

JAXA 相模原アーク風洞の特性評価

下田孝幸^{#1}、山田和彦^{#1}、高橋裕介^{#2}

#1 宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所、#2 北海道大学

Characterization of JAXA/ISAS Arc Wind Tunnel Facility

by

Takayuki Shimoda and Kazuhiko Yamada (JAXA/ISAS), Yusuke Takahashi(Hokkaido University)

ABSTRACT

JAXA Sagami Arc wind tunnel was established as 1MW high power arc tunnel in 1996. It had contributed to the development of “HAYABUSA” capsule successfully and “HAYABUSA2” which will be launched in this year. After “HAYABUSA2,” the exploration to Jupiter orbit is planned. The returned capsule of the vehicle will be exposed heat flux of over 30MW/m². Sagami Arc tunnel is preparing to update the performance to develop the highly heat resistant material for the recovery to the earth. The wind tunnel also started its activity as Inter-University Research facility in 2014. The heat flux and other physical characteristics are under re-investigation and identification for stable operation. We report the results of them so far.

1. はじめに

現在 JAXA 相模原キャンパスに設置されている相模原アーク加熱風洞（以後、アーク風洞と呼ぶ。）は、当初「はやぶさ」のカプセルの開発のために 1996 年に設置され、2010 年 6 月に幾多の試練を乗り越え地球に無事帰還し地球大気再突入に成功した「はやぶさ」カプセルの開発に貢献し、その後も様々な耐熱材料等の研究活動に使用され、実績を残してきた。2014 年秋には「はやぶさ」の後継機である「はやぶさ 2」が種子島宇宙センターから打ち上げられ、2020 年末に再び地球に帰還する予定であり、アーク風洞において開発された耐熱材が再び成果を上げるはずである。また、更なる深宇宙探査として木星軌道のトロヤ群との間を往復する探査機も計画されており、この探査機が地球大気に再突入する際には「はやぶさ 2」の 2 倍以上の加熱を受けることになる。アーク風洞はそのような高加熱率に耐える耐熱材の開発のために、半導体レーザを併用した更なる高加熱率化をも計画している。

また、アーク風洞は 2014 年度から大学共同利用設備として幅広く研究者の利用に供せられることになり、初年度は共同利用の公募に対して多数の応募があり、9 件の研究が採択され現在ユーザの共同利用が行われているところである。

このように重要性の増した相模原アーク風洞において、改めて風洞としての様々な性能特性の再確認、安定した運用性、性能向上へ向けた活動に取り組んでいるところである。

2. 相模原アーク風洞の概要

アーク風洞は、JAXA 相模原キャンパス特殊実験棟内に設置され、耐熱実験室に設置された加熱装置及び試験室をメインとして、その付帯設備として電力供給設備、作動ガス供給設備、ガス排気設備、冷却水設備、計測設備から構成されている。作動ガスは試験の目的に応じて空気と窒素が使用可能であり、起動ガスとしてアルゴンを使用し、風洞起動時にアークの点火を行うようになっている。加熱装置はセグメント型であり、約 80 枚の独立したドーナツ状の無酸素銅製のディスクから構成されたコンストリクタの上流に位置する陽極チャンバと下流側の陰極チャンバの間に 1500V の電圧をかけてアーク電流を発生させる。各ディスクはそれぞれ独立して純水によって冷却されており、ディスク間はセラミック製の絶縁板によって絶縁されている。作動ガスはコンストリクタ壁面上の多数の小さな穴から加熱器内部に流入し、アーク電流によりジュール加熱を受けプラズマ化し、ノズルによって膨張加速され超音速流を発生する。通常アーク電流は 450A を維持し、供試体への加

熱率はノズルからの距離によって調整するが、電流を 350A～550A 程度の間で変化させ、ノズルから等しい距離にある供試体への加熱率を変化させることも可能である。相模原アーク風洞の主な性能を表 1 に、セグメント型加熱器を図 1 に、またアーク風洞サブシステムのブロック図 1) を図 2 に示す。

表 1 相模原アーク風洞の主な性能

作動電流	300-700A
作動電圧	最大 2000VDC
最大出力	1MW
質量流量比	10-30g/s
エンタルピ	3-20MJ/kg
澱点動圧	0.05-0.7kg/cm ²

セグメント型アーク風洞の安定した運用のためには数回の試験毎にメンテナンスを行う必要があり、加熱器の状態によってはディスクを分解してのメンテナンスも必要となるため試験日数に対してランの回数に限られてくる。このためアーク風洞にはガードンゲージを含む 5 個の供試体を取り付けられるようになっており、順次気流中に投入して 1 ランの間に最大 5 個の供試体を加熱することができる。ただし熱電対温度の測定ラインは 6 個であり、これを設置供試体で分けなければならない。供試体温度測定ラインは今後増設するよう検討中である。

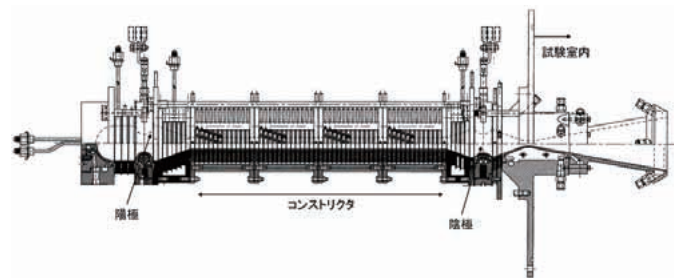


図 1 相模原アーク風洞のセグメント型加熱器

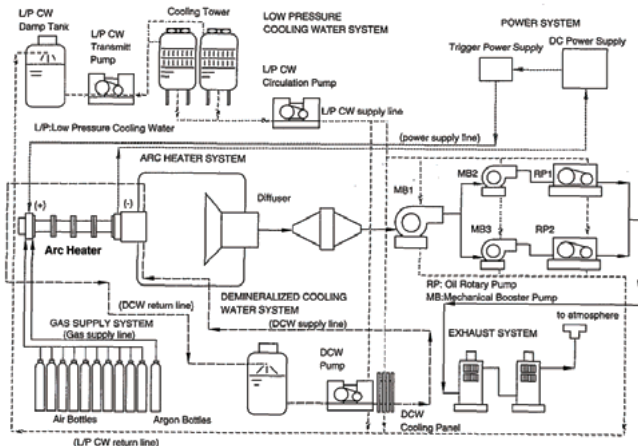


図2 相模原アーク風洞サブシステムブロック図¹⁾

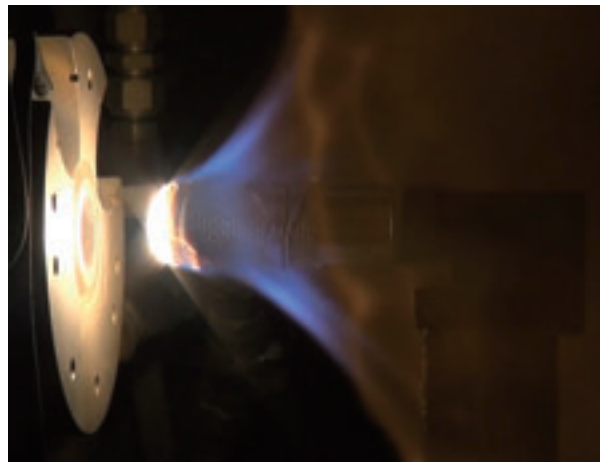


図4 25mm位置での加熱試験の様子

3. 熱流束特性

3.1 初期熱流束特性把握試験

惑星大気突入環境を正確に模擬することは、「はやぶさ」に代表される深宇宙から帰還した探査機カプセルが地球大気への再突入を経て無事地球の戻ってくるための探査機設計や、さらには今後有人化された宇宙機の地球大気圏への帰還や、火星等への大気突入を経て無事到達するための宇宙機設計のためにも非常に重要となる。

アーク風洞の特性確認に当たり、改めて 25mm φ ガードンゲージ使用時のノズルからの距離と加熱率測定値の関係を調べたのが図3中の EXP としているグラフである。

相模原アーク風洞では、通例 6MW/m² 以下の加熱率測定では 50mm φ のガードンゲージを使用し、それ以上の加熱率では 25mm φ のガードンゲージを使用していた。これは気流の大きさから 80mm 以上ノズルから離れると 50mm φ の供試体を使用でき、それより近くなると 25mm φ の供試体を推奨していたからである。今回、ノズルからの距離にかかわらず 25mm φ ガードンゲージを使用し、熱流束特性を取得した。

図4に 25mm 位置での加熱試験の様子を示す。

図3よりわかったことは、従来の想定に比較して同じ位置での加熱率が高いことである。特に 65mm より近くなると加熱率が急に上昇し、従来想定していた加熱率を大幅に超えている。一例として従来 25mm の位置では加熱率は 12MW/m² とみなしてきたが今回の測定では 15MW/m² を超えている。

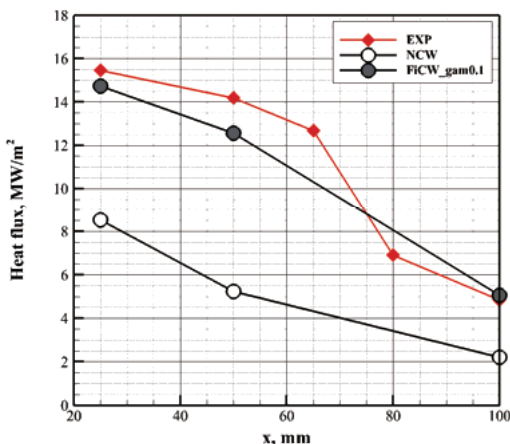


図3 ノズルからの距離と加熱率²⁾

3.2 数値計算による検証

初期熱流束特性把握試験にて得られた結果に対して、数値計算による検証を試みた。ここで用いた計算手法の詳細は、参考文献3)を参照してほしい。

図3に実験値 EXP と合わせて数値計算による解析値を載せている。実験と解析の条件の違いを表2に示す。また、今回の解析ではガードンゲージ壁面温度を 800K と仮定している。

表2 実験と解析条件の違い

	実験	解析
電流 (A)	451	451
電圧 (V)	1434.6	18
質量流量比 (g/s)	18.5	865
加熱機内圧 (Pa)	4.95x10 ⁵	5.67x10 ⁵
エンタルピ (MJ/kg)	~13.0	17.6

解析においては触媒性を考慮し、以下の式により評価しており、図3においては触媒性有り(FICW)として $\gamma=0.1$ を使用し、触媒性なし(NCW、 $\gamma=0$)と比較している。

$$k_s C_s = D_s \frac{\partial C_s}{\partial x}$$

$$\text{where, } k_s = \gamma_s \sqrt{\frac{kT_w}{\pi m_s}}$$

さらに触媒性の影響を見るために、ノズルからの距離 25mm における澁み点加熱率を、触媒性を変化させて解析した結果を図5に示す。

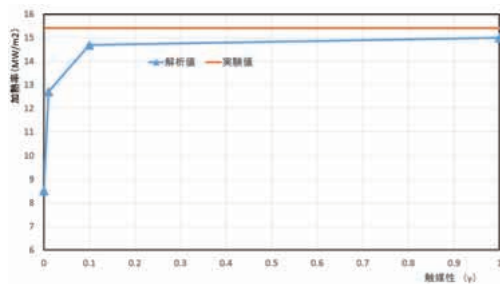


図5 解析における加熱率への触媒性の影響 (ノズルから 25mm 位置における加熱率)

図5より激み点加熱率は、ガードンゲージ壁面での触媒性に大きく影響されることがわかるが、 $\gamma=0.1$ 以上になるとほぼ原子が分子に再結合して、解析値も実験値に近くなることわかる。
 これらより、一定の触媒性のもとで実験値の規模に関して解析で検証できることがわかった。
 さらに加熱面における加熱率分布の解析結果を図6に示す。これにより、直径20mmの内部では加熱率はほぼ一定に近いことがわかる。

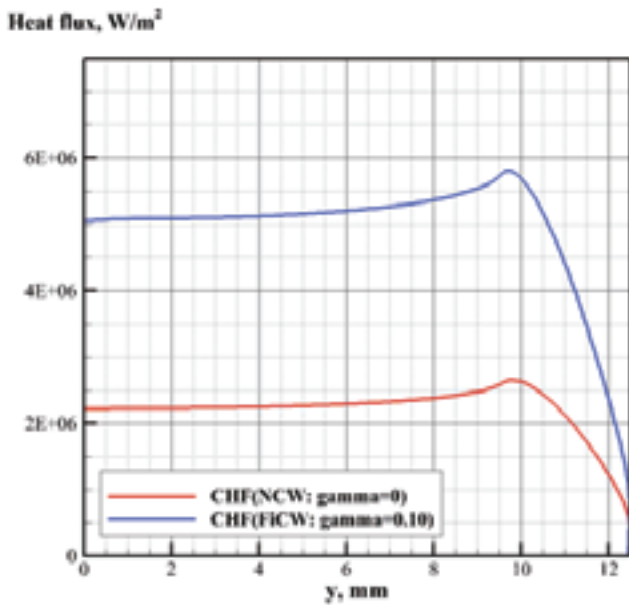
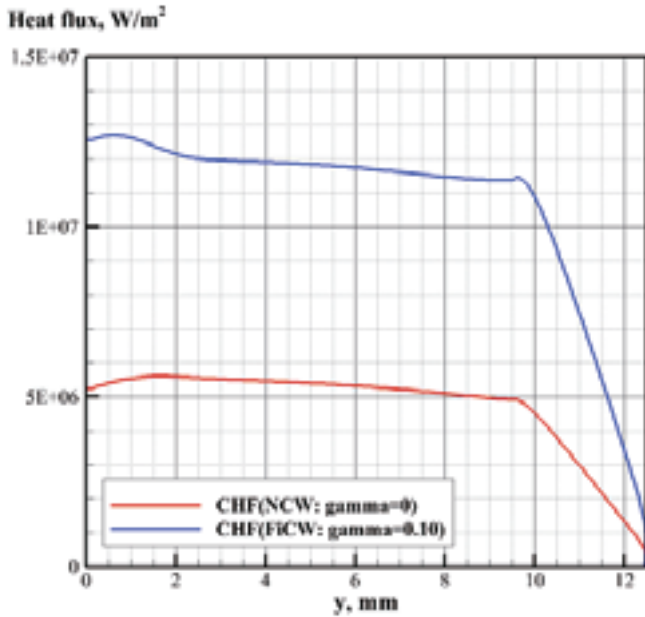


図6 ガードンゲージ表面の加熱率分布 2)
 (ノズル距離からの距離：上50mm,下100mm)
 (壁面温度800K 仮定)

3.3 熱流束特性把握試験

アーク風洞の熱流束特性について、触媒性を考慮した簡易数値の結果との比較においても良く一致していることを示した。ただ計測値には線形性は無く、また簡単な近似式でも表せないカーブとなっている。これは更に実験データを積み重ねてもその傾向に変わり無く、これが相模原アーク風洞の特性だと思われる。この特性が何に由来するかは今後研究を進めていくこととする。

図7に実験データを積み重ねたアーク風洞の熱流束特性のグラフを示す。2種類のガードンゲージで測定したものであり、▲はφ25mm、■はφ50mmのガードンゲージでの計測値である。60mm以上ノズルからの距離が離れるとφ50mm供試体を用いることが出来、加熱率データは■を用いることになる。それ以上近いノズル距離ではφ50mmにおける加熱率データが無いいためφ25mm供試体を用い、▲の加熱率データを用いる。

ここで、ノズルからの距離25mmにおいてデータのばらつきが大きいことがわかる。この距離においては気流中心からのガードンゲージ中心のずれが大きく影響するため、加熱試験毎にガードンゲージによる加熱率を測定することが望ましい。ただ、ノズル距離50mmにおいても14MW/m²の加熱率があり、加熱率の高さを追い求めない安定した試験を行うためには50mm位置における試験が望ましい。

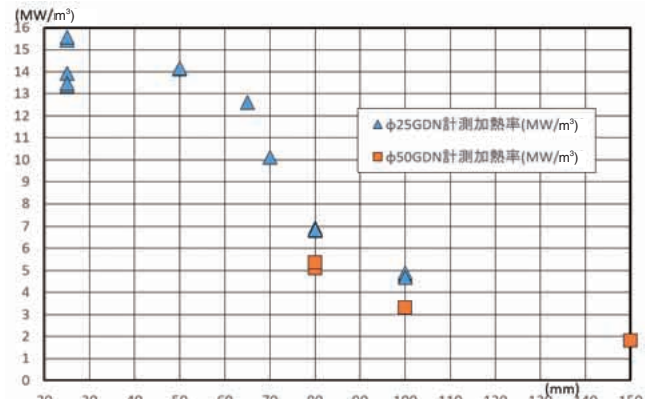


図7 ノズル距離と加熱率の関係
 (電流450A、加熱器内圧0.5MPa)



図8 風洞出力の変化と加熱率の関係

図7における加熱率の測定は、電流 450A、加熱器内圧 0.5MPa の一定出力下で、加熱面のノズル出口からの距離のみを変化させて求めた加熱率である。一方、アーク風洞の出力を変化させたときの加熱率の変化を改めて測定した。ノズル距離が一定でも、風洞の出力を変化させることによって加熱率も変化する。その測定結果が図2である。

アーク風洞の出力は、電流を3通り（350A、450A、550A）、加熱器内圧を2通り（0.5MPa、0.6MPa）の組み合わせの6通りとし、それぞれにおいてノズルからの距離を変えた位置における加熱率を測定した。

図8から分かるように電流を上げるほど加熱率は高くなる。また加熱器内圧が高いほど加熱率は高くなるがその差はさほど大きくない。またノズル距離が近いほど加熱率が上がるのは図7と同様である。

電流が 350A では出力があまり安定せず、450A、550A においては安定した加熱を行うことが出来た。通常の運転では 450A、0.5MPa を基本とし、ユーザの要望に応じて最適な運転を行えるようにしたい。

またユーザによっては直径 10mm 程度の球体を澱点加熱率 $30\text{MW}/\text{m}^2$ 程度で試験を行う希望もあり、実際に進めている。このような試験に対してもスラグ式のカロリメータを整備する等、柔軟な対応を行っていききたい。また、単なる材料試験では無く、ある程度の構造体の試験も行えるよう、供試体インタフェースも柔軟に行えるよう不断の改良を続けていくつもりである。

4. エンタルピーの特性

出力を変化させて風洞特性を取得した際に、同時にエンタルピーの変化を改めて測定した。風洞出力とエンタルピーの関係を図9に示す。3項と同様に3つの電流と2つの加熱器内圧に対するエンタルピーの平均をグラフに示している。電流 350A においてエンタルピーは安定せず、加熱器内圧の影響も大きい。450A、550A においてエンタルピーは安定し、加熱器内圧の差も加熱率にはさほど大きく影響しない。今回の測定では最大エンタルピーが $15.8\text{MJ}/\text{kg}$ 程度であったが、このときの風洞出力はおおよそ 0.86MW 程度である。最大出力 1MW に近い時のエンタルピー、加熱率等を今後確認していき、ユーザの試験条件設定に資していききたい。

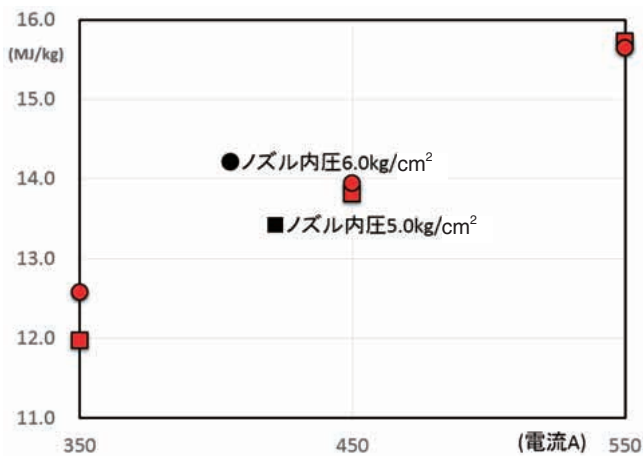


図9 風洞出力とエンタルピーの関係

5. 圧力特性の把握

アーク風洞の澱点圧力についても、今後再計測してデータを揃えようとしているところである。

現在図10のようなピトー圧プローブを準備し、特性把握試験を開始したところである。最初の数回の試験では、ほぼ従来定格としていた値に近いデータがとれている。

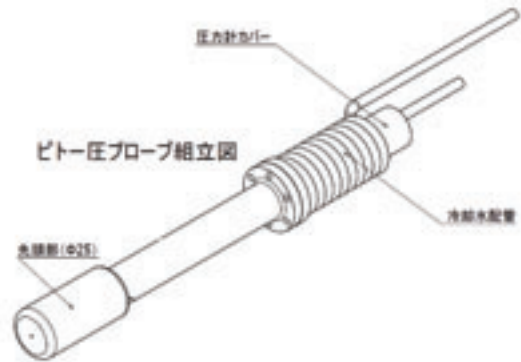


図10 アーク風洞で使用する圧力計



図11 アーク風洞の試験室内。加熱器のノズルと供試体を5個順次投入できる射出装置が分かる

6. まとめ

相模原アーク風洞の熱流束をはじめとした各特性に関する風洞特性の把握を進めている現状を報告した。大学共同利用を幅広く進めて行くに当たり、基礎的なデータを整備していく予定である。

参考文献

- 1) T. Yamada and Y. Inatani, "Arc Heating Facility and Test Technique for Planetary Entry Missions" The Institute of Space and Astronautical Science Report SP No. 17 March 2003
- 2) 高橋裕介, "ISAS 1MW アーク加熱気流の熱流束について part1, part2, part3", Presentation 2014/5
- 3) Yusuke Takahashi, Takashi Abe, Hiroki Takayanagi, Masahito Mizuno, Hisashi Kihara and Ken-ichi Abe, "Advanced Validation of Nonequilibrium Plasma Flow Simulation for Arc-Heated Wind Tunnels", Journal of Thermophysics and Heat Transfer, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol. 28, No.1, pp. 9-17, January-March, 2014.