

750kW アーク加熱風洞気流の圧力計測*

松崎 貴至^{*1} 黒滝 卓司^{*1} 渡辺 泰夫^{*3}
石田 清道^{*1} 伊藤 健^{*1} 福井 利夫^{*2}

Pressure Measurements of 750kW Arc-heated Wind Tunnel Flow

Takashi MATSUZAKI^{*1}, Takuji KUROTAKI^{*1}, Yasuo WATANABE^{*3},
Kiyomiti ISIDA^{*1}, Takeshi ITO^{*1}, Toshio FUKUI^{*2}

ABSTRACT

NAL has been promoting a diagnostic study of the 750kW arc-heated wind tunnel flow to characterize various important flow parameters, such as heat flux and pressure which are, necessary for determining materials test conditions. Results of pressure distribution measurements in high enthalpy air flows are presented. The pressure transducers used for pitot and static pressure measurements were calibrated against NIST (National Institute of Standards and Technology) traceable standard transducer in real measurement configuration. Accurate pitot and static pressure distributions were obtained.

Keywords: High Enthalpy Flows, Arc Heated Wind Tunnel, Pressure Measurement

概 要

航技研は、750kW アーク加熱風洞の熱防護系材料の試験条件に必要な、圧力と加熱率及び各種の重要な流れの特性の気流診断を進めている。その一環として 750kW アーク加熱風洞のコニカルノズルで加速膨張された高エンタルピ流の圧力を、ピトー管及び静圧管によって計測することが必要となる。このため、本報告では、最初に高エンタルピ流での計測を可能とするピトー管および静圧管の検討と開発について、すなわち、ピトー管と静圧管の形状および圧力応答、校正について述べた上でアーク加熱風洞において気流中心軸方向および半径方向のピトー圧分布と、気流中心軸方向の静圧分布を計測した結果を示す。さらに、熱防壁材の表面触媒性評価に資するため、静圧計測及び CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析を併用することにより、一様流条件を推定することを試み、合理的な流れ場同定を行うことができた。なお、圧力計測に使用したピトー管、静圧管、圧力計及び導管を含む圧力計測系は、NIST (National Institute of Standards and Technology) でトレーサビリティを確保した標準圧力計によって校正が行われている。

1. まえがき

750kW アーク加熱風洞^{1), 2), 3), 4)}は、航空宇宙技術研究所(NAL)と宇宙開発事業団(NASDA)との共同研究により宇宙往還技術試験機(HOPE-X)の熱防護系(TPS: Thermal Protection System)等の材料の開発評価試験に運用されている。アーク加熱器と測定室の概念図を図1に、主な性能を表1に示す。NALにおいては、高エンタルピ流の診断技術向上のための計測装置、計測器等の整備を進めてきた。

これらを用いて、ノズル及び自由流については、ピトー管、静圧管、カロリーメータ各種プローブによる圧力計測、熱流束分布等の状態量計測、分光分析による温度計測、電子温度、電子密度計測、質量分析による成分濃度計測等の基礎的研究を進めてきた。

これらのうち発表したのは、次のとおりである。

各種の材料加熱試験等の評価に必要な基本的な諸量を求めるため、ノズルで加速膨張された高エンタルピ流の入力電力 - 激み点圧力特性、入力電力 - 加熱率特性、入力電力

* 平成14年2月6日受付 (Received 6 February 2002)

*1 流体科学研究センター

*2 宇宙開発事業団

*3 元流体科学研究センター

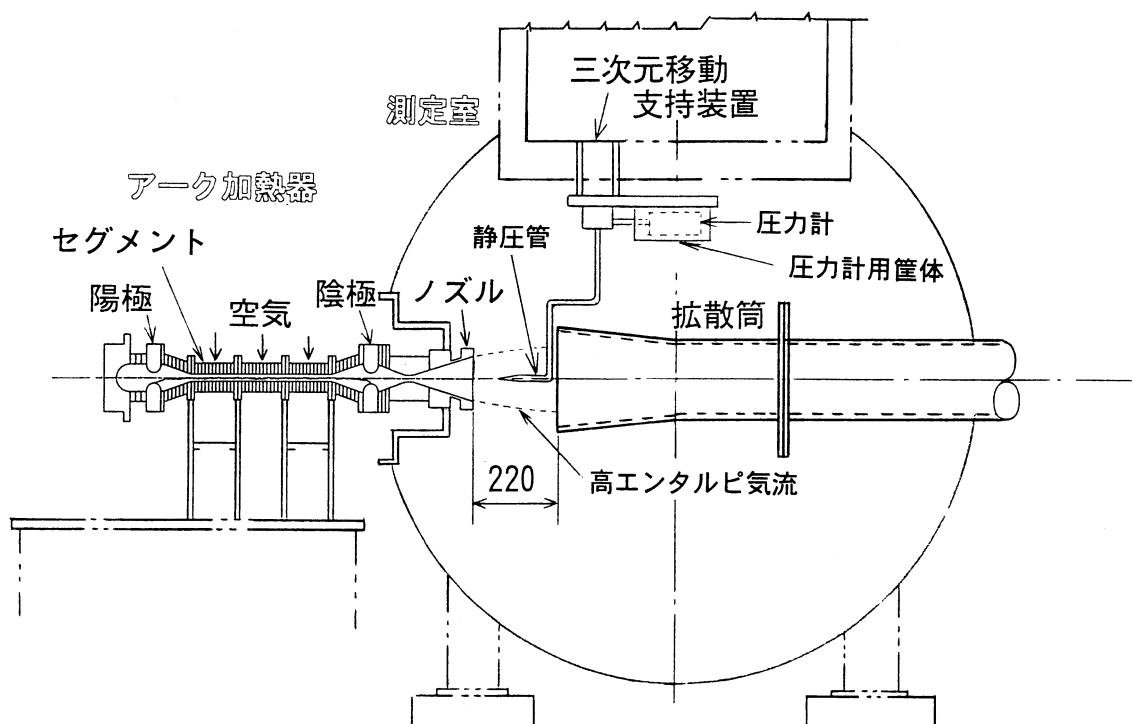


図1 アーク加熱器と測定差の概念図

- 静圧特性等を調べた⁴⁾。アーク加熱空気プラズマ自由流発光を発光分光計測、分析、同定し、紫外から近赤外の波長領域での主要発光源は200-300nm領域のNO、
、の各バンド系のバンド系列であることを確認した。さらに、温度測定のために高分解能スペクトルを収集し、回転温度を決定した^{5)、6)、7)}。熱的、化学的非平衡を伴うアーク加熱された高エンタルピ気流中でのカロリメータによる熱流束の計測は、非常に困難を伴う。このため、熱流束計測においては、現在使用しているガードン式カロリメータの特性、計測運用技術などを熱容量式(スラグ)カロリメータの計測値との比較による評価を行った^{8)、9)}。チャンネルノズル内部の流れ場の計測を目的とした校正用モジュールを製作し、静圧計測、加熱率計測、発光分光計測、質量分析を行い、理論合成スペクトルの比較による温度の分析結果、 $2000 \pm 300\text{K}$ の温度が得られた。また、質量分析を行い、この結果は、分光観測の結果と一致した¹⁰⁾。

さらに、風洞試験で信頼性ある実験を行うためには、ノズルから噴出した高エンタルピ流の状態を正確に求めておく必要がある。このうち圧力計測は、最も基礎的な量の一つであり、ノズル出口から拡散筒の間の高エンタルピ流れ場の圧力計測が必要とされている。

ピトー管等による流れ場の圧力計測は、気流を乱さないよう管の直径を小さくしなければならない。高エンタルピ流のピトー圧等による圧力計測は、超高温度によりピトー管等が熔融されないよう冷却水で強制冷却が必要となり、圧力計測のための導管の直径も細くなる。特に静圧を計測

表1 750kW アーク加熱風洞の性能

1、設備能力	
最大入力電力	750 kW
作動ガス	空気、窒素
ガス流量	8 ~ 22 g/s
総圧	~ 0.11 MPa
最大エンタルピ	~ 30 MJ/kg
アーク加熱器効率	約 50 %
運転時間	20 分/回 以上
2、試験能力	
1) よどみ点試験	
試験体形状	φ40平頭円柱(供試体φ25)
加熱率	~ 2800 kW/m ²
動圧	~ 2500 Pa
2) 平板試験	
試験体形状	100×100 mm 平板
加熱率	300 kW/m ²
表面圧力	3.3 kPa

する場合、静圧値が133Pa(1Torr)以下で、導管の内径が細いほど、長さが長いほど、導管のコンダクタンスやアウトガスから導管の応答時間が問題となる。このため、圧力応答試験装置を使用して圧力計測用導管の圧力応答時間の計測を行い、圧力が低い静圧範囲でも計測可能な圧力導管の応答時間の確認が必要である。

圧力計測においては、米国NIST基準に基づきトレーサビリティを保持した標準圧力計によりピトー圧や静圧を計測する圧力計測系の校正を行うことが精度確保のために重要である。圧力計測系の校正は、ピトー管や静圧管にこ

の標準圧力供給器を取付け、計測用導管を含む圧力計測系（気流圧力計測時と同じ環境）を圧力校正装置から圧力孔に直接標準圧力を印可して行うことにより、校正の精度を上げることができる。この校正法は、圧力計測系の導管や継ぎ手等を含めた校正であり、圧力計測システム全体を精度良く校正を行うことができる。

これらの圧力計測システム校正にもとづいたノズル出口から拡散筒の間の高エンタルピ流れ場の計測結果は、信頼できるデータとみなすことができる。

本報告では、上述の問題点、必要性を踏まえ、圧力計測系を設計、校正した上で行った NAL/NASDA で運用されている 750kW アーク加熱風洞における高エンタルピの流れ場の圧力計測結果について述べる。

2. 圧力計測

2.1 ピトー管・静圧管

ピトー管及び静圧管は円柱型、圧力孔の内径は、 $\phi 1\text{mm}$ で、できる限り外径を細くするよう設計を心がけたが、高エンタルピ流中で溶融しないよう内部を冷却水で強制冷却した結果、外径は、 $\phi 12\text{mm}$ となった。材料は熱伝導が良い銅を使用した。ピトー管は、半球円柱型でその形状を図 2 に示す。静圧管は、円錐円柱型、円錐部の半頂角は 6.8° 、静圧孔は 90° 間隔で 4 個あり、静圧値は、4 個の静圧孔の圧力の平均値が測定される。図 3 にその形状を示す。静圧孔から先端部までの長さ L に対する外径 D の比 L/D は、8.3 である。参考として完全気体の超音速流用静圧管と管に沿う圧力回復¹¹⁾を図 4 に示す。管に沿う壁面圧力 $P_{s'}$ は、管直径 D の 10 倍以降で流れ場の静圧 P_s にほぼ等しくなっている。静圧管の L/D の値は、大きいほど圧力回復した静圧値が得られる。このため、静圧管の長さ L を長くするようこころがけたが、当風洞のノズル出口から拡散筒の間の流れ場の長さが 220mm と短く、静圧管の

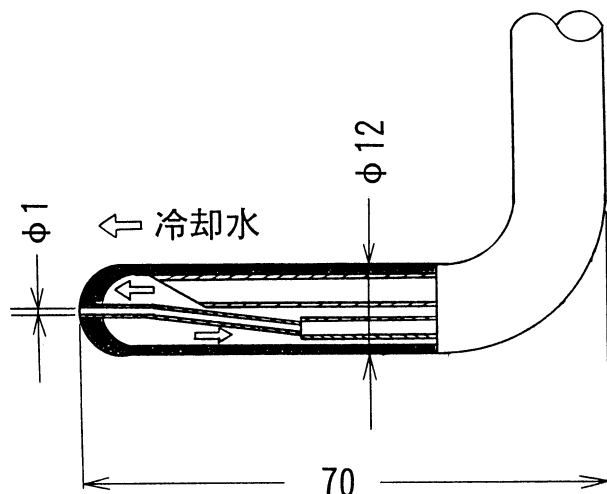


図 2 ピトー管

長さ L は、 100mm となった。この $L/D=8.3$ の静圧管による管に沿う静圧 $P_{s'}$ は、図 4 からほぼ 97% が得られる。

2.2 圧力導管および圧力応答特性

風洞流れ場のピトー圧や気流中の静圧測定では、圧力計までの中継として圧力計測用の導管を用いる。測定圧力値や導管の内径が小さくなるにつれて、また、導管が長くなるにつれて、この導管の抵抗係数は増大し、圧力測定の応答時間は、長くなる。アーク加熱風洞実験では、気流持続時間が長いことから測定室の外に圧力計をおき圧力計測を行ってきた。

ピトー圧計測では、導管は内径 $\phi 2$ 、長さ 520mm + 内径 $\phi 3$ 、長さ $1,600\text{mm}$ を使用し、圧力計を測定室の外に取り付けて計測を行った。しかし、静圧のような圧力が低い圧力計測では、この導管を用いた場合、コンダクタンスやアウトガス等により応答時間が非常に長くなり、圧力計測

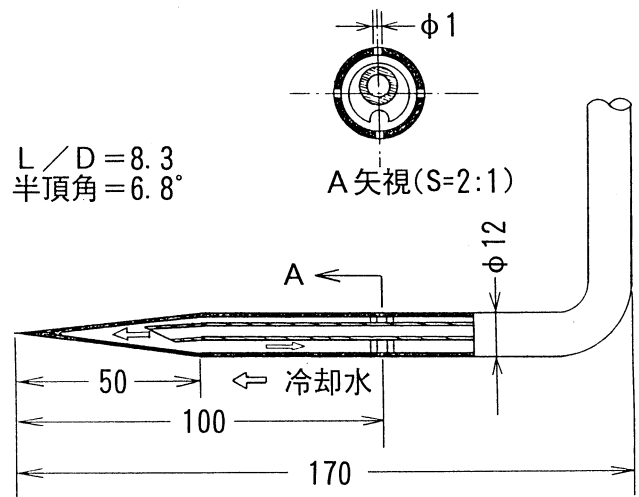


図 3 静圧管

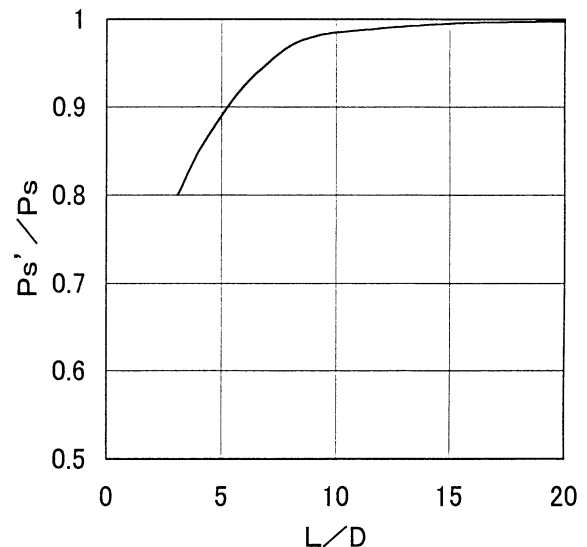


図 4 超音波流用静圧管と管に沿う圧力回復

ができないことがわかった。このため静圧計測では、導管をできるかぎり短くするため、圧力計を測定室内で使用することにした。その結果、静圧導管は内径φ2、長さ890mmとなった。

なお、測定室の環境は、真空中、かつ、拡散筒のペルマウスから溢れたプラズマガスにより圧力計等が加熱され温度変化する。圧力計の仕様は、1 気圧及び常温であるため、このような環境では使用できない。特に精度が良い圧力計は、温度変化の影響を敏感に感じとってしまう。このため、圧力計は、温度変化の影響を最小にするため冷却水で冷却して環境温度を常温定常にし、かつ、大気を導入した圧力計用筐体の中に入れ、圧力計の性能を満足させて使用した。

a) 压力応答試験装置

当風洞の極超音速流の圧力計測では、真空状態から瞬間的に一定圧力が加わる。このような状態を模擬するため、文献 12 で使用された圧力応答試験装置を使用した。その詳細図を図 5 に示す。装置は、圧力容器、圧力導入系(オリフィス、導入管路)、圧力計、排気装置、リーク弁、電磁石及び弁から構成され、材料はステンレス材を使用した。試験では、まず、圧力容器と圧力導入部(=圧力測定系)の間の電磁弁を開とし、排気装置により全体を排気して設定圧力まで減圧する。次に、電磁弁を閉にした上で、リーク弁を開いて圧力容器内を任意の高い圧力値に設定する。その後、電磁弁を瞬間的に開にし、その圧力を圧力測定系に与え、圧力応答時間を計測する。

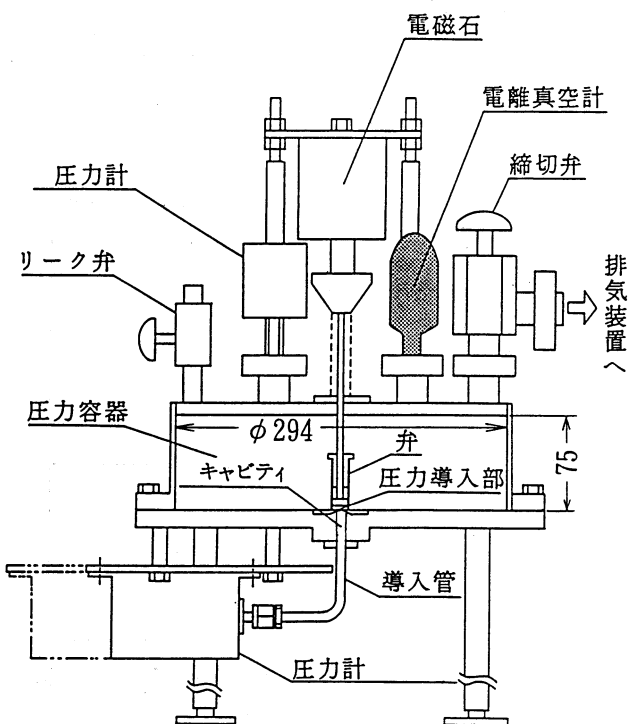


図 5 圧力応答試験装置

b) 压力応答時間

圧力応答試験では、圧力導入部のオリフィス直径を $\phi 1\text{mm}$ 、ピトー圧測定系導管（内径 $\phi 2$ 、長さ 520mm + 内径 $\phi 3$ 、長さ $1,600\text{mm}$ ）および静圧測定系導管（内径 $\phi 2$ 、長さ 890mm ）からなる圧力測定系の応答時間を実験的に求めた。圧力応答時間は、圧力測定系圧力が圧力容器の任意に設定した圧力に達する過程を計測する。データの計測は、A/D 変換器 14bit、分解能 $1\text{ }\mu\text{V}$ 、サンプリングタイム 100kHz の性能を有するオムニレコーダを使用して行った。得られた圧力計の時間的変化を図 6 に示す。圧力応答時間は、ピトー圧の測定圧力範囲（ $0.13 \sim 13\text{kPa}$ ）静圧の測定圧力範囲（ $13 \sim 133\text{Pa}$ ）に相当する各々に対し約 $30 \sim 0.62\text{sec}$ 、約 $130 \sim 32\text{sec}$ が得られた。静圧測定系の応答時間は、予想以上に長くなった。これは、静圧測定系の導管の長さは 890mm と最小限にしたが、強制冷却した静圧

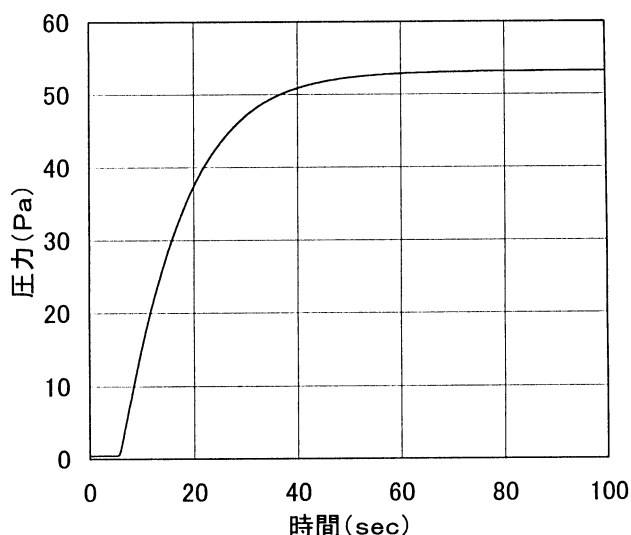


図 6 圧力計出力の時間的变化

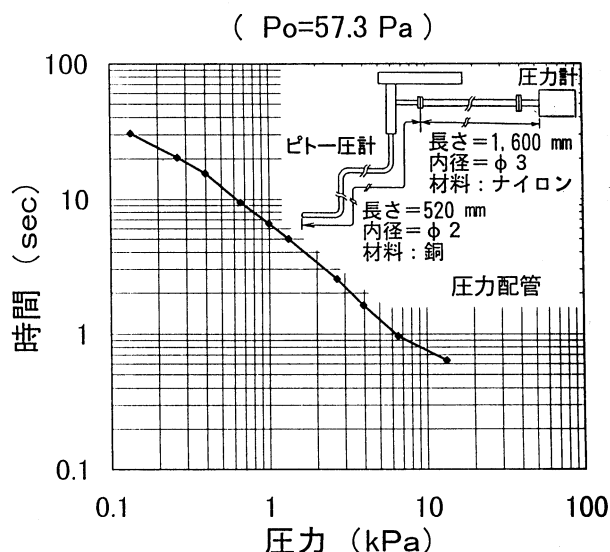


図7 ピトー圧計測系の圧力応答時間

管の外径をできる限り小さくした影響を受け、導管の内径が $\phi 2\text{mm}$ と比較的細かったためである。得られた圧力計測系の応答時間として、設定圧力の 98% のピトー圧計測系の到達時間を図 7 に、静圧計測系の到達時間を図 8 に示す。

($P_o=1.07\text{ Pa}$)

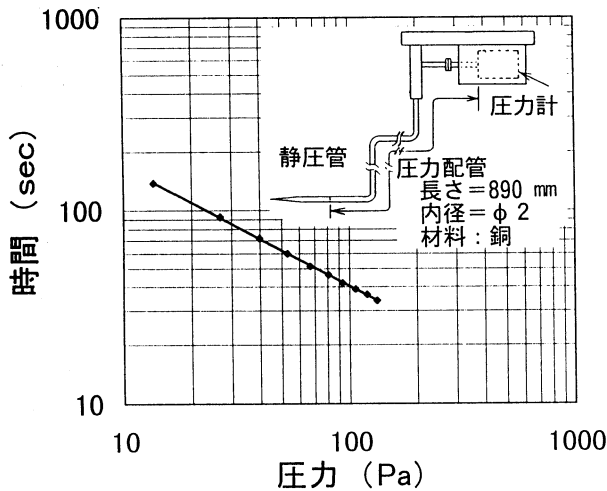


図 8 静圧計測系の圧力応答時間

2.3 圧力計と校正

a) 圧力計の性能およびトレーサビリティ

圧力計測に使用する圧力計は、ピトー圧計用及び静圧計用等に使用する風洞試験用圧力計と、これらの圧力計を校正する標準圧力計がある。圧力計の主な性能を表 2 に示す。標準圧力計は、高精度圧力計測ができ、周囲温度変化の影響を最小にするため通常 45°C に制御されている MKS (株) (日本エム・ケー・エス) 製バトラロンの隔膜静電容量型・絶対圧型を用いた。センサーの材質はインコネルを使用し、絶対圧型センサーは、リファレンス側が 0.013mPa の高真空中で排気、密封し高真空を保持している。ピトー圧力計は、軌道再突入実験 (OREX) における高々度圧力を良好に計測⁶⁾した同型の高性能な隔膜型静電容量型圧力計を使用した。

図 9 にアーク風洞の圧力計測トレーサビリティ体系図を示す。日本エム・ケー・エス (株) は、米国の NIST でトレーサビリティ (値付け) を確認した米国 MKS の基準器 Primary Std. から日本 MKS の基準器 Master Std., さらに、そこから日本 MKS の校正用基準器である Transfer Std. へとトレーサビリティを保持している。アーク風洞

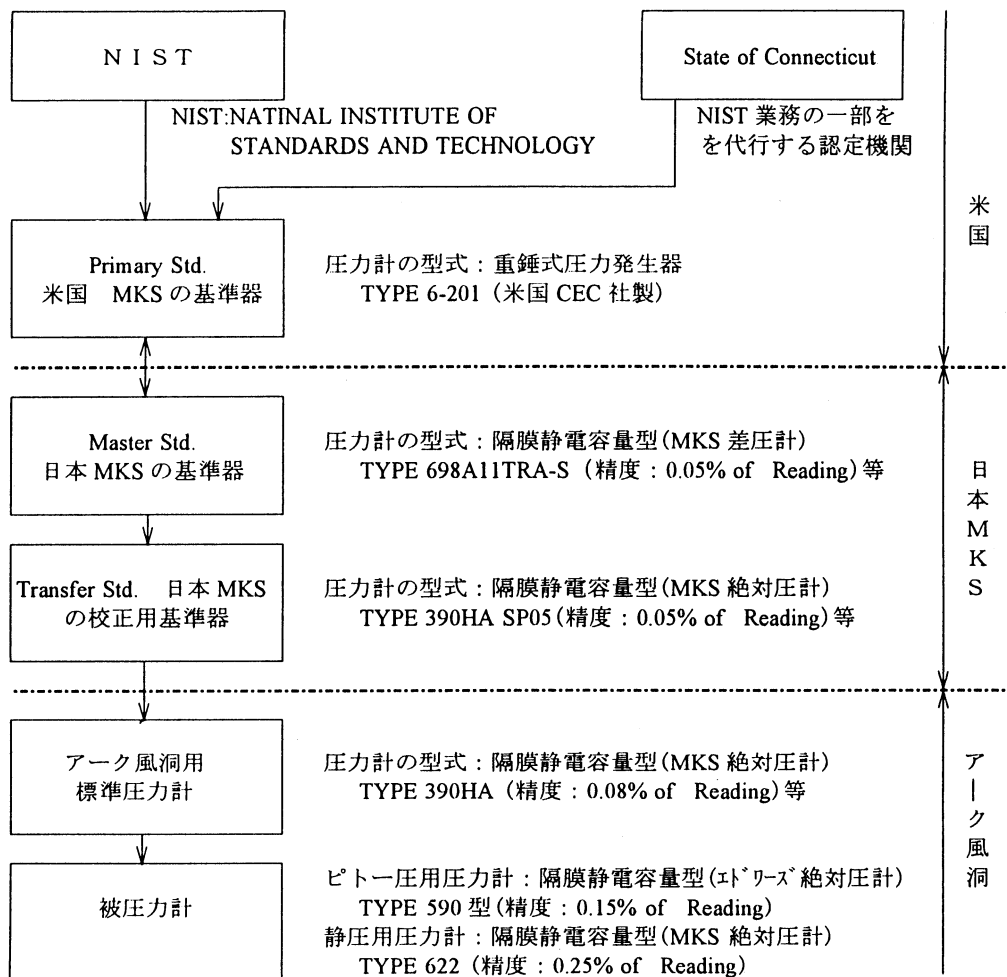


図 9 アーク風洞圧力のトレーサビリティ体系図

表 2 圧 力 計 の 性 能

	標準圧力計	ピトー圧計	静 圧 計
型	隔膜静電容量型 絶対圧型 MKS 製 390HA 型	隔膜静電容量型 絶対圧型 イトワース製 590 型	隔膜静電容量型 絶対圧型 MKS 製 622 型
圧 力 範 囲	0 ～ 13.33 kPa	0 ～ 13.33 kPa	0 ～ 266.6 Pa
精 度	0.08 % of R.	±0.15 % of R.	0.25 % of R.
分 解 能	0.0133 Pa	0.133 Pa	0.0266 Pa
圧力応答時間	< 25 msec	8 msec	< 20 msec
使用温度範囲	15 ～ 40 °C	5 ～ 70 °C	0 ～ 50 °C

R. : Reading

用の標準圧力計は、定期的に日本 MKS の校正用基準器 Transfer Std. によりトレーサビリティ - を確認している。本研究におけるアーク風洞の圧力計測範囲が静圧で 0 ～ 約 133.0Pa、ピトー圧で 0 ～ 約 8kPa であるため、今回の日本 MKS の校正用基準器 Transfer Std. から標準圧力計のトレ - サビリティ - を確認する圧力範囲は、0 ～ 133.0Pa 及び 0 ～ 13.3kPa で行った。トレーサビリティ - 確認前に行った日本 MKS の校正用基準器 Transfer Std. と標準圧力計の校正試験結果を表 3 に示す。標準圧力計の校正結果の最大誤差は、0 ～ 133.0Pa の圧力範囲で 0.11%、0 ～ 13.3kPa の圧力範囲で 0.19% であった。日本 MKS の校正用基準器 Transfer Std. からの標準圧力計へのトレーサビリティ保持のための調整は、電気回路を調整することにより行った。トレ - サビリティ - 確認後の標準圧力計の校正試験結果を表 4 に示す。標準圧力計の校正後の誤差は、0 ～ 133.0Pa の圧力範囲で 0.0%、0 ～ 133.0kPa の圧力範囲で最大誤差は 0.04% となり、標準圧力計のトレ - サビリティ - は、非常に良好である。

b) 圧力計測システム全体の校正

圧力計測に使用するピトー管、静圧管、圧力計及び計測用導管を含む圧力計測系は、新たに設計製作した高性能圧力校正装置により校正を行った。図 10 に圧力校正装置のブロック図を示す。圧力校正装置は、校正用タンク、標準圧力計、圧力調整弁、標準圧力供給器、油拡散ポンプや油回転ポンプ及び排気装置からなり、標準圧力系となる校正タンクや配管は、全て SUS 材を、校正圧用配管、標準圧用配管及び仕切弁の内径は $\phi 25$ を、継ぎ手は全て Oリングを使用して、アウトガス及び漏れの量を無視できるまで小さくした。圧力校正時には、圧力校正の精度向上のため、被圧力計の分解能より低い圧力に排気して被圧力計の電気系のゼロ調整をとることが望ましい。このため、被圧力計の電気系のゼロ調整の際には、ピトー圧のような高レンジの場合は油回転ポンプにより 6.7Pa (10^{-2} Torr) まで、静圧のような低レンジの場合は油拡散ポンプにより 10^{-5} Pa (10^{-7} Torr) まで排気してゼロ調整を行った。圧力校正は、圧力調

表 3 トレ - サビリティ - 前の標準圧力計の校正試験結果

1.0% of F.S.			100% of F.S.		
基準器	被測定器	誤差	基準器	被測定器	誤差
基準圧	測定圧		基準圧	測定圧	
(kPa)	(kPa)	(%)	(kPa)	(kPa)	(%)
0.0000	0.0000	0.0	0.0000	0.0000	0.0
0.0133	0.0133	0.0	1.3370	1.3378	0.06
0.0269	0.0269	0.0	2.6691	2.6716	0.09
0.0403	0.0403	0.0	4.0049	4.0090	0.10
0.0536	0.0536	0.0	5.3393	5.3449	0.10
0.0668	0.0668	0.0	6.6701	6.6774	0.11
0.0803	0.0803	0.0	8.0039	8.0132	0.12
0.0937	0.0937	0.0	9.3395	9.3513	0.13
0.1069	0.1069	0.0	10.6675	10.6828	0.14
0.1204	0.1205	0.11	11.9984	12.0182	0.16
0.1335	0.1336	0.10	13.3377	13.3626	0.19

表 4 トレ - サビリティ - 確認後の標準圧力計の校正試験結果

1.0% of F.S.			100% of F.S.		
基準器	被測定器	誤差	基準器	被測定器	誤差
基準圧	測定圧		基準圧	測定圧	
(kPa)	(kPa)	(%)	(kPa)	(kPa)	(%)
0.0000	0.0000	0.0	0.0000	0.0000	0.0
0.0135	0.0135	0.0	1.3368	1.3370	0.01
0.0268	0.0268	0.0	2.6862	2.6862	0.00
0.0401	0.0401	0.0	4.0114	4.0114	0.00
0.0535	0.0535	0.0	5.3534	5.3531	0.00
0.0667	0.0667	0.0	6.6884	6.6877	-0.01
0.0801	0.0801	0.0	8.0264	8.0256	-0.01
0.0933	0.0933	0.0	9.3503	9.3495	-0.01
0.1068	0.1068	0.0	10.6820	10.6822	0.00
0.1200	0.1200	0.0	12.0179	12.0210	0.03
0.1333	0.1333	0.0	13.3391	13.3442	0.04

整バルブにより手動で任意に標準圧力を設定し、この圧力を標準圧力計により測定するとともに、この値と被校正圧力計の出力値を比較し、下に述べるように最小自乗法による一次回帰解析によって感度係数及びオフセットを求める。

図 11 に圧力校正系の概要を示す。圧力校正は、ピトー管や静圧管に標準圧力供給器を取り付け、ピトー管、静圧管、圧力計及び計測用導管を含む圧力計測系(気流計測時と同じ条件)を圧力校正装置から圧力孔に直接標準圧力を印可して行った。この校正法は、圧力計測系の配管や継ぎ手等を含めた校正であるため、圧力計測システム全体を精度良く校正することが可能である。得られたピトー圧計測

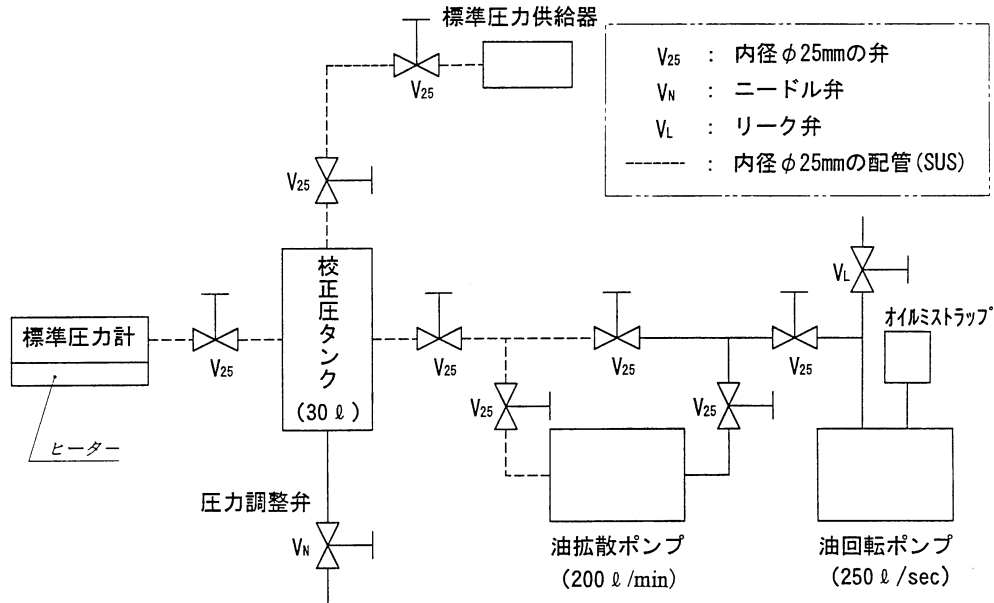


図 10 圧力校正装置のブロック図

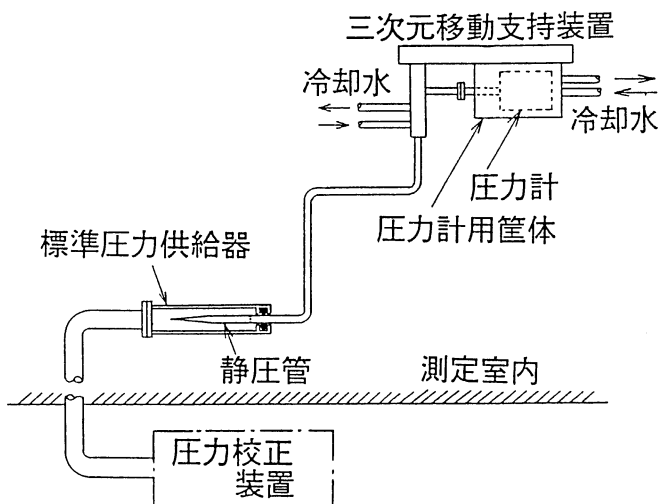


図 11 圧力校正系の概要

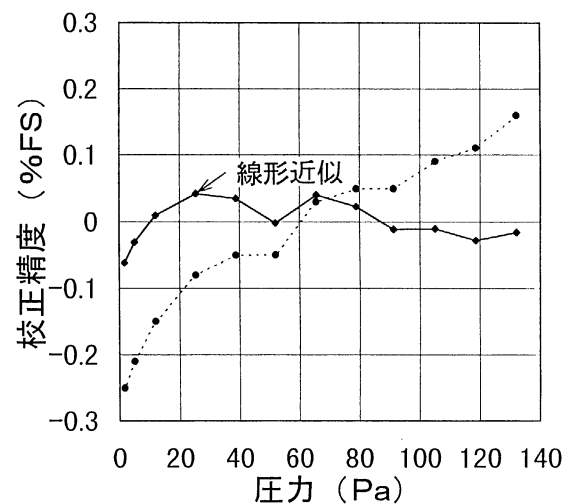


図 13 静圧計測系の校正精度

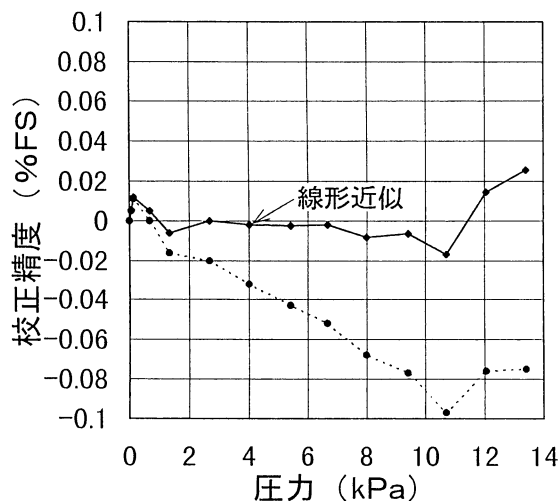


図 12 ピトー圧計測系の校正精度

系及び静圧計測系の校正結果を点線でそれぞれ図の12、13に示す。誤差幅は、実際の計測に問題となるレベルではないが、計測値の誤差を更に小さくするため、得られたデータを最小自乗法により線形近似して新たな校正直線を求め、これを用いて処理を行った。得られた結果は図中の実線であり、圧力値の精度は、ピトー圧計測系が0.03 ~ -0.02%FS、静圧計測系が0.04 ~ -0.06%FSとなった。気流を計測した圧力データは、この線形近似した校正直線により校正を行うものとする。

3. ピトー圧分布、静圧分布の計測

アーク加熱器は、3パック、作動ガスは空気を用いた。ガス流量は、アーク加熱器により加熱されるガス流量を1次

ガス流量 $\dot{m}g1$ とし、アーク加熱器により加熱された直ぐ下流に導入するガス流量を2次ガス流量 $\dot{m}g2$ とした。この2次ガス流量 $\dot{m}g2$ の導入は、アーク加熱風洞の定格枠外の運用によるものである⁴⁾。試験条件は、1次ガス流量 $\dot{m}g1$ を 8.0, 12.0, 16.0 g/s、とし、1次ガス流量 $\dot{m}g1$ の各々の値に対してアーク電流 I を 400, 500, 600 A で行った。これらの条件で得られたアーク加熱器入力電力 P 、アーク加熱器内圧力 P_o 及びエンタルピ h を表5に示す。エンタルピ h は、アーク加熱器への入力電力 P から損失分を差引いて求める。損失分は、冷却水への伝熱による損失量を冷却水流

量 $\dot{m}w$ と温度上昇 T から推算した⁴⁾。以後の気流計測結果は、試験条件である1次ガス流量 $\dot{m}g1 = 8.0, 12.0, 16.0$ g/s、アーク電流 $I = 400, 500, 600$ A の各々の値から得られたアーク加熱器内圧 $P_o = 45.6, 66.1, 86.6$ kPa で整理した。

本アーク加熱風洞気流の圧力計測では、三次元移動支持装置に取り付けたピトー管と静圧管をトラバースすることにより圧力分布を計測する。ピトー圧分布はノズル出口から下流 140mm まで、気流中心から半径方向 ± 120 mm までの範囲で計測を行った。また、静圧分布はノズル出口下

表5 試験条件

1次ガス流量 $\dot{m}g1$ (g/s)	アーク電流 I (A)	入力電力 P (kW)	アーク加熱器圧力 P_o (kPa)	エンタルピ h (MJ/kg)
8.0	400	287	45.6	17.8
12.0	500	440	66.1	18.4
16.0	600	609	86.6	19.2

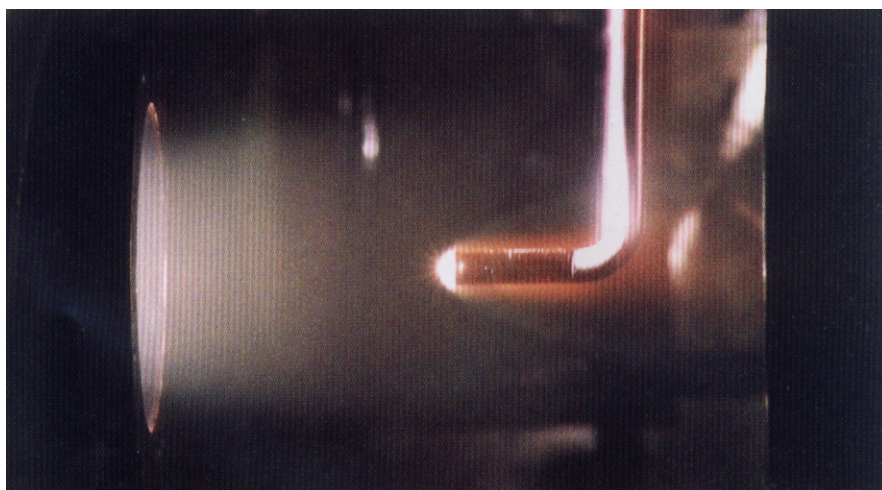


図14 気流のピトー圧計測状況

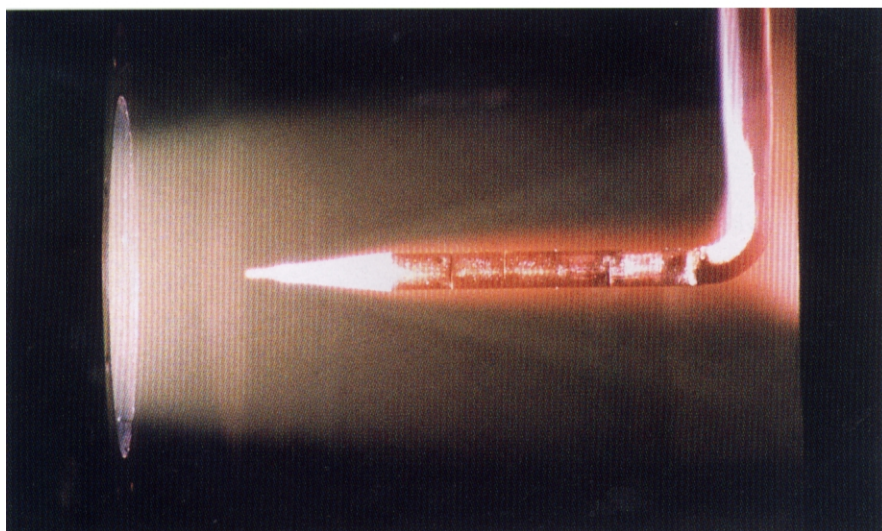


図15 気流の静圧計測状況

流 40mm から 140mm までの範囲で、気流中心軸上の計測を行った。ピトー管、静圧管による気流のピトー圧計測状況及び静圧計測状況の写真をそれぞれ図 14、図 15 に示す。高エンタルピ気流中で各プローブが高い空力加熱を受けているが、問題となる溶融等は生じていない。

図 16、17 に、気流中心軸上および半径方向のピトー圧計測結果を示す。圧力分布の座標軸は、ノズル出口の中心を 0 とし、ノズル出口から下流の気流中心軸方向を $X(+)$ 、気流中心から半径方向を $Y(+)$ 、 $Y(-)$ とした。アーク加熱器内圧値 $P_0=86.6, 66.1, 45.6$ kPa をそれぞれ、 \circ 、 \triangle 、 \square 印とした。図 16 の気流中心軸上のピトー圧分布は、ノズル出口から距離と共に単調に減少することがわかる。また作動ガスの流量の増大あるいは入力電力の増大により、アーク加熱器の内圧が増大するがそれに応じてピトー圧も高くなる。気流中心軸上のピトー圧は 7.3kPa ~ 1.3kPa が得られた。

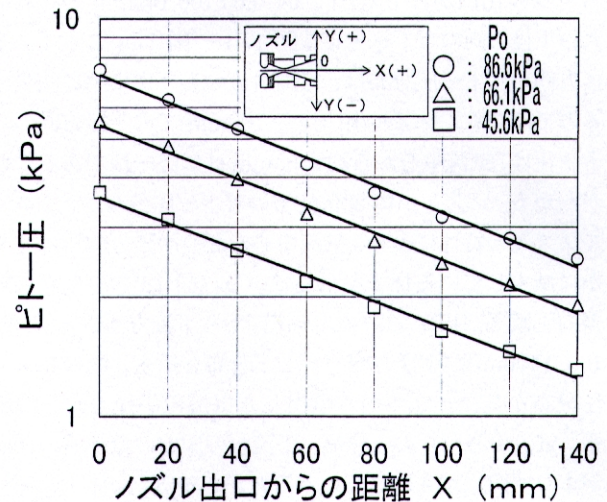


図 16 気流中心軸上のピトー圧分布

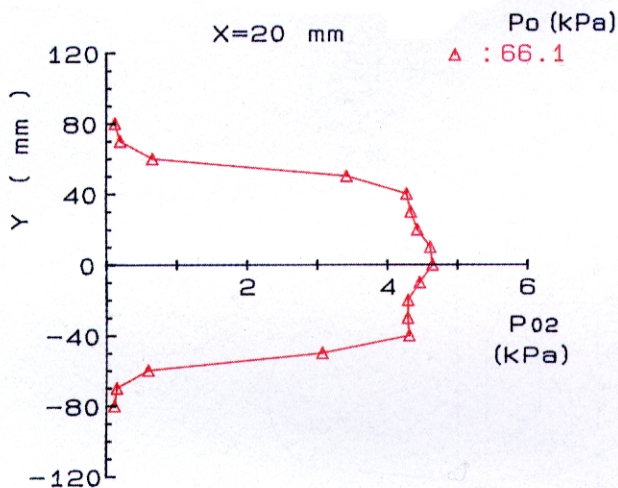


図 17-1 半径方向のピトー圧分布
(ノズル出口から距離 $X = 20$ mm)

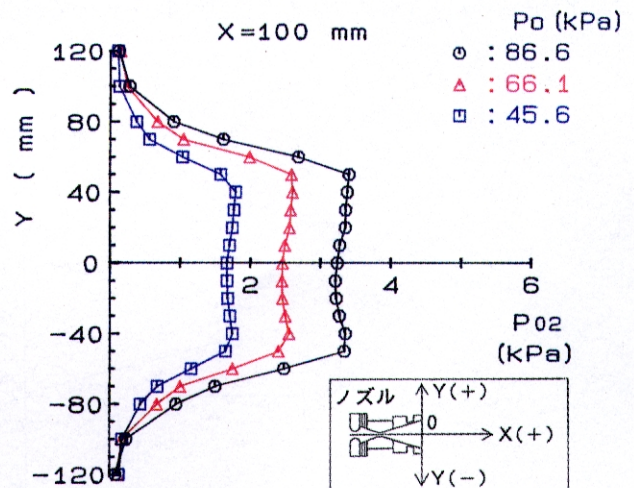


図 17-3 半径方向のピトー圧分布
(ノズル出口から距離 $X = 100$ mm)

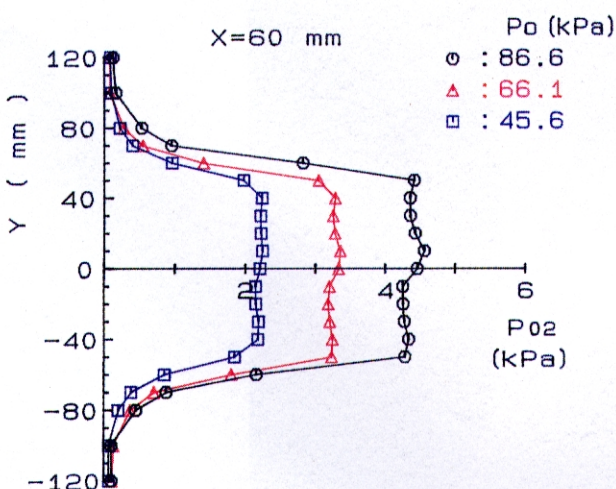


図 17-2 半径方向のピトー圧分布
(ノズル出口から距離 $X = 60$ mm)

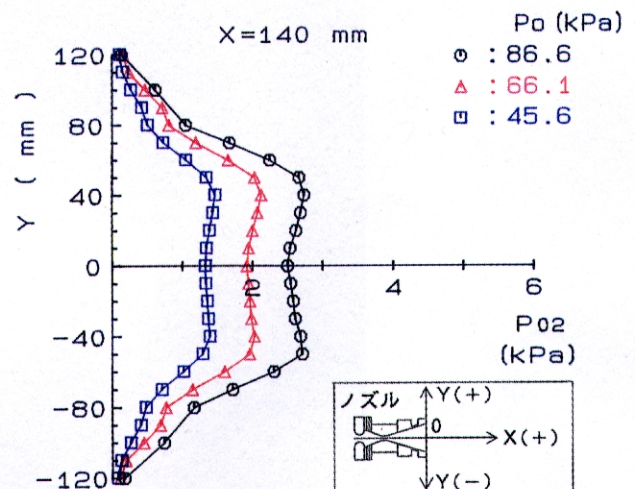


図 17-4 半径方向のピトー圧分布
(ノズル出口から距離 $X = 140$ mm)

ノズル出口から下流方向 $X=20, 60, 100, 140\text{mm}$ のそれぞれの半径方向のピトー分布を図 17-1 ~ 図 17-4 に示す。半径方向のピトー圧分布は、自由噴流のように単調に減少するのではなく、ノズル出口から 100mm での半径方向のピトー圧は、気流中心から約 $\pm 53\text{mm}$ はほぼ一様であることがわかる。ノズル出口 20mm でのピトー圧分布は、コニカルノズルの特性により、気流中心が高く半径方向へは緩やかに減少している様子を示している。図 18 にアーク加熱器内圧値 66.1kPa で、ノズル出口から下流方向 $X=20, 60, 100, 140\text{mm}$ の半径方向のピトー分布を示す。図のピトー圧分布から、ノズルから噴出した気流の半径方向への膨張、気流中心からの一様流、下流への圧力の減少等の傾向がより明瞭に示されていることがわかる。

図 18 の半径方向圧力分布の周辺部でピトー圧が下降開始する位置を印で、ピトー圧と測定室圧がほぼ等しい点を印でプロットした図 19 を示す。図から印で示した範囲が主流のおよそのめやすとなり、印と印の間が境

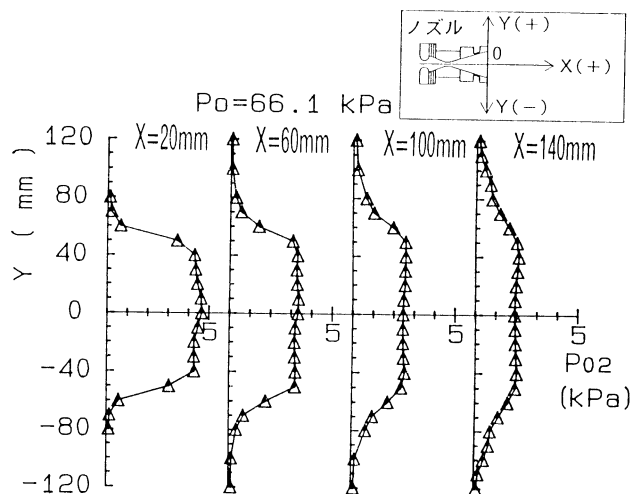


図 18 同一アーク加熱器内圧での半径方向のピトー圧分布

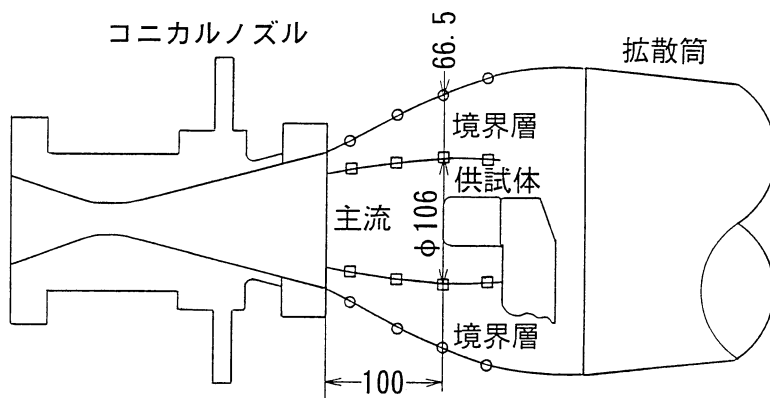


図 19 ノズルから発生した気流

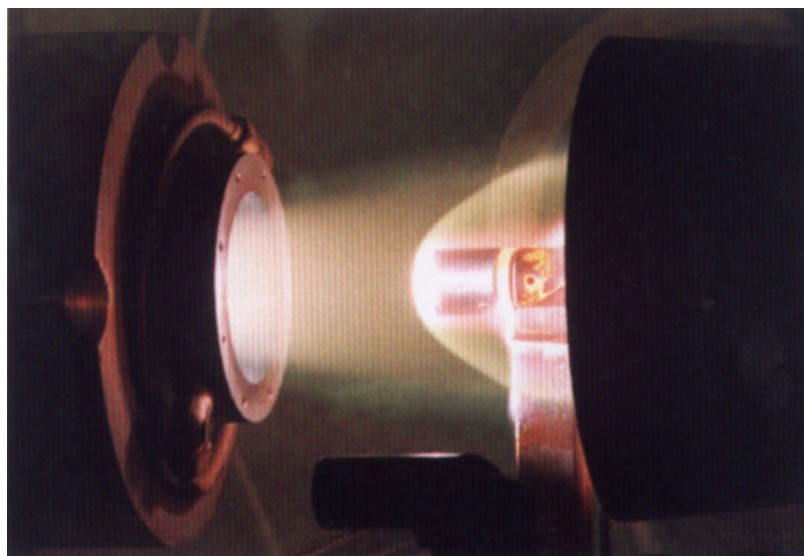


図 20 供試体よどみ点試験状況

界層の厚みとなる。図 19 の位置で行った外径 40mm 供試体のよどみ点試験状況の写真を図 20 に示す。

図 21 に、ノズル出口 40mm から 140mm まで 20mm 間隔で取得した気流中心軸上の静圧分布を示す。図にはアーク加熱器内圧値 86.6, 66.1, 45.6 kPa に対応するデータをそれぞれ、○、△、□印として示している。静圧のような圧力配管計測系では、圧力値が低くなればなるほど応答時間が長くなる。このため、静圧計測では、先に行った圧力配管計測系の応答時間のデータを参考にし、圧力値が十分定常になった時点でデータの取得を行っている。静圧は、ピトー圧分布と同様にノズル出口に近いほど高く、遠くなるに従い単調に減少している様子を示している。静圧の値としては 10 ~ 112 Pa が得られ、圧力校正により十分な精度が確認されている圧力範囲で計測された。

4. 圧力計測の CFD 解析への寄与

最近では、風洞試験に対応した CFD 解析を実施し、実験結果との比較を行うことは、そこで起こっている流体現象の把握や実験精度の確認等を行う上で、有効な方法の一つとなっている。アーク加熱風洞気流は、他の地上実験設備では困難とされる窒素の高速解離流が容易に得られるという、熱防護系材料の熱評価にとって有利な面がある反面、CFD 解析に必要な一様流条件の特定が難しく、空力加熱等の定量的な評価を行う際には注意が必要である。特に、本風洞ではコニカルノズルを使用しているため、供試体付近の流れ場は一樣ではなく膨張流となっている。このため、CFD 解析では供試体淀み点前方の垂直衝撃波が形成される付近の流れの諸量を一様流条件で仮定し、精度良く推定する必要がある。

平成 12 年度に実施した熱防御材表面触媒性の計測試験では、前項までに述べた圧力計測技術を用いて計測した圧力データを併用する事によって流れの一樣流条件を推定し、有限触媒性を有する熱防護材の評価を行った。本試験

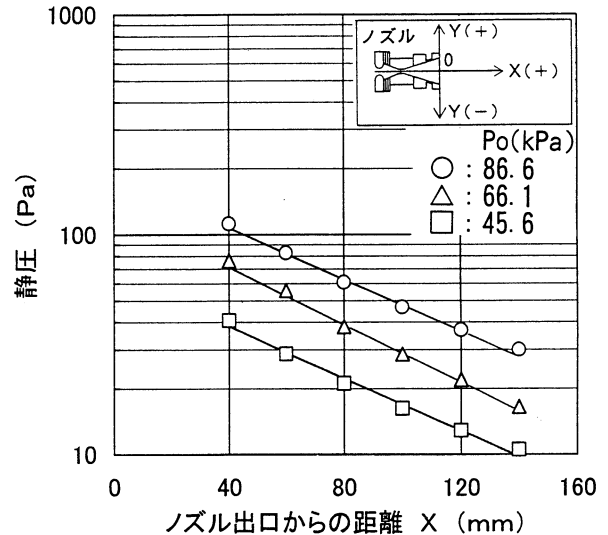


図 21 気流中心軸上の静圧分布

では、試験条件であるガス流量とアーク電流から得られた入力電力、エンタルピ、アーク加熱器内圧等の他に、CFD 解析の一樣流条件の推定に必要なピトー圧と静圧の計測及びガードン式カロリメータによる空力加熱測定が行われ、これらの実験値と CFD による予備解析を併用することにより流れの諸量を決定した。具体的には、この触媒性試験では、比較的加熱率の低い条件を得るため、アーク加熱器は 2 バックとし、低、中、高の 3 通りの試験条件で行った。加熱率測定は、いつも供試体と同一形状の $\phi 40$ 平頭円柱型ガードン型カロリメータの加熱率プローブを用いた。得られた計測結果を表 6 に示す。試験条件の低、中、高の各々の値に対しピトー圧は 2.0, 2.01, 3.19 kPa、静圧は 25.2, 22.3, 40.8 Pa のデータが取得され、以下に示す手順により、気流温度、気流速度等の一樣流条件を推定した。一樣流の推定手順の詳細は、文献 14 を参照されたい。

(1) 試験条件に対応するアーク加熱気流ノズル上流淀み点状態を熱平衡と仮定して計算し¹³⁾、一樣流における質

表 6 風洞試験条件及び計測結果

加熱条件	1 次ガス流量 (g/s)	2 次ガス流量 (g/s)	アーク電流 (A)	入力電力 (kW)	エンタルピ (MJ/kg)	加熱率 (MW/m ²)	ピトー圧 (kPa)	静圧 (Pa)
低	8.0	6.0	300	200	9.4	0.571	2.0	25.2
中	10.0	0.0	405	282	16.5	1.045	2.01	22.3
高	16.0	0.0	560	491	17.9	1.517	3.19	40.8

表 7 一樣流推定結果

加熱条件	一樣流並進温度 (K)	一樣流振動温度 (K)	一樣流密度 (kg/m ³)	一樣流速度 (m/s)
低	360	4000 (推定値)	2.08×10^{-4}	3233
中	375	4000 (推定値)	1.51×10^{-4}	3798
高	502	4000 (推定値)	2.02×10^{-4}	4139

量分率を求める。

- (2) 一様流振動温度を与える。
- (3) 並進温度をパラメトリックに仮定する。
- (4) 淀み点圧力の無次元量($p_s/\rho U^2$)は約 0.9 でほぼ一定であるという点を考慮し、圧力の測定値を用いて密度及び速度等の解析に必要な諸量を求める。
- (5) ガードン式カロリメータは水冷しているため、400K の低壁温、完全触媒壁条件のもとで CFD 予備解析を行い空力加熱量を求める。
- (6) (3)から(4)のプロセスを繰り返し、ガードン式カロリメータによる空力加熱測定値と一致する並進温度に相当する諸量を一様流条件とする。

表 7 に諸量の推定値の結果を示す。これらを一様流条件として CFD 解析条件に与えることにより、供試体加熱率の評価に置いて実験と計算が良く一致した結果が得られた¹³⁾。これは、本報告で確立された技術を用いて計測された圧力を CFD 解析にフィードバックすることで良好な結果を得ることができたものであると考えられ、アーク加熱風洞の気流診断において、本報告における圧力計測技術が有効であることを示すものである。

5 . まとめ

750kW アーク加熱風洞において、高エンタルピ気流の圧力データを取得するため、ピトー管および静圧管を設計し、圧力応答時間の評価と精度の良い校正を行った上で、圧力計測試験を行った。以下に結果を要約して示す。

1. アーク加熱風洞の高エンタルピ流の圧力計測は、できる限り導管を短くした上で圧力応答時間を調べ試験が可能であることを確認するとともに、導管を含めた圧力計測システム全体をトレーサビリティを確認した標準圧力計によって精度良く校正することにより、信頼できる圧力計測システムを構築することができた。
2. 試験範囲、総エンタルピが 17.8 ~ 19.2MJ/kg、総圧が 45.6 ~ 86.6kPa において、圧力計測の結果、気流中心軸上のピトー圧は約 1.3kPa ~ 7.3kPa、静圧は約 10Pa ~ 112Pa が得られた。また、気流の中心軸上の圧力分布は、ノズル出口から距離と共に単調に減少している。これは、コニカルノズルの特性に合致し、計測されたデータは妥当な結果であるといえる。
3. ノズル出口下流の約 100mm の位置(通常供試体試験が行われる位置)で、半径方向±約 53mm の範囲のピトー圧分布が、ほぼ一様であることがわかった。
4. 確立された圧力計測技術を用いて計測した圧力データを CFD 解析に対してフィードバックすることにより、一様流条件の推定を可能とし、CFD 解析結果を得るために大きく寄与することができた。

参考文献

- 1) 松崎貴至、渡辺泰夫、石田清道、板垣春昭他；750kW アーク加熱風洞について、第 37 回宇宙科学技術連合講演会、1993 年 3 月
- 2) 渡辺泰夫、松崎貴至、板垣春昭他；アーク加熱風洞の改修と放射率計測、日本航空宇宙学会誌、第 42 巻、第 482 号、P141 ~ P149,1994
- 3) Watanabe,Y., Matsuzaki,T., Ishida, K., Itagaki, H., Yudate, K., Yoshinaka, T.; Characteristics of the 750kW Arc Heated Wind Tunnel, Proceedings of 19th ISTS 94-d-36, Yokohama 1994, pp. 377-381
- 4) 松崎貴至、渡辺泰夫、石田清道、三保和之他；750kW アーク加熱風洞の構造と動作特性、航空宇宙技術研究所資料、TM-760,2001 年 11 月
- 5) 渡辺泰夫、石田清道、白井紘行；750kW アーク加熱空気流における NO バンド発光の分析、航空宇宙技術研究所報告、TR-1417、2000 年 12 月
- 6) 白井紘行、渡辺泰夫；アーク加熱空気流における NO バンドの測定と分析、第 42 回宇宙科学技術連合講演会、1998 年 10 月
- 7) 渡辺泰夫、松崎貴至、石田清道他；アーク加熱窒素気流の諸特性、第 31 回流体力学講演会、1999 年 10 月
- 8) 渡辺泰夫、松崎貴至、石田清道他；アーク加熱気流の熱流束計測；航空宇宙技術研究所特別資料、SP-38、P67-P78、1998 年 1 月
- 9) 渡辺泰夫、松崎貴至、石田清道他；集中熱容量式(スラグ)カロリメータによるアーク加熱気流の熱流束計測；航空宇宙技術研究所報告、TR-1388、1999 年 6 月
- 10) 石田清道、渡辺泰夫、松崎貴至、伊藤健他；アーク加熱チャンネルノズル流の気流診断、航空宇宙技術研究所報告；TR-1446
- 11) Shapiro, A.H., The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow, 2(1954), P.697, The Ronald Press.
- 12) 松崎貴至、井上安敏；軌道再突入実験における高々度圧力計測、航空宇宙技術研究所報告、TR-1281,1995 年 11 月
- 13) T.E. Horton, W.A. Menard; A Program for Computing Shock-Tube Gasdynamic Properties, NASA CR-99337, Jan. 1969
- 14) 黒滝卓司、伊藤 健、松崎貴至、石田清道、渡辺泰夫；アーク加熱風洞における熱防護材表面触媒性の CFD 評価について、第 33 回流体力学講演会講演集、Sep. 2001, pp.73-76