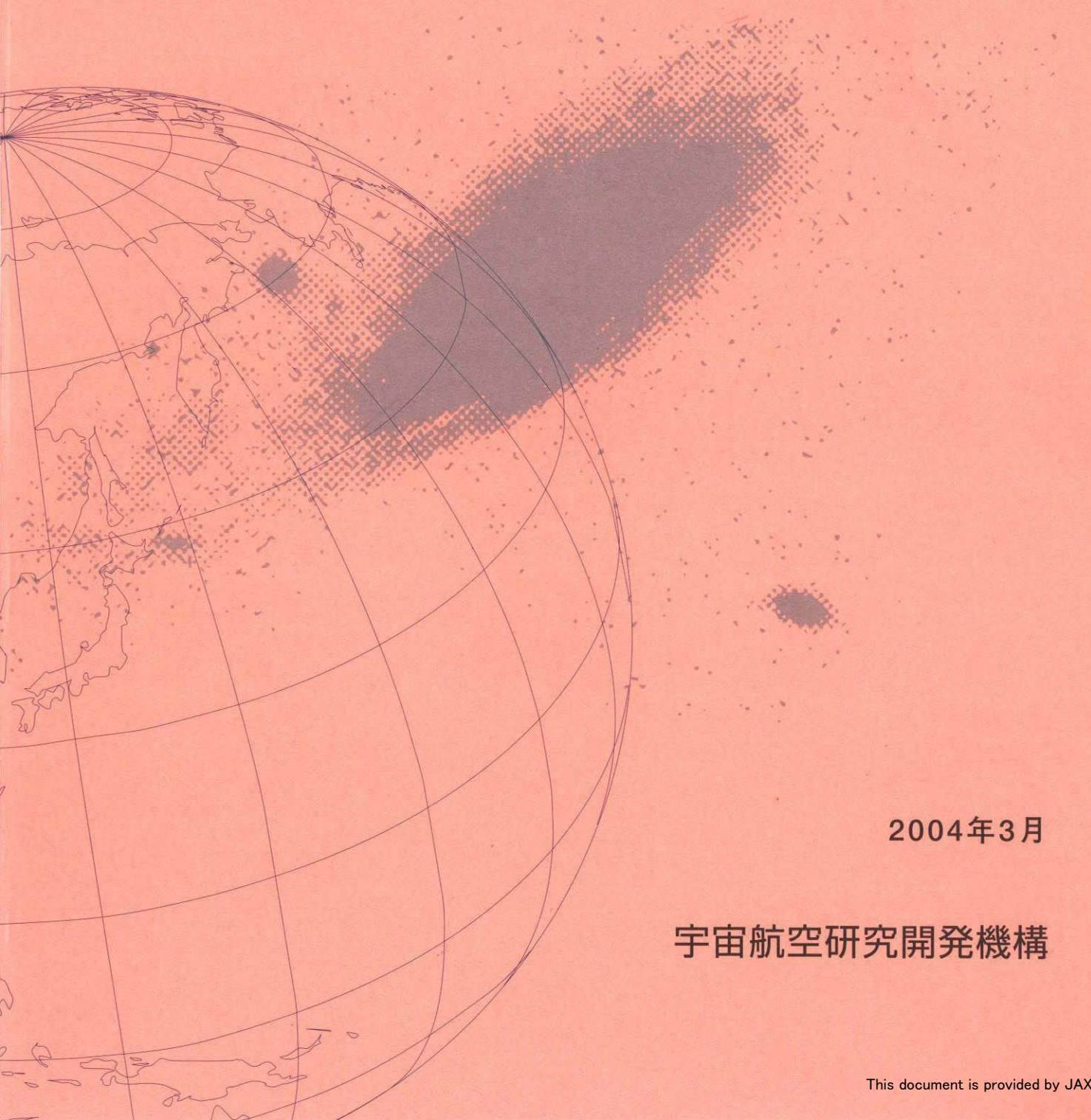


宇宙航空研究開発機構研究開発資料

# 20KW小型アーク風洞試験設備の性能測定



2004年3月

宇宙航空研究開発機構

宇宙航空研究開発機構研究開発資料  
JAXA Research and Development Memorandum

20KW小型アーク風洞試験設備の性能測定  
Evaluation of the Performance of 20KW Arc Wind Tunnel

芳仲 敏成

Toshinari YOSHINAKA

総合技術研究本部 システム評価技術グループ  
Space Systems Evaluation Engineering Group  
Institute of Space Technology and Aeronautics

2004年3月  
March 2004

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



和 文 抄 録	98年度より耐熱技術の研究で活用している、超高温材料研究センターのエロージョン試験機の性能測定状況、問題点、今後の課題について報告する。
和文キーワード	Slug カロリメータ、Gardon gauge、エロージョン試験機



# 目 次

1. 目的.....	1
2. アーク風洞実験.....	1
3. 測定結果.....	1
4. 評価.....	9
5. 参考文献.....	9



### 1.目的

98年度より耐熱技術の研究で活用しているエロージョン試験機の性能測定状況、問題点、今後の課題について報告する。

### 2.アーク風洞概要

エロージョン試験機 (JUTEM) で図1に概要、表1に性能を示す。

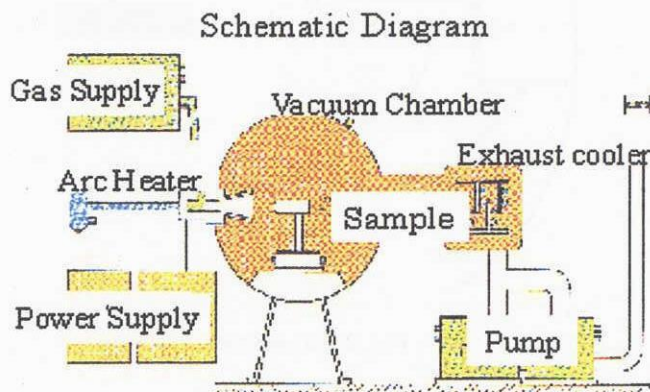


Fig. 1 Schematic diagram of the Erosion Testing Machine

Table 1 Characteristics of Erosion testing machine

Power (KW)	20
Current (A)	80~180
Mass flow (g/s) *	Air : 0.5 ~ 1.0 (25~ 50 litter/min) N2 : 0.39~ 0.78 (20~ 40 litter/min) Ar : 0.14 ~ 0.55 ( 5~ 20 litter/min)
Heating method	Arc heating

\*気体の温度は20℃ (室温) と仮定した。分子量は空気 : 28.8, N2 : 28, Ar : 40、気体の標準状態の式から、20℃で1molの気体の体積は以下により24.0553 litterとして空気流量の換算をした。

$$1(atm) \times 24.0553(litter) = 1(mol) \times 0.0821 \times 293(K)$$

尚、ノズル形状は以下の通り

長さ : 120 mm

出口径 : 75 mm

### 3. 測定結果

98年の焼結SiCアーク風洞試験時および2002年のCIRA共同研究時に空気流量、電流、測定位置をパラメトリックの变えて気流の加熱率と圧力を測定した。測定時は図2に示すようにアークヒータ壁面を基準面とした。

- ・ 焼結SiCアーク風洞試験  
スラグカロリメータで加熱率、Pitot管で動圧を測定した。
- ・ CIRA共同研究時  
Gardon gaugeで加熱率をProbeで圧力を測定した。



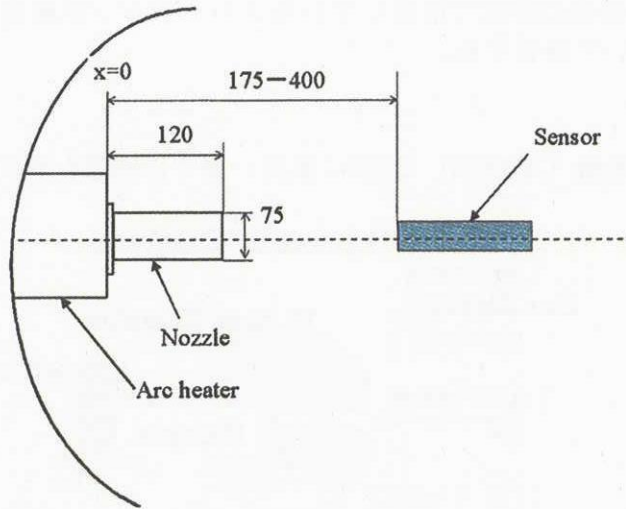
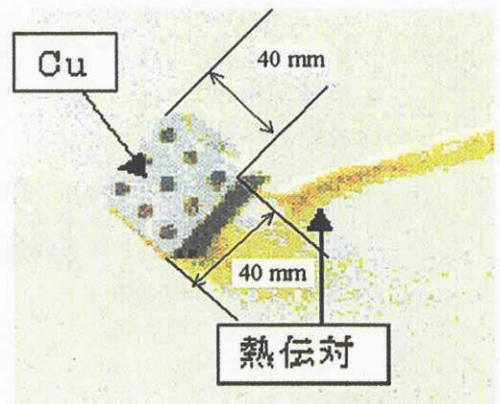
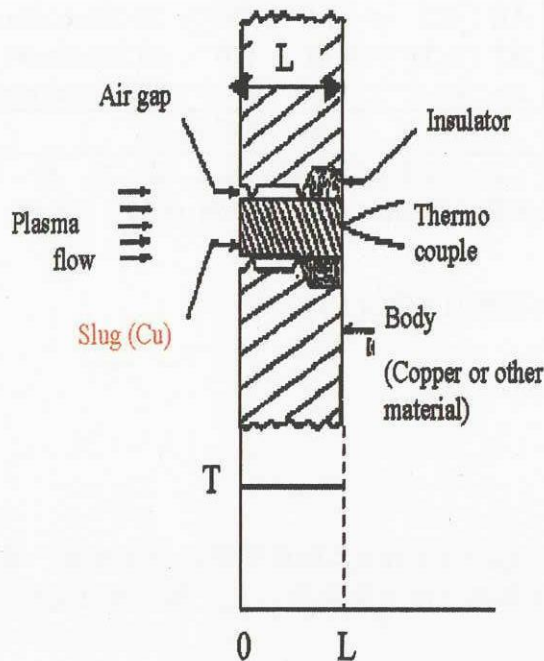


Fig.2 Experimental setup

### 3.1 焼結SiCアーク風洞試験時

#### (1) 加熱率

スラグカロリーメータの概要<sup>(1)</sup>を図3に示す。既知の熱容量の物体 (Cu) をφ40の本体中央に埋め込み周囲を断熱する。プラズマ気流中にカロリーメータを投入するとスラグが加熱されるが、スラグを質点と仮定して表面と裏面温度が等しいとする。



Temperature distribution inside the slug

Fig.3 Outline of the slug calorimeter

裏面に貼り付けた熱伝対による温度測定値から以下の様にして加熱率を算出した。尚、温度測定結果の一例を図4に、加熱率測定結果を図5に示す。

気流投入後の加熱と銅の温度上昇の熱バランスより、

$$L \cdot S \cdot \rho \cdot C \cdot dT/dt = q \cdot S \quad (1)$$

↓

$$q = L \cdot \rho \cdot C \cdot dT/dt \quad (2)$$

↓

$$q = 0.01786 \cdot dT/dt \quad (3)$$

q : 加熱率 (MW/m<sup>2</sup>)      L : 銅の長さ (5 × 10<sup>-3</sup> m)      S : 表面積 (m<sup>2</sup>)  
 ρ : 密度 (8 93 × 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>)      C : 比熱 (400J/kg · K)

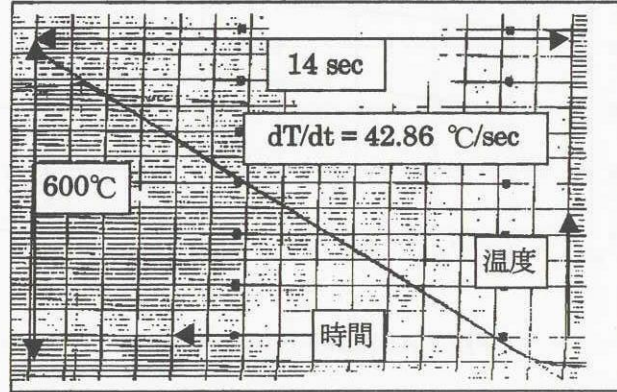


Fig.4 Example of the measured temperatures

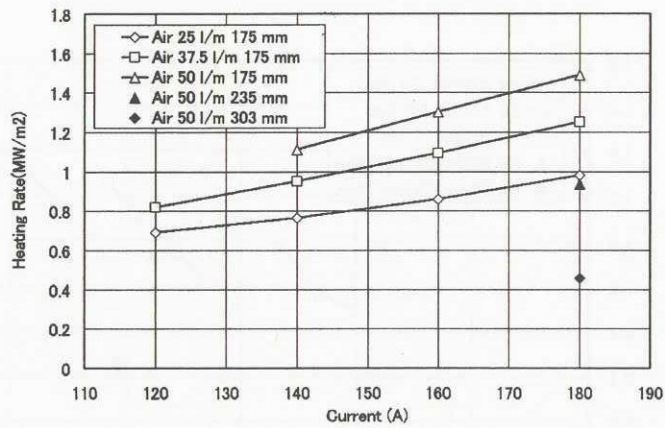


Fig.5 Acquired heat fluxes

(2) 動圧

Pitot管の概要を図6、測定結果を図7に示す。

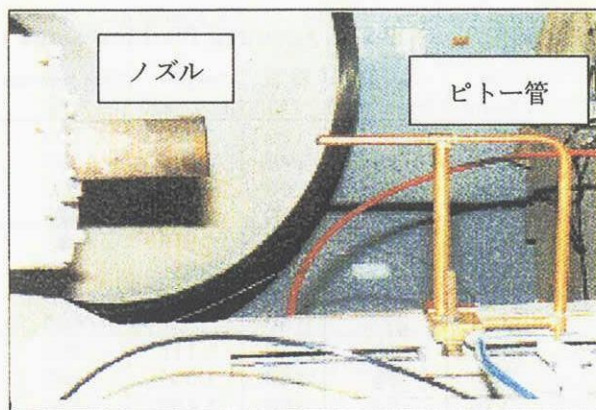


Fig.6 Situation of Pitot pressure measurement

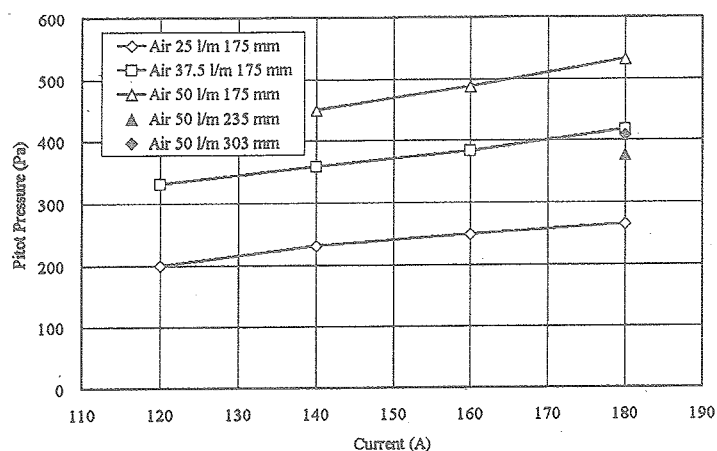


Fig.7 Acquired Pitot pressures.

(3) 運転範囲

取得した加熱率および動圧から、図8に示す様な運転が可能ながわかった。尚、取得した結果を表2に示す。

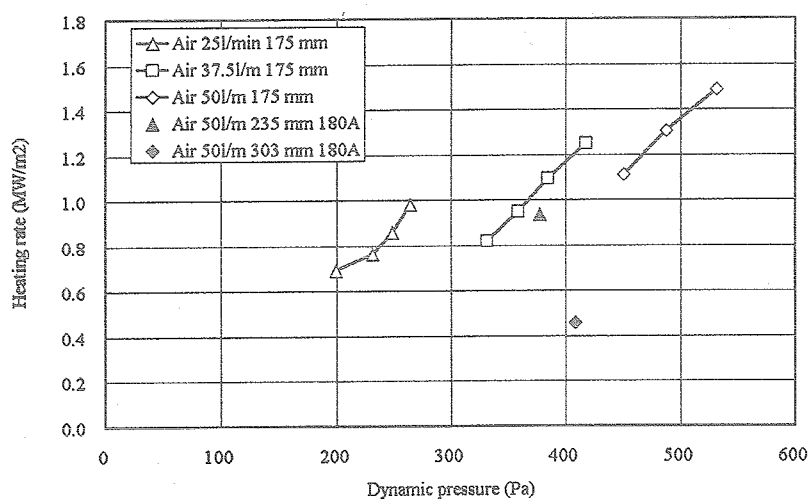


Fig.8 Acquired operation profile

Table 2 Acquired Pitot pressures

X (mm)	流量 (litter/min)	電流 (A)	加熱率 (MW/m <sup>2</sup> )	Pitot Pressure (Pa)
175	25	120	0.693	200
175	25	140	0.765	230
175	25	160	0.859	250
175	25	180	0.981	270
175	37.5	120	0.819	330
175	37.5	140	0.951	360
175	37.5	160	1.094	380
175	37.5	180	1.25	420
175	50	140	1.111	450
175	50	160	1.304	490
175	50	180	1.488	530
235	50	180	0.938	380
303	50	180	0.457	410

### 3.2 CIRA共同研究時

#### 3.2.1 加熱率

##### (1) 原理

Gardon gaugeの概要<sup>(2)</sup>を図9に示す。円形のコンスタンタンフィルム（感熱部）、銅製円筒（ヒートシンク）で構成され、銅線がコンスタンタンフィルムの中心と本体に接続される。気流にさらされるとフィルムに熱が吸収されるが、円筒に伝達されるためにフィルム上には図に示すような平衡温度分布が形成される。

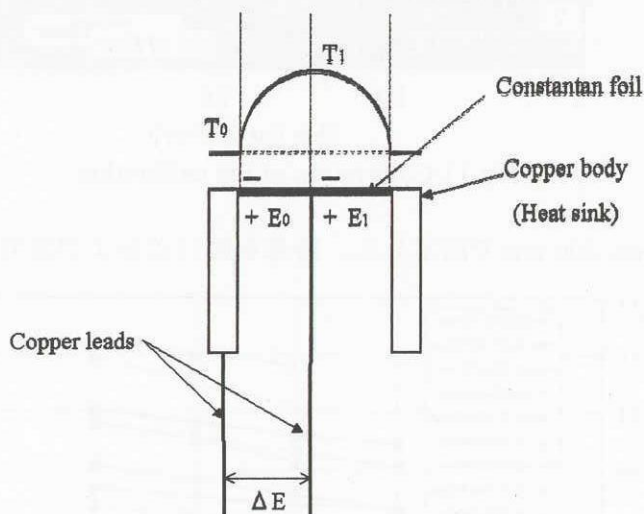


Fig.9 Schematic of Gardon gauge

フィルム中央と端ではそれぞれ銅線および銅製円筒と接触するため、加熱時には熱起電力が発生するが、その差 $\Delta E$ は入熱 $q$ に比例する。 $k$ は比例定数。

$$q = k\Delta E$$

銅製円筒が $-45\sim 235^{\circ}\text{C}$ に保持されれば上式の線形性が保証されるので、アーク気流にさらされる際には円筒は水冷される。測定に用いたのはMEDTHERM Calibration Moduleで外観を図10に、出力電圧と加熱率の相関を図11に示す。形状は $\phi 40$ 、長さ80mmである。

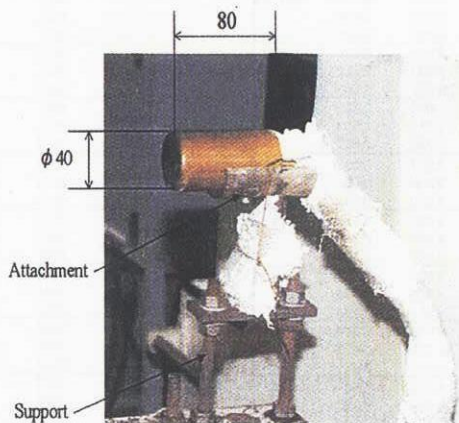


Fig.10 Photograph of MEDTHERM Calibration Module

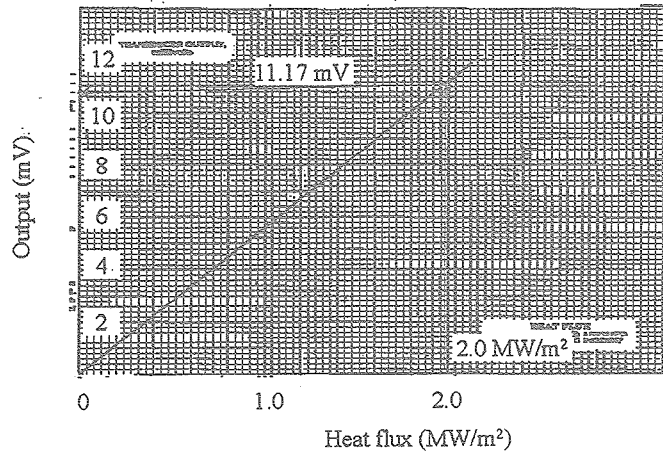


Fig.11 Correlation of the calibration

(2) 測定結果

X=303 mm, 350 mm, 400 mmで測定した。結果を図12におよび表3に示す。

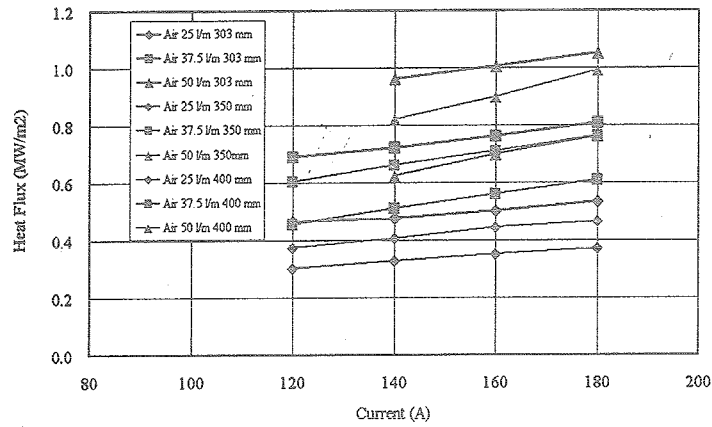


Fig.12 Acquired heat fluxes

Table 3 Acquired data

X(mm) (mm)	Flow (l/min)	Current (A)	Heat Flux (mV)	Heat Flux (MW/m²)	Average
303	25	120	2.640	0.467	0.465
303	25	120	2.621	0.464	
303	25	120	2.614	0.463	
303	25	140	2.681	0.475	0.475
303	25	140	2.682	0.475	
303	25	140	2.692	0.476	
303	25	160	2.830	0.501	0.502
303	25	160	2.837	0.502	
303	25	160	2.841	0.503	
303	25	180	3.007	0.532	0.534
303	25	180	3.019	0.534	
303	25	180	3.033	0.537	
303	37.5	120	3.907	0.692	0.691
303	37.5	120	3.900	0.690	
303	37.5	120	3.900	0.690	
303	37.5	140	4.052	0.717	0.721
303	37.5	140	4.088	0.724	
303	37.5	140	4.083	0.723	
303	37.5	160	4.303	0.762	0.762
303	37.5	160	4.306	0.762	
303	37.5	160	4.309	0.763	
303	37.5	180	4.549	0.805	0.808
303	37.5	180	4.569	0.809	
303	37.5	180	4.581	0.811	
303	50	140	5.423	0.960	0.961
303	50	140	5.440	0.963	
303	50	140	5.430	0.961	
303	50	160	5.680	1.005	1.006
303	50	160	5.685	1.008	
303	50	160	5.670	1.004	
303	50	180	5.945	1.052	1.053
303	50	180	5.948	1.053	
303	50	180	5.954	1.054	

X(mm) (mm)	Flow (l/min)	Current (A)	Heat Flux (mV)	Heat Flux (MW/m²)	Average
350	25	120	2.113	0.374	0.375
350	25	120	2.130	0.377	
350	25	120	2.116	0.375	
350	25	140	2.293	0.406	0.407
350	25	140	2.292	0.406	
350	25	140	2.311	0.409	
350	25	160	2.435	0.431	0.445
350	25	160	2.464	0.436	
350	25	160	2.642	0.468	
350	25	180	2.604	0.461	0.463
350	25	180	2.615	0.463	
350	25	180	2.628	0.465	
350	37.5	120	3.410	0.604	0.603
350	37.5	120	3.402	0.602	
350	37.5	120	3.403	0.602	
350	37.5	140	3.740	0.662	0.661
350	37.5	140	3.727	0.660	
350	37.5	140	3.738	0.662	
350	37.5	160	4.007	0.709	0.711
350	37.5	160	4.024	0.712	
350	37.5	160	4.025	0.712	
350	37.5	180	4.306	0.762	0.763
350	37.5	180	4.306	0.762	
350	37.5	180	4.316	0.764	
350	50	140	4.644	0.822	0.820
350	50	140	4.627	0.819	
350	50	140	4.634	0.820	
350	50	160	5.101	0.903	0.899
350	50	160	5.047	0.893	
350	50	160	5.090	0.901	
350	50	180	5.621	0.995	0.991
350	50	180	5.613	0.994	
350	50	180	5.582	0.994	

(c) X = 400 mm

X(mm) (mm)	Flow (l/min)	Current (A)	Heat Flux (MW/m <sup>2</sup> )		Average
			(mV)		
400	25	120	1.697	0.300	0.301
400	25	120	1.791	0.301	
400	25	120	1.699	0.301	
400	25	140	1.824	0.323	0.327
400	25	140	1.860	0.328	
400	25	140	1.865	0.330	
400	25	160	1.957	0.345	0.350
400	25	160	1.972	0.348	
400	25	160	1.988	0.352	
400	25	180	2.089	0.370	0.372
400	25	180	2.105	0.373	
400	25	180	2.115	0.374	
400	37.5	120	2.578	0.456	0.455
400	37.5	120	2.560	0.453	
400	37.5	120	2.572	0.455	
400	37.5	140	2.852	0.505	0.510
400	37.5	140	2.888	0.511	
400	37.5	140	2.896	0.513	
400	37.5	160	3.157	0.558	0.558
400	37.5	160	3.152	0.558	
400	37.5	160	3.173	0.562	
400	37.5	180	3.438	0.609	0.609
400	37.5	180	3.419	0.605	
400	37.5	180	3.472	0.615	
400	50	140	3.533	0.625	0.624
400	50	140	3.520	0.623	
400	50	140	3.521	0.623	
400	50	160	3.946	0.698	0.698
400	50	160	3.944	0.698	
400	50	160	3.940	0.697	
400	50	180	4.289	0.761	0.762
400	50	180	4.312	0.763	

## 3.2.2 淀み点圧力

形状はφ40、長さ80mmのProbeで圧力を測定した。形状を図13に示す。

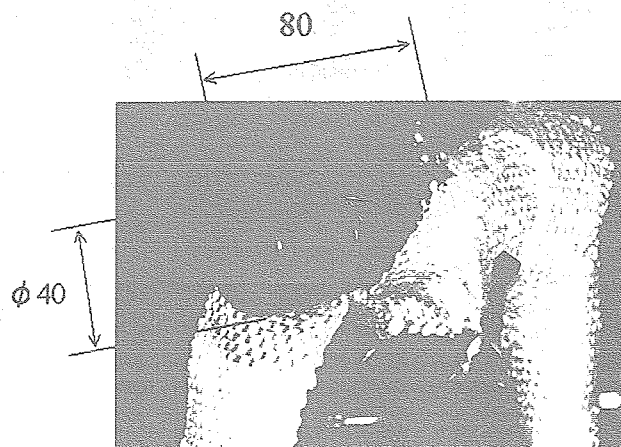


Fig.13 Photograph of the pressure Probe

X=303 mm, 350 mmで測定した。結果を表4および図14に示す。

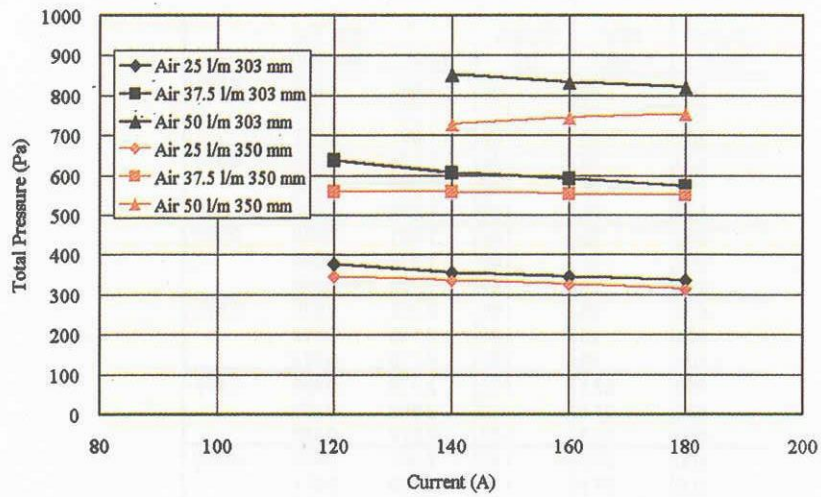


Fig.14 Measured pressures

Table 4 Measured pressures

(a) X = 303 mm

(b) X = 350 mm

X(mm) (mm)	Flow (l/min)	Curent (A)	Pitot Pressure	
			(Torr)	(Pa)
303	25	120	2.84	380
303	25	140	2.67	360
303	25	160	2.59	340
303	25	180	2.52	340
303	37.5	120	4.80	640
303	37.5	140	4.56	610
303	37.5	160	4.45	590
303	37.5	180	4.30	570
303	50	140	6.42	850
303	50	160	6.26	830
303	50	180	6.17	820

X(mm) (mm)	Flow (l/min)	Curent (A)	Pitot Pressure	
			(Torr)	(Pa)
350	25	120	2.58	340
350	25	140	2.50	330
350	25	160	2.43	320
350	25	180	2.35	310
350	37.5	120	4.17	550
350	37.5	140	4.18	560
350	37.5	160	4.14	550
350	37.5	180	4.12	550
350	50	140	5.44	720
350	50	160	5.57	740
350	50	180	5.65	750

(3) 運転範囲

加熱率および圧力測定結果から明らかになった運転範囲を図15に示す。

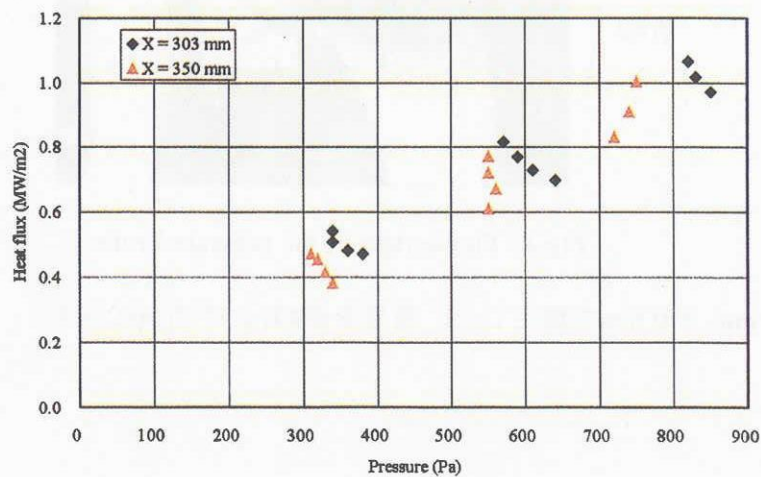


Fig.15 Acquired operation profile

#### 4. 評価

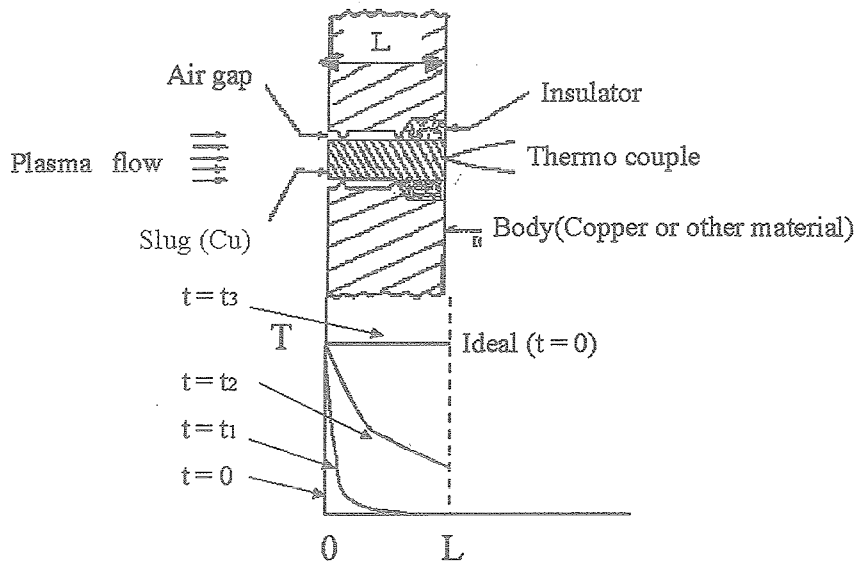
焼結SiCアーク風洞試験とCIRA共同研究時で共通の条件を表5に示す。加熱率、圧力ともにCIRA共同研究時が焼結SiCアーク風洞試験の2倍かそれ以上になった。

Table 5 Experimental conditions

Current (A)	Mass flow (litter/min)	Position (mm)	Heat flux (MW/m <sup>2</sup> )		Pressure (Pa)	
			Gardon	Slug	Stagnation	Pitot
180	50	303	Gardon	1.065	Stagnation	820
			Slug	0.457	Pitot	410

##### (1) 加熱率

スラグを質点としたので、プラズマ気流中に投入後の内部温度分布は、図16に示す様に投入時 ( $t=0$ ) に表面と裏面の温度は等しい。しかし、1次元熱伝導のしたら裏面温度が表面温度と等しくなるまでの時間は0ではない ( $t=t_3$ ) ので測定値はことなる。熱計算や解析などで表面と裏面の温度差および入熱量を算出する必要がある。



Temperature distribution inside the slug

Fig.16 Temperature histories

一方、Gardon gaugeの場合は、円筒が水冷されていること、感度が放射熱源で校正されていることから、スラグ形カロリメータよりも精度良く計測できると考える。尚、NALではGardon gaugeでの測定値はスラグ形カロリメータの1.8倍程度高くなっている<sup>(1)</sup>。

加熱率は形状に依存すること、JUTEMでアーク風洞試験を考えているモルダブルサンプルの形状は□40なことから、寸法の近いGardon gaugeでの測定値を用いることとする。

##### (2) 圧力

Pitot管およびProbeで気流中の圧力を計測したが、サンプル形状に類似しているProbeでの測定値を用いることとする。測定値の相違については今後の検討課題である。

#### 5. 参考文献

- (1) 渡辺泰夫、松崎貴、石田清道、三保和之、福井利夫、濱村修：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 NAL TR-1338 1999





宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-03-011

---

発行日 2004年3月25日  
編集・発行 独立行政法人宇宙航空研究開発機構  
〒182-8522  
東京都調布市深大寺東町七丁目4番地1  
TEL 0422-40-3000 (代表)  
印刷所 株式会社ビー・シー・シー・  
東京都港区浜松町2-4-1

---

©2004 JAXA

※本書(誌)の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。

※本書(誌)からの複写、転載等を希望される場合は、下記にご連絡ください。

※本書(誌)中、本文については再生紙を使用しております。

<本資料に関するお問い合わせ先>

独立行政法人宇宙航空研究開発機構 情報化推進部 宇宙航空文献資料センター



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

