

## C/C コンポジットの炭酸ガスプラズマ気流中の耐熱実験 Thermal protection testing for C/C composite in carbon dioxide plasma flow

北川一敬<sup>†</sup>  
Kazutaka KITAGAWA<sup>†</sup>

**Abstract** Arc heated wind tunnel facility was conducted a high enthalpy and hypersonic flow which are used to investigate for purposes as thermal protective testing of reentry flow into the other planet. The emission spectra profiles in shock layer of the ablation materials are spectroscopically measured for CO<sub>2</sub> arc plasma flow. Vibrational temperature obtained from Boltzmann plot method for C<sub>2</sub> SWAN at 20mm upstream of the sonic throat and shock layer in bow shock around the blunt body. The  $d^3\Pi_g - a^3\Pi_u$  transition of  $\Delta v=0$  of C<sub>2</sub> SWAN, is referred from 509 to 516 nm. Vibrational temperature is determined to be 2700 K of C/C Composite from band head ratio of incline to (0,0)-(2,2) of the C<sub>2</sub> SWAN band system emission.

### 1. 緒言

高温加熱風洞は、惑星探査機や宇宙船などが各種惑星大気圏再突入状態の高温・高圧条件を模擬する実験風洞である<sup>3-5)</sup>。

本研究では、49kWの水冷式中空電極型の Hüls 型 DC アークヒータを用いて、炭酸ガスアークプラズマ気流中に設置された鈍頭物体周りの衝撃層内の分光計測、加熱前後での試験材料を、走査電子顕微鏡とエネルギー分散型 X 線分析装置を用い、アークプラズマ気流が試験材料にどのような影響を及ぼすか調べた。

### 2. 実験装置及び実験方法

Hüls 型 DC アークヒータは、水冷式中空電極型で、上流側電極を陰極、下流側電極を陽極、両電極には無酸素銅を用いた。作動ガスに炭酸ガスを用いた。DC アークヒータ上流部の陰極ケースに電磁コイルを巻いて外部磁場を発生させ、ローレンツ力によりアーク輝点を中空電極内で回転させる事により各電極の局所的な損傷を防いでいる。

アーク加熱実験条件は、放電電流値 180[A]、放電電圧

値 110[V]、よどみ点圧力 0.101125[MPa,abs]、真空タンク内圧力 80[Pa]、質量流量 0.69[g/s]である。

分光計測は、Ocean Optics 社 USB4000 超小型マルチチャンネル分光器と、SOLAR TII 社製回折格子型 MS7504 を用いて、アークプラズマ気流中の鈍頭物体周りの衝撃層内の分光計測を行い、流れ場の成分、励起状態を確認した。

供試体には、(株)アクロス製、C/C コンポジット、直径 10[mm]、長さ 20[mm]、密度 1.7[g/cm<sup>3</sup>]、炭素繊維含有率 40[vol %]を使用した。超音速ノズル出口より 21[mm]の距離に鈍頭物体を設置し、材料表面より 1[mm]前で分光計測を行なった。C/C コンポジットと CFRP の分光計測結果を比較した。

加熱試験前後の表面観察及び成分分析を行なうため、走査電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope,以下 SEM, JEOL 社製 JSM-5600LV)と、エネルギー分散型 X 線分析装置(Energy Dispersed X-Ray Spectrometer, 以下 EDS, JEOL 社製 JSM-5600LV)を用いた。

C/C コンポジットの SEM・EDS 計測は、アーク加熱実験後除冷し、その後、ダイヤモンドカッターで、軸方向に 2 等分に切断した。水冷による切断で、材料組織への熱影響はほとんど現れない。SEM・EDS の計測点は、C/C コンポジットの中心軸上の 2 点を計測した。

<sup>†</sup> 愛知工業大学 工学部 機械学科 (豊田市)

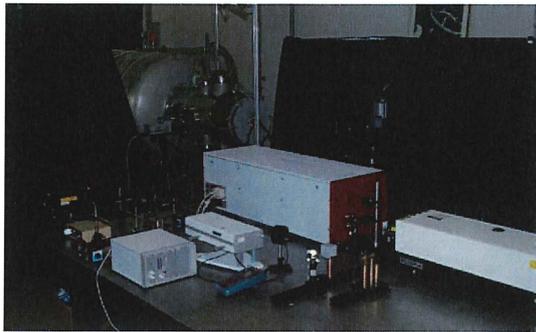


Fig.1 Experimental setup of an arc heated facility

3. 結果及び考察

Fig.2 は、炭酸ガスアークプラズマ気流中に C/C コンポジットと CFRP を設置し、発生する離脱衝撃波の衝撃層内の分光計測結果を示す。縦軸は、相対発光強度[a.u.]、横軸は、波長[nm]である。分光計測結果内の CuI は、電極の銅が融けだしたコンタミネーションである。各衝撃層内では、Cl, OI, OII などの原子スペクトルや、C2 SWAN Band<sup>1,2)</sup>  $v=0, -1$  の振動レベルの輝線スペクトルが観測された。C2 SWAN Band (0,0)-(2,2)1-2, 5 のエネルギー準位が Boltzmann 分布に従うとし、Boltzmann プロット法から振動温度  $T_v$  を求めた。炭酸ガスアークプラズマ気流中の衝撃層内の振動温度  $T_v$  は、C/C コンポジットの場合、約 2700[K]、CFRP の場合、約 3200[K]となった。

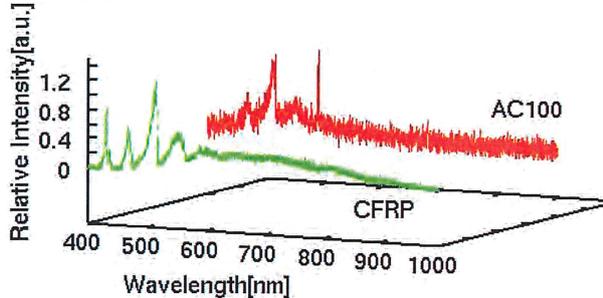


Fig.2 Measured emission spectra in the shock layer of C/C composite & CFRP for CO<sub>2</sub> arc free jet flow.

Fig.3(a)及び(b)は、C/C コンポジットの表面写真を示す。(a)は、加熱実験前のバージン層、(b)は、加熱実験後の様子である。実験前後の供試体の質量は、約 17[%]減少した。アーク加熱実験時間は 150[s]である。Fig.3(a)より、C/C コンポジット表面は滑らかで、所々に製造工程にできた気泡のような跡が見られる。Fig.3(b)より、加熱実験後の C/C コンポジットの加熱表面は黒色になり、表面は脆くなっている。

Fig.4(a)及び(b)は、C/C コンポジットの加熱実験前後の SEM 画像を示す。Fig.4(a)は、加熱実験前のバージン層、(b)は加熱実験後の加熱表面と内部の様子である。Fig.4(a)より、加熱実験前の C/C コンポジットでは、炭素繊維が材料内部に確認することができた。Fig.4(b)より、加熱実験後の C/C コンポジットは、加熱表面付近では炭素繊維同士が結合し、

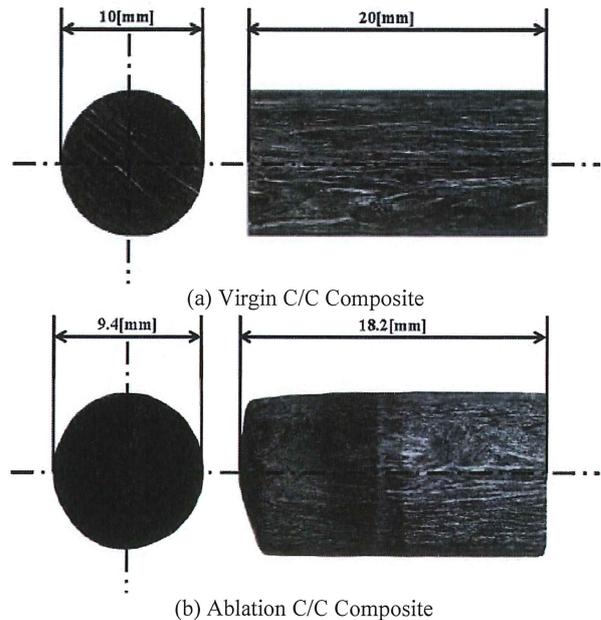
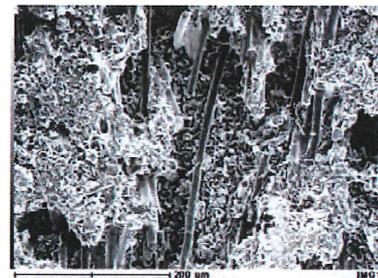
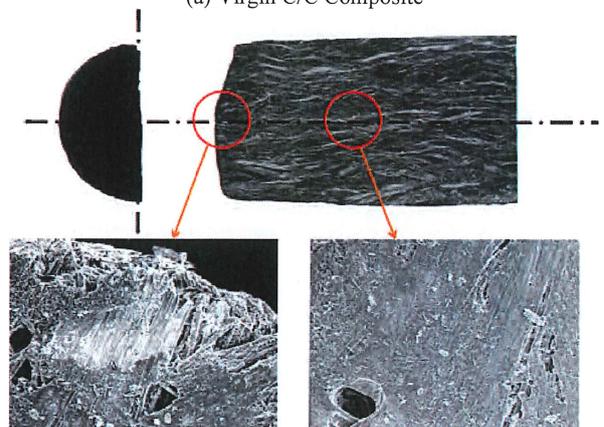


Fig.3 Surface photograph of TPS material for C/C Composite  
先端は、ボロボロになっていることが確認できる。内部では、加熱実験前に比べ、炭素繊維を確認することができなかった。これは、アーク加熱実験により、炭素繊維が融解し、炭素繊維同士が結合してしまったと考えられる。Fig.4(a)及び(b)の SEM 計測範囲において、EDS により成分分析を行なった。成分分析結果より、加熱実験前後では、炭素以外の成分は検出されなかった。この結果より、C/C コンポジットは、炭酸ガスアークプラズマ気流中の衝撃層内で、C や O と化合し、気流中に放出されていると考えられる。



(a) Virgin C/C Composite



(b) Ablation C/C Composite

Fig.4 Micrograph of TPS material for C/C Composite

## 5. 結言

炭酸ガスアークプラズマ気流による C/C コンポジットの衝撃層内の分光計測、SEM 及び EDS を行い、以下の結果を得た。

炭酸ガスアークプラズマ気流中の衝撃層内では、CI, OI, OII, C2 Swan Band  $\Delta v=1, 0, -1$  のスペクトルを確認できた。炭酸ガスアークプラズマ気流中の 衝撃層内の振動温度  $T_v$  は、約 2700[K]となった。SEM と EDS の表面観察及び成分分析結果より、アーク加熱実験により、炭素繊維が融解し、炭素繊維同士が結合して、衝撃層内で、C や O と化合し、気流中に C が放出されてしまった。

### 参考文献

(1) Kökkin, D. L., Bacskey, G. B. and Schmidt, W.T.: Oscillator strengths and radiative lifetimes for C<sub>2</sub>: Swan,

Ballik-Ramsay, Phillips, and  $d^3\Pi_g \leftarrow e^3\Sigma_u^+$  systems, J. Chemical Physics, Vol. 126-8, pp. 084302-084302-11, 2007.

(2) Herzberg, G.: Molecular Spectra and Molecular Structure, IV. Constants of Diatomic Molecules”, D.Van Nostrand Co., Princeton, NJ, 1979.

(3) Vérant, J. L., Perron, N., Gerasimova, O., Balat-Pichelin, M., Sakharov, V., Kolesnikov, A., Chazot, O. and Omaly, P.: Microscopic and Macroscopic Analysis for TPS SiC Material under Earth and Mars Reentry Conditions, 14th AIAA/AHI Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, AIAA 2006-7947.

(4) Yakushin, M., Gordeev, A., Vennemann D. and Novelli, A.: Mass loss of SiC sample surfaces under different flow conditions, AIAA Paper 98-2605, 1998.

(5) Nicolls, R. W.: The Interpretation of Intensity Distribution in the CN Violet, C2 Swan, OH Violet and 2 Schumann-Condon Factors, Proc of Physical Society LXIX 10-A, pp. 741-753, 1956.