

# アーク風洞によるアブレーションセンサーの特性評価

○渡邊一也，中澤寛典，福井大輝（名古屋大学），北川一敬（愛知工業大学），  
平井研一（IHI エアロスペース），石田雄一（JAXA），酒井武治（名古屋大学）

Characteristic evaluation of ablation sensor by an arcjet wind tunnel

Kazuya Watanabe, Hirofumi Nakazawa, Hiroki Fukui (Nagoya University), Kazutaka Kitagawa (Aichi Institute of Technology), Kenichi Hirai (IHI Aerospace), Yuichi Ishida (JAXA), Takeharu Sakai (Nagoya University)

Key Words : Ablation, Thermal Protection System, Ablation sensor

## Abstract

A resistance circuit ablation sensor based on Analog Resistance Ablation Detector(ARAD), which was used in Galileo mission, is developed to measure the charring process within an ablative material. The sensor has a multi-layered configuration made of a CFRP rod, polyimide tube, and nichrome wire. The ablation sensor is embedded into a graphite test specimen and is heated in an arcjet wind tunnel flow in order to examine the characteristics of the developed sensor. The results show that the polyimide resin used in the sensor has an electrical conductivity when the value of the normalized mass loss of it is about 40%.

## 1. 背景及び目的

アブレータを含めた宇宙機の熱防御材料は、アーク風洞をはじめとする地上プラズマ風洞で材料試験が行われるが、大気突入時に宇宙機がさらされる加熱環境のすべてを再現することが難しいため、大気突入時の材料の熱応答特性を計測することは大変有用である。中でも炭化アブレータに特有な炭化層の生成／消失過程は熱防御特性を評価する上で重要な指標の一つであるが、現状他国と比べて<sup>1,4)</sup>日本ではその過程を計測する技術の確立ができていない。

このような現状を踏まえ、大気突入時の炭化層進展特性を計測するため、NASAで開発された可変抵抗回路の原理<sup>2)</sup>を基に、埋め込み型アブレーションセンサーの開発に我々は着手した<sup>5-8)</sup>。本センサーでは、後述するセンサー構成要素のうちのニクロム線での電圧降下を測定し、抵抗値を算出する。抵抗値は、ニクロム線で巻かれているポリイミド樹脂管の炭化過程に応じて変化するため、炭化層進展に関する距離情報を評価するにはポリイミドの熱応答過程を詳細に理解する必要がある。本稿では、黒鉛供試体にアブレーションセンサーを埋め込み、アーク加熱風洞で加熱試験を行い、高速昇温環境でのセンサー作動データを取得し、熱重量解析で得られたポリイミドの熱分解特性から、ポリイミドの導電性発現と質量損失の関係を調査した結果の一例について報告したい。

## 2. アブレーションセンサー

本研究で製作したアブレーションセンサーの概略図を図1に示す。CFRP棒・ポリイミド管・ニクロム線螺旋巻ニクロム線からなる層状構造により、抵抗回路を形成する。ただし、ポリイミド管は加熱され炭化したときのみ導体となる。螺旋巻ニクロム線で生じる電圧降下は、その外側のポリイミド管と螺旋巻ニッケルリボンの層状構造からなる計測回路で測定される。回路には定電流6mAが供給され、加熱表面からポリイミドの炭化面が進行する時の螺旋巻ニクロム線における電圧降下の時間変化を計測している。センサーは耐熱材料内部に埋め込まれ使用される。ポリイミド管は内径約1mm、肉厚0.06mmと非常に薄いため、耐熱材料の熱特性がセンサーの構成材料であるポリイミド管の炭化進行度に大きく関係すると考えられる。

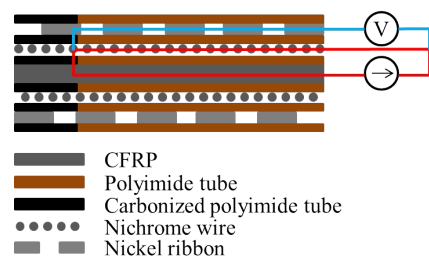


図1 アブレーションセンサー

### 3. アーク風洞加熱試験

750kWアーク加熱風洞 (JAXA/IAT) を使用した。実験条件を表1に示す。供試体は2種類用意し、その概略図を図2に示す。どちらも耐熱材料として黒鉛 (東海カーボンG330) を使用した。A型供試体は中心貫通穴にセンサーを模擬したものを挿入し、加熱表面から7.6, 12.6, 17.6, 22.6mm位置のCFRP棒の温度を熱電対で計測するものである。またB型供試体は中心貫通穴にアブレーションセンサーを挿入し、電流を供給することで作動させ、センサーの動特性を試験するものである。

温度計測結果を図3に示す。図3(a)から使用した黒鉛の熱伝導率は常温で104[W/m-K]と非常に高いため、厚さ方向の温度勾配が小さいことが分かる。加熱終了時刻 (60秒) では内部温度が約1200Kに達しており、ポリイミド樹脂が炭化すると予想される約900Kを十分に超えているため、センサーの動特性を調べることができる熱環境を構築できた。

アブレーションセンサーで計測した電圧の時間履歴を図4に示す。本センサーが加熱されて正常に動作すれば、ポリイミドの炭化進行に伴い電圧が減少していくと予想される。図4の結果も原理に則したものとなっている。センサーの中心材料に黒鉛ポリマー棒を用いた際、加熱開始から約30秒間は電圧がゼロとなり抵抗回路の形成が不安定であった<sup>8)</sup>。しかし、CFRP棒を用いた結果、安定的に回路形成が維持できることがわかった。計測電圧時間履歴にみられるノイズの原因についての詳細は現時点では不明であり調査中である。黒鉛供試体がアーク加熱気流に曝されて帯電し、センサー回路に流れたことに起因している可能性が高いと考えている。図4の電圧降下からセンサーの炭化位置履歴を求め<sup>9)</sup>、その結果を図5に示す。現時点での炭化位置の検出精度は螺旋巻ニクロム線のピッチの誤差から最大で±20%程度である。

表1 加熱試験条件

気流	空気
電流, A	300
質量流量, g/sec	10
ピトー圧, kPa	1.9
冷温壁加熱率, MW/m <sup>2</sup>	1.1
供試体加熱時間, sec	60

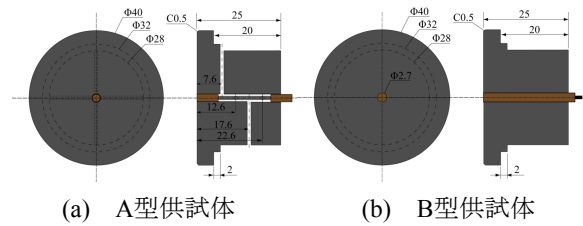
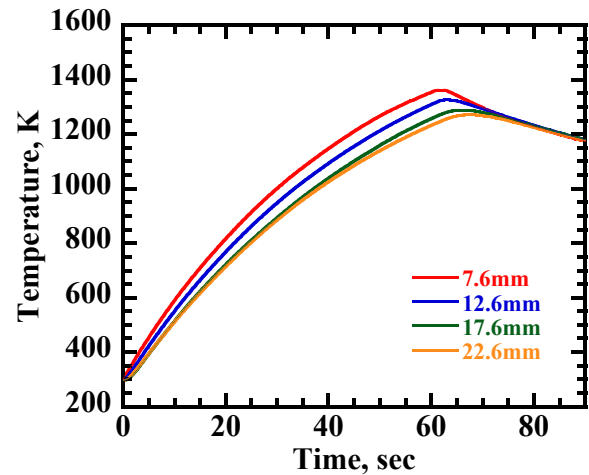
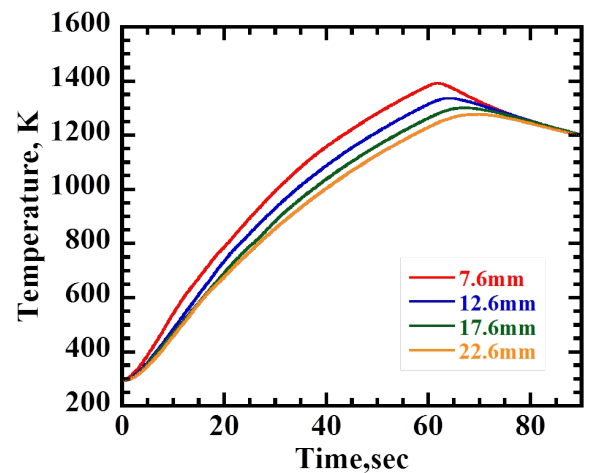


図2 試験で用いた供試体の種類



(a) 黒鉛供試体



(b) CFRP棒

図3 加熱中の温度履歴

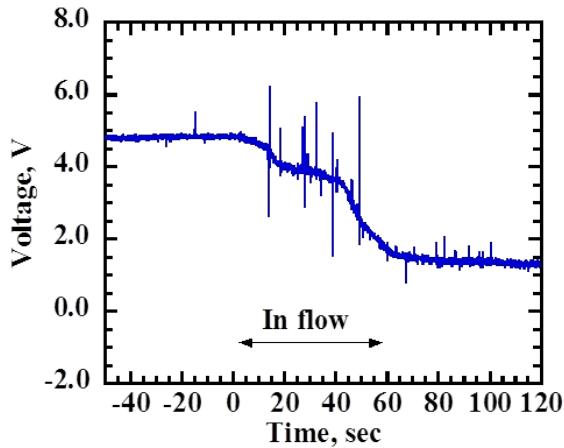


図4 センサーの電圧履歴

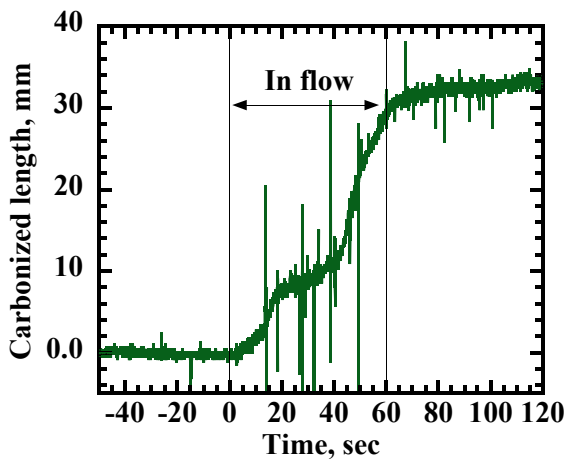


図5 炭化位置履歴

#### 4. ポリイミドの導電性発現と熱分解

アーク風洞で得られた炭化位置履歴とポリイミドの質量損失特性の関係を調べるため、センサーの構成材料であるポリイミド管の熱重量解析を行った。その結果を図6に示す。昇温速度を2, 5, 10K/minの3条件で解析した。また得られた実験結果から、ポリイミドの熱分解特性をアレニウス型1段反応式により熱分解特性のモデル化を行った：

$$\frac{d\left(\frac{m}{m_0}\right)}{dt} = -\left(1 - \frac{m_c}{m_0}\right) \left(\frac{\frac{m}{m_0} - \frac{m_c}{m_0}}{1 - \frac{m_c}{m_0}}\right)^\mu A \exp\left(\frac{-B}{RT}\right) \quad (1)$$

ここで $m$ ,  $m_0$ ,  $m_c$ はそれぞれある時刻での質量、初期及び炭化時の質量を示す。また $A$ ,  $B$ ,  $R$ はそれぞれ頻度因子、活性化エネルギー、普遍気体定数と呼ばれる定数である。本稿では $\mu=6$ ,  $m_c$ は900℃の時の質量とし、 $m_c/m_0=0.57$ とした。 $A$ と $B$ は昇温速度10K/minの実験データを回帰分析することで求めた。

アーク加熱風洞試験のCFRP棒の内部温度履歴(図3(b))を入力として、式(1)を数値積分して各熱電

対位置(加熱面から7.6,12.6,17.6,22.6mm)でのポリイミド管の質量損失を計算した。その結果を図7に示す。図中の4本の破線は、図5に示した炭化位置が各熱電対位置と同じとなった時刻を示す。従って、その交点は、センサー内のポリイミド樹脂管が導電性を発現した質量損失を意味するものと考えられる。熱電対位置が7.6mmの場合を除き、ポリイミドの重量減少が40%ほど進むと導電性が発現する傾向を示していることがわかる。このポリイミドの導電性発現と質量損失の関係はセンサーの中心材料に黒鉛ポリマーを用いた場合のものと同じ値を示した<sup>8)</sup>。

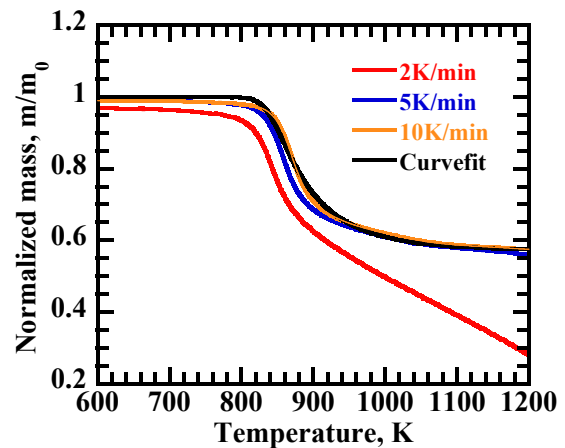


図6 ポリイミドの熱重量解析

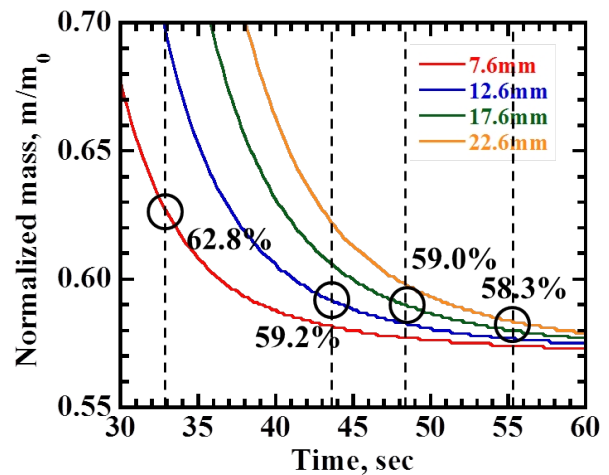


図7 ポリイミドの質量損失と導電性発現

#### 5. まとめ

アーク風洞を用いてセンサーの動特性を調査した。加熱時にはセンサーの原理上起こると考えられる電圧が降下したが、ノイズの対策などは今後の課題である。また、構成材料であるポリイミド管の導電性発現時の質量損失の値は約40%であることがわかった。

## 参考文献

- 1) Lebel, P. J. et al.: Development of Sensors to Obtain In-Flight Ablation Measurements of Thermal Protection Materials, NASA TN D-3686, 1966.
- 2) Milos, F.:Galileo Probe Heat Shield Ablation Experiment, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.34, No.6, pp.705-713, 1997.
- 3) Oishi, T. et al. :“Development and Application of a TPS Ablation Sensor for Flight”, AIAA Paper 20081219, January, 2008.
- 4) Santos, J. et al. : Isotherm sensor calibration program for mars science laboratory heat shield flight data analysis, AIAA Paper2011-3955, June, 2011.
- 5) 酒井武治他 3 名 :アブレーション熱防御システムフライト計測センサーの開発, 平成 23 年度航空宇宙空力班シンポジウム 2012 年 1 月
- 6) 栗林充伸他 4 名 :アブレーションセンサーによる炭化層進展時間履歴計測の検討, 平成 23 年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2011 年 12 月
- 7) 渡邊一也他 6 名 :アブレーションセンサーによるアブレータの炭化過程計測, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会, 2012 年 11 月
- 8) 酒井武治他 6 名 :アブレーションセンサーの作動特性, 平成 24 年度航空宇宙空力班シンポジウム 2013 年 1 月