

# 1E01 アーク加熱風洞での気流軸方向せん断応力分布の 実験的数値的解析

○坂本憲一，西村新樹，早栗茉央，金田啓嗣，酒井武治（鳥取大学）

Experimental and Numerical Analysis of Shear Stress Distribution in an Arcjet Wind Tunnel  
Kenichi Sakamoto, Shinju Nishimura, Mao Sokuri, Akishi Kaneda and Takeharu Sakai (Tottori university)

Key Words: Shear stress measurement, Indirect method, Heat flux measurement, Skin friction coefficient

## Abstract

To validate the direct shear stress measurement results in the arcjet, we applied an indirect diagnostic approach by measuring heat flux with a coaxial thermocouple. We established a heat flux measurement system at the same position as the direct measurement and compared the skin friction coefficient based on the heat transfer analogy. The common flow field parameters necessary for comparison were supplemented by numerical simulations, and the results by indirect method demonstrated well with direct measurement results.

## 1. はじめに

これまで開発した，アーク加熱風洞試験での模型表面せん断応力直接計測システム<sup>1),2)</sup>の実験結果を検証したい．我々はこれまで，ひずみゲージによる浮動要素式天秤で直接的にせん断応力を計測してきたが，その結果について，異なる診断手法によるバリデーションが必要である．気流によるせん断応力の診断には，直接計測のほかにせん断応力以外の実験パラメータから，コルバーンの相似則を用いる間接的な評価法と，数値流体シミュレーション解析（CFD）があげられる．アーク加熱気流中ではそれぞれに困難性があり，間接法を用いる場合，多くのパラメータ（エンタルピ，熱流束，境界層端での密度や流速，壁面温度）を評価する必要がある，CFDでは，熱化学的非平衡気体による3次元模型周りの流れ場を解かなければならない．最終的には，これらを用いたそれぞれの評価精度を相互的に検証することで，より正確なせん断応力の診断手法の確立を目指している．

現在，我々は直接計測結果の検証に必要な間接診断法の整備のため，模型表面熱流束の同軸熱電対での計測環境構築を進めている．熱流束の評価手法は，ガードンゲージやカロリメータが代表的だが，比較的大きいため，模型への艤装を考えた際にコストがかかる．一方で，提案する同軸熱電対による手法は，1次元半無限熱伝導の仮定をベースとした数ミリ秒オーダーでの評価が基本となるため，長時間試験でその測定精度については検証段階ではあるものの<sup>3)</sup>，そのサイズは非常に小さく，低コストである．よって，これまで開発した直接計測天秤に組み込むことが可能で，模型表面でせん断応力の直接計測と熱流束の同時計測，つまり，直接診断と間接診断に必要なパラメータを同時に取得できるポテンシャルを有する．本稿では，このような概念実証を念頭に置き，せん断応力の間接診断実験系を構築して実施した予備試験の結果について報告する．

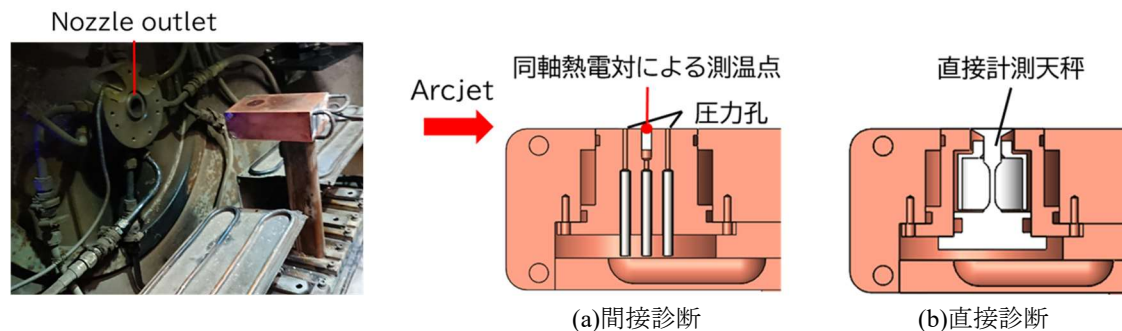


図1 JAXA/ISAS 1MWアーク加熱風洞試験用の鈍頭平板模型

## 2. 模型表面熱流束計測によるせん断応力間接診断

### 2. 1. 熱流束計測実験系

熱流束の評価に必要な表面温度の計測には、E型の同軸熱電対を配置する。図1にアーク加熱風洞試験模型を示す。模型は、せん断応力計測を実施した形態と同様で、熱電対は天秤と中心位置を一致させ、模型表面に面一となるように配置した。また、表面温度と同時に表面圧力の計測も実施する。この圧力を参考値として、同時に環境構築を進めているCFD解析結果の妥当性の評価に用いた。風洞試験模型は写真に示すように下方で支持されており、風洞作動後にアークジェットに投入される。ノズル出口から計測中心までの距離 $X$ を80mmと100mmにすることで、対象とする熱流束、ひいてはせん断応力を変化させた。

### 2. 2. 同軸熱電対による熱流束評価

熱流束は、熱電対で計測する表面温度の上昇から評価する。半無限熱伝導を仮定すると模型表面での熱流束 $q_w$ は、表面温度 $T_w$ から以下の式で示される。

$$q_w = 2 \sqrt{\frac{\rho c k}{\pi}} \sum_{i=1}^n \frac{T_w(t_i) - T_w(t_{i-1})}{\sqrt{t_n - t_i} + \sqrt{t_n - t_{i-1}}} \quad (1)$$

密度 $\rho$ 、比熱 $c$ と熱伝導率 $k$ は熱電対材料の物性値である。

ここで、評価時間 $t$ は半無限熱伝導の仮定が、ある有効性を持つ範囲で決定した。アーク加熱風洞試験でのせん断応力計測との、同時実施を想定すると、熱流束の評価時間がどの程度有効かを確認する必要がある。今回は、材料厚さ $l$ と熱拡散率 $a$ から以下の式であらわされるフーリエ数 $F_0$ が0.255で、熱流束の偏差が1パーセント<sup>3)</sup>の条件とした。

$$F_0 = \frac{at}{l^2} \quad (2)$$

今回使用する熱電対の厚さは5mmで、有効な評価時間は、1s程度であった。直接計測系には投入時の振動が確認されているため、計測時間の短さに起因する評価の難しさはあるものの、成立には問題ない。ここで、軸方向以外の熱の移動については考慮されていないことには注意が必要である。

### 2. 3. 表面摩擦係数の診断

コルバーンのアナロジーによる間接診断<sup>4)</sup>において、せん断応力を評価する局所表面摩擦係数 $c_f$ は、熱流束を用いて以下の式で示される。

$$c_{f(indirect)} = \frac{2q_{w(exp)}(Pr)^{2/3}}{\rho_e U_e \left( h_0 + \frac{U_e^2}{2} (Pr^{1/2} - 1) - C_p T_w \right)} \quad (3)$$

今回は、プラントル数 $Pr=1$ 、 $C_p \approx 1005 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ で固定とし、総エンタルピ $h_0$ には、実験における質量平均エンタルピを用いた。ここで、境界層端での流速 $U$ と密度 $\rho_e$ は、同時に環境構築を進めているCFD解析結果を用いる。今回は、完全気体条件で行った3次元模型周りの境界層端での諸量で、間接診断と直接診断の結果を結び付けて比較する。CFD解析についての詳述は省くが、計測位置における模型表面圧力の実験計測結果と解析結果が程よく一致したことを確認して、これらの値を採用した。直接診断における表面摩擦係数は、以下の式で算出する。

と密度 $\rho_e$ は、同時に環境構築を進めているCFD解析結果を用いる。今回は、完全気体条件で行った3次元模型周りの境界層端での諸量で、間接診断と直接診断の結果を結び付けて比較する。CFD解析についての詳述は省くが、計測位置における模型表面圧力の実験計測結果と解析結果が程よく一致したことを確認して、これらの値を採用した。直接診断における表面摩擦係数は、以下の式で算出する。

$$c_{f(direct)} = \frac{\tau_{w(exp)}}{\frac{1}{2} \rho_e U_e^2} \quad (4)$$

## 3. 結果と考察

表面温度の計測結果から決定した評価時間で、熱流束値は妥当な傾向を示した。図2に風洞試験で得た表面温度と熱流束に換算した結果を示す。温度の上昇が始まる時点が模型のアークジェットへの投入開始とした際、投入完了までに0.3sを要する。また、時間刻みを0.1sとして熱流束に換算しているため、前述の有効評価時間1sを考えると投入完了後の0.1-0.6s間が評価時間としては適当である。この時間で得られた熱流束は、それぞれ $X=80\text{mm}$ 位置で $0.27 \text{ MW/m}^2$ 、 $100\text{mm}$ 位置で $0.18 \text{ MW/m}^2$ で、一定であった。一方で、評価時間以降に熱流束は減少傾向を示す。これは、フーリエ数による影響とは逆の傾向を示しており、水冷される熱電対周囲材料（銅）への伝熱による影響が表れていると考えられる。

図3に間接および直接診断の表面摩擦係数を比較した結果を示す。それぞれの結果は同オーダーで示されたものの、傾向が異なり、直接診断による結果が高く示された。この差は、せん断応力値にすると最大数十Pa程度で、値としては比較的小さいものの、要因を明らかにする必要がある。また、その傾向にばらつきがあることにも注意が必要で、熱電対計測に関しては、試行回数が少ないこともあり、再現性含め今後の調査が必要である。

## 4. まとめ

アーク加熱風洞試験において、比較的小型なE型同軸熱電対で表面温度を計測して得た熱流束から、表面摩擦係数を間接診断した結果は、直接診断で得た結果と程よく一致した。一方で、アーク加熱気流中でのせん断応力の直接診断と間接診断を同時に実現するためには、各診断手法による解析精度について引き続き調査が必要である。

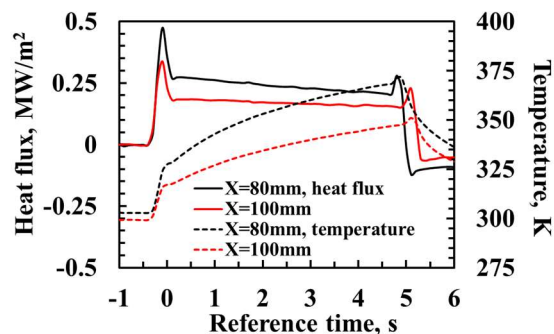


図2 E型熱電対計測による表面温度と熱流束

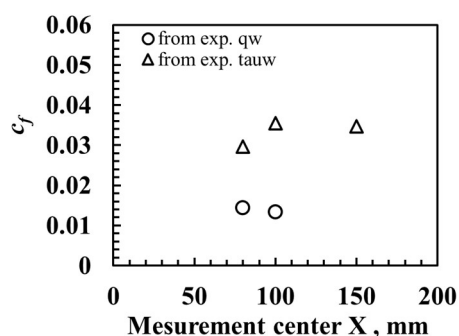


図3 直接および間接診断による表面摩擦係数

## 謝辞

本研究はJSPS科研費 JP24K07882の助成を受けたものです。また、本研究で実施された風洞実験は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所が、大学共同利用設備として提供する、惑星大気突入環境模擬装置にて行われました（課題番号WA24-09）。

## 参考文献

- 1) Sakamoto et al.: アーク加熱風洞試験におけるせん断応力直接計測システムの確立に向けて, 第56回流体力学講演会/第42回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2024.
- 2) Sakamoto et al.: Shear Stress Measurement on Model Surface in Arcjet Wind Tunnel, The 34th International Symposium on Space Technology and Science, 2023.
- 3) Zhang et al.: Coaxial Thermocouples for Heat Transfer Measurements in Long-Duration High Enthalpy Flows, Sensors, 2020.
- 4) Prabhu et al.: CFD Analysis Framework for Arc-Heated Flowfields, II: Shear Testing in Arc-jets at NASA ARC, AIAA 2009-4081, 2009.