

# アーク・レーザー加熱風洞による SiC系セラミック材料の動的酸化加熱試験

学生証番号 47136079 氏名 横手 寛大  
(指導教員 小紫 公也 教授)

Key Words: Arc- heated plasma wind tunnel, Laser heating, Re-entry, TPS, UHTC, Dynamic oxidization

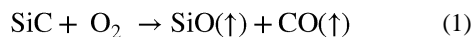
## 1. 背景および目的

宇宙機が大気圏へ再突入する際、空力加熱によって激しく加熱される。それと同時に大気中の酸素が衝撃波背後の高温により解離し、反応性の高い原子状酸素によって機体は厳しい酸化環境に曝されてしまう。この厳しい環境から機体のシステムや宇宙飛行士を守る手段として、熱防御システム(TPS: Thermal Protection System)の研究が世界中で進められている。この TPS 用の材料研究には主に、熱天秤をもちいた静的な酸化試験と、再突入環境を模擬した高エンタルピー風洞による動的な酸化試験が行われている。

TPS 材料の中でも現在盛んに研究開発が行われているのが SiC や ZrB<sub>2</sub>-SiC を代表とする超高温耐熱セラミックス(UHTC: Ultra High Temperature Ceramics)である。この材料は高融点・耐酸化性・耐熱衝撃性などに優れているため、再使用型の TPS として期待されている。しかし、この SiC は 2 種類の酸化挙動を持ち、1. サンプルの表面温度 2. ガス分圧 3. ガス成分という 3 つのパラメータによって決定されるといわれている。

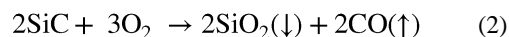
### ◆ Active 酸化

比較的高温・低酸素分圧下で起こるとされており、主に式(1)のような反応が進むことで SiC 壁面が激しく損耗してしまうため、再使用型 TPS としては好ましくない。



### ◆ Passive 酸化

比較的低温・高酸素分圧下で起こるとされている。式(1)の反応に対し、式(2)のような SiO<sub>2</sub> が生成される反応が多く起こる。この SiO<sub>2</sub> が SiC 表面に堆積し、式(1)の酸化反応を抑制するため、再使用型の TPS 材料として理想的な状態である。



この Active 酸化から Passive 酸化へ遷移する境界(A/P

遷移境界)を解明するための先行研究がなされているが、静的な酸化試験では対流等の影響でその結果にばらつきが生じてしまうことが問題となっていた。

本研究ではアーク加熱風洞により動的酸化環境を作り出すと同時に、レーザー照射による材料表面温度の上昇と制御を可能とした。このアーク・レーザー加熱風洞を用いて動的酸化加熱試験を行い、材料試験設備としての有効性を評価するとともに、SiC の A/P 遷移境界を検証することが本研究の目的である。

## 2. Ar-O<sub>2</sub> 予混合型アーク・レーザー加熱風洞

図 1 に本研究で用いるアーク加熱風洞の概略図、表 1 に基本性能をそれぞれ示す。この風洞はコンストラクタ型アーク風洞であり、大気圏再突入時の動的酸化環境を作り出すため Ar と O<sub>2</sub> を作動ガスに用いており、予め混合することで高密度の原子状酸素を含む高エンタルピー流を生成することができる。酸化によるエロージョンを低減するため、カソードは ZrN、アノードには Cu-50vol.%Cr コーティングを施した銅を用いた。

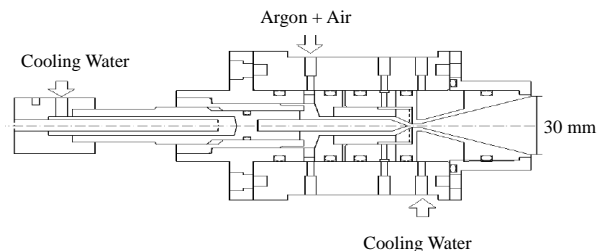


図 1 アーク加熱風洞概略図

最大電力 (kW)	1.8
設計マッハ数	2.0
比エンタルピー (MJ/kg)	3.0
ノズル出口径 (mm)	30
チャンバー圧 (Pa)	20

表 1 アーク風洞基本性能

図 2 にレーザー加熱システムの光学系概略図を示す。

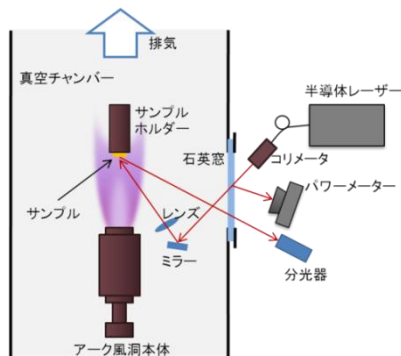


図 2 レーザー加熱概略図

### 3. 計測

壁面直前で酸素が十分解離していることを確かめるため、クロスビーム吸収飽和分光法により淀み点の併進温度を診断した。またサンプルの表面温度は発光スペクトルをプランクの法則でフィッティングすることにより計測した。

### 4. 加熱試験・結果

SiC を用いて、アーク・レーザー加熱風洞による動的酸化加熱試験を行った。試験条件を表 2 に、試験後の損耗率を図 3 に、表面の原子分率を表 4 に示す。損耗率の小さい条件では、サンプル表面に O が多く存在していたため、SiO<sub>2</sub> が表面に生成される Passive 酸化が起き、一方で損耗率の大きい条件では、表面に C が多く存在しているため SiC のまま損耗が進む Active 酸化が起きたと考えられる。

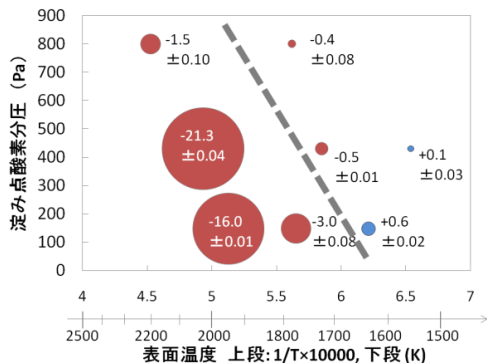


図 3 各試験条件における損耗率の比較

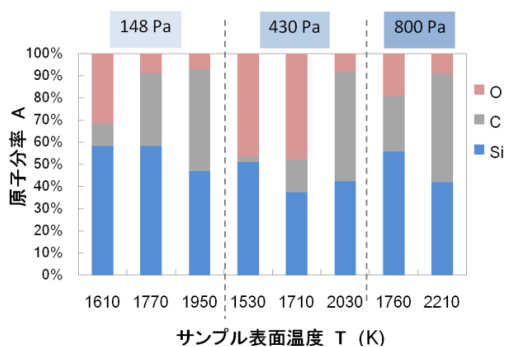


図 4 サンプル表面の原子分率変化

### 5. 考察

A/P 遷移境界の比較を図 5 に示す。この結果は、動的酸化の先行研究と非常に良い一致を示しており、再現性の高い試験を実施することができた。また、この結果を静的酸化試験と比べると比較的低温かつ高酸素分圧側にシフトしている。これは材料表面の化学種が静的酸化では酸素分子だったのに対し、動的酸化では反応性の高い原子状酸素が多く存在していたことが原因ではないかと考えられる。

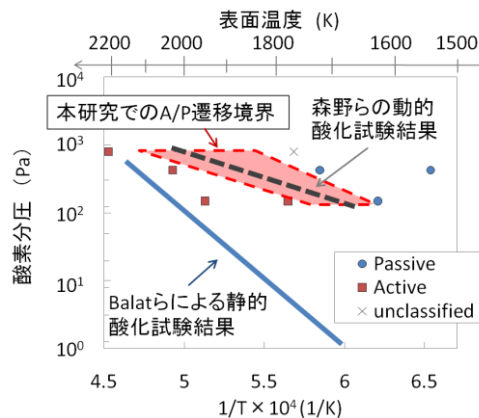


図 5 A/P 遷移境界の比較

### 6. まとめ

以下に本研究のまとめを述べる

- 1) 実験室レベルの設備を用いて再突入環境を模擬した動的な酸化環境での加熱試験を実施し、SiC の A/P 遷移境界を評価した。
- 2) 動的酸化試験による A/P 遷移境界の再現性の高さを示した。また、動的な酸化環境では流れのない静的な環境に比べ、その化学種の違いから Active 酸化が起りやすいことが分かった。

ガス流量[slm]		アーク投入電力 [kW]	レーザー出力 [W(A)]	酸素分圧(P <sub>O<sub>2</sub>)s [Pa]</sub>	表面温度 T <sub>s</sub> [K]	試験時間 [s]
アルゴン	酸素					
4.0	0.1	1.2	70 (40)	148	1610	100
			100 (60)		1770	
			125 (70)		1950	
4.0	0.3	1.2	50 (30)	430	1620	600
			85 (50)		1710	
			130 (80)		2030	
4.0	0.6	1.8	100 (60)	800	1760	300
			150 (100)		2210	

表 2 加熱試験条件一覧