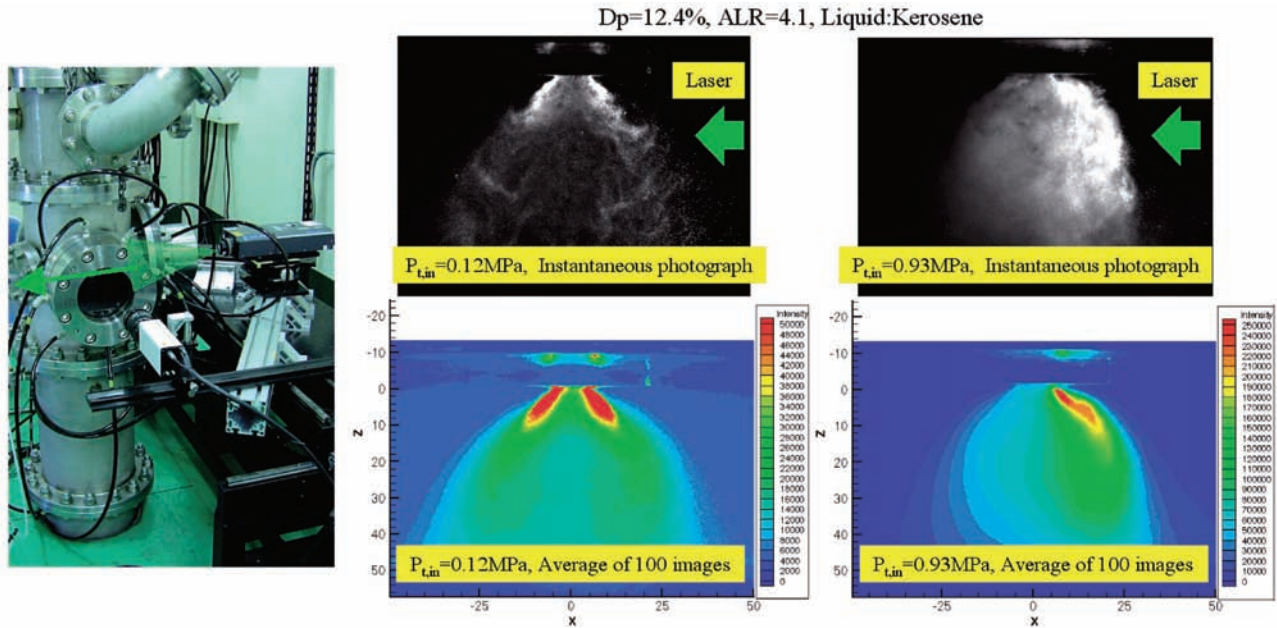


図47 レーザシート法のセットアップ及び噴霧可視化例

照明が得られるので、噴霧現象を見誤ることが少なく、鮮明度の高い撮影が可能である。撮影はハロゲンランプ等の高輝度光源からの光を直接照明として、または拡散板（簡易的にはトレーシングペーパー等）を介して一様な輝度分布を持たせるようにした拡散光照明として利用し、噴霧に対して光源と反対側の位置からデジタルカメラやビデオ等で撮影する。同じ対向照明でも、照明系と撮影系を正対させれば（背景光照明）、噴霧の影絵写真となるが、ノズルを見上げるような形で照明系と撮影系に若干の角度を持たせてセットした場合には、前方ミー散乱光⁽²²⁾を捉えることになり、逆に噴霧の存在する場所が明るく映ることになる（図37参照）。このほか、側方照明、あるいは撮影系と同じ側からの照明を利用する場合もあるが、双方とも対向照明と比較して光量が必要となり、また前者の場合は照明の仕方噴霧の印象が変わってしまうので注意が必要である。後者については、アクリル外側壁をもつ予混合管模型内の混合状態を調べる試験等で、対向照明等では光が透過しない部分の撮影を行う場合に用いている。

この他、今後はパルス光源による高速微粒化現象の凍結撮影、ハイスピードカメラによる高速撮影を行い、高圧雰囲気下の微粒化現象解明を行っていく予定である。

3.5.2.2 レーザシート法による可視化

レーザシート法は、シリンダカルレンズなどを用いてレーザ光をシート状に広げて噴霧に入射させ、通常シート面から90度をなす方向からミー散乱光を捉えて撮影を行うことで、噴霧構造を可視化する方法である。

定性的ではあるが、取得画像中の各点の輝度は、対応する空間上の点（領域）に存在する全液滴の表面積の和に比例すると考えられるので、燃料の空間分布を知る目安となり、セットアップが容易でデータ取得に時間を要しないため、噴射弁開発における簡易評価の目的で多用される。

光源は通常Nd:YAGパルスレーザ光源（第2高調波532nm, 15mJ）や、He-Ne連続レーザ光源（633nm, 10mW）を用いている。前者は瞬間の噴霧構造の把握が可能であるが、平均的な分布を得るだけであれば後者の方が小型でセットアップや取り扱いが容易であるから、開発上試験時間が限られる噴射弁評価試験の場合などは主に後者を利用する。レーザシート法の光学セットアップ並びに可視化画像の例を図47に示す。レーザシート法による可視化は、通常測定部ダクト1を利用して行う。

レーザシート法の難点は、噴霧が高濃度となった場合に、多重散乱の影響を受けることである。図47は、噴射弁における気流圧力損失（Dp）を12.4%、噴射弁気液質量流量比（ALR）を4.1に固定した場合の入口圧力（ P_{Lin} ）0.12MPa及び0.93MPaにおけるレーザシート法の可視化画像例（瞬間写真及びこれら100枚の積算平均）であるが、高圧条件の方が高濃度噴霧となるため、噴霧は左右対称にもかかわらず、入射光が光路に沿って進行するうちに多重散乱により減衰するため、結果として入射側の方が輝度が高い画像が得られる。それでも、噴霧形状、特に噴霧の濃い領域の形状（図の赤い部分）は、明らかに大気圧と高圧で異なっており、高負荷条件

での性能評価には、昇圧雰囲気下における試験を行って燃料分布の圧力依存性を把握しておくことが重要であることがわかる。

尚、レーザシート法を用いてトラバース計測を行えば、時間平均ながら3次元的な定性的燃料空間分布を得ることも可能であり、この手法は旋回気流中に垂直に小孔から燃料を噴射するタイプの液柱式気流噴射弁の場合等、非軸対称噴霧の評価に威力を発揮している。

3.5.2.3 位相ドップラ法 (PDA)

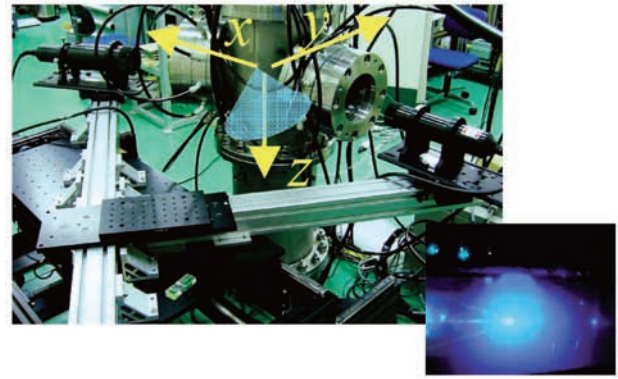
位相ドップラ法^(7,8) (Phase Doppler Anemometry, PDA) は、レーザドップラ法^(8,16)を拡張した方法であり、噴霧計測において3.5.2.4節で述べるレーザ回折法と並んで最もよく用いられる方法である。点計測ながら、個々の球形粒子の粒径・速度同時計測が可能であるため、特定の噴射弁の詳細な性能評価、あるいは基礎研究に向けた方法である。現在用いているAerometrics社のシステムでは、4Wの水冷Arレーザを光源として用いており、緑色 (532nm) と青色 (488nm) の出射ビームを用いて2方向成分の速度計測が可能である。

1点の計測時間は噴霧の濃度にもよるが、現在の標準的な使用法の場合、数千~2万個程度のサンプルを取得するのに数秒から数分である。軸対称性の仮定できる噴霧の場合は、噴射弁の対称軸方向 (z) と半径方向 (r) のトラバース計測を行って噴霧の評価を行う場合が多い。

位相ドップラ法の光学セットアップ並びに計測結果の例を図48に示す。測定部ダクト2を用い、通常のセットアップでは光学系は送光系と受光系の光軸 (散乱角) が30度となるようにセットする。この他、同ダクトを用い、散乱角を70度とするセットアップも可能であり、この場合には信号強度は減少するが、水平偏光の入射ビームを利用した場合、液体表面からの反射光に対してブリュースタ角付近となるため、本来計測に利用している屈折光成分のみを効率的に抽出でき、計測誤差を抑えることができる。

図48の計測例では、サンプルとして速度分布は全ての液滴の平均を示している。しかし実際に噴霧を評価する場合には、液滴速度は個々の液滴の気流への追従性、つまり液滴径に依存するため、データを液滴径毎に分類してから統計処理を行わないと、現象を誤って解釈する可能性があるため注意が必要である。

位相ドップラ法では、光学アライメントが不完全であったり、使用するレーザパワーや光電変換器のゲインが異なると、粒径測定結果が大きく影響されるため、使用にあたっては装置にある程度熟練する必要がある。また、実際のエンジン条件を模擬した試験の場合には、噴霧は高濃度となり、信号ノイズ比の悪化に伴って有効



$P_{t,in}=0.6\text{MPa}$, $D_p=13\%$, $ALR=11.5$, Liquid:Water
 $z=15\text{mm}$, $x=0\text{mm}$

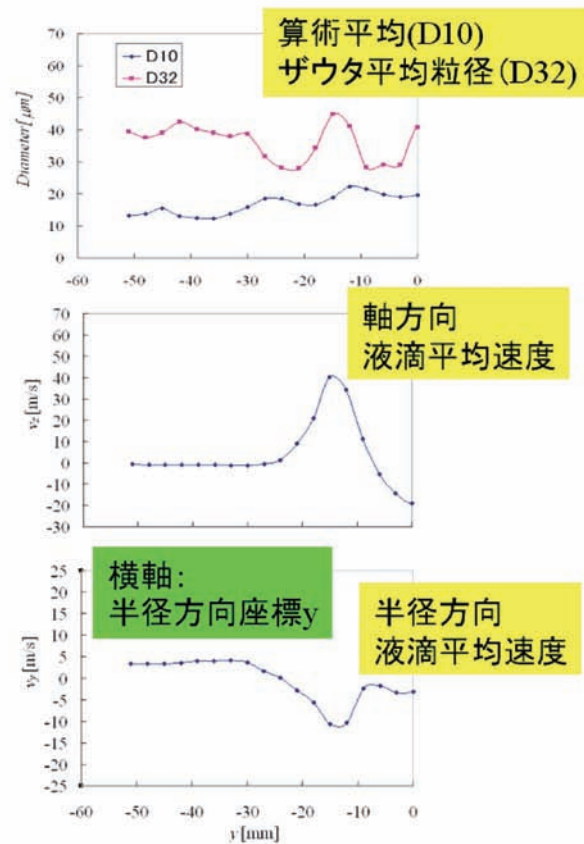


図48 位相ドップラ法のセットアップ及び計測結果例

データレートが低下する現象が見られ、また微弱な小粒径液滴からの信号がノイズに埋もれてしまって結果的に平均粒径を大きく見積もる傾向があるので、取得したデータの吟味を慎重に行う必要がある。

3.5.2.4 レーザ回折法及びCTレーザ回折法

レーザ回折法^(9,10) (Laser Diffraction technique) は、送光系と受光系を噴霧をはさんで正対させて配置し、送光系からレーザビームを液滴 (群) に照射し、その前方散乱光、特に光軸近傍の信号を受光系により捉え、その

散乱パターン（散乱角と散乱強度の関数）から粒度分布・平均粒径等を算出する方法である。JAXAでは早くからこの手法の改良に着手し、その技術⁽²³⁾は市販製品にも反映されている。

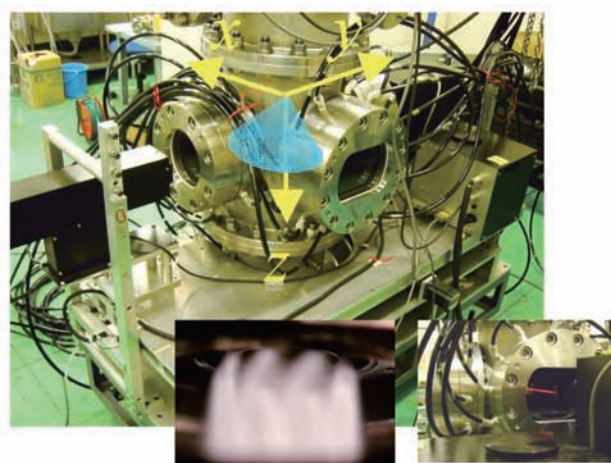
本手法はレーザービーム上の全ての液滴の信号を捉える、所謂line-of-sightと呼ばれる手法に属する。通常は、噴射弁下の特定の軸方向位置（ z ）において、光学系をレーザービーム（ y 軸に平行）と噴射弁軸（ z 軸）に垂直な方向（ x 軸に平行）にトラバースさせて計測し、各位置のデータを総合することで、噴射弁軸に垂直な断面（ xy 断面）の粒度分布・平均粒径を得、これにより微粒化性能を評価する。

現在用いている東日コンピュータアプリケーションズ製のレーザ回折法装置（後述のCT機能も付属）は、JAXAの技術をベースとして製作されており、自動光学アライメント機能や自動水平（ x 軸方向）トラバース機能が備えられている。現在の標準的な使用法の場合、トラバース1点（正確には線）の計測時間は0.3s程度（トラバース時間を除く）、1断面30秒～2分程度で測定が可能である。この高いデータ生産性と取り扱いの容易さ故に、本方法は、噴射弁を次々と取り替えて微粒化性能評価を行うような、噴射弁の選定・開発目的に向けた手法である。

一方、本手法を用いて空間的な燃料分布や平均粒径分布等を得ようとするには、軸対称噴霧の場合にはAbel変換⁽²⁴⁾を適用すればよいが、非軸対称噴霧の場合にはトモグラフィ⁽¹²⁾の手法を適用することになる。現在使用しているレーザ回折法装置には、自動回転トラバース機構（ θ 方向）とJAXA開発のCT（Computation Tomography）アルゴリズムによるソフトウェアが付属しており、CTによる噴霧構造解析が可能となっている。

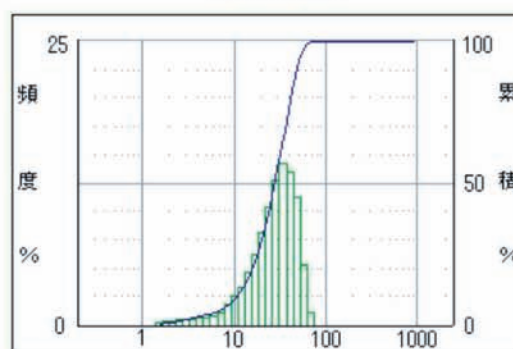
図49にレーザ回折法装置を高圧噴霧試験用に設置したセットアップの様子並びに計測例を示す（図中 \dot{m}_L は液体質量流量を示す）。測定は測定部ダクト1を利用して行う。3.4.3節で述べた通り、噴霧装置本体の回転トラバース機構のケーブル類の接続を変更することで（図46）、 z 軸を除くトラバース（ x 及び θ 方向）はレーザ回折法装置側から制御できる。通常の使用法では、計測を開始すると、回転座標0度において x 軸方向のトラバース計測を指定間隔（通常1～2mm）で行う。CT計測の場合は、終了次第回転トラバースにより指定角度（通常4度程度）回転し、次の x 軸方向トラバース計測に移る。半周分これを繰り返すと計測が終了し、計算処理により噴霧構造分布が表示される。

レーザ回折法の難点は、観測窓への液滴付着等で回折光信号が乱された場合に、誤った計測結果を算出しやすいことである。このため、本手法による試験を行う

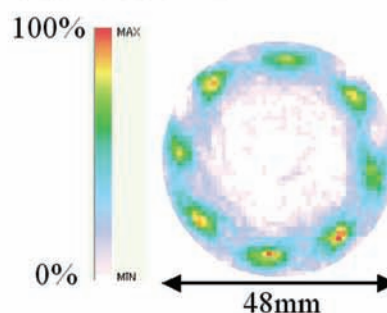


$P_{t,lin}=0.6\text{MPa}$, $D_p=6.5\%$, $\dot{m}_L=12\text{g/s}$,
Liquid:Kerosene, $z=25\text{mm}$

断面粒度分布



噴霧濃度分布（相対スケール）



ザウタ平均粒径分布

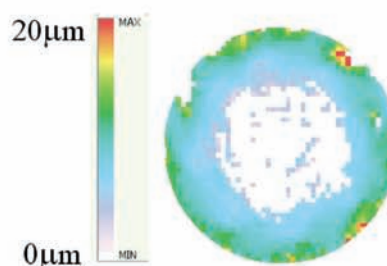


図49 レーザ回折法・CTレーザ回折法のセットアップ及び計測結果例

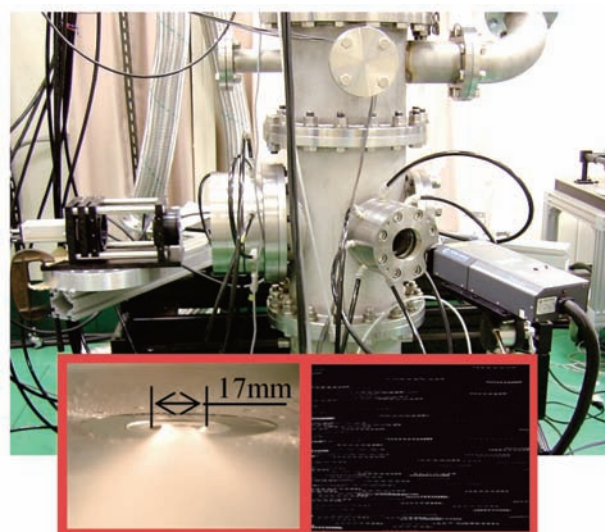
場合は、窓への噴霧付着防止は特に重要である。また、窓には反射防止コーティングを施し、反射光等ノイズの影響を抑える必要がある。

この他、高濃度の噴霧においては、位相ドップラ法とは逆に、粒径を小さく見積もる傾向があり、レーザー透過率が50%程度を切ると誤差が増大するという報告⁽²⁵⁾もある。高負荷エンジン条件に相当する模擬条件での噴霧試験の場合、定量的な計測は一般に困難であり、ノズルから計測位置までの距離 (z) にもよるが、これまでの実績では、噴射弁下15~30mmの位置において、希薄予混合タイプの噴射弁(図37, 49の例)の場合で15%程度、1次燃焼領域を過濃状態で燃焼させるような従来燃焼方式用の噴射弁⁽²⁶⁾(図47, 48及び後述の図50の例)の試験では、5%以下まで透過率が下がる場合がある。多重散乱に対する適当な補正を施す方法⁽²⁷⁾も考えられるが、今後データの信頼性を確認するために異なる手法の結果によるクロスチェックを行うなどの検証をおこなっていく必要がある。

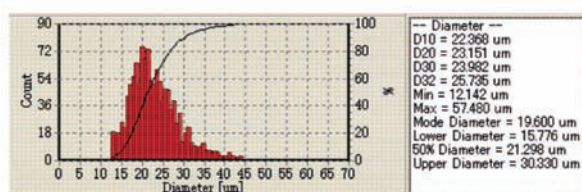
3.5.2.5 干渉画像法

干渉画像法⁽²⁸⁾はレーザーシート法とほぼ同様の光学系を用いるが、受光系は散乱角70度程度方向(液体噴霧の場合)に設置し、非焦点面にて撮影を行う。これにより、液滴の表面で反射する光成分と、液滴の内部を屈折してから出射する光成分との干渉縞が得られ、この干渉縞の本数が粒径と比例することから、粒径が計測できる。PIV, PTV⁽²⁹⁾(Particle Tracking Velocimetry)法と同様の原理により速度計測も可能であり、現状では12mm×12mm程度の視野において、個々の液滴の粒径・速度の同時面計測が可能である。JAXAにおいては、比較的濃度の高い噴射弁近傍まで計測できるよう、Maedaら⁽¹³⁾によるOptical Compression法を採用した光学系を用いて、ステレオ法による3方向速度成分の同時計測が可能なる光学系を構築し、大気圧噴霧の詳細構造の解明に利用しているが⁽³⁰⁾、干渉画像法は概して小粒径液滴の計測に困難があり、微粒化の向上する高圧雰囲気下での適用には現状では難がある。また、Optical Compression法を採用した場合でも、高圧場での高濃度噴霧の計測を可能とするためには、さらに視野の拡大やレーザーシートを薄くする(但し旋回成分が大きい場合には速度計測は困難になる)等の対策を行う必要がある。

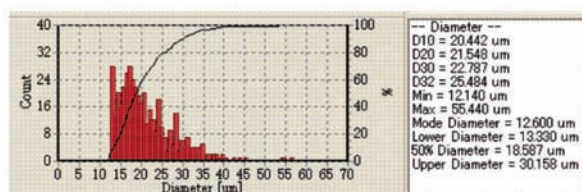
図50に干渉画像法のセットアップ並びに噴霧計測例を示す。写真の例では測定ダクト1を利用して計測を行っているが、測定ダクト2の利用も可能である。図の例では、特に0.9MPaの高圧条件の場合、微粒化が向上し、計測可能下限粒径である12 μ m以下の小液滴を捉えきれていないことがわかる。現在光学系の改良を進めてお



$D_p=13\%$, $\dot{m}_L=1\text{g/s}$, Liquid:Water, $z=20\text{mm}$, $r=20\text{mm}$



$P_{t,in}=0.2\text{MPa}$ (Sample Number: 1209)



$P_{t,in}=0.9\text{MPa}$ (Sample Number: 425)

図50 干渉画像法のセットアップ及び計測結果例

り、今後計測可能範囲を広げてゆく予定である。干渉画像法には、実際の画像を目視で確認でき、誤った計測結果を計測者が排除できる利点がある。従って本手法はクロスチェックによる他の計測法の検証にも有効であると考えられる。

3.5.2.6 その他の計測手法について⁽³¹⁾

今後、噴霧計測については、燃料分布を計測するための各種のレーザー誘起蛍光法(Laser-Induced-Fluorescence, LIF)、あるいはミー散乱とLIFを併用して平均径の空間分布を求めるPDS法^(32,33)等、気流速度計測については先述のPIV法、LDV法等の利用が想定され、噴霧装置もこれらの技術が利用可能なように設計されている。これらの手法の適用については、噴射弁開発上の有用性を十分に吟味しながら、今後検討していく予

定である。

4. まとめと今後の展望

本稿では、開発した高圧噴霧試験装置の特徴、機能及び適用可能な光学計測技術について報告した。本文中でも述べた通り、既に現在開発中の次世代の希薄予混合予蒸発方式の低NO_x燃料噴射弁の評価を中心に、研究開発上貴重なデータを提供しているが、今後さらに信頼性のある有用なデータを効率よく提供できるよう、以下について検討する必要がある。

- ・使用後の燃料を再利用できるシステムの構築を検討する。
- ・ノズルの交換作業にかかる時間の短縮を図る
- ・観測窓への噴霧付着防止機構の改良を継続的に続け、よりロバストなものとする。また、現状では観測窓に噴霧が付着した場合には清掃のために試験を中断することになるが、この時間の短縮を図る。
- ・信頼性の高い基礎試験データの取得のために、高圧場における各計測技術の精度について検証を行う必要がある。具体的には、異なる手法による計測結果のクロスチェックが有効と考えられるが、この際には手法により統計量を算出する対象となる液滴母集団の性質が異なることを踏まえて評価する必要がある^(31,34) (例えば計測された噴霧の「濃さ」は、ConcentrationかFluxか、等)。
- ・同じく信頼性の高い基礎試験データの取得のために、観測窓の噴霧付着防止のために利用している補助空気が噴霧場を与える影響について、気相速度場や液滴速度の計測等により定量的に評価を行う必要がある。
- ・圧力・空気流量・燃料流量等の試験条件に関して、より高圧力比エンジンの高負荷条件に近い条件を模擬できるようにする。空気密度の観点からは、最大1.5～2MPa程度の噴射弁入口条件が実現できれば上記の条件を完全に模擬できることになる。このためには、本高圧噴霧試験装置を空気源等も含めて増強する方法と、噴射弁入口圧力が5MPaまでの試験が可能なJAXA高温高圧燃焼試験設備を利用して噴霧試験を行う方法が考えられる。本高圧噴霧試験装置の利点は、様々な光学計測の適用に関して柔軟に対応できるよう光学アクセスやトラバース機構等に配慮した設計がなされている点であるが、現状よりさらに高圧場となれば、粒径計測等の光学計測はより困難となり、適用できる計測手法も限られるため、どちらの選択が効率的かについては十分に検討する必要がある。
- ・空気温度・蒸発の影響の調査により、本装置による常

温噴霧試験から得られる知見と実際のNO_x排出性能がどこまで相関付けられるかを評価する。この場合、JAXA高温高圧燃焼試験設備等における高温場の試験が必要となり、試験技術の開発が合わせて必要となる。

この他、気流密度が微粒化特性や噴霧分散特性に与える影響のより詳細な調査、液体の表面張力や粘性が微粒化に与える影響の評価、基礎モデルによる設計パラメータと噴霧特性の相関データベースの蓄積、開発上さらに重要性を増すであろうCFDに用いる微粒化モデルの検証等、中長期的な視野に立った試験も合わせて行っていく必要があると考えられる。また、把握したい現象に応じて、レイノルズ数、ウェーバ数、オーネゾルゲ数、気液密度比、気液質量流量比、運動量比、ストークス数等の微粒化、噴霧分散を支配するパラメータ⁽³⁴⁻³⁶⁾を、実機条件と試験条件でどのようにスケールアップしていくかについても、検討の余地が残されている。

近年は、予混合式噴射弁の低NO_x化の観点から、海外の研究機関において、クロスフロージェットの高圧場における気流への貫通の問題を中心に、高圧噴霧の研究が盛んになっている⁽³⁷⁻³⁹⁾。今後はこれらの研究の動向を踏まえながら、設備改良並びに試験方法の開発を継続的に行い、高性能燃料噴射弁の開発に有用なデータを提供していく予定である。

謝辞

本高圧噴霧試験装置の開発並びに運用にあたり、航空宇宙技術振興財団 (JAST) の武田克己氏には、連続ラム燃焼試験用空気圧縮機の操作に関する御指導並びに御協力をいただきました。また、JAXA航空プログラムグループ 環境適応エンジンチーム 派遣職員の堀内正司氏には、低脈動ポンプによる燃料供給系の製作に御協力いただきました。また、英国Cranfield大学のArvind K. Jasuja博士、カナダNational Research CouncilのAndrew P. Corber氏には、昇圧雰囲気場での噴霧現象、高圧噴霧試験装置の設計・運用、観測窓への噴霧付着防止技術等に関する議論の中で、大変貴重な御意見をいただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 林 茂, 「クリーンエンジン技術計画の概要」, 独立行政法人宇宙航空研究開発機構 第1回総合技術研究本部公開研究発表会前刷集, pp.11-16 (2004).
- [2] 林 茂, 柳 良二, 二村尚夫, 福山佳孝, 「JAXA航空エンジン環境技術研究開発プロジェクト

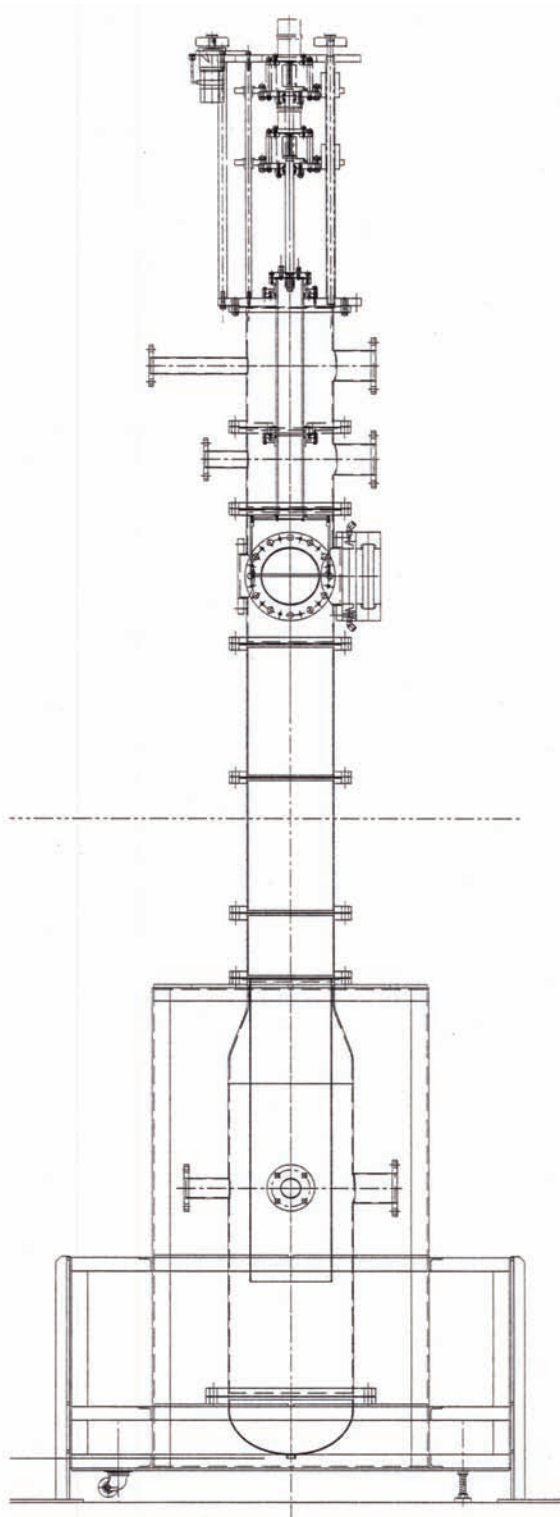
- (TechCLEAN) の概要」, 第47回航空原動機・宇宙推進講演会講演論文集, No.B22 (2007).
- [3] 山本 武, 牧田光正, 松浦一哲, 山田秀志, 下平一雄, 黒澤要治, 吉田征二, 飯野 淳, 「JAXA TechCLEANにおける低NO_x燃焼技術の研究開発」, 第47回航空原動機・宇宙推進講演会講演論文集, No.B29 (2007).
- [4] 例えば Rosfjord, T., J. and Padget, F., C., “Experimental Assessment of the Emissions Control Potential of a Rich/Quench/Lean Combustor for High Speed Civil Transport Aircraft Engines,” NASA CR-2001-210613 (2001).
- [5] 例えば Bittlinger, G. and Brehm, N., “High Pressure Combustion Test of Lean Premixed Prevapourised (LPP) modules in an axially staged combustor using a multisector rig,” Proc. 14th International Symposium on Air Breathing Engines, ISABE, 99-7008 (1999).
- [6] Jasuja, A., K., “Behaviour of Aero-Engine Airblast Sprays in Practical Environments,” Proc. 10th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS 2006, Paper No. 06-287 (2006).
- [7] Durst, F. and Zaré, M., “Laser Doppler Measurements in Two Phase Flows,” Proc. LDA symp., Copenhagen, pp. 403-429 (1975).
- [8] Albrecht, H., -E., Borys, M., Damaschke, N. and Tropea, C., “Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques,” Springer (2002).
- [9] Swithenbank, J., Beer, J., M., Taylor, D., S., Abbot, D. and McCreath, G., C., “A Laser Diagnostic Technique for the Measurement of Droplet and Particle Size Distribution,” Prog. in Astronautics and Aeronautics, AIAA,53, p.421-447 (1976).
- [10] Hayashi, S., “Measurements of Absolute Concentration and Size Distribution of Particles by Laser Small Angle Scattering,” Optical Particle Sizing, Theory and Practice (Gouesbet, G., and Grehan, G., eds), p.549, Plenum Press (1987).
- [11] Kawamura, K., Saitoh, A. and Tanasawa, Y., “Measurement of Fuel Concentration in Sprays by Laser Light Computed Tomography,” Proc. 4th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS '88, p.311-316 (1988).
- [12] 高橋 位, 林 茂, 「筒内噴射燃料インジェクタからの噴霧の時系列CT画像測定」, 第13回微粒化シンポジウム講演論文集, p.137-142 (2004).
- [13] Maeda, M., Kawaguchi, T. and Hishida, K., “Novel Interferometric Measurement of Size and Velocity Distributions of Spherical Particles in Fluid Flows,” Meas. Sci. Technol., Vol. 11, No. 12, pp. L13-18 (2000).
- [14] 例えば「独立行政法人 航空宇宙技術研究所年報」, 平成14年度/平成15年度上期, p.184.
- [15] Raffel, M., Willert, C., E. and Kompenhans, J., “Particle Image Velocimetry: A Practical Guide,” Springer (1998).
- [16] Durst, F., Melling, A. and Whitelaw, J., H., “Principles and Practice of Laser Doppler Anemometry,” Academic Press (1976).
- [17] Holmqvist, G., Kallen, S. and Jansson, B., “Protective device for optical elements,” US Patent, 4240691 (1980).
- [18] 梅崎幸男, 磯辺秀義, 「LDV用観測窓粒子付着防止装置」, 特開平11-14650 (1999).
- [19] Ballard, E., O., “Purged window apparatus utilizing heated purge gas,” US Patent, 4443072 (1984).
- [20] Drennan, S., A., Sowa, W., A. and Samuelson, G., S., “The effect of Ambient Pressure on the Spray Characteristics of a Twin-Fluid Atomizer,” ASME 90-GT-393 (1990).
- [21] Corber, A., P. and Matsuura, K., Private Discussion (2005).
- [22] Van De Hulst, H., C., “Light Scattering by Small Particles,” Dover Publications, Inc. (1982).
- [23] 例 え ば Hayashi, S. and Horiuchi, S., “Method and apparatus for measuring the size of a single fine particle and the size distribution of fine particles,” US Patent, 5229839 (1993).
- [24] Hammond, D., C., Jr., “Deconvolution technique for line-of-sight optical scattering measurements in axisymmetric sprays,” Applied Optics, Vol. 20, Issue 3, pp. 493-499 (1981).
- [25] 例えば林 茂, 「レーザ回折法による測定」, 第8回微粒化フォーラム ―噴霧特性の測定原理と実習― テキスト, 日本液体微粒化学会, pp.39-53 (2000).
- [26] Makida, M., Yamada, H., Kurosawa, Y., Yamamoto, T., Matsuura, K. and Hayashi, S., “Preliminary Experimental Researches to Develop a Combustor for Small Class Aircraft Engine Utilizing Primary Rich Combustion Approach,” ASME GT2006-91156 (2006).

- [27] 高橋 位, 「高濃度噴霧のレーザ粒度分布測定における多重散乱補正方法」, 第6回微粒化シンポジウム講演論文集, pp. 243-248 (1997).
- [28] König, G., Anders K. and Frohn A., "A New Light-Scattering Technique to Measure the Droplet Diameter of Periodically Generated Moving Droplets," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 17, No.2, pp. 157-167 (1986).
- [29] Nishino, K., Kasagi, N. and Hirata, M., "Three-Dimensional Particle Tracking Velocimetry Based on Automated Digital Image Processing," *J. Fluid Eng.*, Vol. 111, pp. 384-391 (1989).
- [30] Matsuura, K., Zarogoulidis, K., Hardalupas, Y., Taylor, A.M.K.P., Kawaguchi, T., Sugimoto, D. and Hishida, K., "Simultaneous planar measurement of size and three-component velocity of droplets in an aero-engine airblast fuel spray by stereoscopic interferometric laser imaging technique," *Proc. 10th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS 2006*, Paper No. 06-240 (2006).
- [31] 松浦一哲, 「計測方法の概要とデータ評価方法」, 第2回微粒化セミナー —液体微粒化の基礎と計測技術— テキスト, 日本液体微粒化学会・日本エネルギー学会, pp. 18-29 (2006).
- [32] Yeh, C. N., Kosaka, H. and Kamimoto, T., "A Fluorescence/Scattering Imaging Technique for Instantaneous 2-D Measurement of Particle Size Distribution in a Transient Spray," *Proc. 3rd International Congress on Optical Particle Sizing*, p.355-361 (1993).
- [33] Domann R. and Hardalupas Y., "Evaluation of the Planar Droplet Sizing (PDS) Technique," *Proc. 8th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS 2000* (2000).
- [34] Lefebvre, A., H., "Atomization and Sprays," Hemisphere Pub. (1988).
- [35] 日本液体微粒化学会編, 「アトマイゼーション・テクノロジー」, 森北出版 (2001).
- [36] Crowe, C., T., Sommerfeld, M. and Tsuji, Y., "Multiphase Flows with Droplets and Particles," CRC Press LLC (1997).
- [37] Becker, J. and Hassa, C., "Breakup and Atomization of a Kerosene Jet in Crossflow at Elevated Pressure," *Atomization and Sprays*, Vol. 11, pp. 49-67 (2002).
- [38] Masuda, B., J. and McDonell, V., G., "Penetration of a Recessed Distillate Liquid Jet into a Crossflow at Elevated Pressure and Temperature," *Proc. 10th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS 2006*, Paper No. 06-275 (2006).
- [39] Bellofiore, A., Ragucci, R., Di Martino, P. and Cavaliere, A., "Morphology and Fluctuations of a Liquid Jet in High-Density Air Crossflow," *Proc. 10th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS 2006*, Paper No. 06-248 (2006).

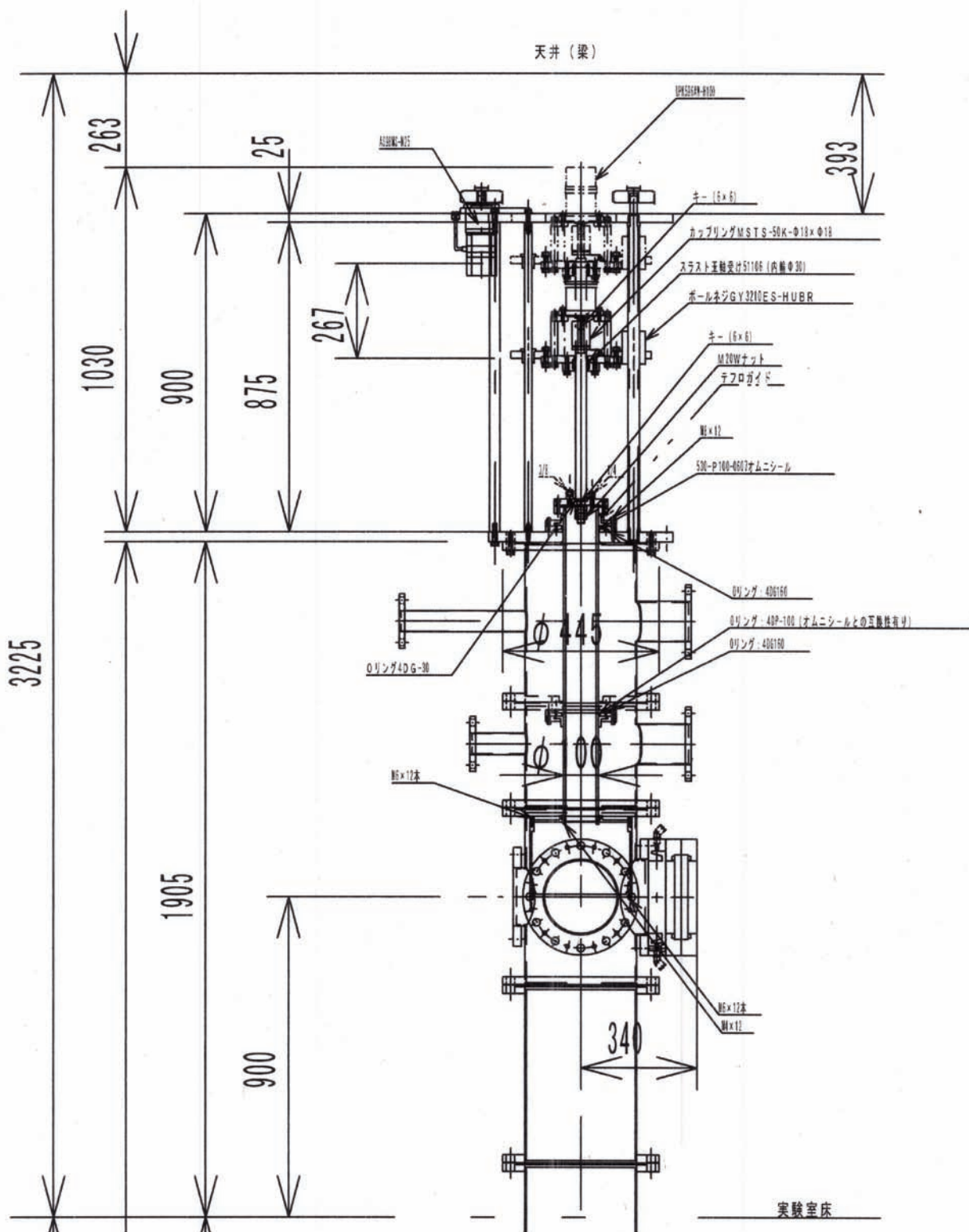
付録

A. 高圧噴霧試験装置本体概要図

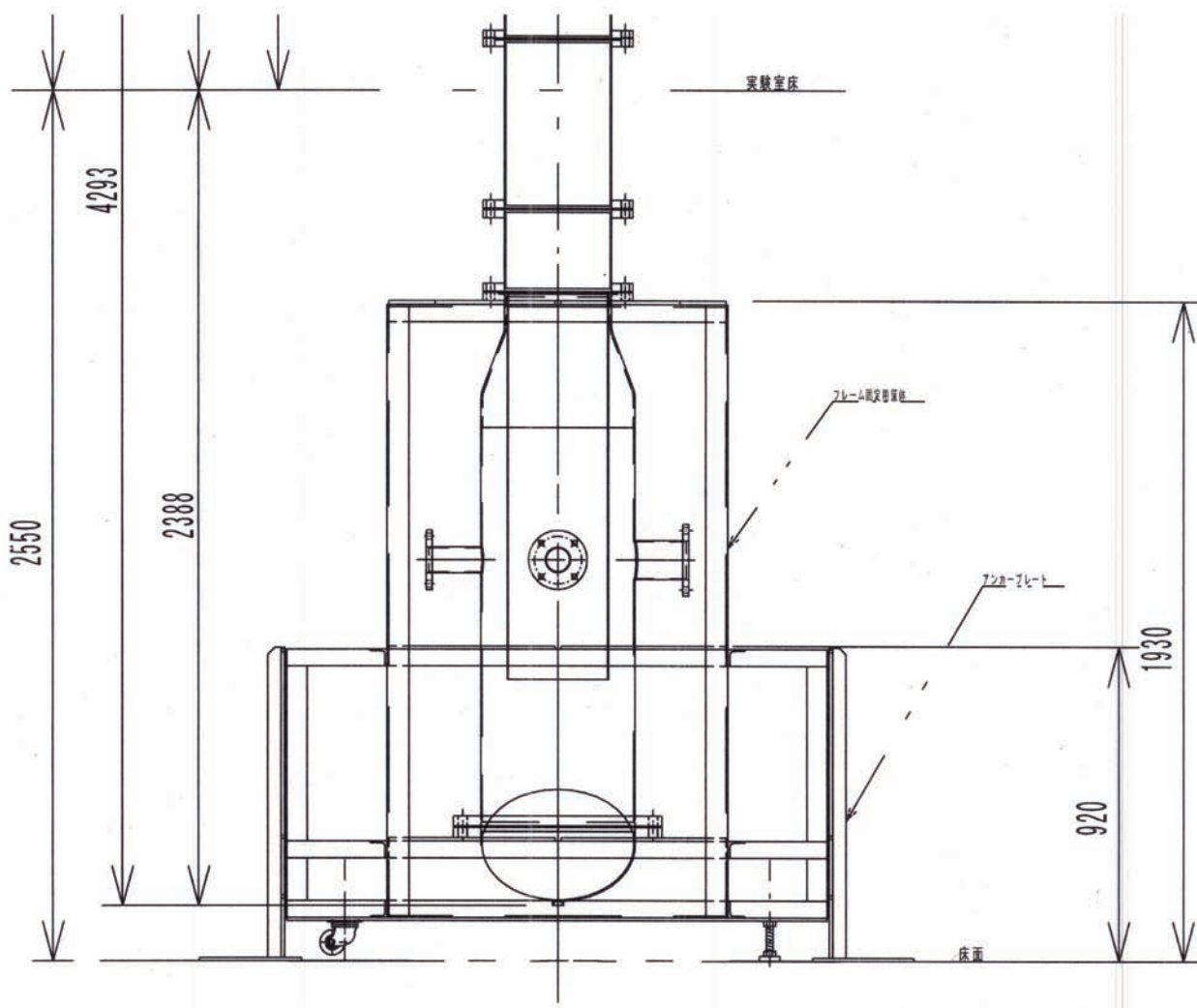
高圧噴霧試験装置本体の概要図を図A～Cに示す。



図A 高圧噴霧試験装置本体全体概要図（全体）



図B 高圧噴霧試験装置本体全体概要図 (高圧セクタ実験棟1階部分)

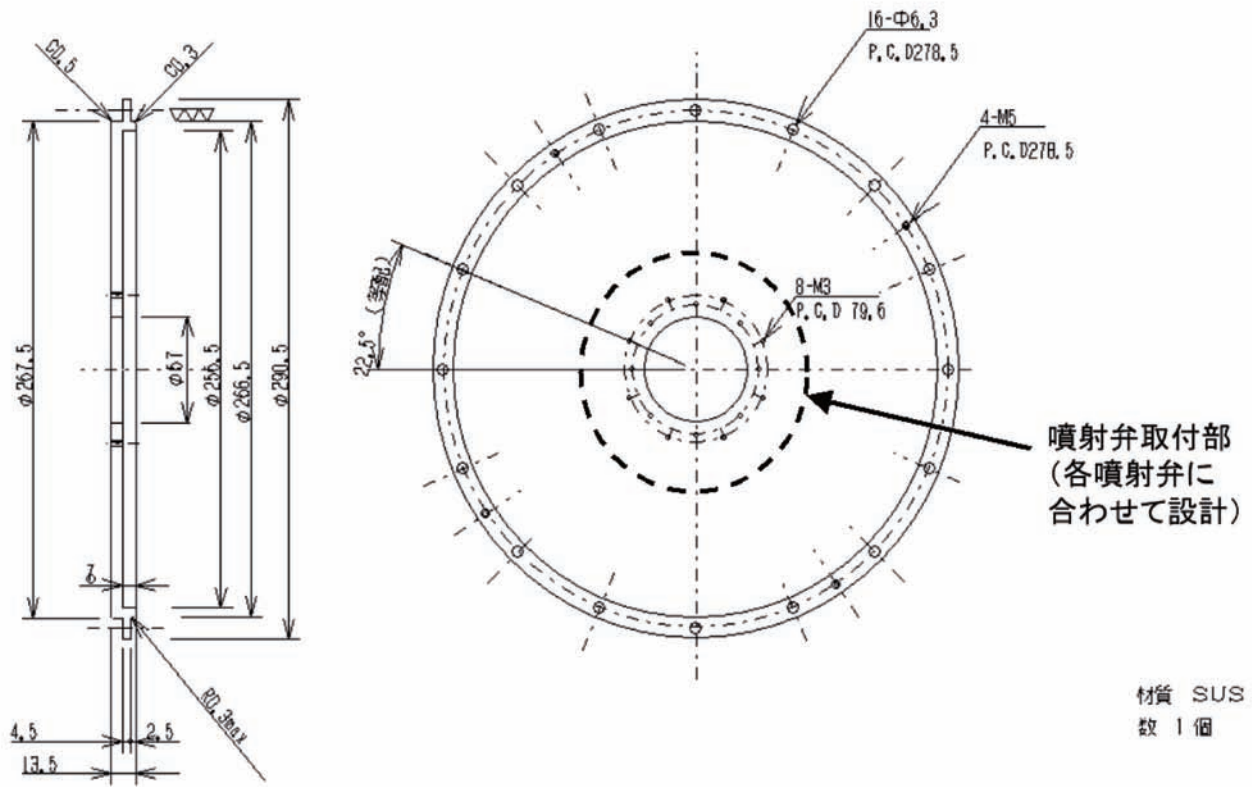


図C 高圧噴霧試験装置本体全体概要図（高圧セクタ実験棟地下部分）

B. 噴射弁取付フランジ図面

噴射弁取付フランジの図面を図Dに示す。

注. 指示ナキ線各部及び穴の両面C0.2~0.3トスル



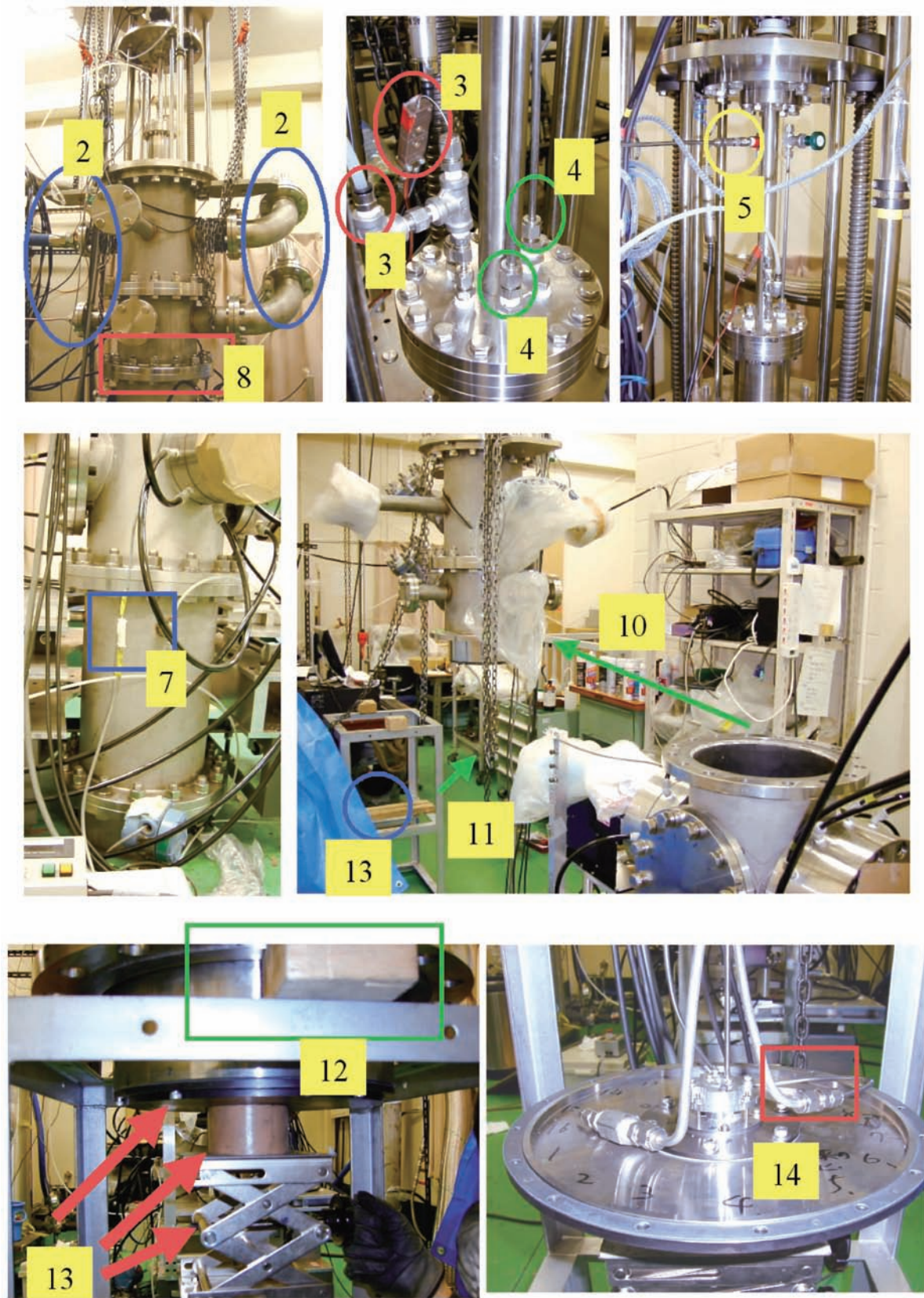
図D 噴射弁取付フランジ図面

C. 噴射弁取付作業手順

以下に高圧噴霧試験装置への噴射弁の取付作業手順（あるいは交換手順）並びに参考図（図E）を示す。

事前準備：

1. **必ず作業前に窓並びに光学計測機器に保護カバーを装着する。**また、後の作業性を考慮してあらかじめ鉛直トラバース機構によりエアボックスを十分上方にあげておく。回転トラバースについてはユーザ原点に戻しておくのが望ましい。
2. 装置上部の主流空気及びエアカーテン空気導入部の結合ボルト等を外して、主流配管及びエアカーテン用配管を取り外す。外した配管部には適宜カバーをする。
3. 主流鉛直配管上部の熱電対コネクタ、圧力計測用チューブを取り外す。
4. 主流鉛直配管上部の燃料配管ボアスルー結合部の継手を緩める。
5. 主流鉛直配管上部の供給系からの燃料配管を液体用圧力計の継手部分で取り外す。
6. 手順3～5で外した配管部には適宜キャップまたはカバーをする。
7. 鉛直トラバース機構のブレーキケーブルのコネクタを外す。
8. 測定部ダクト上部フランジの結合ボルトを外す。
9. 装置上部の水平バランスや周辺のケーブル類に注意しながら、ゆっくりとチェーンブロックにより装置上部を上方へ持ち上げる。このとき、エアボックスと測定部ダクトの内壁がなるべく接触しないように注意する。
10. 装置上部の水平バランスや周辺のケーブル類に注意しながら、ゆっくりとギヤードトロリにより北側へレールに沿って水平に移動する。
11. 装置上部の移動先となる位置（装置本体の北側の作業領域が確保できる領域で、南北に走るギヤードトロリのレールの真下）に、アングル台を設置する。
12. 装置上部の水平バランスや周辺のケーブル類に注意しながら、ゆっくりとチェーンブロックにより装置上部をアングル台へと下ろす。この時、アングル台上面と装置上部の下方フランジの間に木材などをはさんで、フランジ面を傷つけないようにする。
13. アングル台中段に木板などを介してラボジャッキ、さらにその上に噴射弁を保護する部材などを置き、その上面が噴射弁取付フランジと軽く接する程度の位置に設置した上で、噴射弁取付フランジの計16個のM6ボルトをはずして、噴射弁取付フランジを外す。
14. ラボジャッキにより適当なところまで噴射弁取付フランジを下げた後、本体側の液体供給用燃料配管と噴射弁側の燃料配管を接続している配管継手を外す。
15. 1人が噴射弁取付フランジを支えた状態でもう1人がラボジャッキと木板を取り除き、噴射弁の燃料配管と全圧管・熱電対との干渉に気をつけながら、引き抜くような形で噴射弁取付フランジをさらに下方へと移動し、噴射弁取付フランジ及び噴射弁を装置上部から完全に自由な状態とする。
16. 作業性の良い場所で噴射弁を交換した後、手順2～15と全く逆の手順により噴射弁を取り付ける。尚、観測窓が汚れている場合にはこの間に清掃作業を行う。



図E 噴射弁取付作業手順参考図

D. 高圧噴霧試験装置主要部品仕様等一覧表

以下に高圧噴霧試験装置主要部品の仕様等一覧を示す。

表A 高圧噴霧試験装置主要部品仕様等一覧表

No.	名称	仕様等	規格	メーカー
1	元弁ストレーナ	5インチステンレスY形ストレーナフランジ形	10UYA-125A-80メッシュ	キット
2	元弁	5インチステンレスボールバルブフランジ形	10UTB-125A	キット
3	流量調整弁上流圧力計	ゲージ圧伝送器レンジ0-1MPa	PT7021A21G20	大倉電気
4	主流空気流量調整弁(主)	3インチUカットボールバルブウエハ形	AEXGS-103UW080	日本バルブコントロールズ
5	主流空気流量調整弁(副)	1インチUカットボールバルブウエハ形	AEXGS-103UW025	日本バルブコントロールズ
6	主流空気流量計(大)	渦式流量計レンジ 0-630m ³ /h 3インチフランジ形	VXF1080-N11G-1006	オーバル
7	主流空気流量計(大)用整流格子	ハニーベーンS ウエハ形80A	HVS1080-C1L-A	オーバル
8	主流空気流量計(大)用圧力計	絶対圧伝送器レンジ0-1MPa	PT7021A21A20	大倉電気
9	主流空気流量計(大)用温度計	T型シース熱電対 シース径 1ミリ		サーモテックス
10	主流空気流量計(小)	渦式流量計レンジ 0-430m ³ /h 3インチフランジ形	VXF1050-N11G-1006	オーバル
11	主流空気流量計(小)用整流格子	ハニーベーンS ウエハ形50A	HVS1050-C1L-A	オーバル
12	主流空気流量計(小)用圧力計	ゲージ圧伝送器レンジ0-1MPa	PT7021A21G20	大倉電気
13	主流空気流量計(小)用温度計	T型シース熱電対 シース径 1.6ミリ		サーモテックス
14	補助空気流量調整弁	3インチUカットボールバルブウエハ形	AEXGS-103UW080	日本バルブコントロールズ
15	補助空気流量計	渦式流量計レンジ 0-130m ³ /h 2インチフランジ形	YF104-AAUJ1J-S3S3*E	横河電機
16	補助空気流量計用整流格子	ハニーベーンS ウエハ形80A	HVS1080-C1L-A	オーバル
17	補助空気流量計用圧力計	絶対圧伝送器レンジ0-1MPa	PT7021A21A20	大倉電気
18	補助空気流量計用温度計	T型シース熱電対 シース径 1ミリ		サーモテックス
19	窓パージ用空気流量計	渦式流量計レンジ0-650m ³ /h 3インチフランジ形	VXF1080-N11G-1006	オーバル
20	窓パージ用空気流量計用圧力計	ゲージ圧伝送器レンジ0-1MPa	PT7021A21G20	大倉電気
21	窓パージ用空気流量計用温度計	K型シース熱電対 シース径 1.6ミリ		サーモテックス
22	高圧ベビコン	パッケージタイプ 1075L/min 1.15-1.4MPaG	CFP110-14D	アネスト岩田
23	トレーサ用空気流量調整弁	1インチUカットボールバルブウエハ形	AEXGS-103UW025	日本バルブコントロールズ
24	トレーサ用空気流量計	渦式流量計レンジ0-6.5m ³ /h 3/8インチウエハ形	VXF1010-N12G-1006	オーバル
25	トレーサ用空気流量計用圧力計	絶対圧伝送器レンジ0-2MPa	PT7021A22A20	大倉電気
26	トレーサ用空気流量計用温度計	T型シース熱電対 シース径 1.6ミリ		サーモテックス
27	トレーサ用供給装置入口空気圧力計	ゲージ圧伝送器レンジ0-2MPa	PT7021A22G20	大倉電気
28	液体供給ポンプ	吐出量 113-2000ml/min 常用圧力 9MPa	HVSA-20	富士テクノ工業
29	液体供給ポンプ用インバータ	適用モータ容量1.5kW 出力周波数 0.2-400Hz	FR-A520-1.5K	三菱電機
30	液体供給ポンプ吐出圧力計	ゲージ圧伝送器レンジ0-5MPa	PT7021A23G20	大倉電気
31	液体流量計	測定流量範囲 7-5000cc/min 精度 ±0.5%R.D.以下	901-000-510	東洋コントロールズ
32	液体流量調整弁(小)	メータリングバルブ 最大CV値 0.03	SS-6WG-MM	スウェージロック
33	液体流量調整弁(大)	メータリングバルブ 最大CV値 0.37	SS-1RS6MM	スウェージロック
34	液体供給圧力計	ゲージ圧伝送器レンジ0-2MPa	PT7021A22G20	大倉電気
35	噴射弁入口圧力計	ゲージ圧伝送器レンジ0-1MPa	PT7021A21G20	大倉電気
36	噴射弁入口温度計	T型シース熱電対 シース径 1ミリ		サーモテックス
37	蒸気圧力計	ゲージ圧伝送器レンジ0-1MPa	PT7021A21G20	大倉電気
38	ミストセパレータ入口弁	2.5インチステンレスゲートバルブフランジ形	10UMA-85A	キット
39	ミストセパレータ	蒸気用ミストセパレータ 換蒸気量 2000kg/h	CS200-10	進栄技研
40	ミストセパレータ差圧計	差圧伝送器レンジ0-1000kPa	3051CD4A02A1AH2L4D9	大倉電気
41	圧力調整弁	SIZE 4B LIFT 38mm PLUG CV120 LINEAR	ACN	山武
42	調整弁用電空ボジショナ		AVP300-XSD2A-1CYI-X	山武
43	データロガー	30チャンネル 30点/秒(1ユニット使用時)	R7430A	アドバンテスト
44	トラバース装置 X軸モータ	PLギヤード 減速比10 分解能 0.036°/パルス	ASM66AA-P10	オリエンタルモータ
45	X軸モータ用ドライバ		ASD24A-A	オリエンタルモータ
46	トラバース装置 Y軸モータ	PLギヤード 減速比10 分解能 0.036°/パルス	ASM66AA-P10	オリエンタルモータ
47	Y軸モータ用ドライバ		ASD24A-A	オリエンタルモータ
48	トラバース装置 Z軸モータ	PNギヤード 減速比25 分解能 0.0144°/パルス	ASM98WC-N25	オリエンタルモータ
49	Z軸モータ用ドライバ		ASD18A-S	オリエンタルモータ
50	トラバース装置 θ軸モータ	ハモニックギヤード 減速比100 分解能 0.0036°/パルス	PK598AV1-H100	オリエンタルモータ
51	θ軸モータ用ドライバ		UDK5114N#2	オリエンタルモータ
52	ドライバコントローラ	2軸コントローラ	EMP402-2	オリエンタルモータ

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-06-010

発行 平成19年3月30日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL: <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 株式会社 実業公報社

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

TEL: 029-868-2079 FAX: 029-868-2956

©2007 宇宙航空研究開発機構

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

